

CAPÍTULO 11

Impactos de las represas en la calidad del agua

David W. Hendricks

Introducción

Naturaleza de la directrices

Las siguientes directrices reflejan un tipo de perspectiva necesaria para evaluar y resolver los impactos sobre la calidad del agua ocasionados por las represas, e ilustran las cuestiones que deben plantearse en las áreas afectadas. También tratan de ser indicativas, más que absolutas, y de mostrar la dirección en vez de enumerar los pasos específicos. Las directrices sugieren, por tanto, un plan para hacer un estudio más amplio. Sin embargo, al equipo de estudio corresponde ampliar y adaptar el plan a las necesidades de su proyecto.

Definición y dimensiones de la calidad del agua

El término *calidad del agua* se refiere a la condición o estado de una determinada cantidad de la misma. Generalmente se describe por medio de indicadores y medidas como la temperatura, la cuenta de coliformes, el oxígeno disuelto, la demanda biológica de oxígeno (DBO), el total de sólidos disueltos, los cationes y aniones que puedan resultar de interés. El cuadro 1 amplía algunos de los parámetros que miden con mayor frecuencia. Sólo son representativos; podrían citarse centenares de diversos constituyentes. Por ejemplo, las cantidades de plancton hay que incluirlas en algunos estudios, ciertos compuestos orgánicos disueltos son importantes, y así sucesivamente. La selección de los que se debe incluir en la evaluación depende de los objetivos a los que se destina el agua (por ejemplo irrigación, abastecimiento municipal, usos en el río mismo, etcétera), y de las características del sistema de calidad del agua ambiental que se consideren importantes por razones ecológicas o de salud.

Cuadro 1. Indicadores comunes de la calidad del agua

Temperatura
Cuenta coliforme (organismos por 100 ml)
Demanda de oxígeno disuelto (mg/l)
Demanda de oxígeno bioquímico (mg/l)
Total de sólidos disueltos (mg/l)
Cationes (mg/l)
Sodio
Potasio
Calcio
Aniones (mg/l)
Cloruros
Sulfatos
Ortofosfatos
Nitratos
Sólidos en suspensión (mg/l)

La identificación de los componentes de interés es un paso inicial necesario en el proceso de evaluación. La selección de los que hay que incluir después debe ser más restrictiva, ya que hay que tener en cuenta el tiempo y los gastos necesarios para obtener e interpretar los datos.

Perspectiva del trabajo de evaluación del impacto

Efectos directos e indirectos. Los impactos de una represa en la calidad del agua son ocasionados por el embalse creado y por los usos diversos del agua almacenada. Los efectos ocasionados por cada uno de estos factores se clasificarán aquí como *directos* e *indirectos*, respectivamente. Por lo tanto, se incluye una gama bastante grande de impactos cuya valoración exige una perspectiva proporcionalmente amplia. El embalse es en sí un *ambiente nuevo*; sustituye a un río que fluye libremente. Éste es el efecto más destacado entre los *directos*. Además, su patrón funcional programará el régimen de calidad del agua al salir de la represa. Éste también es un *efecto directo*.

Por otro lado, la disponibilidad de nuevos abastecimientos de agua seguros permitirá el desarrollo de nuevos ambientes culturales y la expansión de los existentes. Los cambios resultantes en la calidad del agua pueden clasificarse como *efectos indirectos*. Los ejemplos más destacados de éstos son las corrientes de retorno de las aguas servidas de la agricultura y los desagües de la expansión urbana y el desarrollo industrial. Todos los grupos de usuarios producirán impactos en la calidad del agua

en el ambiente circundante, ocasionados por los múltiples flujos de retorno del agua degradada al sistema fluvial. El sistema fluvial es, pues, el *locus* de los procesos naturales de drenaje y actividades humanas y de los procesos inducidos por el hombre (por ejemplo la irrigación), que tienen lugar en una determinada represa. El sistema fluvial acumula en la calidad del agua los efectos de todas estas actividades y procesos.

El concepto de sistemas. De lo anterior se deduce que el alcance de la evaluación del impacto sobre la calidad del agua es muy amplio, abarca el concepto de un sistema completo. Por lo tanto, para evaluar los impactos de las presas en la calidad del agua debe prevalecer el concepto de sistemas en su sentido más amplio. La hidrología de la cuenca fluvial, el desarrollo cultural promovido por el agua disponible, las interacciones ecológicas, etcétera, son algunos de los principales componentes del sistema que están relacionados con la calidad del agua, cuyos papeles respectivos exigen una definición.

El papel crítico del conocimiento. Aunque el concepto de sistema proporciona la base ideológica para determinar lo que debe o no incluirse en la evaluación de los impactos sobre la calidad del agua, la ejecución real del proceso de evaluación del impacto exige una comprensión intuitiva de los componentes del sistema individual, así como del sistema general. Tal comprensión se logra mediante la compilación de un "cuadro" descriptivo amplio, tanto del sistema como de sus componentes. Esta compilación puede incluir mapas, exposiciones gráficas de datos, compilaciones tabulares, fotográficas, muestreo de campo, visitas locales al campo, etcétera. A partir de este "cuadro", y de la experiencia de otras situaciones, se debe empezar a organizar una base para una interpretación razonable de la situación existente, y a predecir una serie de impactos posibles y plausibles en la calidad del agua, ocasionados por la presa propuesta.

Vigilancia. Indudablemente, no hay que descuidar la necesidad de una evaluación continua de los cambios tal como van apareciendo en el tiempo real durante la construcción y después durante la operación, en los años siguientes a la terminación del proyecto. A fin de obtener los datos necesarios, hay que organizar una red permanente de vigilancia de la calidad del agua, que equilibre las necesidades presentes reales con las limitaciones del presupuesto y del tiempo. Con dicha información se puede asegurar empíricamente qué es lo que sucede en realidad. Así se pueden hacer adaptaciones de la estrategia (por ejemplo distribución de la descarga de desechos) para que el sistema real se adapte a la conducta deseada. Con este enfoque empírico se incorporan a las observaciones hechas en el tiempo real otras influencias y actividades que no se tuvieron en cuenta en las predicciones del proyecto.

Administración. Además de las predicciones de los impactos del proyecto sobre la calidad del agua antes de su realización, y de la retroalimentación de los impactos reales durante su operación, debe existir una estructura administrativa regulatoria dedicada a la conservación y mejo-

ría del ambiente. Sin dicha administración, las predicciones y las medidas de los impactos en la calidad del agua son sólo ejercicios de recopilación de datos. La jerarquía administrativa debe utilizar esta información, además de la sensibilidad sobre las metas y aspiraciones y las posibilidades económicas de la sociedad, para fijar normas de calidad del agua. El organismo administrativo debe asegurarse también de que se cumplan esas normas.

Descripción del sistema de calidad del agua

El primer paso en la evaluación de la calidad del agua consiste en describir el sistema de calidad existente y sus componentes. El objetivo es identificar los principales componentes del sistema y entender cómo interactúan, para después trazar un "cuadro" razonable de las condiciones generales de la calidad del agua anteriores al proyecto. Esta comprensión proporciona la base para la evaluación de las nuevas condiciones producidas por el proyecto.

El subsistema hidrológico

La hidrología es una ciencia empírica que se ocupa de la presencia, distribución y movimiento del agua en la corteza terrestre. Al nivel del desarrollo de recursos hidráulicos, los intereses de un proyecto se enfocan sólo en una parte del sistema hidrológico natural general, por ejemplo los patrones de precipitación, las corrientes fluviales y las interacciones de las aguas subterráneas. La recopilación de esos datos permitirá el análisis de los probables rendimientos de agua del proyecto, en términos de abastecimiento municipal e industrial, irrigación, energía hidroeléctrica, mantenimiento de corrientes fluviales mínimas, etcétera. Este sistema natural se debe entender en términos hidrográficos anuales de la corriente principal y de los afluentes más importantes, así como de la distribución de la frecuencia o períodos de retorno de los flujos anuales. También hay que describir la distribución temporal de la salida y el retorno del flujo. Con esta información se debe construir un diagrama reticular para ilustrar el sistema natural general, y el sistema modificado por el hombre, de las corrientes anuales tal y como son antes del proyecto. La represa y cualquier proyecto de desarrollo asociado con ella modificarán el sistema hidrológico existente. Por su función de almacenamiento, las salidas proyectadas del embalse cambiarían la gráfica anual del flujo abajo de la represa. Las comparaciones de las gráficas hidrológicas anteriores y posteriores al proyecto ayudarán a comprender el tipo de sistema que se está formando y sus efectos sobre la calidad del agua. Además, habrá que describir los patrones de los nuevos flujos de salida y retorno. El nuevo diagrama reticular debe compararse con el anterior para destacar los cambios que tengan lugar.

