

DESAFÍOS EN HIDRÁULICA PARA EL SIGLO XXI*

Helmut Kobus¹

RESUMEN: Vivimos en un mundo que cambia rápidamente: el crecimiento de la población, la revolución tecnológica la crisis ambiental y la globalización de los mercados y sus interacciones, son factores que afectan de manera inmediata y profunda a la profesión de la Ingeniería Hidráulica y a su función hacia la sociedad. Como necesidad primaria, la demanda de agua crece inevitablemente a un ritmo incluso mayor que el de la población mundial. El concepto de desarrollo sostenible está cambiando nuestro sistema de valores e influye asimismo sobre los objetivos del desarrollo de los recursos hídricos, variables según sea la escala local, regional o global. La clave para enfrentar los retos del futuro está en la formación de los ingenieros hidráulicos, tanto en el nivel universitario como en la formación continua, incidiendo especialmente en el sentido de responsabilidad del ingeniero en cuanto al desarrollo sostenible de los recursos hídricos dentro de las limitaciones sociales y ambientales. La Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas (AIH-IAHR) proporciona un marco adecuado para el intercambio científico y profesional, fundamental para la consecución del desarrollo sostenible.

INTRODUCCIÓN

Hablar sobre los desafíos en Hidráulica es por supuesto un tema muy extenso y además de gran dificultad: Como quiera que todos ustedes son expertos en hidráulica, nada de lo que quiero decir será nuevo para ustedes -excepto que quisiera considerar el presente, y las probables tendencias futuras en nuestra profesión, en un contexto global de la mayor extensión.

En este trabajo analizaremos brevemente los mayores desarrollos en hidráulica en este siglo y, seguidamente, nos ocuparemos de los desafíos presentes y futuros en hidráulica, los cuales cubren un amplio rango desde problemas de escala global hasta los temas de escala regional y local. Quisiera introducir el concepto de sostenibilidad y su impacto en los objetivos de la ingeniería hidráulica, y a partir de ello podremos identificar algunas tendencias hacia el nuevo rol de la ingeniería hidráulica.

Aproximándonos al tercer milenio vivimos en un mundo rápidamente cambiante. El crecimiento de la población, la revolución tecnológica, la crisis ambiental y la globalización de los mercados e interacciones, son características de nuestro tiempo, y estas tendencias también afectan fuerte e inmediatamente la manera en la cual la ingeniería hidráulica ha de proveer sus servicios a la sociedad.

La fotografía que, más que cualquier otra, ha formado la visión del mundo en el cual vivimos, es la del planeta Tierra visto desde una nave espacial. Sus rasgos dominantes son los océanos: la Tierra es el planeta de agua (el planeta azul). Las nubes recuerdan el eterno ciclo hidrológico. El agua en el curso de este ciclo, y durante su corto tiempo de permanencia sobre o cerca de la superficie, es la base de sustento de toda la vida en la Tierra. Ella es un recurso renovable pues realmente no es consumida, ya que apenas se usa se retorna a la naturaleza

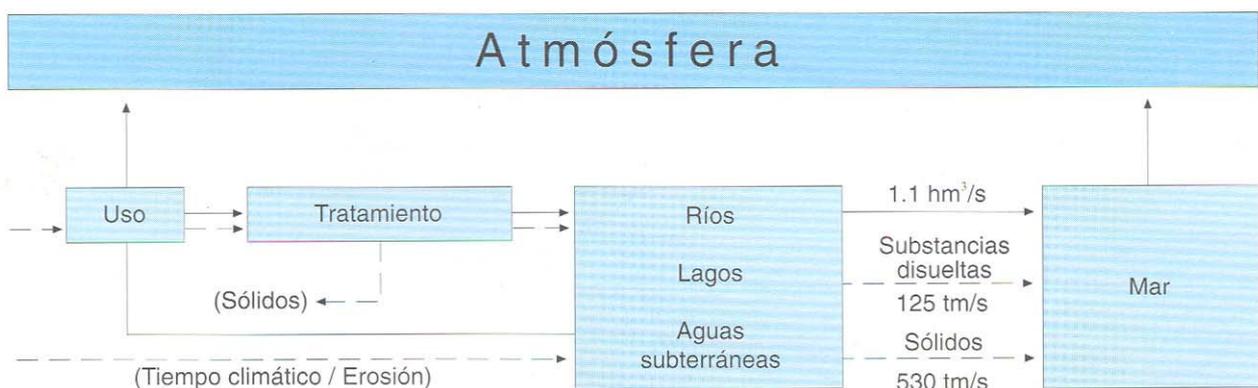


Figura 1: Transporte de sustancias en el ciclo hidrológico

* Presentación del XVII Congreso de la División Latinoamericana de la IAHR. Guayaquil, Ecuador Octubre 1996

¹ Presidente IAHR (AI/H, Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas)

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.4 Num.1 (marzo 1997), páginas 27-38, recibido el 24 de enero de 1997 y aceptado para su publicación el 14 de febrero de 1997. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

Actividad	Estructuras
• Transferencia de agua en el tiempo →	• Embalses
• Transferencia de agua en el espacio →	• Desviaciones, tomas, tuberías
• Variación de su elevación →	• Almacenamiento bombeado / energía hidroeléctrica
• Variación de su calidad →	• Desagües, descargas, plantas de tratamiento, mejoramiento de la calidad de las estructuras

Figura 2: Planes básicos en ingeniería hidráulica y las estructuras relacionadas

en el ciclo natural del agua, de una manera u otra. Al mismo tiempo, el ciclo hidrológico es el principal sistema de transporte para sustancias como nutrientes y contaminantes en el ambiente (Figura 1). En una dimensión global, hay suficiente agua dulce disponible para satisfacer las demandas de la humanidad

Sin embargo, los recursos de agua dulce están distribuidos muy desigualmente en el tiempo y espacio. Esto da origen a interacciones, en los trabajos de ingeniería hidráulica, con la finalidad de hacer frente a la oferta y la demanda. En el esfuerzo por satisfacer las necesidades de agua, de acuerdo con los recursos disponibles, surgen en la hidráulica una variedad de tareas. Los elementos básicos de los proyectos hidráulicos y las estructuras relacionadas con los desarrollos de los recursos de agua se muestran en la Figura 2. El impacto de estos proyectos sobre el sistema natural de agua y la ecología deben ser considerados en escala local, regional y global, y los factores en juego pueden ser completamente diferentes dependiendo de la escala en consideración. Echando un vistazo a los desarrollos en hidráulica, que tuvieron lugar en el presente siglo, podemos identificar varias fases

Tendencias en la hidráulica en el S. XX
<ul style="list-style-type: none"> • Laboratorios de hidráulica • La era de la mecánica de los fluidos • Consecuencias ambientales del desarrollo tecnológico • Planeamiento de los recursos hídricos como una disciplina formal • Aplicaciones de la computación • Extensión de los conceptos de planeamiento de los recursos hídricos: <ul style="list-style-type: none"> → Aspectos ecológicos, económicos y sociales → Desarrollo sostenible → Comunicación interdisciplinar y cooperación

Figura 3: Tendencias de la hidráulica en el siglo XX

consecutivas, las cuales se presentan en la Figura 3.

Partiendo de la base histórica, podemos identificar los desafíos futuros en varias escalas en consideración.

