

NUEVOS Y VIEJOS CONCEPTOS EN LA PLANEACION Y EVALUACION DE PROYECTOS HIDRAULICOS (*)

COLEGIO INGENIEROS DE CAMINOS
BIBLIOTECA

Por MANUEL DIAZ-MARTA
Ing. de Caminos, Cánales y Puertos

"Todos los ríos van al mar,
pero el mar nunca se llena;
al lugar de donde provienen las aguas
a ese mismo retornan."

Eclesiastes, Cap. 1, Vers. 7.

La concepción y evaluación de proyectos hidráulicos han experimentado importantes cambios en los últimos decenios, como consecuencia del reconocimiento de la influencia de dichas obras en las modificaciones del medio ambiente. La evaluación clásica antepone el objetivo económico a los demás. Básicamente comprendía dos clases de estudios: el puramente económico y el de los medios técnicos para alcanzar las metas económicas. En ocasiones, los otros objetivos merecían alguna atención gracias a la intuición social y ecológica de algunos proyectistas.

En el artículo se consideran la evaluación técnica, incluyendo el aspecto hidrológico, hidráulico, constructivo y de aprovechamiento del agua; la evaluación económica, considerando el efecto de la obra en el desarrollo económico, nacional y regional, y la evaluación ecológica, examinando la influencia del proyecto en los ecosistemas afectados, incluso desde el punto de vista social y humano. Se presentan ejemplos reales correspondientes a obras de modificación de costas, construcción de un embalse y trasvase de cuencas, de gran actualidad en los últimos años.

Las ideas que predominan en la concepción de los proyectos hidráulicos han experimentado cambios muy sensibles durante las últimas décadas. Cada vez se reconoce mayor importancia al papel que dichas obras desempeñan en las modificaciones del medio en que el hombre se desenvuelve y esto obliga a examinar sus efectos con una perspectiva muy amplia. Por otra parte, los criterios tradicionales que han servido para evaluar y tomar decisiones sobre la ejecución de proyectos hidráulicos resultan difíciles de aplicar, y si se aplican pueden conducir a soluciones erróneas o perjudiciales. Para juzgar los méritos de un proyecto, ya no bastan las consideraciones técnicas y económicas; es preciso observarlo desde otros ángulos visuales muy importantes a fin de prever en lo posible sus consecuencias en el medio ambiente y en la sociedad humana. La evaluación de proyectos hidráulicos se ha convertido por estos motivos en una tarea muy compleja.

Este panorama más dilatado con que ahora se contemplan las obras hidráulicas, especialmente las de grandes proporciones, obliga, a su vez, a efectuar estudios técnicos y económicos más precisos que en otros tiempos y con modalidades que antes merecían poca atención o no se tenían en cuenta.

En un artículo publicado en esta Revista (1), dábamos algunos ejemplos de alteraciones causadas por las obras hidráulicas en los ecosistemas de que forman parte. Podrían citarse muchos más pero no es necesario por la difusión que alcan-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de abril de 1973.

(1) "Los estudios ecológicos en la ingeniería hidráulica". M. Díaz-Marta. Revista de Obras Públicas, diciembre 1970.

zan hoy los problemas ambientales. Ejemplos de esta clase aparecen constantemente en las publicaciones técnicas y aun en la Prensa ordinaria y están en la mente de todos. Estos ejemplos muestran que durante muchos años de intensa actividad constructiva, ésta se caracterizó por la imprevisión de los males que podía acarrear. Pero las consecuencias adversas que han tenido bastantes obras hidráulicas indican que sus efectos "indirectos" o "secundarios" no deben permanecer ignorados. Deben, por el contrario, ser objeto de una meticulosa investigación desde el momento en que se empieza a idear y planear un proyecto hidráulico.

NORMAS DE EVALUACION

Los países de mayor desarrollo industrial son los que más han padecido, y por tanto los más escarmentados a consecuencia de proyectos hidráulicos concebidos con metas exclusivamente económicas. Por eso, en su esfuerzo para evitar la repetición de los mismos errores en el futuro, intentan establecer nuevas pautas para su evaluación.

En los Estados Unidos, el "Water Resources Council" ha tratado de encontrar un procedimiento para evaluar proyectos en el que a cada uno de sus objetivos se le asigne su justo valor. Dentro del enfoque plural propuesto por su comisión de trabajo, destacan cuatro importantes objetivos: desarrollo económico nacional, calidad del medio ambiente, calidad de la vida humana y desarrollo regional.

La evaluación clásica antepone el objetivo económico a los demás. Básicamente comprendía dos clases de estudios: el puramente económico y el de los medios técnicos para alcanzar las metas económicas. En ocasiones los otros objetivos merecían alguna atención gracias a la intuición social y ecológica de algunos proyectistas o de los encargados de juzgar los proyectos, pero esto no era lo acostumbrado.

En la exposición que sigue, consideramos los siguientes aspectos en la evaluación de proyectos hidráulicos:

- Evaluación técnica, incluyendo el aspecto hidrológico e hidráulico, el de las construcciones de ingeniería y el de la técnica del aprovechamiento del agua.
- Evaluación económica, considerando el efecto de la obra en el desarrollo económico, tanto desde el punto de vista nacional como desde el regional.
- Evaluación ecológica — incluyendo en esta denominación la ecología social y humana —, que examina la influencia de la obra en los ecosistemas que resultan afectados por la misma, para deducir sus efectos en la calidad del medio ambiente y en el bienestar de la sociedad.

EVALUACION TECNICA

En los proyectos hidráulicos de cierta envergadura, los estudios de hidrología que les sirven de base no pueden limitarse al recuento de volúmenes disponibles. El calificativo "sobrantes" que se da a veces a esos volúmenes indica una concepción del empleo del agua que ya no puede mantenerse. El agua que corre por ríos y arroyos, la que fluye por los intersticios del terreno y la que retienen los de-

pósitos superficiales o subterráneos raras veces puede considerarse sobrante. Aparte de su valor potencial como recurso utilizable, desempeña funciones importantísimas en el equilibrio aparente de la naturaleza.

El agua, además, es hoy el más disputado de los recursos naturales, pero a diferencia de otros, resulta relativamente fácil de recircular y emplear en forma sucesiva. La regulación del régimen de la corriente, las modificaciones del cauce y la utilización consuntiva de las aguas pueden alterar las condiciones naturales de la cuenca o cuencas afectadas por estos cambios. Por todas estas razones, el balance hidráulico debe formularse teniendo en cuenta no sólo las aportaciones de agua, sino las derivaciones y extracciones sucesivas de las corrientes y las consiguientes recuperaciones.

El valor total de empleo de un metro cúbico de agua tomado de una corriente para uso consuntivo puede estimarse en forma simplificada, considerando que si r_i es el coeficiente de retorno o proporción del volumen de agua que vuelve al cauce, el primer usuario empleará 1 m^3 , el segundo $1 \times r_1$, el tercero $1 \times r_1 \times r_2$ y el de orden n , $1 \times r_1 \times r_2 \times \dots \times r_{n-1}$.

La suma de estas cantidades expresaría el volumen de empleo (VE) del metro cúbico de agua:

$$VE = 1 + r_1 + r_1 r_2 + r_1 r_2 r_3 \dots + r_1 r_2 r_3 \dots r_{n-1}$$

Introduciendo la simplificación de que todos estos valores r sean aproximadamente los mismos, resultaría:

$$VE = 1 + r + r^2 + \dots + r^{n-1} = \frac{1 - r^n}{1 - r}$$

En el caso que el coeficiente de retorno fuera $r = 0,6$, el volumen de uso de cada metro cúbico no podría exceder de $\frac{1}{1 - 0,6} = 2,5$.