Estas descripciones de las condiciones hidrológicas anteriores y posteriores al proyecto darán una idea clara de las partes del sistema sensibles a los cambios en la calidad del agua, que serán ocasionados por entradas de cargas de desechos por usos diversos y por nuevos procesos biológicos dentro de la corriente o de la presa. Los últimos pueden ser producidos por nuevas condiciones ecológicas creadas (por ejemplo la presa misma, su orilla, nuevos patrones de flujo en el río, etcétera).

También habrá que emprender un estudio del río desde el punto de vista de la determinación de los tipos de nichos ecológicos que contiene antes del proyecto, y los cambios ocasionados por éste (entre otros qué nichos se crearán y cuáles pueden desaparecer). Por ejemplo, ¿cuál es la población de jejenes (simúlidos) vectores de oncocercosis con agua estancada o con agua corriente? ¿De qué dimensiones es el hábitat que se ofrece a los caracoles planorbideos? ¿Aumentará éste o disminuirá con la presa y con el régimen de aguas alterado de la corriente inferior del río? ¿Se pueden controlar estos hábitats (eliminando vegetación del embalse, etcétera)? De lo anterior se deduce claramente que hay que tratar con bastante amplitud la hidrología y otros componentes del sistema hídrico, y no sólo en términos de las prácticas convencionales. La descripción de la hidrología debe coordinarse con los trabajos de otras personas incluidas en el estudio.

Características de la calidad del agua del sistema ambiental de la corriente

Las características de la calidad del agua de cualquier río son una función de su historia agregada de exposición anterior (por ejemplo su hidrología). En el sistema natural están incluidos muchos procesos químicos y biológicos. Las corrientes de agua pasan a través y por encima de suelos y rocas, disolviendo material. El agua es también el medio de innumerables ecosistemas (por ejemplo la zona litoral de una presa, su epilimnio, su hipolimnio, la corriente, etcétera). El metabolismo general de cada ecosistema puede sintetizar productos benéficos o perjudiciales, según las cantidades y los productos específicos. La calidad del agua se puede expresar realmente de acuerdo con alguno de estos productos: (cantidad de algas, concentración del oxígeno disuelto, y otros). Las algas constituyen la base de la cadena alimenticia (junto con las células sintetizadas organotróficamente). Su presencia moderada es necesaria, pero en exceso constituyen una molestia. También otras plantas fotosintéticas pueden ser importantes, según la situación. La acrecencia de plantas como los lirios acuáticos (*Eichhornia*), *Salvinia* y *Pistia* (lechuga acuática) ha asfixiado prácticamente algunas represas formando espesas alfombras de crecimiento enmarañado e inutilizando la presa para la pesca u otras actividades humanas. En los países latinoamericanos se las encuentran con frecuencia en lugar de las formas de plancton unicelulares. Por

ejemplo, en el embalse de Cerrón Grande, El Salvador, los barcos quedan inmobilizados por esa vegetación. Además, estas alfombras proporcionan hábitat al caracol planorbideo (género *Biomphalaria*) produciendo el grave problema de la esquistosomiasis. Los tipos de modelos cuantitativos que incluyen esta complejidad de problemas no son factibles excepto en un sentido muy limitado. Más importante es el desarrollo de una comprensión del sistema orientada al campo y una apreciación de su complejidad. A este nivel hay un grado de posibilidad de predicción factible; se base en medidas empíricas y en la familiaridad de conocimientos lograda en el campo. Se puede así fomentar una comprensión de la conducta de la calidad del agua en el sistema y de sus variaciones.

Por lo tanto, si se modifica la hidrología por el almacenamiento de la corriente fluvial y por su distribución y uso en la agricultura, municipios e industrias, se fomentan también nuevos regímenes de calidad del agua. Éstos son producidos por los flujos de retorno del agua degradada. Así, el sistema puede llegar a estar dominado por el hombre tanto en la hidrología como en la calidad del agua. Estos cambios deben evaluarse por predicción antes del proyecto, y en el tiempo real, después del mismo. Más tarde hay que juzgarlos en relación con las normas o criterios diseñados para proteger políticamente determinados valores sociales. La faceta más importante de la evaluación de la calidad del agua es mantener una perspectiva amplia sobre la tarea y plantear las cuestiones que sean pertinentes. No es tan importante saber si ya se conocen las respuestas como el hecho de haber considerado las posibilidades y haber establecido lo que se sabe (más que preocuparse demasiado por lo que se desconoce). La documentación de todo el proceso es de suma importancia para que en años posteriores sea posible comprobar la extensión de las investigaciones realizadas.

Degradación de la calidad del agua por su utilización

Los tipos principales de los usos de extracción del agua son municipales, industriales, de enfriamiento y agrícolas. Las aguas municipales resultantes de desechos aparecen como albañal. Estas formas de aguas servidas es la más discutida y tiene las siguientes características: es un peligro para la salud, es estéticamente desagradable y tiene una considerable cantidad de materia orgánica biodegradable. El tratamiento secundario por clorinación suele considerarse esencial (aunque algunas personas afirman que el tratamiento primario es suficiente cuando la dilución es adecuada).

No se debe permitir que los dispositivos para el tratamiento individual de las aguas negras sustituyan a los sistemas generales de albañal. Su manejo y regulación es realmente imposible y las fallas son frecuentes. Constituyen riesgos para la salud si se emplean en vez del sistema de alcantarillado.

Cuadro 2. Características de la contaminación del agua de represa según uso y exposición anterior.

Uso del agua	Indicador de contaminación	—Agua de represa—		Lutinoaméricos: Algunos casos reales o potenciales
		Impactos en la calidad del agua	Parámetros de interés	
		Clase de impacto		
Suministro de agua	Las algas proliferan mucho	Olor incluido en los problemas de tratamiento	Nutrientes (N—P—Si) Profundidades disco Secchi	Laguna del Sauce, P. Este, Uruguay, Lago San Roque, Argentina
Suministro de agua	Desprendimiento de H ₂ S	Olor y problema de tratamiento	Oxígeno disuelto H ₂ S Compuestos orgánicos	Pozza Honda, Ecuador
Suministro de agua	Plaguidas de la agricultura	Compuestos tóxicos en el agua	Plaguidas	Presas de Jaculi, Brasil
Agua para actividades de recreo	Proliferación de algas	Ofensiva a la vista y al olfato	Nutrientes (N—P—Si) Profundidades disco Secchi	Lago Paranae, Brasilia
Contacto con el agua	Descargas drenaje Esquistosomiasis	Esquistosoma y enfermedades entéricas	Radiación solar Caracoles, Cercarias	Presas del Noroeste, Brasil
Peces	Muerte de peces	Disminución de la pesca	Oxígeno disuelto	Lago de Freitas, Río de Janeiro, Brasil
Irrigación	Prevalencia de esquistosoma	Ofensiva a la vista	Comp. inorgánicos tóxicos	Presas del Dep. del Valle, Colombia
Descargas de aguas servidas a la presa	Erosión Muerte de peces	Esquistosomiasis Capacidad reducida Cambio en la vida acuática	Coliformes fecales Caracoles, Cercarias Sólidos suspendidos Compuestos tóxicos	Presas del sistema fluvial del Río Paranae
Planta hidroeléctrica	Molinos acústicos	Obstrucciones	Nutrientes (N—P)	Río Bogotá, Colombia
Agua para enfriar	Descargas industriales	Peces muertos Menor pesca	Temperatura	Presas Tercero, Argentina
Transferencia y mezcla de agua	Prevalencia de algunas especies	Cambio de vida acuática	Salinidad y número de organismos del nivel trófico	Sistema del Canal de Panamá

Los desagües industriales son variados. Su tipo puede ir desde los que tienen un alto contenido orgánico hasta los que tienen metales pesados. También en este caso es necesario un tratamiento adecuado.

