

---

## INTRODUCCION A LA HIDRODINAMICA AMBIENTAL

### Qué es la hidrodinámica ambiental?

Durante la última década el interés por la protección del medio ambiente se ha incrementado en forma notable tanto a nivel internacional como a nivel nacional. En particular, en el país se ha comenzado a incorporar evaluaciones de impacto ambiental en estudios de proyectos de ingeniería civil, y en general la ingeniería nacional se está viendo enfrentada a resolver una amplia y creciente gama de problemas ambientales. Esta tendencia a nivel mundial ha traído aparejada una mayor necesidad por comprender la dinámica del agua en la naturaleza, ya que muchos de dichos problemas tienen relación con procesos de transporte y mezcla en ambientes acuáticos.

Desde el punto de vista ambiental interesa, por ejemplo, resolver problemas relacionados con el transporte de contaminantes en cursos de agua, con la transferencia de gases en la interfase aire-agua en la superficie libre de ambientes acuáticos, con la transferencia de masa en la interfase agua-sedimento en el fondo de canales aluviales, lagos y océanos, con la difusión y mezcla de fluidos estratificados en estuarios, lagos, y cuerpos de agua en general.

El análisis de los problemas antes señalados requiere necesariamente la aplicación de los conocimientos, conceptos y metodologías de la mecánica de fluidos y la hidráulica tradicionales. Esta aplicación da lugar a lo que puede denominarse, entonces, la *hidrodinámica ambiental*.

### Qué son los procesos de transporte en ambientes acuáticos?

Los procesos de transporte antes referidos corresponden a procesos de transferencia de masa, calor y momentum en la columna de agua y están altamente relacionados con la turbulencia de los flujos considerados. Por ejemplo, en las cercanías de la superficie libre en flujos abiertos a la atmósfera, la turbulencia controla los fenómenos de transferencia a través de la interfase aire-agua, tales como el proceso de reaireación, el cual es de fundamental importancia para mantener niveles adecuados de oxígeno en la masa de agua. De esta forma, por ejemplo, a través del proceso de reaireación un cauce natural contaminado puede recuperar la calidad de sus aguas, lo cual queda controlado por parámetros hidráulicos que inciden sobre la turbulencia del flujo, tales como la pendiente del cauce, la irregularidad de las secciones de escurrimiento, la rugosidad del fondo, etc.

Por otro lado, en las cercanías del fondo en canales aluviales, lagos u océanos, la turbulencia controla los procesos de transporte e intercambio de sedimentos a través de la interfase sólido-líquida, los cuales inciden tanto en la calidad del medio ambiente acuático como en las características de la interfase propiamente tal. Por ejemplo, la resuspensión

---

de sedimento desde el fondo de un canal aluvial se debe al efecto de la turbulencia del flujo, proceso que genera un perfil de concentración de sedimento en suspensión, el cual afecta la turbidez de la columna de agua. Más aún, es común en ciertos cuerpos de agua la existencia de sedimento contaminado, ya sea biológicamente o bien debido a la presencia de metales pesados u otros compuestos, cuya resuspensión afecta directamente la calidad del recurso. Asimismo, el material granular del fondo de los canales aluviales presenta una distribución de tamaños característica, la cual condiciona el ecosistema acuático. Los procesos de transporte de sedimento en las cercanías del fondo afectan dicha distribución de tamaños, de modo que, por ejemplo, una reducción de la capacidad de arrastre del flujo puede ocasionar una depositación de material más fino en el fondo con consecuencias negativas para el ecosistema presente.

### **Qué son los procesos de mezcla en ambientes acuáticos?**

Muchos de los problemas ambientales relacionados con sistemas acuáticos naturales están vinculados a variaciones espaciales o temporales de la estratificación en la densidad del agua, causada por efectos de salinidad, temperatura, presencia de sedimento en suspensión o descarga de contaminantes. La presencia de pycnoclinas (discontinuidades de densidad en la vertical), ya sea en la forma de termoclinas (discontinuidades de temperatura en la vertical), haloclinas (discontinuidades de salinidad en la vertical) o lutoclinas (discontinuidades de concentración de sedimento en suspensión), tiene gran influencia en la circulación y calidad del recurso en cuerpos de agua.