En las cuencas con aprovechamientos hidráulicos de importancia — construidos o en proyecto — respecto a sus recursos totales, es conveniente valerse de un modelo matemático para calcular el efecto de cada utilización de agua en el resto del sistema hidráulico. El modelo servirá, además, para determinar la combinación de aprovechamientos y ordenar la explotación de los mismos a fin de alcanzar el mayor rendimiento del conjunto.

Evaluación desde el punto de vista constructivo.

La evaluación técnica de los proyectos en su aspecto constructivo es la que menos ha cambiado. Las normas para examinar la adecuación técnica, seguridad, funcionalismo y belleza de las obras propuestas son las de siempre, pero la perfección exigida es hoy mayor. Esto se explica porque hay más y mejores variantes técnicas para escoger la más apropiada y porque el perfeccionamiento de los medios de análisis y cálculo y las ventajas del trabajo en equipo permiten elaborar proyectos de más alta calidad.

Asignación de volúmenes de agua.

El cálculo de las necesidades de agua se suele basar en la estimación de la población para un año determinado, 1980 a 2000 por ejemplo, y del volumen de agua a consumir por habitante o por unidad de superficie o de producto, interviniendo también otros supuestos del desarrollo económico. De esas estimaciones es fácil deducir la cantidad de agua requerida para unos u otros consumos o para su utilización en el mismo cauce.

Este cálculo da lugar a muchos errores, porque implica que continuarán los mismos precios y las mismas preferencias en el uso del agua, que no habrá cambios tecnológicos y que perdurarán las actuales ineficacias y fallas en su empleo económico.

Es perfectamente explicable que los cálculos de necesidades se consideraran suficientes en el pasado. Todavía en el primer tercio de este siglo, los recursos hidráulicos de la mayor parte de los países estaban casi sin utilizar. Algunos de gran extensión los consideraban poco menos que inagotables. La meta ideal era explotarlos económicamente y lo más pronto posible. Hoy el panorama es completamente distinto. Hay muchas posibilidades técnicas para el empleo económico del agua, pero la que está sin utilizar va siendo cada vez más escasa y está muy disputada. Uno de los principales problemas de hoy es asignar esos recursos repartiéndolos equitativamente entre las actividades que demandan agua, tales como regadíos, abastecimientos urbanos y rurales, producción de energía eléctrica, refrigeración y procesos industriales, navegación comercial y deportiva, pesca, recreo y esparcimiento y mantenimiento de la limpieza y calidad de las aguas. Otro problema aún más delicado es el de distribuir los recursos hidráulicos entre diferentes regiones en las cuencas donde se originan y entre esas cuencas y otras adyacentes. La asignación satisfactoria de estos recursos depende, como veremos, del análisis correcto de los proyectos, tanto desde el punto de vista económico como del ecológico.

EVALUACION ECONOMICA

Descontando la factibilidad técnica, lo que más se ha tenido en cuenta para decidir la construcción de un proyecto ha sido la estimación de su rendimiento económico. Se piensa ahora que la relación del beneficio con el costo de la obra, que se ha venido aplicando como norma general de evaluación, responde a un criterio demasiado simplista, incapaz de reflejar las consecuencias económicas de un proyecto de medianas o grandes proporciones. En la mayoría de los casos, los resultados de aplicar este criterio son muy discutibles. Por eso, aunque parezca razonable el criterio de basar las decisiones en esta relación, se considera hoy que tiene muchos defectos y está sujeto a revisión en todo el mundo (1).

Fulcher (2) ha expuesto un estudio crítico de este método que consideramos muy enjundioso. Según el criterio de evaluación basado en el cociente beneficio-costo, la condición para que un proyecto se considere rentable es que el incremento

(1) Charles W. Howe y K. William Easter: "Interbasin Transfer of Water-Economic Issues and Impacts". Publicado para Resources for the Future Inc., por The Johns Hopking Press. Baltimore and London.

(2) Gleen D. Fulcher: "Economic and Institutional Aspects of Water Shed Managment". Ponencia presentada al Seminario Latinoamericano de Ordenación de Cuencas, 1971.

de los beneficios que se derivan del proyecto para la economía nacional, sobrepase al incremento de los costos correspondientes. Pero los procedimientos para estimar el valor de esa relación son numerosos y nunca se ha podido llegar a un acuerdo sobre los mismos.

Hay, según Fulcher, muchos postulados dudosos en cualquier análisis de beneficios. Tales son el período de amortización del capital invertido, el interés anual de ese capital y la decisión de incluir en el cálculo solamente los beneficios y costos primarios (originados directamente por el proyecto) o también los secundarios o indirectos (inducidos por su realización y operación).

Si el beneficio y el costo se pudieran calcular correctamente, la relación entre ambos reflejaría la eficacia del proyecto desde el punto de vista de la economía nacional. Es decir, indicaría lo que el producto bruto nacional puede aumentar a causa del proyecto. Aparte de la inexactitud de ese cálculo, se estima hoy que los proyectos hidráulicos pueden tener objetivos de tanta o más importancia que el aumento de dicho producto bruto, por lo cual se cree que dicha relación y en general la evaluación puramente económica ha influido demasiado en las decisiones políticas.

Estimación de beneficios y costos.

El cálculo de los posibles beneficios se complica porque éstos se originan cuando los usuarios, por la asociación de diferentes actividades y por las relaciones del mercado, combinan el agua con otros muchos insumos, tales como abonos, semillas, maquinaria, materias primas combustibles, transporte, trabajo humano, etc., para obtener los productos finales o prestar los servicios requeridos. Otro factor de complicación estriba en la multiplicidad de usos sucesivos a que se presta el agua.

En contra del concepto de necesidades o requerimientos, está el de la demanda económica para nueva provisión de agua. Esta se relaciona con el aumento de beneficios netos que se generaría, para diferentes volúmenes de agua utilizada, por cada metro cúbico adicional.

Conviene aclarar que para obtener el ingreso neto hay que descontar del total de ingresos, el costo de los insumos que se asocian con el agua para obtener el producto o el servicio. Para que se cumpla la condición de eficacia económica, se supone que estos productos se proveen en cantidades ajustadas con su precio, de modo que la asociación de factores productivos produzca el máximo beneficio.

Esta condición de máximo puede determinarse como sigue: Si la función de producción es

$$y = f(x_1, x_2, \dots, a),$$

en la que y representa el producto, x_1, x_2, \dots los diferentes insumos y a el insumo de agua, y si p_y representa el precio del producto final y p_1, p_2 y a representan los precios de los insumos x_1, x_2, \dots y del agua, el beneficio neto valdrá:

$$BN = y p_y - (x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + a p_a).$$

La condición de máximo requiere que se empleen cantidades x_1, x_2, x_3, \dots, a , ta-

les que las derivadas parciales del beneficio neto con respecto a estas variables sean cero, o sea:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} p_y - p_1 = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} p_y - p_2 = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial a} p_y - p_a = 0$$

Estas condiciones de máximo indican que el volumen de cada insumo aumenta hasta que llega a un punto en que el producto adicional originado por la unidad de cada insumo equivale al precio de éste. En una economía totalmente competitiva, el aumento del producto equivaldría al precio del insumo.