El agua que se utiliza para enfriar sufrirá un ascenso de temperatura. Aunque éste puede ser pequeño (quizá sólo 2°C) el efecto biológico puede ser significativo. Las temperaturas más altas producirán una tasa mayor de crecimiento de la mayoría de los organismos.

La agricultura irrigada debe ir acompañada de drenaje. Es evidente que la irrigación y el drenaje son inseparables. El agua de drenaje encontrará su ruta hacia el agua subterránea y después posiblemente hacia el río (según sea agua subterránea superficial o profunda, en relación con el nivel de las aguas del río). En general, la concentración mineral es más alta en el agua de drenaje que en la aplicada, por un margen elevado (por ejemplo de aproximadamente 800-1200 mg./l de aumento en SDI). Se debe a la evapotranspiración, que concentra los solutos ya presentes, y a la disolución de sales adicionales. Además, puede aumentar el contenido en fósforo y nitrógeno en las aguas de drenaje. No se cuenta con ningún método práctico para disminuir estos efectos. Tampoco se conocen enfoques prácticos. Es necesario aceptar un cierto aumento en los niveles de salinidad como parte del desarrollo de la irrigación. No se puede permitir que las sales se acumulen en el suelo; hay que arrastrarlas por drenaje. La gravedad del efecto de la salinidad depende de la cantidad del agua natural del sistema en relación con la cantidad de agua de drenaje de la irrigación.

Es importante conocer estos flujos de aguas de desecho y de aguas de retorno de la irrigación, así como también la calidad asociada con cada una. Hay que determinar las limitaciones de la descarga de las aguas servidas para proteger la ecología fluvial (lo cual por supuesto decide el grado de tratamiento impuesto a las descargas de aguas servidas tanto del municipio como de las industrias), y quizá en algunos casos fijar límites a las zonas irrigadas.

Influencias indirectas en la calidad del agua

La construcción de una presa importante no sólo permite un crecimiento y desarrollo tangibles sino que también los simboliza. El proyecto puede estimular una serie de actividades, muchas de las cuales pueden haber influido en la calidad del agua ambiental. Todas las actividades que alteran la superficie de la tierra, como corte, terraplén, pavimento, etcétera, cambiarán los tipos de exposición química del agua superficial e infiltrada. La tierra agrícola, en particular, suele ser una fuente de nutrientes. La deforestación, sobre todo en las laderas muy inclinadas, puede aumentar la cantidad de sedimentos. Los cortes y terraplenes, carreteras y otras actividades de la construcción también añadirán sedimentos a los ríos adyacentes. Los impactos dependen de cada situación

específica. Las alteraciones adyacentes a un lago oligotrófico, por ejemplo, aumentarán el potencial de eutroficación. O, por el contrario, el salitre que por erosión va a dar a un río de la montaña, cuando el flujo es bajo puede depositarse permanentemente en el fondo destruyendo el hábitat de algunos invertebrados. Ese tipo de interacciones de diversos ecosistemas es muy frecuente. Las áreas urbanas son fuentes de grandes cantidades de material de desecho. Una parte considerable procede de la basura de las calles que va a parar a las zanjas de drenaje con las lluvias intensas. Los terrenos sanitarios son fuente de contaminación si no se sitúan bien en relación con el drenaje.

Las actividades de recreo en las presas y los ríos también producen basuras y contaminación. Aparte de los servicios sanitarios y botes de basura hay que proporcionar el debido mantenimiento.

En todo ello existe un componente cultural. La gente debe sentir una motivación ética para preservar y mejorar el ambiente. Las actividades de educación y de información pública no son menos importantes que los componentes de los servicios del programa de control de la contaminación.

Descripción básica de la calidad del agua

Antes de comenzar la construcción es necesario conocer los niveles ambientales de concentración en las aguas superficiales y subterráneas. Los llamados "impactos" sobre la calidad del agua son los incrementos del cambio producidos por el proyecto. Por lo tanto, si los niveles del oxígeno disuelto en la parte del río abajo de la presa son consecuentemente menores que antes de construir la misma, el cambio en la calidad del agua es la diferencia entre los dos "estados". El programa de muestreo debe incluir las descargas de aguas servidas y los flujos de retorno de la irrigación.

Para obtener un "cuadro" amplio del carácter de la calidad del agua de un sistema fluvial hay que determinar las variaciones de la calidad del agua en el tiempo y en el espacio. Por consiguiente los problemas son: ¿Qué parámetros de calidad del agua deben medirse? ¿Dónde tienen que colocarse las estaciones de vigilancia? ¿Cuántas estaciones hay que instalar? ¿Con qué frecuencia deben tomarse muestras? Las respuestas dependen del criterio que debe integrar a los diversos factores específicos de cada situación. Es preferible tener estaciones de vigilancia en los puntos modulares importantes del sistema fluvial (como antes y después de ingresos significativos de agua) y también conocer el tipo de agua que entra y cualquier influencia que pueda fomentar cambios.

El muestreo debe hacerse con la frecuencia suficiente para captar los ciclos diarios y anuales de cambio y para determinar las variaciones estocásticas y de corriente. Como primer paso debe hacerse un estudio de muestreo de todo el sistema. Después, para determinar los patrones

de cambio, hay que tomar muestras semanales o mensuales en las estaciones índice seleccionadas. También resultan convenientes los estudios de 24 horas en diferentes estaciones del año, para determinar la conducta diaria (por ejemplo para el oxígeno disuelto).

El muestreo debe ir acompañado del análisis de campo de los parámetros que tienen mayor tendencia a cambiar en las botellas de muestreo. En esta categoría se incluyen oxígeno, temperatura, bióxido de carbono y pH. El análisis de laboratorio debe incluir cuentas bacteriológicas (por ejemplo cantidad total, coliformes, coliformes fecales), conteo de algas por especie, y la lista usual de aniones y cationes, además de la turbidez o sólidos en suspensión, amoníaco, etcétera. La selección es también asunto de criterio. Por ejemplo, en una región minera o en una zona industrial quizá sean importantes también algunos metales pesados.

Se debe prestar una atención especial al diseño inicial de un sistema de archivo para conservar los informes de los datos de laboratorio y de campo. Si hay acceso a una terminal de computadora, se facilita una gran parte del procesamiento de datos. Esto es muy importante para los proyectos en los que se recopilan y procesan cantidades relativamente grandes de datos durante periodos largos de tiempo. Los datos básicos (lecturas de instrumentos, diluciones, y otros) se pueden registrar directamente en tarjetas codificadoras de datos y procesar para obtener una página que resuma toda la información importante (concentraciones, fecha, estación, etc.). Después de haber obtenido los datos, éstos tienen que reunirse utilizando formas gráficas y tabulaciones para que sean más evidentes las tendencias (por ejemplo, ¿cómo varía determinado parámetro según la distancia en una fecha determinada? O, para una determinada estación, ¿cómo varía en relación con el tiempo?).

Las personas incluidas en la evaluación deben supervisar el diseño de la red de vigilancia y del programa de muestreo para familiarizarse bien con el sistema. Además deben incluir expediciones de muestreo. De esta forma se fomenta el desarrollo del componente intuitivo en la comprensión del sistema.

Proyectando cambios en la calidad del agua ambiental

Los medios afectados por los cambios en la calidad del agua del ambiente provocados por la construcción de la presa incluyen el embalse que se va a crear y la corriente río abajo. El método de predicción de los cambios en estos sistemas no es exacto y hay que interpretarlo por medio de márgenes aproximados de cambio. Hay dos enfoques aproximados: 1) modelos simulados, y 2) la experiencia. La aplicación del criterio es parte integrante de cualquiera de los dos procedimientos.