DESAFÍOS PRESENTES Y FUTUROS EN LA HIDRÁULICA: TEMAS GLOBALES

Los temas globales en la ingeniería de recursos de agua se relacionan con el incremento de las demandas de agua potable y agua para el riego agrícola. Además, la reducción y mitigación de los desastres naturales relacionados con el agua es un problema global, las fuentes de energía alternativas y renovables están estrechamente vinculadas con los recursos hídricos, y los cambios climáticos globales pueden tener un marcado impacto sobre el sistema hidrológico y en consecuencia en el manejo de estos recursos. La posibilidad de cambios climatológicos debidos al efecto de invernadero está recibiendo generalmente mucha atención. El calentamiento global podría causar el incremento en el nivel del mar, un cambio que alteraría los procesos costeros e incrementaría la necesidad de protección en las orillas. Existe también un creciente interés ya que aún el más mínimo cambio puede tener efectos significativos sobre el ciclo hidrológico y en la ocurrencia de eventos extremos, y éstos podrían afectar severamente el diseño y comportamiento de los proyectos hidráulicos, tal como la protección contra inundaciones, etc.

A continuación, introduciremos brevemente sólo dos de estas áreas problemáticas ya enumeradas: el abastecimiento de agua y los desastres naturales relacionados con el agua.

El agua potable, la comida, vivienda, energía y transporte son las necesidades primarias a ser satisfechas por efecto de un incremento en la población mundial. Por ello, los mayores requerimientos de agua son para la agricultura (riego), el abastecimiento de agua potable y para el uso industrial, además de otros importantes usos de los cuerpos naturales de agua como son la generación de energía hidroeléctrica, vías fluviales para navegación y agua refrigerante para la producción de

energía térmica. También, los aspectos de mantenimiento de paisajes y recreación tienen una importancia creciente a medida que los impactos humanos sobre la tierra continúan creciendo.

No obstante, continúan incrementándose en el mundo los esfuerzos para lograr el uso más económico del agua, mientras crece su demanda global, como se indica en el diagrama de la *Figura 4*.

Evidentemente, el riego en la agricultura para la producción de comida absorbe la mayor cantidad de agua consumida a nivel mundial (*Figura 4*). Esto exige transferencia de agua, ya que la agricultura depende del suelo, del agua y de las condiciones climáticas, y es el agua la única variable que en esta relación puede transportarse fácilmente en el espacio. Se han alcanzado muchos progresos en el uso más eficiente del agua (riego por goteo, etc.). Sin embargo, más allá de estos desarrollos, la presente distribución mundial de la agricultura orientada por el mercado, puede ser afectada a largo plazo por las limitaciones económicas en el transporte del agua.

El desarrollo de la población mundial y la tendencia hacia la concentración en megaciudades se muestra en la *Figura 5*. Este crecimiento implica desarrollos correspondientes en hidráulica urbana para el abastecimiento de agua, tratamiento de aguas servidas, disposición de desechos, etc. A medida que estos sistemas se hacen mayores y más complejos, se debe prestar mayor atención a la prevención y mitigación de

KILÓMETROS CÚBICOS POR AÑO

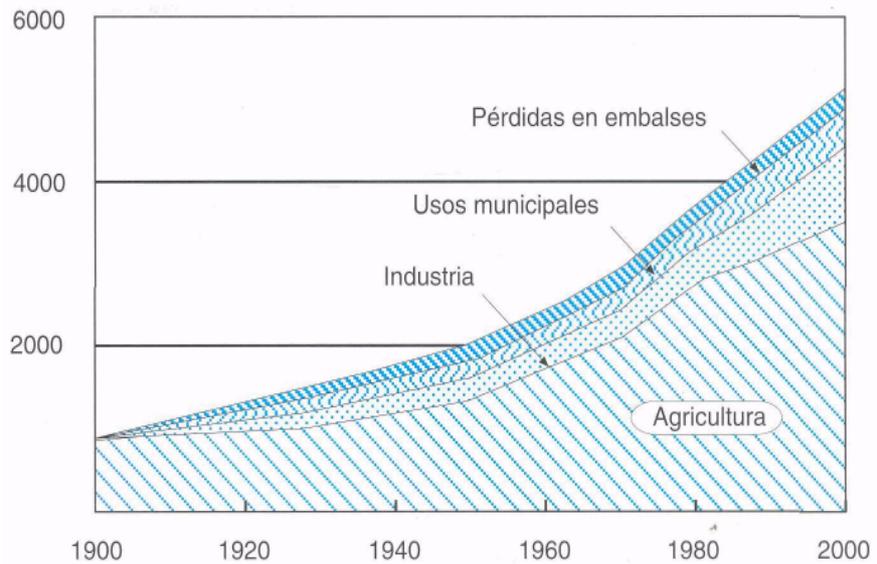


Figura 4: Uso mundial estimado del agua en el periodo 1900/2000

probables "desastres urbanos" relacionados con la infraestructura. El servicio y uso del agua ganan, más que nunca, creciente importancia. Además, dada la distribución natural de los recursos de agua sobre el globo, la cual no se correlaciona bien con la acumulación de población en las megaciudades, es obvio que existe un incremento en la demanda de proyectos para la transferencia de agua no solamente a escala local y nacional, sino también a escala internacional. Esto puede incluir proyectos de transferencia entre cuencas.

La escasez de agua es evidente en muchas partes del mundo, y ello exigirá que se produzcan convenios entre las zonas ricas en agua y los grandes centros de población. Se prevé así que el agua se comercie como una mercancía, y que surjan nuevas formas de transporte, a largas distancias, tal como ocurre con el mercado mundial de petróleo.

Los desastres naturales relacionados con el agua, tales como inundaciones, tsunamis, tifones y huracanes, deslizamientos de tierra o sequías traen como consecuencia cada año la pérdida de muchas vidas y daños calculados en inmensas sumas de dinero. La ingeniería hidráulica juega un papel importante en los esfuerzos que se hacen en todo el mundo para frenar las pérdidas y daños, y para mitigar los efectos de tales eventos extremos. Esto se evidencia en la *Figura 6*, la cual muestra las estadísticas mundiales de los mayores desastres naturales.

POBLACION MUNDIAL (x10)

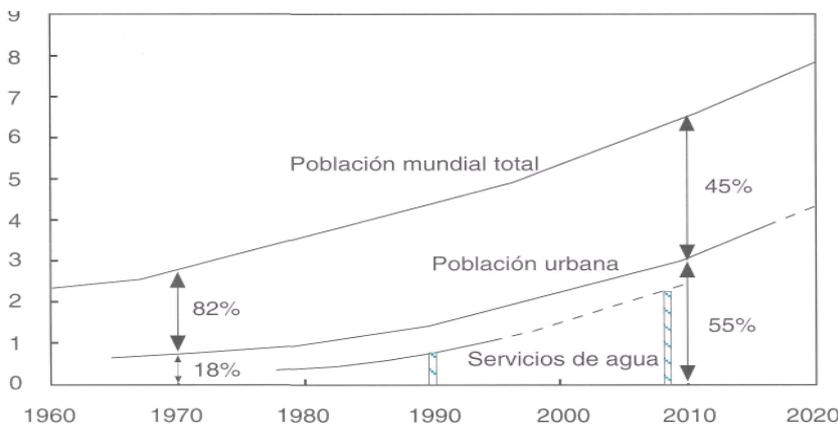


Figura 5: Necesidades mundiales para la estimación de capacidad en el sector agua