En una economía donde no se cumplan las condiciones ideales de ajustes de precios y flexibilidad, es preciso calcular los beneficios y costos secundarios. Por beneficios secundarios se entienden los aumentos en los ingresos netos de los factores de producción (tierra, trabajo y capital) que a través del mercado intervienen en actividades relacionadas con el proyecto como proveedoras de insumos o como procesadoras de los productos obtenidos con el proyecto. Los costos secundarios equivalen a las disminuciones de ingresos correspondientes a los factores de producción que sirven a actividades en las cuales se reducen las inversiones por causa del proyecto, o que a consecuencia del mismo quedan desplazadas del mercado. También hay que considerar la anulación o disminución de otras actividades por la misma esencia del proyecto, tales como el cese de producción agrícola en las zonas inundadas, la disminución de producción en otras actividades al disminuir el agua que emplean a consecuencia de la realización de un determinado proyecto, los gastos de depurar el agua contaminada por los emisarios de drenajes urbanos e industriales, los perjuicios originados por la salinización de las aguas de un río con las procedentes de un sistema de riego, etc.

El cálculo de beneficios y costos no excluye otros análisis de la incidencia del proyecto que resultan difíciles de expresar en términos económicos. Tales son los correspondientes a los aspectos ecológicos y estéticos y en general a la ordenación de una zona para mejorar la calidad de la vida humana.

Cómputos económicos en los trasvases de cuencas.

El análisis de un proyecto que comprenda el trasvase de una cuenca hidráulica a otra requiere ampliar los conceptos anteriores sobre costos y beneficios. La primera condición que debe cumplir el sistema proyectado para que rinda beneficio económico al país es que la suma de sus costos directos e indirectos en todas las regiones afectadas sea inferior a la suma de los beneficios directos e indirectos en las mismas. Estas regiones afectadas son la región de donde proviene el agua o exportadora, la región de tránsito por donde pasa el acueducto, la que recibe el

agua o importadora y las otras regiones del país afectadas económicamente por el acueducto.

Siguiendo las formulaciones de Howe y Eastern, llamemos CT al coste de la mejor solución de trasvase, BD y BS a los beneficios directos y secundarios, CD y CS a los costes de esas mismas categorías y marquemos esos símbolos con subíndices X si son beneficios y costes de la región exportadora de agua, subíndice I si representan los de la región importadora, T si corresponden a las comarcas en tránsito y C si se refieren a las regiones que resienten la competencia de la zona que se beneficia con el proyecto. La condición primera vendrá expresada por:

$$CT + (CD_X + CS_X) + CS_C < (BD_I + BS_I) + (BD_T + BS_T).$$

La segunda condición que debe cumplir el sistema de trasvase es que el costo neto de llevar el agua a la región importadora y a la región de tránsito sea menor que el de las mejores soluciones de suministrar agua a esas regiones sin recurrir a trasvases. Esta condición, llamando CP_I y CP_T a los costos de las provisiones de agua sin trasvases a las regiones importadora y de tránsito, se representa por:

$$CT + (CD_X + CS_X) - (BD_T + BS_T) < CP_I + CP_T.$$

El costo neto de trasvase, representado en el primer miembro de la desigualdad, se obtiene restando de sus componentes directos e indirectos los beneficios obtenidos en la región de tránsito.

Para analizar debidamente la incidencia del trasvase en la economía nacional es necesario compararla con la de otro proyecto hidráulico o grupo de proyectos en otras regiones de los que puedan esperarse análogos efectos económicos. Esto implica una tercera condición, no especificada por Howe y Eastern: que el costo neto de la transferencia de agua sea inferior al del proyecto o grupo de proyectos a realizar en otras regiones, que reporten beneficios equivalentes para la economía nacional.

En el caso de trasvases, los proyectos hidráulicos deben cumplir con otras condiciones que no son fácilmente cifrables, pero que son tan importantes como las económicas.

Nuevas tendencias en el uso de las obras hidráulicas.

La determinación de cómo deben distribuirse los recursos hidráulicos entre las zonas y los usuarios que se disputan su utilización ha pasado a ser uno de los problemas más arduos de toda planeación del desarrollo y que más atención requieren de parte de los hidrólogos, ingenieros hidráulicos y especialistas en economía del agua.

En el supuesto de disponer de un volumen de agua prefijado, susceptible de ser repartido entre varios empleos, la condición para alcanzar la mayor eficacia económica sería que el agua se distribuyera entre los distintos usos, de modo que su contribución neta al ingreso nacional fuera la máxima posible. Esto requiere asignaciones de agua para cada tipo de aprovechamiento, tales que los aumentos de ingresos obtenidos al incrementar en un metro cúbico el agua empleada sean equivalentes para todas las clases de aprovechamiento.

El ingreso marginal por metro cúbico de agua empleado varía extraordinariamente según el destino que se le asigne. Como muestra, reproducimos los valores dados por Young y Martin para el aumento de este ingreso en Arizona, en el año 1968, por cada 1.000 m³ de agua empleada en diferentes producciones:

PRODUCCION	Aumento del ingreso en dólares por 1.000 m ³ de agua empleada
Granos	11
Forrajes	15
Cultivos intensivos de alto precio	65
Ganadería y agricultura	1.580
Proceso de productos agrícolas	1.240
Minería	2.630
Metalurgia primaria	1.370
Manufacturas	68.370
Comercio, transporte y servicios	49.280

Los precios asignados para cada servicio o consumo de agua configuran, en cierto modo, su distribución en una comarca, pero hay preferencias, no reflejadas en los precios, que deciden, finalmente, cómo se reparte el agua entre sus usuarios.

Estas preferencias en el uso del agua y los mismos fines de muchas obras hidráulicas están cambiando rápidamente. En Holanda, las tierras rescatadas con la desecación del Zuiderzee se dedican a la producción agrícola, pero los terrenos últimamente desalinizados con las obras del Delta no se están destinando a ninguna clase de producción, sino a proveer los espacios libres para recreo y esparcimiento que el país necesita. Esto se justifica porque las dunas y las planicies a orillas de los lagos de agua dulce creados con los diques de cerramiento del Delta constituyen lugares de excepción, y además porque el aumento de productividad logrado con la revolución verde hace innecesario seguir extendiendo las superficies de cultivo.

El empleo de los ríos, lagos, estuarios y bandas costeras como atractivo turístico tiene hoy en todo el mundo mucho más valor que hace unas décadas. También se da mayor importancia a los aprovechamientos de agua para el consumo urbano y la industria, decreciendo relativamente la de los riegos.

La navegación interior, después de una declinación temporal por la competencia del ferrocarril y la carretera, vuelve a cobrar relevancia gracias a innovaciones técnicas recientes, que la hacen recobrar sus ventajas sobre las otras clases de transporte.

La regulación del régimen hidráulico de los ríos, la supresión o atenuación de las inundaciones y la previsión de estiajes y crecidas siguen siendo finalidades destacadas de las obras hidráulicas. En los últimos años, la conservación y mejoramiento de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas ha pasado a ser uno de sus objetivos más señalados. Los beneficios económicos y de todo orden que se logran conservando limpias las aguas son de valor inestimable. En cambio, la superedificación de los proyectos hidráulicos a objetivos estrictamente económicos con ol-

vido de sus consecuencias ecológicas, especialmente en lo que se refiere a la contaminación y a la destrucción del suelo, puede causar daños irreparables. Como caso notorio, en el que han entrado en conflicto unas y otras finalidades, puede citarse el del canal de navegación a través de la península de Florida, cuya construcción fue suspendida porque la excavación exigida por el canal para el paso de barcos de gran calado llegaría a las capas acuíferas, que alimentan de agua potable a gran parte de la península, y la inevitable intrusión de agua marina acabaría por contaminarlas.

Economía en el empleo del agua.

La escasez y la carestía del agua obligan a ahorrar en el consumo de este líquido. Los regadíos en los países áridos y semiáridos suelen consumir mucha más agua que los otros aprovechamientos reunidos. Por eso, y por la mayor productividad de otros empleos, se procura reducir las pérdidas en los sistemas de distribución por gravedad, y se extienden cada vez más los riegos por aspersión. Además, en muchos países se realizan investigaciones y ensayos con el fin de perfeccionar los cultivos de regadío y economizar en el consumo de agua (1).