Modelos simulados. Un modelo de simulación computarizado tiene una aplicación limitada pero importante para hacer las predicciones de

los cambios en la calidad ambiental del agua de los ríos. Su estructura debe incluir el sistema fluvial y todas las desviaciones, ingresos y presas de almacenamiento, así como todas las reacciones de la calidad del agua. Las corrientes de agua y las cargas, en peso o concentraciones, de todos los componentes de interés deben incluirse también. Se necesita algún tipo de coeficiente modelo (por ejemplo coeficientes de velocidad de reacción). Éstos tienen que determinarse con investigaciones de campo. Cuando se completa un modelo y se verifica para el sistema en las condiciones existentes, se pueden añadir al mismo nuevos datos (por ejemplo descargas de salida). Los resultados pueden consistir en trazos de perfiles de concentración-distancia para los componentes de interés (como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos, etcétera).

Aunque un modelo de simulación es por naturaleza determinista y su uso es más bien mecánico, el modelo en sí está basado en una cantidad considerable de juicios en relación con la valoración de los coeficientes y con otras condiciones limitantes. Por lo tanto, no se pueden tomar los resultados al pie de la letra. El modelo integra en su construcción un gran número de variables; por ende, puede indicar la conducta y reacción del sistema a cualquier número de casos hipotéticos. Por ejemplo: ¿cuál sería la reacción del oxígeno disuelto en el río a niveles más altos de descarga de desechos?

Los resultados del modelo no tienen que tomarse como absolutos; se deben interpretar más bien a la luz de las limitaciones y capacidades del modelo y de la familiaridad con el sistema real obtenida en la construcción y el uso del modelo. De hecho esta familiaridad íntima con el sistema, lograda durante el proceso de construcción y uso del modelo, es en sí inapreciable, puesto que presta mucha más confianza a la interpretación de los resultados. Pero hay que recordarse que el sistema real es probablemente mucho más complejo de lo que se puede interpretar con el modelo. Por ejemplo, se pueden omitir algunas variables por ignorancia, se pueden establecer mal algunas relaciones funcionales, o los coeficientes cinéticos pueden ser erróneos, etcétera. La simulación de modelos es un proceso útil si se toma como una herramienta.

Analogía (o experiencia y sentido común). Cada situación en el desarrollo de un embalse fluvial es en sí única. Por lo tanto, no se puede extrapolar literalmente de una situación a otra. Pero es posible hacer predicciones sobre la calidad del agua, por *analogía* con categorías de proyectos de desarrollo de represas.

El uso de la analogía no es una técnica formal. Es más bien la aplicación de conocimientos y experiencia, unidos al criterio, para evaluar la semejanza de determinados regímenes de aguas al terminar un proyecto de embalse. En otras palabras, es un enfoque convencional a esos problemas. Aunque es imprescindible poseer conocimientos científicos y aplicarlos, el proceso de hacer este tipo de evaluación es un *arte*. El enfoque tiene mérito propio, ya que hay incontables variables pertinentes a alguna situación, que no se pueden integrar a especificaciones formales.

Una persona con experiencia puede lograr la integración de esas variables faltantes o expresarlas en forma articulada para dar una evaluación razonable de lo que puede suceder. La esencia de este proceso es el criterio basado en conocimientos y experiencia.

Con demasiada frecuencia en los últimos años, con el advenimiento de la computadora, esta aproximación a la solución de los problemas se ha hecho a un lado, dando paso a enfoques más sofisticados y "elegantes". En realidad esas doctrinas (la comparación de la práctica y la teoría) no tienen que ver con la solución de los problemas; lo esencial es que uno siempre cuente con un apoyo práctico. Por lo tanto, cuando el criterio y la experiencia sean más adecuados, hay que reconocerlo y utilizarlos. Este elemento nunca debe faltar, siempre es una parte necesaria de la resolución de algún problema. Además, en algunos casos es el único enfoque factible o apropiado.

Características de la calidad del agua de las represas

La función de una represa es almacenar agua. Los objetivos incluyen el control de inundaciones, la generación de energía, la regulación de la corriente del río, el abastecimiento municipal e industrial y la irrigación. El almacenamiento en sí acarrea el desarrollo de patrones característicos de calidad del agua de la presa en relación con las influencias estacionales y la profundidad. La salida de agua de la presa tiene, pues, un efecto *directo* en la calidad del agua río abajo de la presa, según la profundidad de la que salió el agua y según la época del año. La salida del agua para usos diversos, en comparación con la salida directa, tiene efectos indirectos en la calidad ambiental del agua del río. Estos usos acarrearán una degradación del agua extraída que, al regresar, afectará la calidad ambiental del agua fluvial.

Zonas biológicas. Una represa es esencialmente un reactor biológico complejo. Pero no es un reactor homogéneo. Se caracteriza más bien por tener diferentes zonas limnológicas (por ejemplo zona litoral, hipolimnio, metalimnio, epilimnio, etcétera).

Las características de la calidad del agua de cualquiera de estas diversas zonas están determinadas en gran parte por el carácter ecológico de cada una. Aunque todas las zonas tienen algunas características comunes, los ecosistemas específicos que se forman en cada una están determinados por las *condiciones limitantes* impuestas. Entre estas condiciones limitantes se incluyen: entrada anual de agua, masa de materia orgánica y compuestos químicos que transporta, volumen de la represa, profundidad, patrones de clima y de temperatura, detritus originales del fondo, área superficial y patrones de estratificación.

Las únicas condiciones limitantes significativas que se pueden controlar y que a su vez darán forma al ecosistema predominante son la prepara-

ción del lugar de la represa antes del llenado (por ejemplo eliminar la vegetación) y los patrones de llenado y vaciado. Las otras condiciones limitantes son fijas, y son las que hacen que una situación sea diferente de cualquier otra.

Salidas del agua. Los regímenes de calidad del agua de la parte inferior del río se verán directamente afectados por la calidad del agua que se deja salir, lo cual dependerá de la estación del año y de la capa de la cual proviene el agua. La temperatura suele bajar con la profundidad (la relación temperatura-profundidad se denomina *termocline*) y lo mismo pasa con los niveles de oxígeno disuelto, mientras que la masa de algas puede ser bastante grande en la capa superior (epilimnio). En vista de estas diferencias es preferible contar con la posibilidad de dejar salir el agua a diferentes profundidades. Los mecanismos de desagüe deben tener todo esto en cuenta. Si el agua sale de niveles deficientes en oxígeno hay que considerar la posible aereación y las estructuras de disipación de energía (quizá la generación de energía hidroeléctrica lo impida).

Algas. Si el desagüe tiene lugar en las capas superiores las poblaciones de algas pueden ser elevadas; las que estén adaptadas a las condiciones del río proporcionarán la simiente para su reproducción en la parte inferior del río. Pero la población de algas en conjunto también impondrá al río una carga biológica biodegradable, ocasionando una deficiencia de oxígeno. Además, muchas especies de algas producen problemas de sabor y olor y resultan desagradables. De hecho, esos problemas odoríferos se pueden extender a toda la masa de agua en la que tiene lugar la proliferación, emitiendo olor a pescado. Es posible que el ciclo diario fotosíntesis-respiración resultante de esa abundancia de algas haga que los niveles de oxígeno varíen desde un mínimo nocturno de cero mg/l hasta 30 mg/l durante los máximos diurnos. Sólo las especies más resistentes de peces, como las carpas, pueden sobrevivir. Sin embargo, la población puede ser elevada gracias a la gran productividad de las algas.

Plantas vasculares. En algunos embalses las plantas vasculares predominan sobre las algas. Los lirios acuáticos constituyen el ejemplo más sobresaliente. Estas plantas pueden formar densas alfombras que impidan el tránsito de barcas. Además de constituir una molestia, esas plantas proporcionan un hábitat a los caracoles planorbideos (género *Biomphalaria*), huésped reservorio de la esquistosomiasis. Cuando cuenta con un hábitat tan abundante es prácticamente imposible controlar al caracol.

Zona litoral. Si la configuración de la represa es tal que existen muchas zonas de escasa profundidad, pueden crecer diversas plantas acuáticas enraizadas en el fondo, proporcionando hábitat a mosquitos transmisores de la malaria y a caracoles planorbideos del género *Biomphalaria*. Durante la construcción se debe pensar en suprimir esas zonas como parte de la preparación del embalse. Un enfoque de mantenimiento consiste en hacer fluctuar con frecuencia el nivel del agua, para eliminar el hábitat.