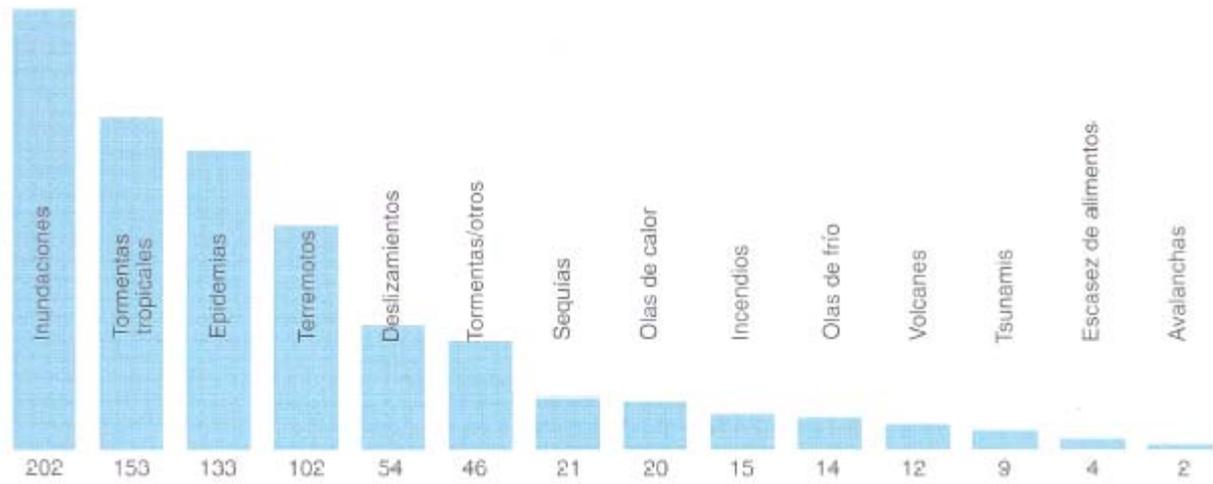


Figura 6: Mayores desastres en el mundo entre 1963 y 1992 (pérdidas significativas)

DESAFÍOS PRESENTES Y FUTUROS EN LA HIDRÁULICA: TEMAS DE ESCALA REGIONAL Y LOCAL

Los impactos ecológicos y ambientales de las estructuras hidráulicas han recibido creciente atención a partir de los años sesenta, cuando empezaron a aparecer los impactos ecológicos de la gran represa de Aswan en el río Nilo. Desde entonces, la ecología y el manejo de los ríos se han convertido en temas de la mayor relevancia.

Además, como producto de los desarrollos humanos, se han perdido enormes cantidades de ciénagas, pantanos, y de nichos ecológicos que son el hábitat natural de una gran biodiversidad. La necesidad de conservar las ciénagas y los pantanos se ha reconocido ampliamente, y en este esfuerzo los ingenieros hidráulicos se han unido

con los ecologistas para definir criterios ecológicos y, luego, transferirlos a criterios hidráulicos a fin de alcanzar criterios predeterminados.

La contaminación tanto del agua superficial como del agua subterránea, se encuentra entre los problemas más críticos que enfrentan los ingenieros hidráulicos hoy en día. Se ha reconocido que el manejo sostenible de los sistemas de aguas subterráneas es uno de los mayores desafíos a largo plazo y que el desarrollo de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos es de importancia fundamental.

De la larga lista de problemas y temas, nos referiremos solamente de manera breve a dos asuntos seleccionados: la ecohidráulica y los recursos de aguas subterráneas.

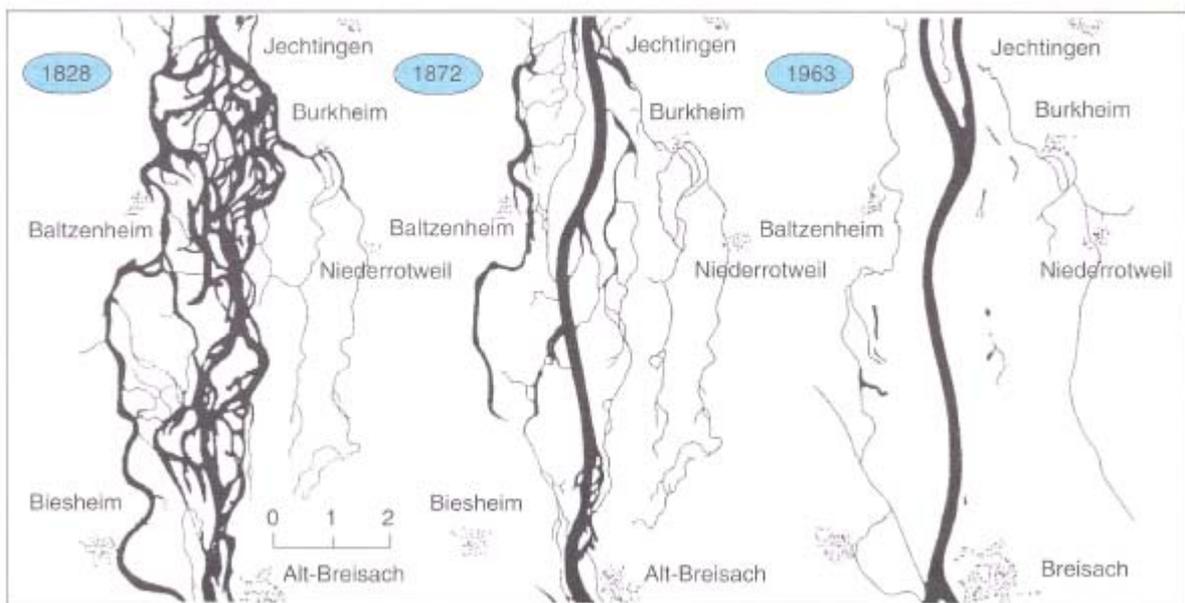


Figura 7: Cambios históricos en el régimen del flujo en la parte superior del Rin en las cercanías de Beisach

LA ECOHIDRÁULICA: ECOLOGÍA FLUVIAL Y EL MANEJO DE LOS RÍOS

El campo emergente de la ecohidráulica trata sobre las interacciones entre el manejo de los ríos, la hidráulica y la ecología de los cursos de aguas. Los ingenieros tradicionalmente han considerado que la función principal de un río es el transporte del agua como un vínculo importante con el ciclo hidrológico. Los ecologistas ven en los ríos un importante hábitat para la vida animal y vegetal, organismos acuáticos, insectos, peces, aves, vida salvaje, y una amplia variedad de especies botánicas. Los ingenieros hidráulicos y los ecologistas fluviales están aprendiendo a realizar juntos, investigaciones y análisis. Algunos temas críticos son el aumento y mejora de hábitats para peces, vida salvaje y flora; la evaluación de los requerimientos de agua con fines ecológicos, mitigaciones efectivas para corrientes estables, aproximaciones para acrecentar la biodiversidad, así como diversos temas sobre la calidad del agua. Ya que las corrientes de agua se usan para diferentes propósitos, deben ser administradas en forma compleja. El manejo de los ríos puede incluir la regulación de caudales, la división de flujos, los medios estructurales y no estructurales para el control de inundaciones, los flujos de lavado para el mantenimiento de canales, las descargas de flujo para requerimientos ecológicos y el control de la calidad del agua. Los esfuerzos por la renaturalización de los ambientes fluviales también requieren estudios sobre la evolución de los ríos a largo plazo.

Un ejemplo ilustrativo de los desarrollos a largo plazo en hidráulica y su impacto sobre la calidad del agua y la ecología fluvial es el río Rin, el cual ha experimentado cambios drásticos en las condiciones de flujo en el último siglo con impactos duraderos en la calidad del agua y la ecología (Figura 7). En las últimas décadas, los esfuerzos internacionales integrados muestran resultados positivos con respecto al mejoramiento de los contenidos de oxígeno, y también en la subsiguiente biodiversidad del río (Figura 8). Recientemente se ha informado que la migración del salmón aguas arriba del Rin ha sido restablecida (uno de los objetivos primarios del programa).

En la Figura 9 se puede observar la cantidad de nitrógeno recibido por los ríos alemanes. Es interesante señalar que la incorporación de nitrógeno desde fuentes difusas por ahora excede el ingreso directo desde las plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto es un indicador de la necesidad de considerar la calidad del agua y la ecología fluvial de una forma más integral que la aproximación tradicional de incrementar la capacidad limpiadora de las plantas de tratamiento, lo cual ya no es suficientemente para mejorar la calidad del agua.