En algunas zonas del norte de Africa, donde la escasez de agua para cubrir las necesidades de los cultivos es extremada, las investigaciones que se realizan tienen como objetivo principal obtener el máximo rendimiento por metro cúbico de agua empleado; no por hectárea regada ni por jornadas de trabajo, y ni siquiera por unidad de capital invertido, a pesar de que también están muy escasos de este último recurso.

Entre los procedimientos más ingeniosos y remuneradores de ahorrar agua en cultivos intensivos de zonas áridas figuran los enarenados que se practican en las costas de Granada y Almería y en las islas Canarias. Consisten fundamentalmente en cubrir las parcelas de cultivo con un manto de arena gruesa —o de cenizas volcánicas en algunas partes de Canarias—, el cual, al romper la ascensión capilar del agua, evita su evaporación y la conserva en el terreno. Además, el manto de material permeable fija alguna parte de la humedad que aportan las brisas y protege la tierra de las heladas y los fuertes calores. Los terrenos así preparados se han dedicado con éxito a cosechas de alto precio. Todo hace suponer que la práctica de los enarenados se pueda extender con resultados satisfactorios a otras costas áridas. Como un ejemplo pueden citarse las del norte de Chile y sur del Perú, donde, no obstante, la falta de pluviosidad, hay humedad en el ambiente que puede ser retenida por el manto de arena e incorporada al suelo.

Recirculación del agua.

La recirculación del agua permite, más que cualquier otro expediente, incrementar en gran escala su empleo utilitario y ahorrar en su consumo. En el caso de regadíos sucesivos en un mismo valle, con la simple recuperación natural por in-

(1) A propósito de este tema, pueden consultarse las publicaciones del VII Congreso de Riego y Drenaje, celebrado en abril de 1968, en Méjico, que versó extensamente sobre la economía del agua en los regadíos.

filtración o escurrimiento, se puede utilizar, como ya hemos visto, más del doble del caudal extraído. Lógicamente, el potencial de reutilización de las aguas de un río depende de su longitud, de la rapidez con que el agua retorna al cauce y de las mermas por evapotranspiración o por filtración a otras cuencas.

Si las extracciones de agua son para empleos no consuntivos o de poco consumo, como en los lavaderos de mineral, refrigeración de máquinas y otros usos industriales, la misma corriente de agua puede dar lugar a múltiples empleos. Esta es una de las razones de que muchas actividades fabriles se hayan radicado en el pasado junto a los ríos de caudal permanente. Aún hoy, a pesar de que tanto el agua como la energía pueden transportarse a distancia, los valles de esos ríos reúnen condiciones preferentes como ejes de desarrollo industrial.

En los aprovechamientos hidroeléctricos, la repetición del uso del agua no depende del caudal, sino de los desniveles no utilizados. En cuanto a la navegación, la pesca, los usos recreativos y los deportes, no puede hablarse con propiedad de repetición de usos, sino de intensidad de los mismos. Esta intensidad, difícil de valorar en términos económicos, depende de la magnitud del río o lago, de su riqueza piscícola, de la belleza y amenidad de sus orillas y de la facilidad de transportes.

El empleo repetido del agua puede lograrse, o aumentarse considerablemente donde ya existe, por medio de la recirculación artificial, la cual se practica cada vez más en las zonas industriales y urbanas.

En algunas de estas zonas en que los recursos naturales están ya muy explotados, se predice que no se harán más extracciones de los cursos y yacimientos de agua. Más bien, se recirculará la ya extraída. Los "puntos" de la discusión sobre "Usos y Reusos del Agua", publicados en "Ekistics" (octubre 1970), refieren casos notables de recirculación. Los sistemas cerrados en la industria son perfectamente posibles. Desde hace años se aplican en dos grandes acerías de Chicago. En Chinook, Kansas (Estados Unidos), el agua se recirculó nueve veces durante la sequía de 1957, poniéndose al final de color ámbar, pero nadie se puso enfermo. Pueden citarse otros muchos casos de recirculación en los sistemas urbanos; sin embargo, la realidad es que las aguas residuales recién depuradas raras veces se aplican para consumo urbano. Se utilizan más bien para riego, en general, mezcladas con aguas de otras procedencias. Lo común es el vertido al río más cercano, en el cual sus caudales, si se verifica una depuración natural, pueden servir para nuevos aprovechamientos urbanos.

Las aguas residuales ya tratadas se utilizan con éxito en la recarga de mantos acuíferos. Al pasar por estas formaciones filtrantes mejoran sus condiciones físicas y sanitarias, y quedan aptas para el consumo. Las formaciones así recargadas suelen explotarse por medio de pozos, o bien indirectamente, extrayendo el agua de los cauces a donde descargan los acuíferos. La ventaja de la recarga de acuíferos como etapa intermedia en la recirculación de aguas servidas radica en su economía, en la eficacia de la depuración y en la confianza que produce en los consumidores.

La recirculación con recarga de acuíferos se practica en gran escala en Long Island, New York. En esta isla, de 3.640 km², poblada por más de seis millones de habitantes, la precipitación anual es del orden de 4.000 millones de metros cúbicos, de los cuales unos 2.500 millones ingresan al almacenamiento subterráneo. La extracción de agua es intensa, y para evitar el descenso excesivo de los acuíferos se vigilan sus niveles y se alimentan artificialmente con agua de distintas proceden-

cias. Una buena parte de la que corre superficialmente se recoge en las cunetas de las calles, autopistas y carreteras de la isla y se infiltra en los acuíferos. Cuando éstos yacen a poca profundidad, se construyen pozos anchos, con la hondura necesaria para una rápida difusión. También se inyecta a los acuíferos el agua procedente de la refrigeración de máquinas y de otros empleos no contaminantes, así como la que proviene del tratamiento de efluentes cloacales. Esta inyección restablece el equilibrio del sistema, ya que las aguas de los efluentes, que antes iban al mar, vuelven ahora a los yacimientos de donde fueron extraídas.

Las formas en que puede efectuarse la recirculación y recuperación del agua son muchas y muy variadas. Los recursos que brindan la naturaleza, los diferentes métodos de depuración física, química y bacteriológica que pueden emplearse y los sistemas mecánicos que pueden idearse para el manipuleo del agua ofrecen al proyectista un amplísimo campo donde mostrar su competencia y desarrollar su imaginación y su ingenio.

EVALUACION ECOLOGICA

La experiencia de unas décadas de intensa actividad en obras hidráulicas ha demostrado que sus efectos colaterales o indirectos deben ser objeto de estudio. Las alteraciones del medio ambiente, ya sean beneficiosas o perjudiciales, a que dan lugar estas obras, obligan a investigar y analizar su incidencia en los ecosistemas con los que están relacionados. Estos estudios son imprescindibles en la etapa de planeación y elaboración de los proyectos, pero más todavía al revisarlos para decidir si se han de realizar y cómo deben realizarse.

Hagan y Roberts han catalogado en un trabajo reciente (1) los efectos ecológicos de un proyecto típico, con embalse y derivación de aguas, basándose en la experiencia de California. Dichos autores enumeran los cambios ocasionados aguas arriba de la presa de embalse, entre ésta y el lugar de derivación y aguas abajo de este punto. Sus listas son de valor, como recordatorio a la hora de inventariar las consecuencias que pueden derivarse de un sistema hidráulico del tipo indicado. Sin embargo, tomadas como pautas al emprender un análisis ecológico, pueden distraer la atención de los efectos de capital importancia. Por otra parte, cada ecosistema afectado por una obra hidráulica constituye un caso único. De aquí que convenga concentrar el esfuerzo en la investigación de las interrelaciones que lo caracterizan.