El papel del hipolimnio. Una gran parte de la biomasa fotosintética, en forma de algas o plantas vasculares, caerá al fondo con el tiempo, formando una cantidad significativa de materia orgánica. Esta materia se degrada anaeróbicamente desprendiendo metano y bióxido de carbono. De esta forma, una parte del carbono abandona el sistema. Sin embargo, el bióxido de carbono interviene en la reacción fotosintética que tiene lugar en el epilimnio, asegurando así que continúe la fotosíntesis. Si el embalse está sujeto a cambios en primavera y otoño, la represa reciclará los nutrientes liberados. Así pueden transcurrir años o decenios antes de que haya un desgaste apreciable de nutrientes o de carbono en el sistema.

Control de los nutrientes. Aunque los nutrientes pueden ser arrastrados a la presa de varias formas, o venir en la corriente del río que llena, quizá el control más conveniente de la eutroficación sea eliminar la vegetación que se va a inundar. La vegetación natural puede poseer suficientes nutrientes en su biomasa como para elevar en forma significativa cualquier potencial ya existente.

Control y mantenimiento de la calidad del agua

El conocimiento y la comprensión de la conducta de un sistema de calidad del agua resulta inútil a menos que se apliquen al control y mantenimiento. Este proceso debe unir los objetivos estratégicos con la factibilidad técnica. En la combinación tiene importancia primordial fijar estándares de calidad del agua. Sin embargo, todo lo anterior carece de importancia si no va seguido de un programa de ejecución. Los problemas conexos con los objetivos de la calidad del agua, estándares, ejecución obligatoria y proceso general de manejo se discuten en las secciones siguientes.

Objetivos en relación con la calidad del agua

Los valores de una sociedad se reflejan en sus metas. Son definiciones bastante amplias sobre lo que la sociedad desea ser y las aspiraciones y esperanzas que tratará de alcanzar con su trabajo. Se pueden dividir en dos grupos principales: *objetivos de supervivencia* y *objetivos de satisfacción*. Los primeros incluyen seguridad ambiental, seguridad colectiva, seguridad individual y oportunidad económica. Los segundos comprenden: oportunidad de recreo, oportunidad estética, oportunidades culturales y de la comunidad, oportunidad educativa, y libertad y diversidad individuales. Cada una de estas metas amplias se pueden dividir a su vez en "macroobjetivos" más específicos o condiciones sociales, tales como el bienestar económico, la igualdad social, la salud pública, la diversidad de oportunidades, etcétera. La forma de relacionar estos objetivos con los

programas y proyectos, y posteriormente con los indicadores específicos, se puede observar en la serie de matrices respectivas de las figuras 1, 2, 3, y 4.

Los signos "x" en los elementos de las cuatro matrices representan afirmaciones de que pueden existir relaciones entre los respectivos renglones y columnas. (Las afirmaciones no se limitan desde luego a las indicadas, ya que cualquiera puede proponer otra relación existente; además, la naturaleza de cada relación la decidió el estudio personal). Cada renglón y cada columna muestran un "vector" (o conjunto) de efectos, distribuidos y recibidos respectivamente. Por ejemplo, el objetivo del programa "control de la contaminación" en la figura 2, tiene efectos en el "bienestar económico", "salud", "conservación ambiental", y "diversidad en oportunidades". También, como se ve en la figura 3, el "control de la calidad del agua" como propósito del proyecto es necesario para lograr el "control de la contaminación". En la figura 1 hay muchos indicadores específicos involucrados en el control de la calidad del agua. Los estándares de calidad del agua son los niveles particulares asociados a cada indicador para alcanzar los propósitos señalados, por ejemplo en la figura 4. La razón de su importancia se presenta en las cuatro matrices. Como cada situación es especial, los estándares de calidad

**Figura 1. Matriz "indicador específico/
propósito del proyecto"
(Vlachos y Hendricks, 1977)**

Propósito del proyecto Indicador específico	Agua municipal e industrial	Energía hidroeléctrica	Enfriamiento térmico	Irrigación	Control de inundaciones	Administración de la pesca	Control de la calidad del agua
Mínimo en el flujo del río	x	x	x	x	x	x	x
Fluctuaciones en la presa		x			x	x	x
Control de la temperatura del río	x		x			x	x
Nivel de oxígeno disuelto						x	x
Control de la turbidez	x			x		x	x

**Figura 2. Matriz “macroobjetivos/objetivos del programa”
(Vlachos y Hendricks, 1977).**

Macroobjetivos o condiciones sociales						
Objetivos del programa	Bienestar económico	Justicia social	Salud	Conservación ambiental natural	Diversidad en oportunidades	Nicho en la comunidad social
Creación de empleos	X	X			X	X
Distribución de los ingresos	X	X			X	X
Conservación ecológica			X	X	X	
Propósito estético					X	
Control de la contaminación	X		X	X	X	
Estabilidad institucional	X	X	X		X	X
Desarrollo regional	X	X	X		X	X
Eficiencia económica	X					

**Figura 3. Matriz “objetivo del programa/
propósito del proyecto”
(Vlachos y Hendricks, 1977)**

Objetivo del programa							
Propósito del proyecto	Creación de empleos	Distribución de ingresos	Preservación ecológica	Propósito estético	Control de la contaminación	Estabilidad institucional	Desarrollo regional
Agua municipal e industrial	X	X				X	X
Energía hidroeléctrica	X	X				X	X
Enfriamiento térmico	X	X				X	X
Irrigación	X	X				X	X
Control de inundaciones	X	X				X	X
Administración de la pesca	X	X	X			X	X
Control de la calidad del agua			X	X	X	X	X

Figura 4. Matriz "metas/valoración de los objetivos"

Meta Macroobjetivos o condiciones sociales	Seguridad ambiental	Seguridad colectiva	Seguridad individual	Oportunidad económica	Oportunidades recreativas	Oportunidades estéticas	Oportunidades culturales y de la comunidad	Oportunidades educativas	Libertad y diversidad individuales	
1 Bienestar económico	x	x	x	x				x		
2 Justicia social			x	x	x					
Salud	x		x	x	x_{ij}					b_j
j Conservación del ambiente natural	x				x	x		x		
Diversidad de oportunidades	x			x	x	x	x	x	x	
n Nicho en la comunidad social		x	x	x	x	x	x	x	x_{mn}	
				a_i						$\sum b_j = 1.0$ $\sum a_i = 1.0$

del agua se deben especificar de forma que "encajen" entre los dos (por ejemplo la situación y los estándares). Por esta razón, los estándares deben ser flexibles, para que difieran en distintas secciones del río si el carácter de la corriente cambia. Así, se pueden "clasificar" los ríos y los sectores del río. Es un proceso técnico-estratégico que incluye una evaluación de cómo la sociedad prefiere invertir su capital de ambientes naturales y cuáles son las exigencias técnicas para tener éxito. Además, la sociedad puede evolucionar en cuanto a sus esperanzas y metas. También pueden cambiar las clasificaciones de los ríos y los estándares. Por lo tanto, debe haber alguna libertad a largo plazo. Los cambios a corto plazo, en cambio, se consideran contraproducentes debido a que los principales contaminadores en relación con el tiempo (industrias, ciudades, y otros) tienen responsabilidades respecto al cambio (por ejemplo planificación y distribución de tiempo, presupuesto, financiamiento, etcétera).

Objetivos y dimensiones sociales de la calidad del agua

Algunos de los propósitos comunes para el uso del agua son los que se exponen en el cuadro 3, que también presenta la relación entre los "objetivos" de la calidad del agua y los "usos". Por ejemplo, se puede ver que para el abastecimiento doméstico de agua el objetivo principal es la "salud" y que los "materiales tóxicos" y los "organismos pató-

genos" son dos parámetros correspondientes que se emplean en la vigilancia. Generalmente los parámetros vigilados tratan de medir los aspectos de la calidad del agua que hay que preservar para que el agua sea adecuada para el uso previsto.