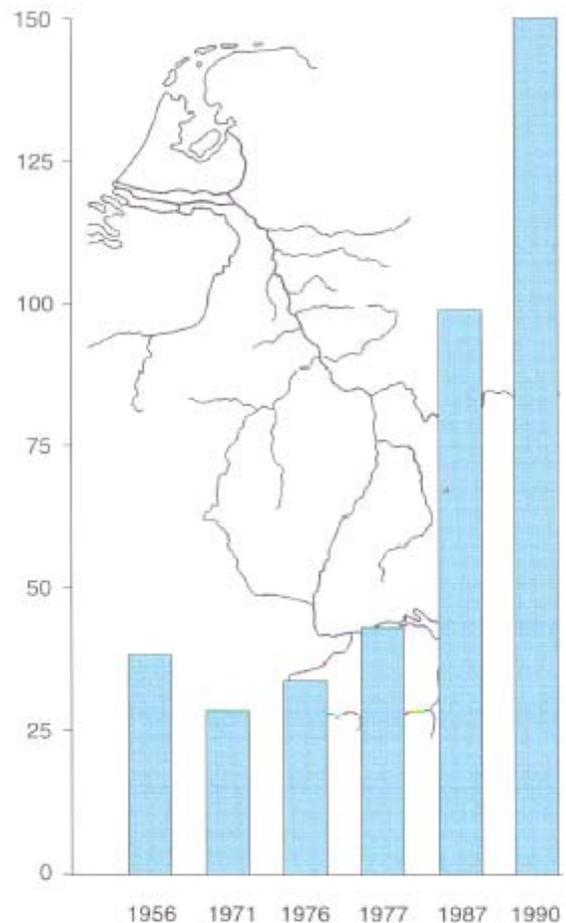


Figura 8: Desarrollo de microfauna en el lecho del río Rin

MANEJO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea constituye la fuente más importante de agua dulce de la Tierra. Esta es dos órdenes de magnitud mayor que el volumen total de agua de los ríos y lagos. Así, podemos definir el sistema de aguas subterráneas como un subsistema abierto el cual está interrelacionado con otros subsistemas acuáticos y terrestres tal como se muestra en la Figura 10. A lo largo de los contornos abiertos del sistema, pueden producirse en una o en ambas direcciones flujos de agua, de sustancias (nutrientes, contaminantes) y de energía. Existe particularmente una íntima interrelación entre los cuerpos de agua de la superficie y las aguas subterráneas asociadas. La dirección del intercambio usualmente varía con las condiciones hidrológicas y las fluctuaciones en los niveles de agua de la superficie ocasionan variaciones correlativas en los niveles freáticos. El papel del lecho de los ríos y el fondo de los lagos es de particular importancia en estas interacciones.

Fuentes difusas 630 (61%)		Fuentes puntuales 410 (39%)	
Agricultura	79 (8%)	Aguas servidas industriales	91(9%)
Precipitación	22 (2%)	Tratamiento de aguas de lluvia	29 (3%)
Drenaje	54 (5%)	Aguas servidas domésticas	290 (28%)
Erosión	73 (7%)		
Agua subterránea	400 (39%)		
Total: 1040			

Figura 9: Ingreso de nitrógeno de los ríos de Alemania entre 1989 y 1991. (fuente: Umweltbundesamt Berlin)

Las aguas subterráneas son nuestro recurso más importante en el abastecimiento del agua potable. Particularmente resulta un recurso indispensable, en los países con escasez de agua, y en Europa Central nos apoyamos en las aguas subterráneas para el abastecimiento de un porcentaje muy alto del agua potable requerida.

El desarrollo en el abastecimiento de agua y las demandas posiblemente contrapuestas para la preservación del ambiente natural y la ecología, tienen que ser evaluadas con miras al concepto de un desarrollo sostenible. Si tratamos de definir este principio para los sistemas de aguas subterráneas tenemos que distinguir tres componentes:

- Sostenibilidad de la cantidad de agua significa la consideración de un presupuesto balanceado de agua para un sistema de aguas subterráneas. Extraer más agua de

la que naturalmente es recargada constituye una sobreexplotación del recurso lo cual conlleva al agotamiento y a un continuo descenso de la capa freática con consecuencias adversas para el sistema a largo plazo. Ejemplos particularmente drásticos son las extracciones de los profundos y antiguos sistemas de aguas subterráneas que prácticamente no tienen recarga (por ejemplo, los reservorios de aguas subterráneas "fósiles" debajo de los actuales desiertos). Estos deben ser considerados como no sostenibles y deben calificarse como "minas acuíferas", que deben tratarse en forma similar a la explotación ingenieril del petróleo como recurso no renovable.

- Sostenibilidad también implica el mantenimiento de la circulación del agua en el sistema y la preservación de los tiempos naturales de residencia.

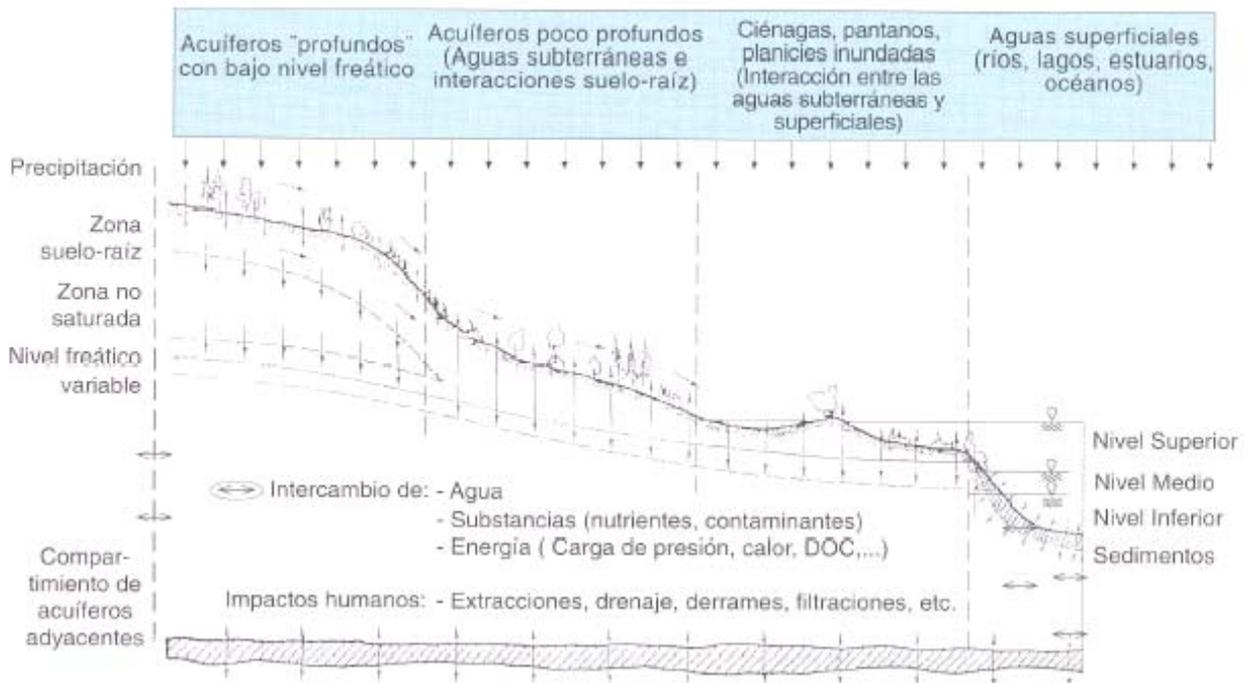


Figura 10: Sistema abierto de aguas subterráneas

• Aún más significativo es el mantenimiento sostenible de los ecosistemas de aguas subterráneas y sus funciones, lo cual gobierna la calidad natural de las aguas subterráneas. Dado que los tiempos naturales de residencia en los sistemas de aguas subterráneas son muy largos, cualquier perturbación en el sistema puede dar lugar a efectos a largo plazo, o más aún, a cambios irreversibles (o únicamente reversibles en términos de varias generaciones). Por consiguiente, la sostenibilidad requiere la prevención de la contaminación de las aguas subterráneas, lo que implica enormes esfuerzos de precaución sobre todos los tipos de uso de las tierras y sobre las actividades humanas. Esta es una gran responsabilidad de nuestra sociedad con las futuras generaciones.