La diversidad de las alteraciones de cada ecosistema para cada obra se muestra bien aparente en los tres ejemplos que siguen. En ellos se resumen las actividades y alteraciones ambientales originadas por las obras, o a que pueden dar lugar éstas, y se esquematizan, en forma por demás simplificada, los procesos de cambio en cada ecosistema.

Ejemplo de alteraciones en las costas ocasionadas por la construcción de un puerto.

El caso de las costas de Veracruz, mencionado en nuestro artículo anterior (2),

(1) "Ecological Impacts of Water Projects in California". Robert M. Hagan y Edwin B. Roberts. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proc. ASCE, septiembre 1971.

(2) "Los estudios ecológicos en la ingeniería hidráulica". M. Díaz-Marta. Revista de Obras Públicas, diciembre 1970.

es bien demostrativo de los efectos que puede causar la construcción de las obras de abrigo de un puerto sobre las playas y zonas costeras inmediatas. Los fuertes vientos que baten la costa, formada por arenas muy finas, magnifican dichos efectos, según ha podido comprobar el autor al intervenir durante muchos años en las obras emprendidas para corregirlos (1).

Las obras de abrigo del puerto se construyeron durante el pasado siglo, terminándose la escollera de unión del islote de Ulúa con la tierra firme hacia 1898. El cierre del antiguo fondeadero —protegido tan sólo por el castillo de San Juan de Ulúa— con las escolleras creó un puerto seguro y abrigado, pero interrumpió el acarreo litoral que tenía lugar a través del canal entre el islote y la costa, y produjo acumulación de arenas en la playa al NO. del puerto y la disminución consiguiente en la playa, situada al SE. del mismo (fig. 1).

Esta interrupción había de producir una inestabilidad en la costa y zonas inmediatas que ha venido afectando a la ciudad de Veracruz hasta hoy. El crecimiento de la playa al NO. de la escollera, expuesta directamente a los vientos del Norte, determinó un aumento del acarreo eólico de arenas procedentes de esa playa y, por tanto, de la actividad de las dunas, las cuales antes vegetadas y relativamente estables, se convirtieron en áridas y vivas. A su vez, la actividad dunaria ocasionó calamidades tales como la invasión de arenas en calles, instalaciones ferroviarias y otros lugares de trabajo y el cegamiento de desagües naturales, con el consecuente deterioro de las condiciones sanitarias.

Tal como se indica en el esquema, para contrarrestar estos efectos perjudiciales se realizaron, hacia 1908, los primeros trabajos de fijación de dunas en la playa norte. Estos fueron varias veces interrumpidos para reanudarse, ya con carácter de permanencia, en la década del 20. La duna artificial creada junto a la extensa playa sirvió para fijar las arenas en la banda de terreno inmediata, impidiendo su vuelo prolongado. Como consecuencia, volvieron las dunas a tener un carácter más estable, y los vientos, cargados de arenas, dejaron de molestar a la población. En esta forma, la Playa Norte avanza hacia el mar año tras año, tendiendo a quedar más expuesta al acarreo litoral y más propicia al establecimiento de un nuevo equilibrio.

Al SE. del puerto, o sea, en las playas inmediatas a la ciudad, la disminución del aporte de arenas produjo la recesión de la costa, invadiendo el mar balnearios, ferrocarriles y caminos. En la década del 40 al 50 se trabajó activamente en la construcción de un paseo marítimo que habría de servir para contener el avance del mar. El muro produjo su efecto, pero la playa todavía no había alcanzado su equilibrio, puesto que se producían socavaciones en el muro que había que corregir con nuevas obras de protección.

Finalmente, y gracias a la duna artificial al norte del puerto y a los espigones y refuerzos del muro al Sur, parece que se está llegando, después de más de setenta años de esfuerzos, a conseguir una relativa estabilidad —no un nuevo equilibrio— de la costa, pero tal estabilidad se basa en una atención continua y en renovados trabajos de protección.

(1) "Protection Works on the Mexican Coast. The Creation of Beaches and Dunes". Manuel Díaz-Marta. The Dock and Harbour Authority. January & February 1957.

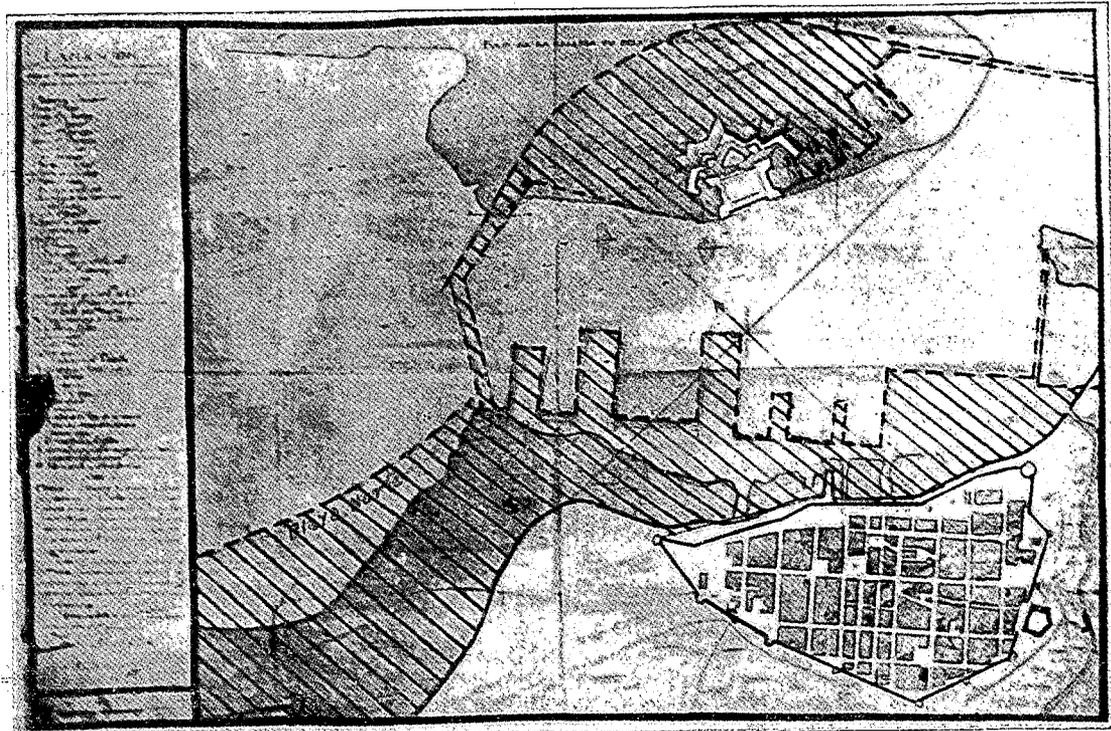
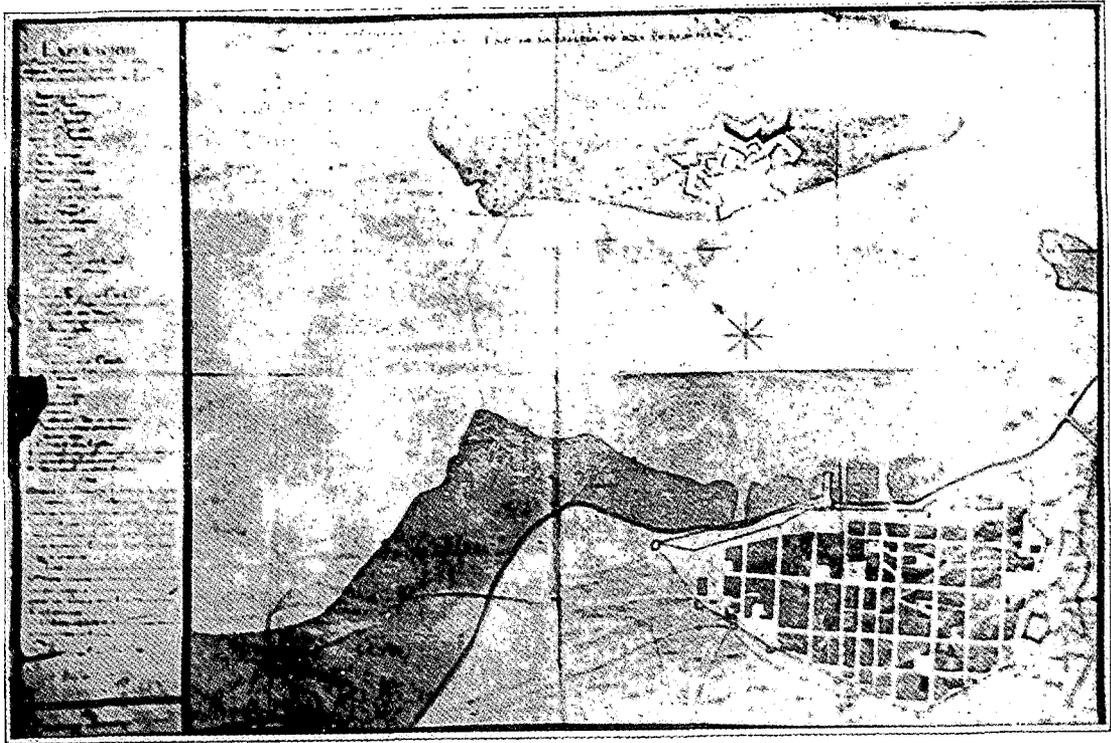