Clasificación de los ríos

Todas las aguas de Estados Unidos se han clasificado siguiendo las cláusulas de la Ley de Control de la Contaminación del Agua, de 1966. La ley exigía que se clasificaran todos los ríos, sectores de ríos y aguas costeras. Se utilizaron seis clasificaciones, según el tipo de servicio asociado al agua en estudio.

Cuadro 3. Usos del agua y objetivos de la calidad del agua

Categoría del uso del agua	Objetivos	Parámetros de calidad del agua
Suministro de agua potable	—Salud —Sabor —Dureza	—Materiales tóxicos —Organismos patógenos —Color, sabor, olor —Ca, Mg, Fe
Agua para proceso industrial	—Compatibilidad química con los procesos	—Compuestos químicos específicos —Conteo de algas
Enfriamiento industrial	—Minimizar la escala —Minimizar la basura biológica	—CaCO₃ —Conteo de algas
Recreo	—Salud —Molestias —Estética	—Organismos patógenos —Nutrimentos —Conteo de algas —Color
Conservación de la pesca	—Compatibilidad fisiológica	—Oxígeno disuelto
Preservación estética	—Molestias	—Materiales flotantes —Bancos de cieno —Grasa —Color
Irrigación	—Tolerancia en contenido salino —Toxicidad	—Total de sólidos disueltos —Compuestos tóxicos

El cuadro 4 es una recopilación abreviada del sistema de clasificación que se utiliza junto con los estándares de calidad del agua. La nota N° 1 al pie de la página merece especial atención porque presenta un esbozo en general de los estándares mínimos para todas las aguas.

La falta de estándares específicos para algunas clases no implica que no haya restricción en los niveles.

Para ilustrar la evolución de los estándares que refleja los valores evolucionados de la sociedad, el cuadro 5 resume los últimos estándares de calidad del agua de Colorado, de 1974, después de las enmiendas de 1973 a la Ley de Control de la Contaminación del Agua (PL 92-500). Las clasificaciones C y D se han omitido, quedando sólo las clasificaciones más elevadas.

El cambio en las premisas entre los estándares de 1971 y los de 1974 es perceptible. Los primeros se basan en lo que podría denominarse una premisa "utilitaria", ya que distinguen los valores asociados a ríos de diferente carácter (lo cual puede estar relacionado con cualidades naturales o con patrones de uso establecidos). Según este punto de vista se puede tolerar alguna degradación en la calidad del agua si es implícitamente consistente con los estándares de la clasificación. Los estándares de 1974 representan lo que se podría denominar una premisa "ecológica". De acuerdo con esta premisa no se acepta implícitamente ni de otro modo ninguna degradación del río inferior a los estándares de las aguas de las clases A₁, A₂ o B₁, B₂. Este cambio refleja una desviación correspondiente en el carácter ético de la sociedad norteamericana, de un clima ético primordialmente de "desarrollo-conservación" a otro que quizá se esté inclinando hacia una "situación estable-ambiental".

Objetivos de los estándares, criterios y manejo

La mayoría de los usos del agua tienen límites específicos para varios o muchos parámetros de calidad. Se denominan *criterios* si están fijados por las exigencias técnicas o necesidades del usuario. Se llaman *estándares* si están codificados por la ley. Los cuadros 4 y 5 son ejemplos de estándares de ríos que se utilizan en Estados Unidos. Se presentan con fines ilustrativos ya que cada país debe fijar los suyos. Lo importante es que es necesario fijar algún tipo de estándares. La definición de estándares de calidad del agua asociada a determinadas metas es el objetivo de un programa de control de la calidad del agua. La jerarquía implícita de las metas, los objetivos, la clasificación de ríos, los estándares de calidad del agua, etcétera, proporcionan un enfoque sistemático al manejo de la calidad del agua. Lo importante es recordar que debe existir un marco de ese tipo (aunque se reconozca que su carácter específico varía de un país a otro).

Cuadro 4. Grados de clasificación para ríos y lagos y estándares de calidad del agua asociados a ellos, 1971 (abreviado), Departamento de Salud de Colorado¹

Clase	Adecuada para	Coliformes Total (por 100 ml)	Estreptococo fecal (por 100 ml)	O ₂ disuelto (mg/l)	pH	Temp (°C)	Total sólidos disueltos (mg/l)	Turbidez	Otros
A	Suministro de agua potable	<1 000	2	>4	6.0-9.0	2	<500	2	
B ₁	Pesca de aguas frías	<1000	2	>6	6.5-8.5	<20 ³	2	Adecuada para la pesca	Libre de sustancias tóxicas
B ₂	Pesca de agua templada	<1 000	2	>6	6.5-8.5	<30 ³	2	Adecuada para la pesca	Libre de sustancias tóxicas
B ₃	Contacto con el cuerpo (deporte)	<100	2	2	6.5-8.5	2	2		Calidad general del agua compatible
C	Usos industriales	<1 000	2	>3	5.0-9.0	<39	2	2	
D	Irrigación	<1 00	2	2	2	2	Fijado por autoridad reguladora	2	Libre de sustancias tóxicas

¹Todas las aguas deben estar libres de: a) sustancias descargadas que formen depósitos de cieno; b) espuma o material flotante desagradable a la vista, o nocivo; c) sustancias que producen color, olor o molestias, sabor a pescado, etcétera; d) sustancias tóxicas o perjudiciales para animales, plantas u otros organismos acuáticos; e) sustancias que producen organismos acuáticos indeseables; f) residuos de aguas servidas que producen glóbulos de grasa, películas o coloración de la superficie del agua; g) niveles de radiactividad superiores a los últimos estándares fijados para el agua potable; h) descargas que agraven los problemas de salinidad.

²No hay estándares.

³Se evitarán los cambios abruptos.

Cuadro 5. Grados de clasificación para ríos y lagos y estándares de calidad del agua asociados a ellos, 1974 (abreviado), Departamento de Salud de Colorado¹

Clase	Adecuada para	Coliformes (por 100 ml)	Estreptococo fecal (por 100 ml)	O ₂ disuelto	pH	Temp. (°C)	Total sólidos disueltos	Turbidez	Otros
A	Suministro de agua potable; contacto en recreo; pesca en agua fría	<1 000	<200	<20	>6	6.5-8.5	<20 ³	10 JCU ⁴	2
A ₂	Suministro de agua potable; contacto en recreo; pesca en agua templada	<1 000	<200	<20	>5	6.5-8.5	<39 ³	10 JCU ⁴	2
B ₁	Contacto en recreo; pesca en agua fría	<10 000	<1 000	1	>6	6.0-9.0	<20 ³	10 JCU ⁴	2
B ₂	Contacto en recreo; pesca en agua templada	<10 000	<1 000	1	>5	6.0-9.0	<39 ³	10 JCU ⁴	2

¹ Ibid. nota 1 cuadro 3.

² No hay estándares.

³ Hay que evitar cambios abruptos.

⁴ Aumento permitido.

Estándares de calidad de agua

Para fijar los estándares de protección de la calidad del agua ambiental hay dos enfoques: 1) estándares del río, y 2) estándares del effluente. Ambos son necesarios para un manejo eficiente. Los estándares del río proporcionan una meta que se desea alcanzar y una referencia para evaluar la eficiencia del programa de control de la contaminación. Pero no bastan, porque es difícil aplicarlos; el organismo de ejecución no cuenta con base legal para limitar las descargas effluentes. Por lo tanto es imperativo fijar, al mismo tiempo, estándares de descarga effluente. Los conjuntos dobles de estándares de río y de estándares de effluentes posibilitan la administración de un programa. Los estándares del río representan una meta real y considerable para las aguas públicas. Los estándares de effluentes son las metas tangibles para cada punto individual de descarga así como para los reguladores. Si un conjunto dado de estándares del effluente no permite alcanzar los estándares del río, se pueden restringir más los primeros. Por consiguiente, se incluye un cierto grado de empirismo.

Es difícil prescribir estándares de calidad del agua específicos, debido a la singularidad de cada situación ecológico-cultural.