Hay numerosos problemas relacionados con los usos de las aguas subterráneas. En la *Figura 11* se enumera una lista de varios problemas cuantitativos "clásicos", de los cuales nosotros como ingenieros hidráulicos estamos bien al tanto. Los problemas relacionados con la calidad de las aguas subterráneas y su preservación contra los impactos humanos son asuntos ecológicos de gran prioridad, que pueden surgir virtualmente de cualquier forma de actividad humana, como se indica en la *Figura 12*.

Las actividades agrícolas constituyen una importante amenaza a la calidad de las aguas subterráneas. La intensificación de la agricultura ha originado fuentes difusas de recarga en áreas agrícolas debido a la infiltración de fertilizantes y pesticidas, lo cual conduce en muchos países a fuertes incrementos en la concentración de nitratos. En la *Figura 13* se presenta un ejemplo de las concentraciones de nitratos a través de un registro de largo período realizado en un acuífero, el cual muestra de forma impresionante la tendencia al crecimiento (a manera de comparación: el agua potable estándar europea contiene nitratos en una proporción de 50 mg/l). El nitrato es un ejemplo típico de una fuente difusa de contaminación no puntual, la

Problemas relacionados con el uso de aguas subterráneas
<ul style="list-style-type: none"> • Sobreexplotación • Descenso del nivel freático • Efectos de cambios en la distribución de presiones en la subsuperficie • Salinización • Intrusión de agua salada • Impacto de los proyectos hidráulicos

Figura 11: Problemas relacionados con el uso de la aguas subterráneas

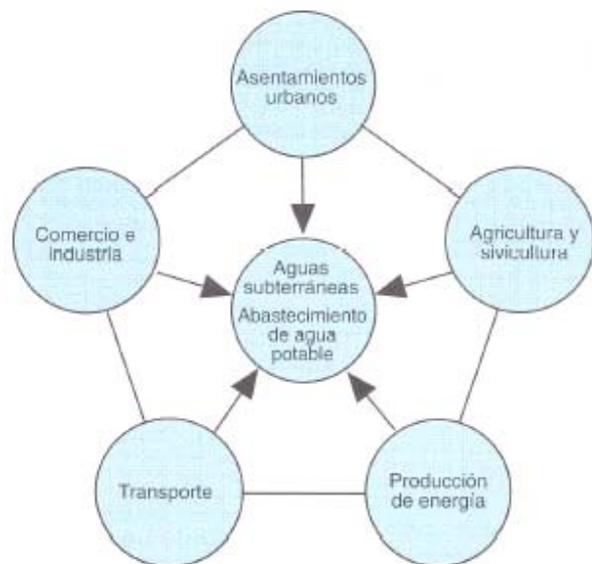


Figura 12: Potenciales de contaminación de las aguas subterráneas

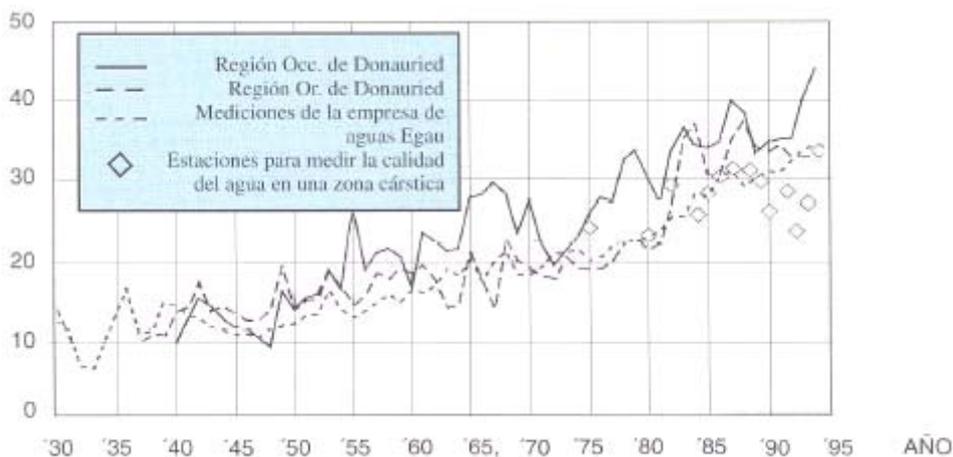


Figura 13: Desarrollo de la concentración de nitratos a largo plazo (ejemplo: abastecimiento de agua del estado de Baden- Württemberg, Stuttgart, Alemania)

cual solamente puede ser controlada con la regulación en los usos de la tierra y de las prácticas agrícolas. Por lo tanto, la aproximación hacia un control efectivo de la contaminación de las aguas subterráneas determina la creación de "zonas de protección" en las áreas de captación de los pozos de abastecimiento de agua, imponiéndose numerosas restricciones en el uso de la tierra (por ejemplo: cultivos extensivos, se prohíben los asentamientos industriales, se prohíbe el almacenamiento de sustancias peligrosas para el agua, se establecen requerimientos especiales en la construcción de las vías, etc.). En el estado altamente poblado de Baden-Württemberg, estas zonas de protección suman más del 25% del total de tierras. La propuesta de las zonas de protección se basa en el concepto de que, sobretodo, prevenir la contaminación de las aguas subterráneas es mejor y más económico, que remediar las consecuencias posteriores.

En todos los países altamente industrializados y densamente poblados, la contaminación industrial de la subsuperficie (suelo y subsuelo) debida a filtraciones, fugas, accidentes y a la existencia de depósitos y sitios abandonados conlleva a un serio deterioro de las aguas subterráneas. Entre los intentos por remediar esta situación se distinguen el mantener controlados los penachos de contaminantes para evitar su propagación posterior, y el tratamiento de las fuentes de contaminación por la remoción y transformación de los contaminantes de la superficie. Como los contaminantes se encuentran frecuentemente en fase con la fuente en consideración, la

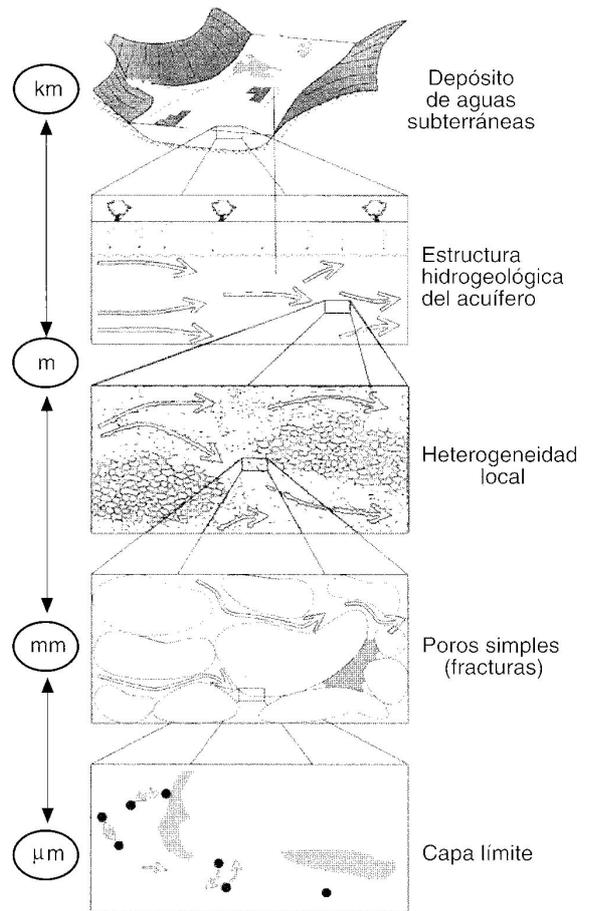


Figura 14: Escalas en el flujo de aguas subterráneas y los procesos de transporte