Fig. 1. — Costa de Veracruz, fondeadero, castillo de San Juan de Ulúa y Bajos de la Gallega. a) Plano de la costa en época colonial. b) esquema, sobre el mismo plano, del cerramiento del puerto, posición de sus muelles y crecimiento de la Playa Norte.

Proceso ecológico originado por un embalse.

Al llenar un embalse se producen cambios en las características físicas del ambiente. La capacidad de retención del agua que poseen naturalmente las cuencas fluviales se incrementa con los embalses. Cada embalse o lago artificial constituye un ecosistema muy distinto del fluvial y terrestre al que reemplaza. Una de sus particularidades es que la influencia del embalse puede llegar a zonas muy alejadas del mismo.

Los embalses, por su estrecha relación con el desarrollo económico y su capacidad de cambiar el medio ambiente, reclaman la atención no sólo de los profesionales que los construyen y operan, sino de cuantos tienen responsabilidad e interés en los asuntos públicos. Por esto y por su proliferación en todo el mundo, hay un gran interés en conocer sus efectos directos e indirectos, interés que se refleja en numerosas reuniones internacionales dedicadas a su estudio. Sin embargo, y a pesar de las actuales investigaciones, puede afirmarse que el proceso ecológico que se indica al construir una presa de embalse dista mucho de ser conocido satisfactoriamente.

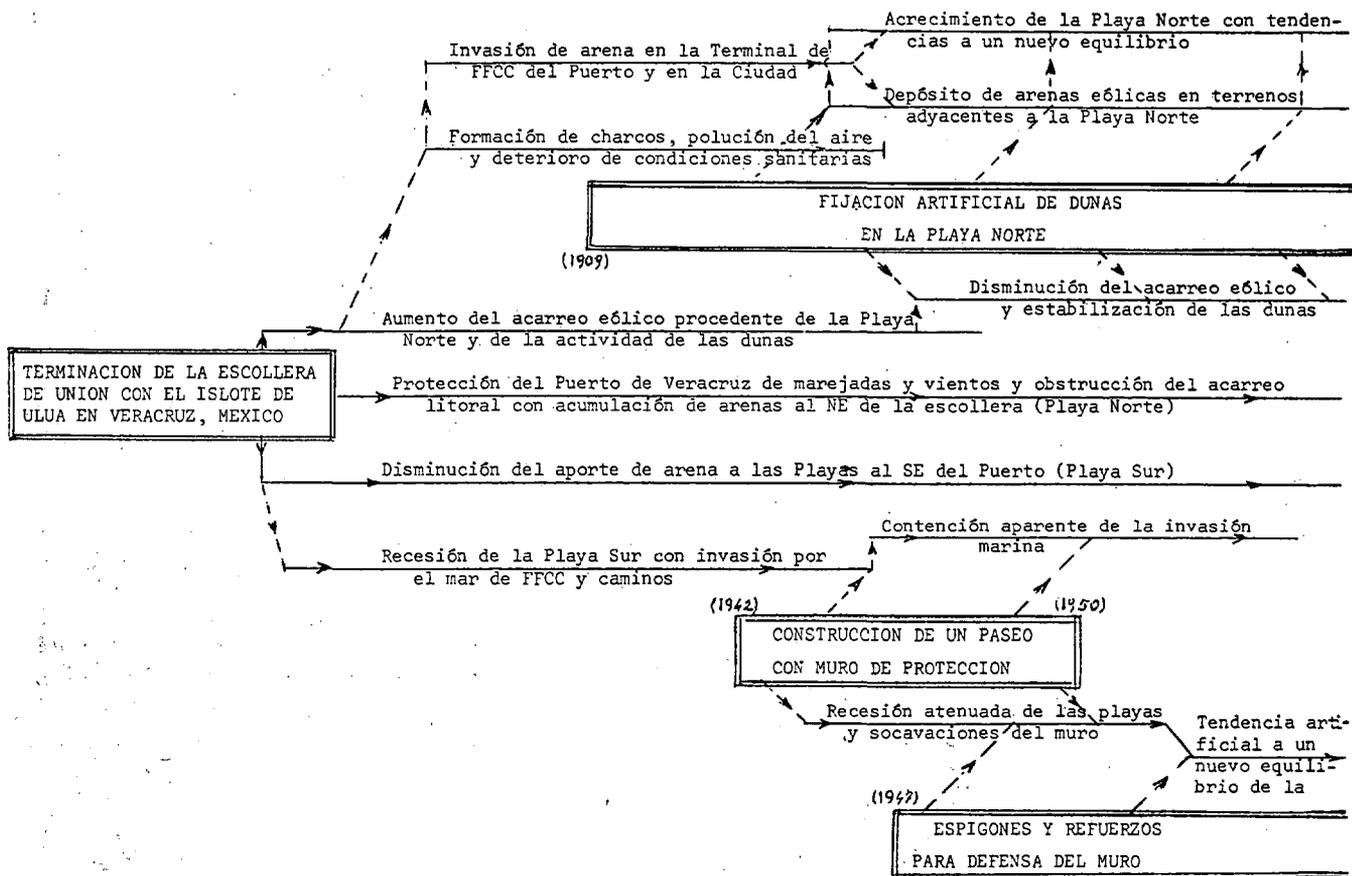


Fig. 2.—Esquema de proceso de desequilibrio y estabilización en la costa de Veracruz, originado por la construcción del puerto.

Esta falla se debe en parte a que no ha habido acumulación sistemática de experiencias. Las observaciones y estudios en la mayoría de los embalses se han limitado a la etapa de llenado y a la puesta en funcionamiento. Las consecuencias del embalse no incluidas entre los objetivos del proyecto no suelen observarse metódicamente a no ser que ocurra alguna perturbación notoria.

Las fases más destacadas de formación y desarrollo de un embalse y los efectos del mismo que deben ser estudiados con mayor interés se han presentado en el esquema adjunto (fig. 3).