Bases técnicas para estándares de ríos

La base ecológica de los estándares de calidad del agua se deriva de los criterios para la supervivencia sana de las especies bióticas de interés. El cuadro 6 presenta criterios de hábitat y de calidad del agua para varias especies acuáticas que se encuentran en varios sectores del sistema del río South Platte, Colorado. La idea clave es que a cada especie va asociado un *vector* de criterios. Dicho de otro modo, el organismo no sobrevivirá si solo se cumplen uno o varios de los criterios; hay que satisfacer todo el *conjunto de criterios*. En el cuadro 6 se puede hacer una observación importante, pues se muestran dos categorías de criterios: la "calidad del agua" y el "hábitat biológico". Se deduce que de nada sirve fijar estándares de calidad del agua para una determinada especie si el hábitat biológico ambiental no es el que corresponde. Es un enfoque general frecuente en estos últimos años en Estados Unidos, debido más al celo emocional de la ética ambiental que a la razón. Pero la condición anterior refleja el clima político predominante desde 1965.

Aunque el cuadro 6 ilustra el concepto de "vector de criterios" para diferentes biotas, el mismo concepto se puede aplicar a los seres humanos en relación con la salud. Se puede observar esto en los vectores de estándares de los cuadros 4 y 5 para las clases de agua que se consideran potables y adecuadas al contacto con el cuerpo en actividades de recreo. En lo referente a los países latinoamericanos, hay otras muchas consideraciones que deben tenerse en cuenta, y por lo tanto, los cuadros 4 y 5 son únicamente ilustrativos.

A fin de mostrar el concepto de vectores de criterios en un sentido más amplio, el cuadro 7 presenta vectores de criterios para diversos objetivos sociales correspondientes a la parte inferior del río South Platte en Colorado. Se indica si las condiciones actuales de flujo, calidad del agua, etcétera, son satisfactorias (S) o insatisfactorias (I) respecto a la posible realización de los diversos objetivos sociales que presentan. Nuevamente, la idea clave es que no conviene hacer grandes inversiones en la calidad del agua para lograr objetivos sociales que no se pueden alcanzar debido a limitaciones inherentes en otras variables necesarias de la situación. Si por el contrario el vector de variables situacionales asociado a un objetivo social dado contiene suficientes valoraciones "S", sería absurdo permitir que la calidad del agua se deteriorara hasta la situación "I". Por ejemplo, si se construye un cuadro similar para la parte alta del río South Platte (en las montañas) los vectores variables de la situación constan principalmente de condiciones "S". Así, sí es sensato mantener una calidad de agua adecuada. Por consiguiente, las personas encargadas de clasificar ríos deben distinguir entre los ríos y lagos que han de permanecer prístinos y puros y aquéllos en los que se puede tolerar una cierta cantidad de degradación con escaso perjuicio para la naturaleza y para el hombre.

De la anterior exposición se debe concluir que el proceso de fijación de estándares de calidad ambiental del agua exige una perspectiva bastante amplia. Con este punto de vista será posible elaborar un programa factible y operante de manejo de la calidad del agua.

Estándares para aguas servidas

Los dos enfoques básicos que se deben usar para el control de las descargas contaminadas son: 1) carga de aguas servidas, y 2) estándares de la descarga. De acuerdo con el primer enfoque, el organismo regulador evalúa cada contaminante de acuerdo con la cantidad descargada en el río (por ejemplo kilogramos de demanda de oxígeno bioquímico por día). La carga de agua servida por unidad de contaminante, descargada diariamente, se aumenta hasta que la calidad del agua ambiental se adapta a los estándares del río establecidos. Según el segundo enfoque, utilizado en Estados Unidos, se fijan estándares de aguas servidas que en caso de excederse, constituye una violación de la ley. Los estándares deben ser suficientemente estrictos como para hacer que la calidad del agua ambiental se aproxime a los respectivos estándares del río. El concepto básico es que los gastos debidos a las descargas de aguas servidas deben ser absorbidos por el causante, ya que imponen perjuicios externos a los demás. Los estándares de aguas servidas han empezado en Estados Unidos con las especificaciones de las tecnologías de tratamiento de las descargas municipales e industriales, respectivamente. Los estándares de descarga efluente para las categorías de aguas servidas de origen industrial están sometidos a una "producción por unidad" de descarga permitida, aso-

Cuadro 6. Calidad del agua y vectores del hábitat de diferentes organismos
(Hendricks y Bluestein, 1976)

ATRIBUTOS AMBIENTALES										
Biota	Calidad del agua						Hábitat			
	Temperatura en grados Celsius	Nivel de supervivencia por el oxígeno disuelto a 20°C en mg/l	Total de sólidos disueltos en mg/l	Anonho en mg/l	Sólidos en suspensión	Nutrientes	Corriente del río más adecuada	Substrato*	Cubierta de fondo*	Tipos de alimentos
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
(a) PECES										
Peces deportivos										
trucha	23.5 - 28.1 ^d	5.6 ^e	- ^f	0.6	270 ^e	- ^f	fluida	G.R	E	C.P
lucerna	36.4 ^d	5.5 ^e	- ^f	- ^f	100 000 ^e	- ^f	estática	G.R.A	E	C.P
bagre (canal)	33.5 ^d	3.3 ^e	- ^f	37.5 ^f	85 000 ^e	- ^f	estática a lenta	De	T	C.S
otros (rueda)	30.2 - 35.0 ^d	3.3 ^e	- ^f	- ^f	166 000 ^e	- ^f	estática a lenta	G.A.R	E	I.C
Peces resistentes										
minora	31.2 ^d	- ^f	- ^f	6	- ^f	- ^f	estática a fluida	De	N	O.H
carpa	35.7 ^d	3.7 ^e	- ^f	2.0	181 000 ^e	- ^f	estática a lenta	D.M.A.G	N	O.H
otros (peces pequeños)	33.8 ^d	- ^f	- ^f	180 ^f	163 000 ^e	- ^f	estática a fluida	M.G. De	-	-
(b) INVERTEBRADOS										
Sensibles										
Trichoptera	28 ^d	1.0 ^f	- ^f	- ^f	- ^m	- ^m	fluida	R.G ⁿ	R ^d	D.A.F
Libélulas	33 ^d	3 ^f	- ^f	- ^f	- ^m	- ^m	fluida	R.G ⁿ	R ^d	Z.D
otros (diptera)	38.5 ^d	1.2 ^f	- ^f	- ^f	- ^m	- ^m		R.G ⁿ	R ^d	Z.D
Tolerantes										
larvas del sedimento	<35 ^d	- ^f	- ^f	- ^f	- ^m	- ^m	estática	M.S	R ^d	F.B.De
larvas de jefinas	41.8 ^d	- ^f	- ^f	- ^f	- ^m	- ^m	fluida	R.G	R ^d	De
otros (quironómidos)	35 ^d	- ^f	- ^f	- ^f	- ^m	- ^m		R.G.S.M	R ^d	De

	(c) PLANTAS ACUÁTICAS		
	25 - 35 Óptima	0.4 ---	estática
Algas verdes			
Plantas vasculares	22 - 35 Óptima	nada	estática D, M, G, R

*G = grava; R = roca; S = arena; De = ostrícos; M = moluscos.
 BG = especie; T = turbidez; N = no evaluado; Rd = roca y despojos.
 CC = crecimiento; P = pecuero; S = sereno; I = inactivo; O = ostrícos; H = herbívoro; D = zooplancton; Z = zooplancton; B = bacterias.
 Da = densidad.
 dTum significa tolerancia media límite o nivel necesario para medir el 80% de las organismos en un período especificado (por ejemplo 96 h T.Lm).
 La temperatura inferior a los niveles de supervivencia son inferiores, por ejemplo, el nivel de supervivencia de la trucha es 1.0 mg/l a 10°C y 3.0 mg/l a 16°C.
 Estas formas de vida crecen muy bien en agua salada de varios miles de partes por millón de total de sólidos disueltos. Algunas pueden incluso vivir en agua marina. La trucha sobrevive en aguas que tienen 35 000 mg/l de Cl y 11 000 mg/l de NO₃.
 gTum = la trucha, el T.Lm = tierra disueltos. Para la lluvia y otros peces, turbidez final como la arcilla.
 16 mg/l : 15 mg/l de NO₃. A no resultan tocos para la trucha arriba en 24 horas.
 Puede ocurrir una superabundancia de plantas y algas perjudiciales para los peces, el río fosfo rera vez alcanza niveles tóxicos para los peces.
 Como ejemplo de ejemplo, 96 h T.Lm; referencia : T.Lm para la trucha = 30 mg/l de cloruro de amonio.
 Muchos invertebrados sobreviven a > 35°C, pero la población disminuye : la temperatura letal son muy variables según los factores que influyen en la reacción del organismo a la temperatura.
 Mayor dado para la velocidad de corriente de 2 fpa; en ninguna corriente se necesitan 4 mg/l.
 perjudicial porque obstruye las delicadas membranas de las algas.
 La arena media y el sedimento ligero del fondo son medios especialmente perjudiciales para la mayoría de los invertebrados acuáticos.
 reduce la cantidad de luz solar.