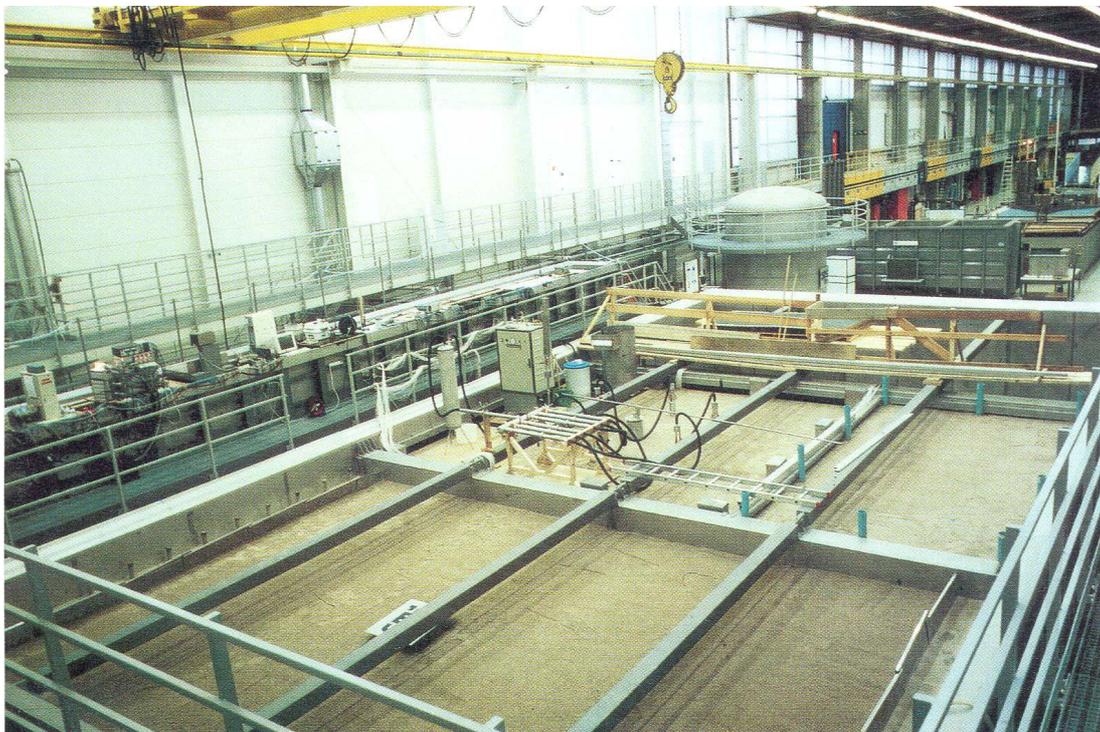


Figura 15: Acuíferos artificiales a escala en VEGAS para experimentos controlados de remediación

comprensión de los procesos y el desarrollo de las tecnologías adecuadas para remediar las consecuencias nocivas constituyen un enorme desafío para la ingeniería hidráulica. Los procesos físicos, químicos y microbiológicos para remediar este problema tienen lugar en la escala de poro, en el límite entre el fluido y la matriz, pero por otro lado la ingeniería remedial tiene lugar en acuíferos con dimensiones de alrededor de 10 órdenes de magnitud mayores (ver Figura 14). Esto conlleva a que la tecnología remedial sea verdaderamente una tarea interdisciplinaria de investigación que requiere interacciones directas entre la ingeniería hidráulica, la física, la geología, la química, la microbiología, las tecnologías de medición y las matemáticas numéricas.

La aproximación ingenieril al desarrollo de tecnologías adecuadas consiste en conducir experimentos técnicos a escala, sobre acuíferos artificiales heterogéneos que contengan contaminantes reales, con la finalidad de identificar y cuantificar los procesos relevantes. Con este fin, se estableció una nueva instalación de investigación en la Universität Stuttgart, titulada "Versuchseinrichtung zur Grundwasserund Altlastensanierung VEGAS" (Instalaciones de Investigación para Tecnologías Remediales de la Subsuperficie). De la Figura 15 se percibe una sensación respecto a las dimensiones de los acuíferos en la instalación, y la Figura 16 presenta un ejemplo de un derrame experimental de un hidrocarburo clorotado en un sistema de acuífero heterogéneo bien definido. En la Figura 17 se muestra el resultado de un ejemplo de un experimento tecnológico, en el cual se usan inyecciones de vapor de agua en un proyecto remedial para mejorar la eficiencia en la extracción de vapor del suelo. Se dan estos ejemplos con la finalidad de ilustrar las tendencias hacia la necesidad de una cooperación.

EL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD Y SU IMPACTO SOBRE LA INGENIERÍA HIDRÁULICA

El concepto de sostenibilidad es fundamental. El crecimiento de la población y el mejoramiento de los niveles de vida en los países industrializados, así como la expansión de las economías de mercado, exigen incrementos en la producción y el consumo. Los recursos naturales para la producción de bienes se toman del ambiente, y simultáneamente, los desechos de los procesos de producción se descargan en él. Como consecuencia, el ambiente se expone a un impacto global y se coloca en peligro. Estos desarrollos tienen que ser controlados con una visión que abarque todo el concepto de desarrollo sostenible como se definió en el informe de la Comisión Brundland de las Naciones Unidas (1987): "La humanidad tiene que garantizar que su desarrollo hoy en día satisfaga las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones en satisfacer sus propias necesidades". Para los ingenieros hidráulicos esto se traduce en una pregunta: ¿Cómo reconciliar los usos del agua y la ecología (el agua en la naturaleza) en un marco socialmente aceptable?.

Sostenibilidad en el sentido económico significa la distribución eficiente de los escasos bienes y recursos. En el sentido ambiental significa no exceder los límites del impacto ambiental manteniendo la base natural de la vida. Y, en el sentido social, significa un máximo en la igualdad de oportunidades, justicia social y libertad. Para un desarrollo sostenible, los tres elementos deben ser considerados y deberían estar en equilibrio, tal como se indica en la Figura 18.

El desarrollo sostenible evidentemente implica no sólo políticas económicas y de recursos, sino también aspectos éticos. Están involucrados los sistemas de valores de todas las sociedades y el manejo de los recursos hídricos