La interacción entre la turbulencia y una interfase de densidad produce la mezcla de ambos fluidos y un proceso que se denomina incorporación y que implica el transporte de un fluido en el seno del otro. La mezcla de dos fluidos que presentan una estratificación estable (por ejemplo agua fresca sobre agua salada) demanda un aporte externo de energía. En la naturaleza, esta energía se origina de varias fuentes, como por ejemplo el viento, mareas, transferencia de calor, gravedad, etc. Físicamente, sin embargo, el proceso de mezcla depende fundamentalmente de la turbulencia presente en el sistema, la cual es generada por las fuentes de energía antes señaladas. Por ejemplo, la energía transferida por el viento al agua es usada principalmente en la generación de olas, corrientes, circulación, etc, y por lo tanto en la producción de energía cinética turbulenta la que incide directamente en el proceso de mezcla de los fluidos estratificados. Cuando el viento cesa, la actividad turbulenta desaparece, sin embargo parte del agua salada más densa ha sido elevada contra la acción de la gravedad y mezclada con la capa superior de agua fresca, y por lo tanto ha ganado energía potencial. La eficiencia del proceso de mezcla es la razón entre la energía potencial ganada y la energía cinética turbulenta producida.

### **Algunos problemas típicos**

Un problema que suele ser noticia en repetidas oportunidades está relacionado con los accidentes de barcos petroleros y roturas de tuberías que resultan en el derrame de grandes cantidades de combustible en cuerpos de agua. Un procedimiento utilizado

frecuentemente para evitar importantes daños a la vida acuática consiste en el uso de barreras flotantes para contener el petróleo (Fig. 1). Dado que el petróleo y el agua no se mezclan y el primero es de menor densidad que el segundo, el petróleo derramado tiende a formar una capa superficial la cual puede ser extraída mediante bombeo, siendo necesario para ello darle a dicha capa una profundidad suficiente. Esta es conseguida mediante las barreras antes referidas, cuyas características, tales como profundidad y dimensiones, deben ser definidas a partir de un análisis hidráulico del problema.

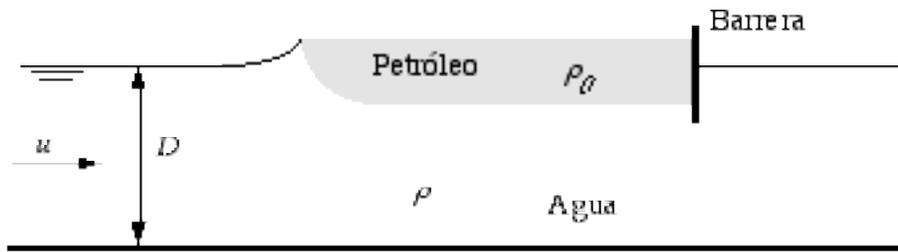


Fig. 1. Barrera flotante para la contención de petróleo.

Un problema común en lagos y embalses es el relacionado con la formación de corrientes de densidad causadas por diferencias de temperatura o por la presencia de sedimento en suspensión (Fig. 2). En estos casos lo que origina e impulsa al flujo es precisamente el efecto gravitacional debido a la diferencia de densidades entre el fluido de la corriente y el fluido ambiente. La dinámica de dichas corrientes tiene un rol importante en la calidad del agua y la sedimentación en embalses, y su evolución depende fundamentalmente de los procesos de mezcla y de incorporación de fluido ambiente a la corriente lo cual produce la dilución del fluido en ella.

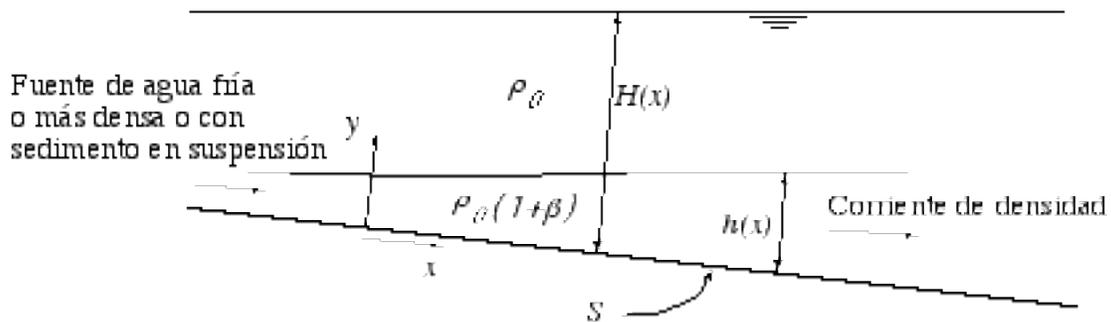


Fig. 2. Corriente de densidad causada por el efecto gravitacional debido a la diferencia de densidades entre el fluido ambiente y la corriente.