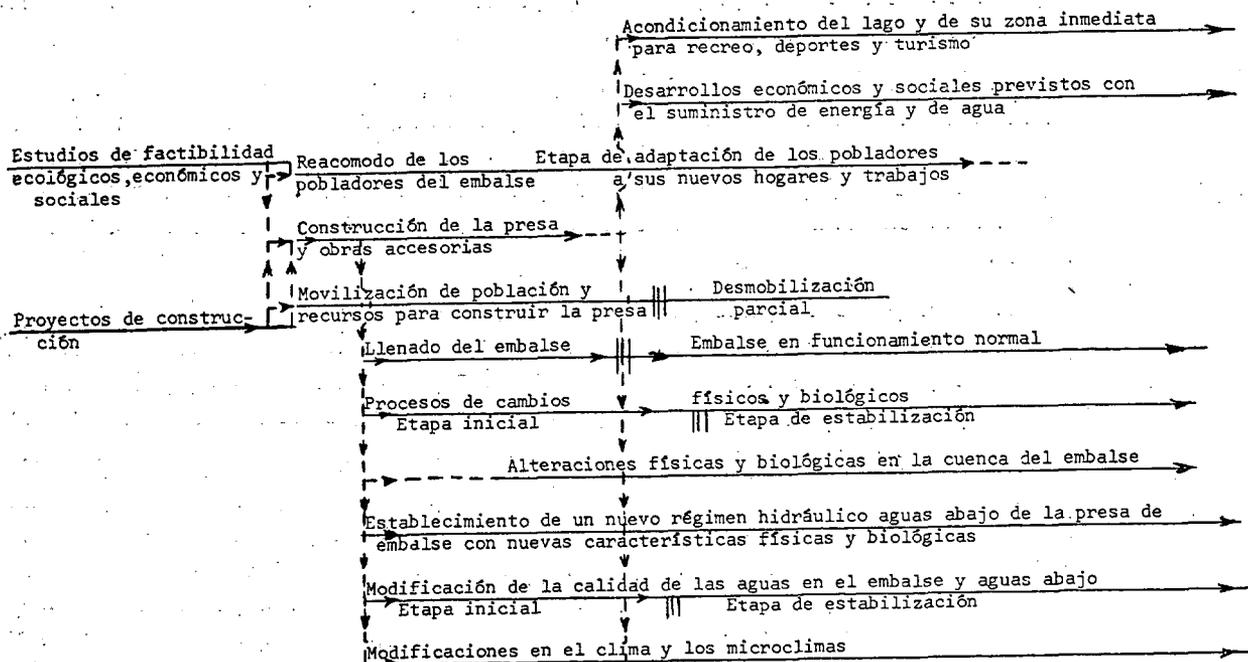


Fig. 3. — Esquema de actividades y efectos relacionados con la construcción de una presa de embalse.

La realización de la obra implica alteraciones importantes de orden sociocultural. Es necesario prever la movilización de trabajadores para construir la obra propuesta, y el traslado y reacomodo de las personas que habitan las tierras a inundar. En muchas grandes presas, la movilización de la fuerza de trabajo y las obras se inician antes de la terminación total de los estudios, calculando que éstos se han de completar durante el período constructivo. El traslado, indemnización y reasentamiento de los moradores del valle inundable son operaciones que deben prepararse con tiempo suficiente y con meticulosidad, a fin de evitar los daños innecesarios que sufrirían las familias movilizadas si se procediera con premura. En el caso de que los reinstalados tengan marcadas diferencias culturales con sus nuevos vecinos, debe procederse con sumo cuidado y ejercer una discreta tutela sobre los recién llegados por algunos años, hasta que se adapten a las nuevas comunidades en que han de vivir.

El aprovechamiento del embalse dará lugar a los desarrollos económicos y sociales previstos en el proyecto y tal vez a algunos más, todos los cuales deben ser

objeto de estudio. En ocasiones, ocurrirán a considerable distancia del embalse, y tal vez en cuencas hidráulicas distintas. El desarrollo de la cuenca lacustre cercana al lago deberá integrarse en un plan de organización del terreno basado en las nuevas condiciones creadas por el embalse. Las comunicaciones y sistemas de transporte deben desarrollarse al mismo tiempo. Muchos embalses ofrecen enormes posibilidades para esparcimiento y recreo de la población, deportes y turismo. En tales casos hay que pensar en la creación de hoteles y campamentos, cotos de caza, balnearios, centros deportivos y parques para diferentes usos.

El embalse ocasiona cambios de diversa naturaleza en la cuenca afluyente, en el espacio convertido en lago y aguas abajo de la presa. Estos cambios son de naturaleza física, química y biológica.

El lago artificial afecta a la temperatura, precipitación atmosférica y balance hídrico de su cuenca alimentadora, modifica la humedad de la atmósfera y la del suelo en las zonas próximas al embalse e influye en los microclimas. No obstante, esta influencia, que se reconoce muy importante en los grandes lagos, el impacto del lago en todas estas características ambientales es desconocido cuantitativamente.

En el espacio ocupado por el embalse, la retención del agua da lugar a un fuerte aumento de la sedimentación y a la disminución consiguiente del caudal sólido evacuado por la presa. Puede decirse que las presas de embalse, al intensificar el proceso sedimentario, están acelerando la formación de los futuros valles aluviales.

La acumulación de las aguas afecta a los sistemas naturales de producción biológica. La energía solar, captada por plantas acuáticas y fitoplankton, se transforma en especies acuáticas, de las cuales interesan especialmente los peces. Durante el llenado hay mortalidad en masa y emigración de organismos terrestres, al tiempo que se produce un crecimiento explosivo de las especies fluviales —ya sean plantas o animales— adaptables a las aguas quietas. Tal explosión demográfica se debe a la expansión del ambiente acuático y a la aportación de nutrientes que provienen de plantas sumergidas y restos de animales. La evolución desde una primera etapa de alta productividad a una segunda de estabilización se verifica con gran rapidez. En ambas etapas desaparecen los ambientes terrestres y fluviales y se expanden los lacustres.

En su funcionamiento, el embalse produce un cambio del régimen hidráulico aguas abajo de la presa. Este cambio, por ser uno de los objetivos principales del proyecto, suele estar bien estudiado. A consecuencia de esa alteración de régimen suelen producirse otros cambios en la erosión y sedimentación del cauce del río, y, por tanto, en sus formas geométricas. La intensidad y frecuencia de las grandes crecidas puede reducirse por la acción de un embalse, si bien éstos no constituyen una garantía contra las inundaciones y pueden producirse efectos inesperados. La operación de un embalse requiere por eso informaciones precisas meteorológicas e hidrológicas con previsiones a corto y largo plazo, además de la vigilancia estricta de los procesos supuestos.

Las propiedades del agua al salir de un lago pueden diferir mucho de las que tenía al entrar. La modificación de las cualidades del agua depende de varias condiciones del régimen hidráulico del embalse, entre las cuales se cuentan el flujo, la capacidad activa (volumen del embalse donde el agua realmente se mueve), la pre-

cipitación atmosférica sobre el embalse, la evaporación del mismo, la entrada y salida de aguas superficiales, la entrada y salida de aguas subterráneas y las corrientes en el embalse debidas al viento y a las diferencias de temperatura.

En los grandes lagos artificiales, tan pronto como empieza a llenarse el vaso, es necesario iniciar una etapa de intensa e ininterrumpida vigilancia que comprenda todas las características ambientales que son modificables con la obra. Los datos y supuestos hidrológicos y el funcionamiento del embalse en la regulación de crecidas deben ser objeto de estudios y comprobaciones especiales durante los primeros años. Igualmente es necesario registrar las condiciones sedimentológicas y de evolución de los cauces, así como los índices que indican la calidad de las aguas, el desarrollo biológico, etc., y los que reflejan el impacto social y económico de la nueva obra.