Figura 16: Experimento del derrame de un hidrocarburo clorotado

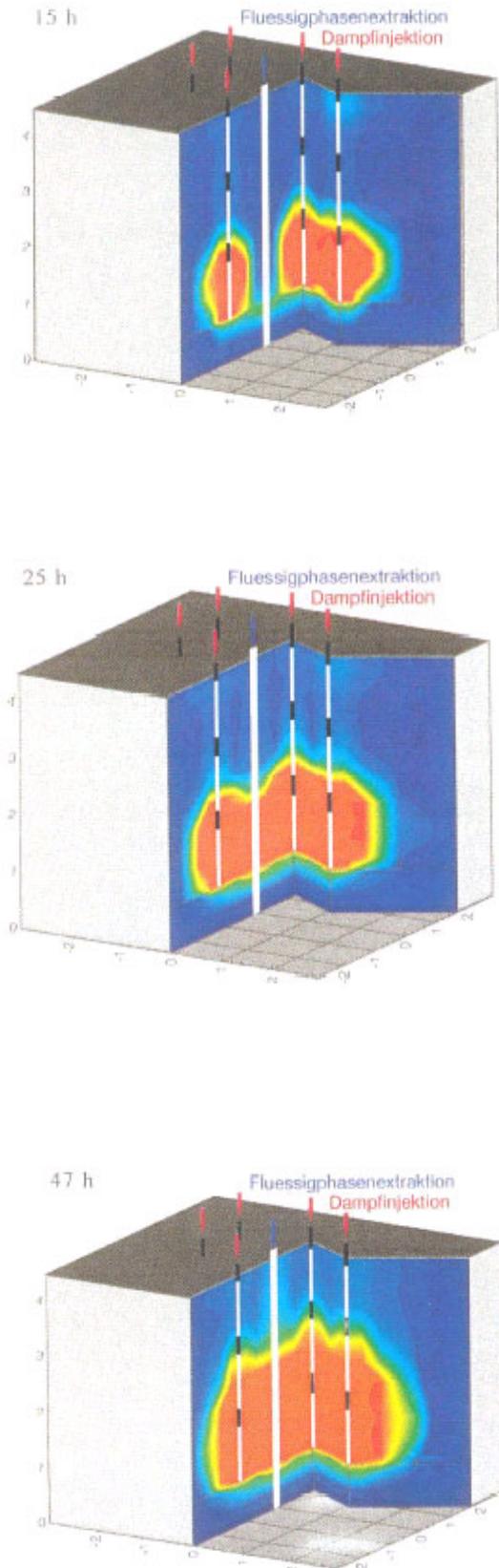


Figura 17: Experimento tecnológico sobre la extracción térmica del vapor del suelo: distribución de temperaturas medidas

es solamente una rama del complejo árbol del desarrollo. Los cambios en los sistemas de valores de las sociedades también se reflejan en nuestra perspectiva acerca de qué es el manejo sostenible de los recursos hídricos: esto se ilustra esquemáticamente por el lazo de retroalimentación mostrado en la *Figura 19*. Un ejemplo ilustrativo sobre cómo nuestro sistema de valores ha cambiado a través de los siglos es el manejo del río Rin descrito anteriormente.

Como ejemplo que ilustra los conflictos de intereses y las disputas entre las demandas de los usos del agua, se puede considerar el río Neckar, un afluente del Rin que fluye por Stuttgart (*Figura 20*). Esto puede resumirse como sigue:

- a) Los usos relacionados con la extracción de agua y recarga no solamente incluyen los abastecimientos de agua potable a partir de las aguas subterráneas, sino que también incluyen el agua subterránea y el agua de los ríos para abastecimiento industrial, con las correspondientes descargas de aguas servidas al río y el uso de los ríos como refrigerante para la industria y las plantas de energía térmica.
- b) Otras demandas sobre el río incluyen su uso comocanal de navegación, producción de energía a través de la fuerza hidráulica, producción de arena y grava, como recurso natural para la pesca, natación, deportes acuáticos y recreación.
- c) Además el manejo de los ríos tiene que proveer una adecuada protección contra las inundaciones, y al mismo tiempo se piden nuevos desarrollos del río para hacerlo más "cercano a la naturaleza" con miras a la recreación y su valoración como un elemento dominante del paisaje.
- d) Finalmente tienen que ser considerados la recarga y el transporte de nutrientes, contaminantes y sedimentos debidos a los procesos naturales y sus efectos sobre el río y la calidad de las aguas subterráneas.

En la búsqueda y valoración de los componentes para una solución balanceada y sostenible, los beneficios económicos a ser obtenidos de la naturaleza por los proyectos hidráulicos tienen que considerar los aspectos sociales, la aceptación de tales proyectos por la sociedad, así como también el no comprometer a la ecología. En general, podemos distinguir y clasificar los problemas y conflictos de intereses en escala global, regional y local como se muestra en la *Figura 21*.

Como ilustración, consideremos los conflictos típicos que en la escala regional, surgen sobre las cuencas internacionales entre los consumidores de aguas arriba y aguas abajo del mismo sistema hidrológico. Así, como en cualquier cuenca las aguas superficiales de un río, los recursos de aguas subterráneas y la ecología están vinculados íntimamente, pueden desarrollarse intereses conflictivos sobre los ríos transnacionales. Además, en muchas partes del mundo se han efectuado importantes divisiones y proyectos de transferencia de agua entre cuencas, las cuales no han sido satisfactorias y en algunos casos han conllevado a daños ecológicos irrepara-

bles, como por ejemplo en el caso del Mar Aral.

En los proyectos hidráulicos de mayor escala, la "producción" y el "uso" (producto = agua potable, energía hidroeléctrica, agua para el riego, etc.) están frecuentemente muy distantes el uno del otro, y por tanto los beneficiarios de un proyecto pueden ser completamente diferentes que las personas afectadas por él mismo. Por esta razón, algunos grandes proyectos hidroeléctricos y de transferencia de agua en el mundo han dado origen a problemas sociales (la tercera columna de la sostenibilidad).

Los serios conflictos internacionales sobre el agua únicamente pueden resolverse de forma racional, por un manejo orientando de los recursos hídricos de las cuencas y considerando todos los intereses pertinentes. Por ello, la IAHR en su Convención Mundial sobre el Agua (Tokio, 1993) formuló un manifiesto para la cooperación internacional.

TENDENCIAS HACIA EL NUEVO PAPEL DE LA INGENIERÍA HIDRÁULICA

La profesión de la ingeniería hidráulica tiene que adaptarse a las cambiantes demandas de la sociedad. A partir de su base tradicional, la ingeniería hidráulica está bien preparada para diseñar estructuras hidráulicas cuyo funcionamiento sea seguro y para conducir investigaciones con miras a realizar diseños cada vez más eficientes y económicos. Los nuevos desafíos se orientan a calibrar el impacto de las estructuras hidráulicas sobre los sistemas naturales de agua y los cambios resultantes en el flujo, transporte de sedimentos, temperaturas, calidad del agua, la flora y la fauna. Las interacciones entre la hidráulica y la ecología se introducen en la recién formada Sección de Ecohidráulica de la IAHR.

Es interesante señalar que las nuevas clases de tareas en ingeniería hidráulica están desarrollándose para un nuevo objetivo; el cual contempla la protección, preservación o restauración de ecosistemas relacionados en forma única con el agua, contra los impactos humanos, tales como la restauración de ciénagas y pantanos o la reconstrucción de ríos semejantes a los naturales.

Con la finalidad de enfrentar los desafíos se han desarrollado nuevas herramientas y métodos. Esto incluye avances en la investigación dentro de la mecánica de fluidos, modelación numérica e hidroeinformática, técnicas de medición y tecnologías de sensores remotos, sistemas de información geográfica, etc. Con estas herramientas avanzadas, se lograrán nuevas y más eficientes propuestas para la solución de los problemas.