Un problema similar al anterior aunque de naturaleza distinta es el que ocurre en estuarios, en los que una corriente de agua fresca escurre sobre una capa de agua salada proveniente del océano. En estos casos la mezcla entre los dos fluidos define la calidad del agua, lo cual incide directamente sobre los ecosistemas existentes en el estuario. Dicha mezcla en este caso resulta de una serie de factores tales como el régimen de mareas imperante, caudal de agua fresca, vientos, etc. El régimen de mareas, por ejemplo, define la existencia de flujos y reflujos los que permiten una renovación del agua en la zona del estuario, renovación que puede ser más o menos efectiva dependiendo de las características de éste, y que controla por lo tanto la calidad del agua en la zona en términos de salinidad, concentración de contaminantes y nutrientes. El efecto del viento sobre la superficie libre, por otro lado, induce oleaje superficial y corrientes, aumentando la turbulencia en el sistema, la cual como ya se ha mencionado, incide directamente en los procesos de mezcla de los fluidos estratificados. Debido al gran número de variables involucradas y a la complejidad del sistema, el análisis de estuarios es materia de estudios que involucran tanto la modelación numérica y física del sistema como la realización de campañas de terreno para la obtención y medición de datos.

En los casos en que la mezcla en el estuario es de baja intensidad puede ocurrir el fenómeno de intrusión de agua salada hacia el curso de agua que descarga al océano como se ilustra en la Fig. 3. Debido a las bajas pendientes que usualmente se tienen en la desembocadura y a la mayor densidad del agua salada, ésta tiende a introducirse por gravedad hacia aguas arriba del cauce, formando una cuña que se desplaza pegada al fondo. Cuando el caudal afluyente disminuye, la cuña de agua salada puede desplazarse decenas de kilómetros aguas arriba y por lo tanto afectar, por ejemplo, tomas de agua para consumo ubicadas en las márgenes de los cursos de agua afectados. Una característica importante de estas cuñas de agua salada es que debido a las bajas velocidades de los flujos, no se produce una mezcla importante entre el agua salada en el fondo y el agua fresca en la superficie. El análisis de este problema requiere utilizar principios de mecánica de fluidos e hidráulica para determinar, por ejemplo, la longitud que la cuña de agua salada se extenderá hacia aguas arriba para condiciones dadas de caudal de agua fresca y de nivel de marea en el océano.

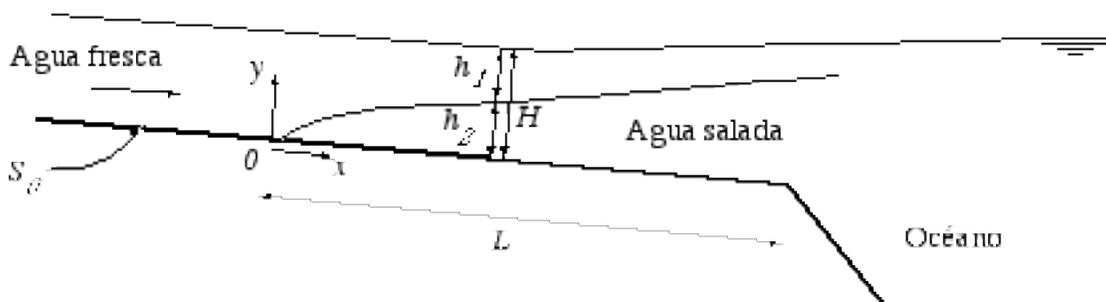


Fig. 3. Intrusión salina desde el océano hacia aguas arriba en un curso de agua.

---

Otro ejemplo de flujo estratificado es el que ocurre en el caso de un penacho vertical originado por efectos de flotación al descargar agua menos densa en el fondo de un cuerpo de agua (Fig. 4). Esta situación se da comúnmente con el uso de difusores para la descarga de aguas servidas en zonas costeras, y por lo tanto tiene gran importancia práctica (Fig. 5). La mezcla que ocurre en el penacho provoca la incorporación del fluido ambiente, lo cual produce la dilución del fluido descargado, permitiendo disminuir los efectos negativos de éste sobre la calidad del cuerpo de agua receptor de la descarga. Las características de mezcla y dilución en el penacho son afectadas además por una serie de otros factores tales como la presencia de estratificación en el cuerpo de agua (de temperatura o salinidad, por ejemplo), la existencia de corrientes, vientos, etc. El diseño y análisis de sistemas de difusores reviste gran importancia del punto de vista de la ingeniería ambiental, sin embargo ellos deben basarse principalmente en principios de la mecánica de fluidos e hidráulica.