Cuadro 7. Vectores de las variables del estado del agua, en relación al cumplimiento de los objetivos sociales; región inferior del río South Platte, Colorado (Hendricks y Bluestein, 1976)

Objetivo	Variables del Estado del Río*							
	Flujo	Calidad del agua	Uso de la tierra adyacente y propiedad de la tierra	Acceso a los ríos	Vegetación ribereña	Biota acuática	Vegetación de las vegas, aves acuáticas y vida terrestre	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Satisfacción:								
Potencial recreativo	I	S	I	I	S	I	S	
Integridad ecológica	I	S	S	S	S	S	S	
Potencial de cinturón verde urbano	I	S	I	I	S	S	S	
Goce estético	I	S	I	I	S	S	S	
Supervivencia:								
Agua municipal	S	S	S	S				
Agua industrial	S	S	S	S				
Agua de irrigación	S	S	S	S				

Nota: Las designaciones son juicios con propósitos ilustrativos. Los criterios se basaron en proyecciones de las condiciones para 1983 y se aplicaron a las flujuras de South Platte desde la parte inferior a Denver hasta Julesburg.

ciada a los diferentes niveles de tecnología de control que incluyen el diseño del proceso en la planta y el tratamiento. El cuadro 8 ilustra los requisitos generales actuales en Estados Unidos. Se han agregado directrices específicas para desechos industriales y municipales. Se han fijado directrices sobre contaminantes industriales para cada industria. El tratamiento secundario de las aguas servidas municipales se interpreta como estándar "30-30", lo cual significa 30 mg/l en demanda de oxígeno biológico y 30 mg/l de sólidos en suspensión. En la actualidad hay una tendencia hacia un estándar "10-10", que implica un tratamiento terciario.

En lo que se refiere a la construcción de represas, debería fijarse el concepto de estándares de descarga a fin de que existiesen requisitos para descargar en la presa agua de las zonas circundantes y con flujos que sean compatibles con los estándares de calidad del agua en la parte inferior del río. Por lo tanto, no debería salir agua del hipolimnio en un período en que sea anaerobio. Además, la temperatura del agua que sale debe ser lo más cercana posible a la de la corriente natural del río, y no hay que permitir cambios repentinos.

Infraestructura para el control continuo de la calidad del agua

Los objetivos de la calidad del agua no se alcanzarán sin la estructura de una agencia reguladora adecuada, respaldada por un financiamiento apropiado y por autoridad legal. La agencia debe encargarse, por ley, de fijar estándares en el río, determinar estándares de descarga de aguas servidas, administrar un programa de permisos de descarga de aguas servidas, vigilar la calidad del agua ambiental y el cumplimiento del

Cuadro 8. Requisitos* sobre la descarga de aguas servidas, de acuerdo con PL 92-500, Sección 301

Año 1	Descargas de desagües industriales 2	Descargas de desagues municipales 3
1977	Mejor tecnología practicable	Tratamiento secundario
1983	Mejor tecnología disponible	Mejor tecnología practicable
1985	Ninguna descarga de contaminantes	Ninguna descarga de contaminantes

* La "descarga cero" para 1985 está definida como meta en la ley, en la sección 101; no es un requisito específico.

permiso de descarga de aguas servidas, expedir emplazamientos por violaciones a los permisos, financiar la educación de profesionales, subvencionar proyectos de investigación, realizar investigaciones de campo, etcétera.

En resumen, la vigilancia de la calidad del agua es un programa continuo y activo. Por esta razón, debe tener perspectivas amplias y una infraestructura de ejecución proporcional al esfuerzo *ad hoc* mostrado por unas cuantas personas. Aunque una infraestructura eficiente exige años para su consecución, el elemento más importante para alcanzarlas es el compromiso político continuo de hacerlo.

Referencias

- Colorado Department of Health, *Water Quality Standards for Streams and Lakes*, Denver, 1971.
 Colorado Department of Health, *Water Quality Standards for Streams and Lakes*, Denver, 1974.
 Hendricks, D. W. y M. W. Bluestein. Response of the South Platte to Effluent Limitations, *Journal of the Environmental Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, agosto 1976.
 Vlachos, E. y D. W. Hendricks. *Technology Assessment for Water Supplies*, Water Resources Press, Fort Collins, Colorado, 1977.

Bibliografía comentada

No hay ninguna referencia completa para cualquiera de las áreas discutidas en la sección de la calidad del agua. Se recomienda más bien una pequeña biblioteca que cubra las diversas facetas de cada tema. Los libros enumerados a continuación pueden proporcionar orientaciones. Se han seleccionado entre un gran número de libros e informes que componen la literatura relacionada con los temas.

1. Administración del control de la calidad del agua.

McGayhey, P. H. *Engineering Management of Water Quality*, McGraw-Hill, Nueva York, 1968.

Este libro presenta una buena orientación general sobre el tema.

Camp, T. R. y R. L. Meserve, *Water and Its Impurities*, 2a. edición, Dowden, Hutchinson, and Ross Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, 1974.

Es un excelente libro de consulta, práctica y general, sobre el tema de la calidad del agua. Trata los principios básicos de los procesos químicos y físicos pertinentes, estándares que han de usarse, y problemas tales como la dispersión y mezcla de las descargas de aguas servidas, la desaparición gradual de bacterias, perfiles de oxígeno, etcétera. Explica y utiliza principios en relación con problemas prácticos, características muy típicas de Camp.

2. Criterios de la calidad del agua

McKee, J. L. y H. W. Wolf. *Water Quality Criteria*, 2a. edición, Publicación N° 3-A, California Water Quality Control Board, Sacramento, California, 1963.

Es un libro de consulta que ofrece información sobre los criterios acerca de la mayoría de los parámetros de calidad de agua.

3. Valores sociales:

Vlachos, F. y D. W. Hendricks, *Technology Assessment for Water Supplies*, Water Resources Press, Fort Collins, Colorado.

Este libro proporciona una orientación y una base racional que conecta el desarrollo de un proyecto a los valores sociales.

Technical Committee of the Water Resources Centers of the Thirteen Western States, *Water Resources Planning, Social Goals and Indicators: Methodological Development and Empirical Test*. Utah Water Research Laboratory, Logan, Utah, 1974.

Este documento es un informe sobre un proyecto de investigación interdisciplinario que trata los temas de los valores y las metas en relación al desarrollo.

James, L. F. y R. R. Lee. *Economics of Water Resources Planning*, McGraw-Hill, Nueva York, 1971.

Trata las bases racionales de la economía aplicadas a cuestiones del desarrollo de recursos.

4. Diseño de modelos para la calidad del agua:

Shen, H. W. (ed.) *Modeling of Rivers*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1979.

Shen es el editor de un gran tratado sobre mecánica fluvial. Hay 4 capítulos prácticos sobre modelos para la calidad del agua, que también dan orientaciones sobre el tema; se enumeran a continuación:

- 1) Sanders, T. G., "Data Collection Planning and Survey of Water Quality Models", (capítulo 16)
- 2) Krenkel, P. A. y V. Novotny, "River Water Quality Model Construction", (Capítulo 17)
- 3) Krenkel, P. A. y R. J. Ruane, "Basic Approach to Water Quality Modeling", (capítulo 18)
- 4) Hendricks, D. W., "Application of Water Quality Models", (capítulo 19).