Como la mayoría de las tareas de diseño en la ingeniería hidráulica son de naturaleza interdisciplinaria, el ingeniero debe desarrollar una genuina sensibilidad hacia los puntos de vista y necesidades de las partes involucradas. Con la finalidad de alcanzar sus objetivos, normalmente

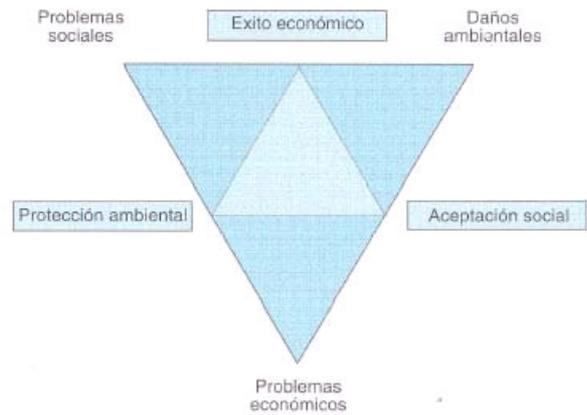


Figura 18: Factores de la sostenibilidad

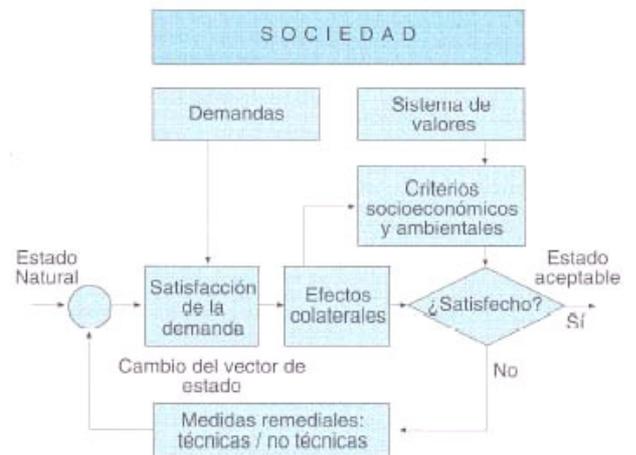


Figura 19: Desarrollo de proyectos, demandas de la sociedad y sistema de valores

los ingenieros son los que tienen que coordinar los esfuerzos multidisciplinarios. También se requiere habilidad para lograr una comunicación eficiente en el dominio público, particularmente en la forma de presentar equilibradamente los objetivos de los proyectos y sus contextos ambientales y sociales. Además, el procedimiento exige un compromiso en los procesos de decisión, públicos y políticos.

CONCLUSIONES

- 1) El concepto de sostenibilidad está cambiando nuestro sistema de valores y tiene un impacto sobre los objetivos de los desarrollos de recursos hídricos.
- 2) Estos problemas en la ingeniería de los recursos hídricos (preservación vs. uso) varían profundamente según sea la escala local, regional o global.

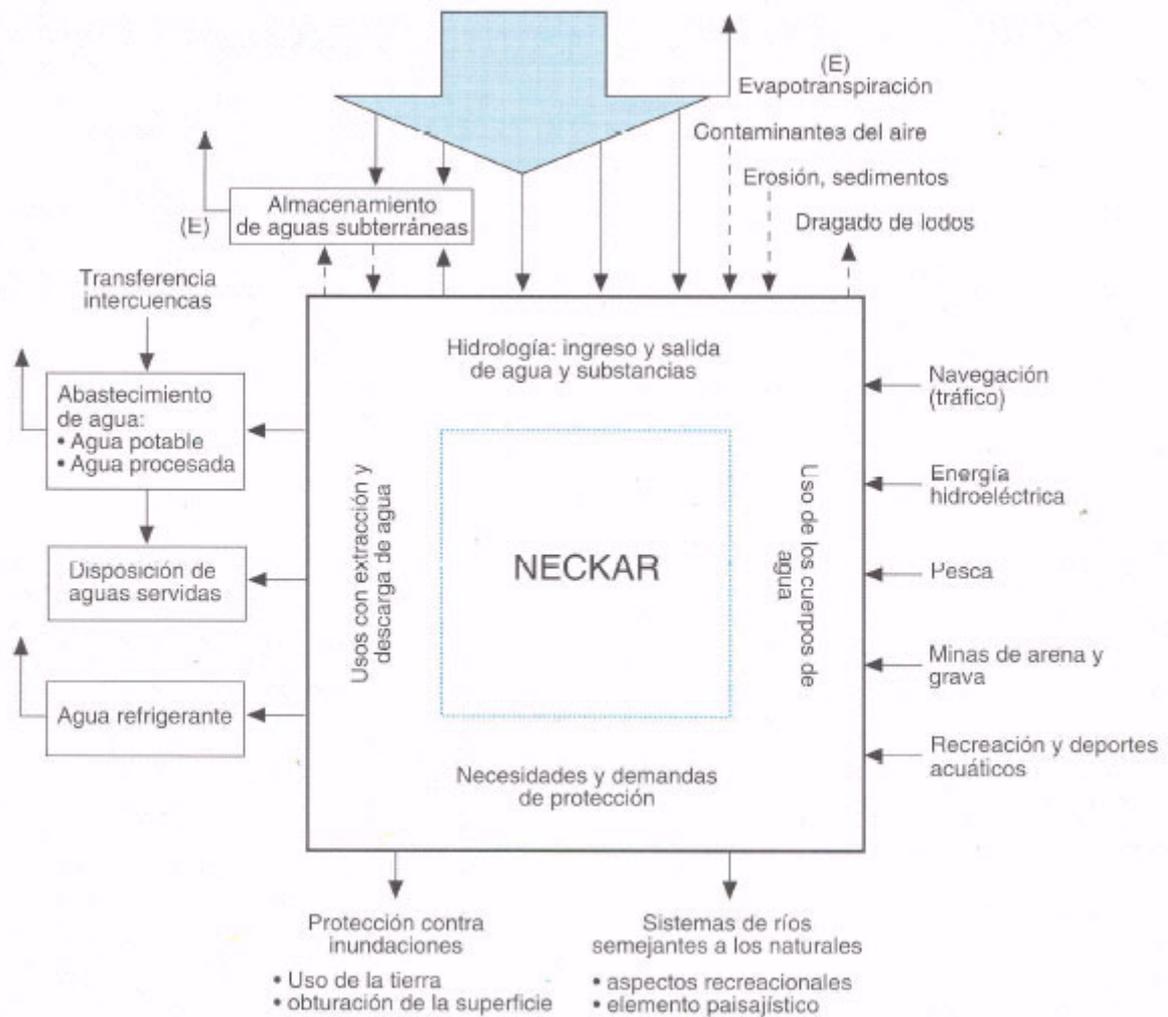


Figura 20: Competencia de demanda sobre un río –ejemplo del Neckar–

- 3) La clave para enfrentar los desafíos del futuro está en la educación firme y progresiva de los ingenieros hidráulicos. Esto tiene que incluir la formación universitaria así como también la educación continua. La ingeniería hidráulica debe enseñarse en un contexto amplio incrementando el sentido de responsabilidad de los ingenieros por el desarrollo sostenible de los recursos hídricos dentro de las limitaciones ambientales y sociales.
- 4) La ingeniería hidráulica afecta aspectos de importancia internacional ya que muchos nuevos proyectos de gran envergadura involucran los intereses de más de un país, dado que la mayoría de los grandes ríos del mundo son internacionales. Por lo tanto, los intercambios científicos y profesionales a escala internacional son de primordial importancia.
- 5) La IAHR es una organización mundial que provee una red adecuada a la comunidad de la Ingeniería Hidráulica, la cual puede ser instrumento para el esfuerzo global por alcanzar el desarrollo sostenible de los recursos hídricos.

Clasificación de los factores y conflictos de intereses (fuente: Ö. Starosolszky, 1996)
<p>Conflictos Globales</p> <ul style="list-style-type: none"> • crecimiento de la población/necesidad de consumo • recursos naturales y financieros inadecuados • calidad inadecuada de los recursos • Reacciones en cadena y retroalimentación • Cambios globales
<p>Conflictos Regionales</p> <ul style="list-style-type: none"> • cuencas internacionales de los ríos • países aguas arriba y aguas abajo de los ríos
<p>Conflictos Nacionales</p> <ul style="list-style-type: none"> • entre diferentes sectores (prioridades) • entre diferentes usuarios (prioridades) • entre conservacionistas y desarrollistas • entre diferentes recursos hídricos (aguas superficiales, aguas subterráneas, uso consuntivo)

Figura 21: Clasificación de los factores y conflictos de interés