Efectos de un sistema hidráulico con trasvase de una cuenca a otra.

En el caso de un proyecto con trasvase de aguas, el análisis ecológico resulta mucho más complicado que el de un simple embalse. Los ecosistemas afectados son varios y están situados en comarcas y cuencas diferentes; lógicamente, los efectos de las obras en cada uno de ellos deben recibir la misma atención.

Sería muy difícil indicar pautas para el estudio ecológico de un proyecto de trasvase, ya que no hay dos parecidos. Nos limitaremos a examinar, como ejemplo, una propuesta que ha sido lanzada para derivar gran parte de los caudales del río Paraná, en Argentina, al río Uruguay, a fin de producir energía eléctrica en la presa de Salto Grande, ahora en estudio.

El sistema ideado presupone la construcción de la presa Yaciretá-Apipé, sobre el río Paraná, también en estudio, pero en fase menos avanzada que Salto Grande. Los caudales del Paraná se derivarían del embalse creado en Apipé (sin capacidad suficiente para regular el régimen) por medio de un vertedor y un gran canal especialmente dispuestos para desaguar los caudales de avenidas hacia la región del Iberá. Los actuales esteros, lagunas, pantanos y llanuras de esta región se convertirían en un lago, de más de 15.000 kilómetros cuadrados de superficie, por medio de un dique, que en total tendría 240 kilómetros de longitud, con salida de agua por un lado a los ríos Miriñay y Uruguay, y por otro al río Corrientes, para regresarlas al Paraná a unos 700 kilómetros del lugar de donde fueron tomadas.

El río Paraná, en el lugar de desvío de las aguas, lleva un promedio de 12.000 metros cúbicos por segundo y el Uruguay, en el de ingreso, de 5.000. La propuesta incluye diversas variantes, todas ellas tejidas en torno a la idea de utilizar los esteros del Iberá como vaso regulador. La variante presentada en el esquema es la que supone que las aguas almacenadas en el Iberá no retornarían parcialmente al río Paraná, sino que irían en su totalidad al Uruguay para ser turbinadas en Salto Grande.

La realización de este desvío, que en la propuesta se eleva a un promedio de 6.700 m³/seg., o sea, más de 200.000 hectómetros cúbicos por año, alteraría una serie de ecosistemas situados en el río Paraná, aguas abajo de Apipé, en la región del Iberá, en los ríos Miriñay, Uruguay y Corrientes, y en el Río de la Plata, y afectaría a la navegación, la agricultura y otros intereses económicos importantísimos.

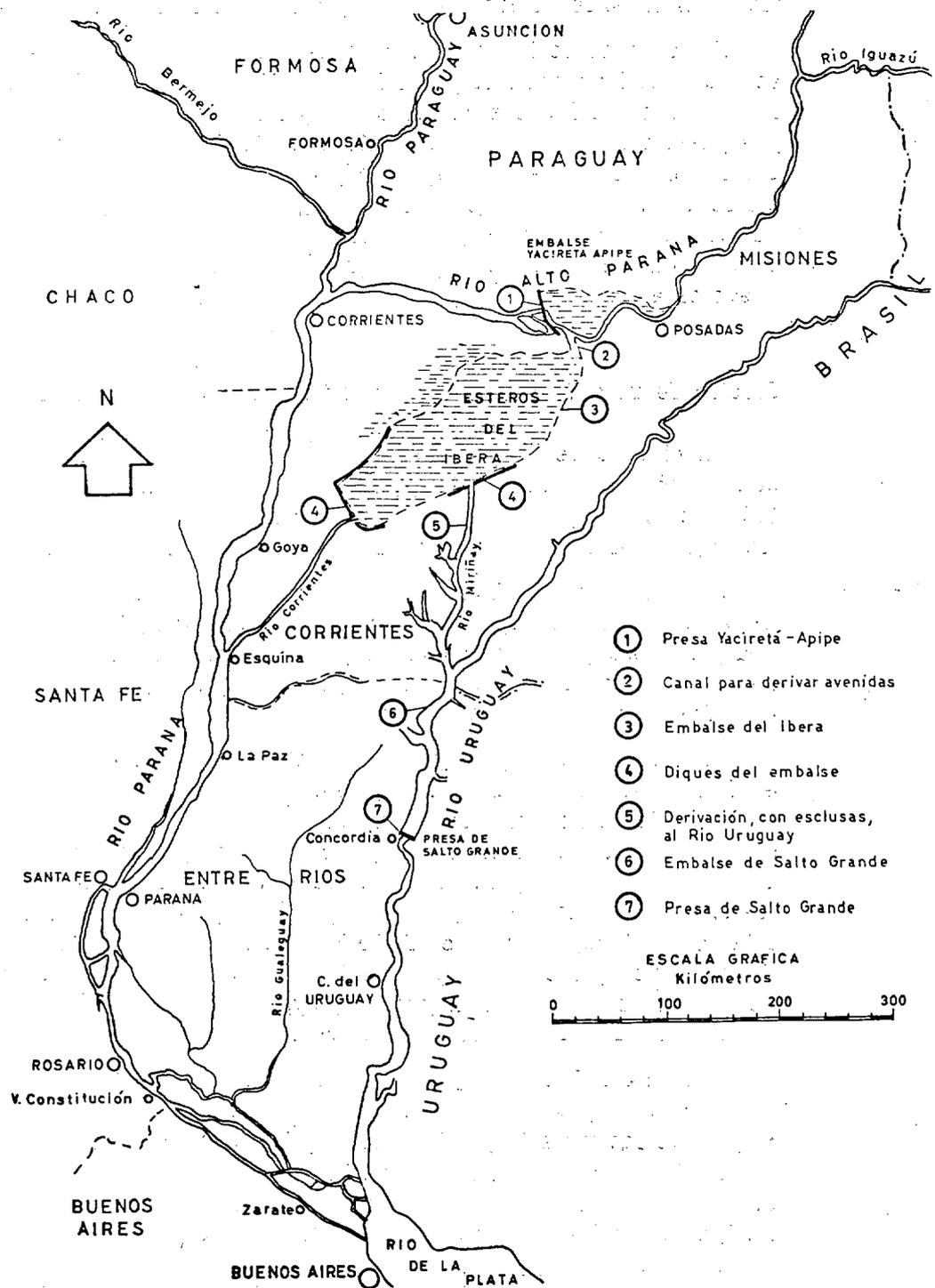


Fig. 4.—Esquema de la propuesta de trasvase del río Paraná al río Uruguay, a través de los esteros del Iberá.

En el estado actual de conocimiento de los fenómenos ecológicos, la mayoría de las alteraciones que sufrirían los ecosistemas fluviales resultan imposibles de prever o evaluar. Además, no se llegaría a un nuevo equilibrio en los cauces sin un largo período de inestabilidad, que bien podría durar varios decenios. Durante ese período sería difícilísimo señalar y mantener los canales navegables en el cauce del río Paraná, entre Apipé y Buenos Aires.

En el cuadro adjunto se enuncian los efectos más importantes a considerar e investigar en la evaluación ecológica de la obra propuesta, en la hipótesis de que el canal medio derivado fuera de unos 3.000 m³/seg., es decir, la cuarta parte del que lleva el Paraná, en lugar de suponerse, como en la propuesta, de 6.700 m³/segundo. Las dificultades de la evaluación ecológica en el ejemplo propuesto se advierten claramente por la simple lectura de los temas que abarcaría.