Un ejemplo final que se mencionará brevemente dice relación con los procesos de estratificación y mezcla en lagos y embalses. En estos cuerpos de agua, a diferencia de lo que ocurre en ríos, los movimientos del agua son bastante lentos. Las fuerzas que originan estos movimientos son generadas por efecto del viento, radiación solar, pérdidas de calor y los flujos de entrada y salida al cuerpo de agua. Pequeñas variaciones de densidad, causadas por gradientes de temperatura en la vertical (debido a la radiación solar o al enfriamiento superficial) o gradientes en la concentración de sustancias disueltas, controlan el comportamiento termo-hidrodinámico del cuerpo de agua. Fenómenos que son despreciables en cursos de agua pueden ser dominantes en lagos y embalses, como por ejemplo la estratificación térmica, convección debido a una estratificación inestable de la densidad, el efecto del viento que tiende a producir circulación y mezcla, corrientes de densidad como las mencionadas previamente, etc. Todos estos procesos hidrodinámicos afectan las condiciones que controlan los ecosistemas existentes en estos cuerpos de agua, y cualquier estudio de la calidad del agua en ellos debe incluir explícitamente dichos elementos en el análisis.

## Conclusiones

Esta breve descripción de algunos problemas ambientales que es necesario abordar recurriendo a los elementos de la mecánica de fluidos e hidráulica, cuya aplicación se ha denominado *hidrodinámica ambiental*, pretende motivar el interés por el estudio del tema, el cual si bien no es de reciente desarrollo, su aplicación está tomando mayor importancia en la medida que la sociedad pone un mayor interés en preservar y proteger el medio ambiente.

Es importante hacer notar, asimismo, que en muchos de los problemas mencionados no se tiene un nivel de conocimiento adecuado acerca de los procesos físicos involucrados, o bien aún no se han desarrollado las metodologías de análisis desde un punto de vista ingenieril. En la actualidad, el estudio de los procesos de mezcla y transporte turbulentos

en fluidos estratificados y no estratificados es materia de gran actividad en el ámbito de la investigación científica y de ingeniería, lo cual hace de éste un tema abierto y de la *hidrodinámica ambiental* un campo de aplicación poco rutinario.

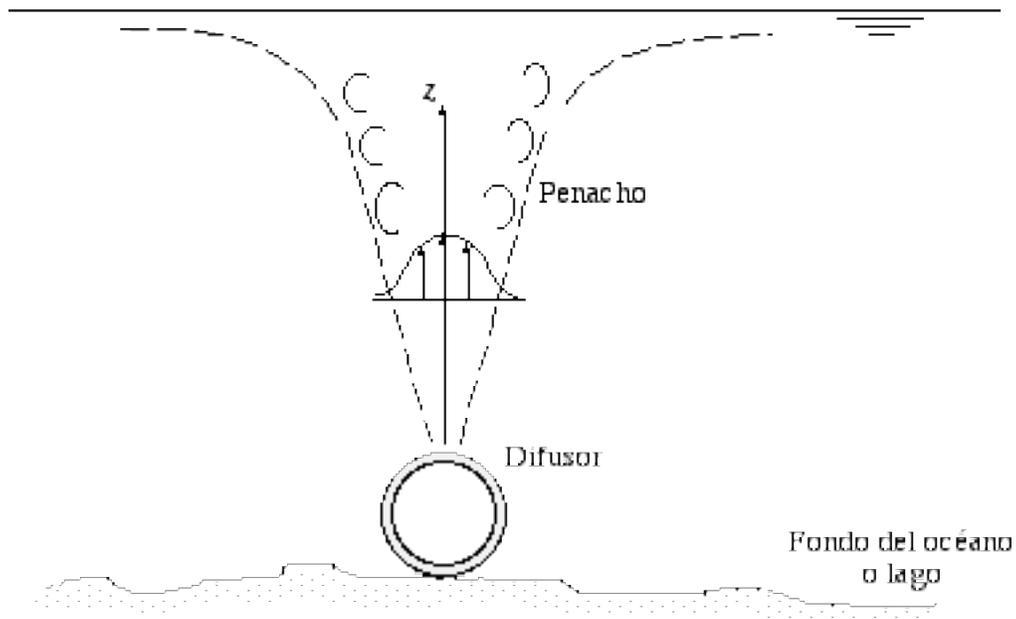


Fig. 4. Penacho vertical producido por efectos de flotación.

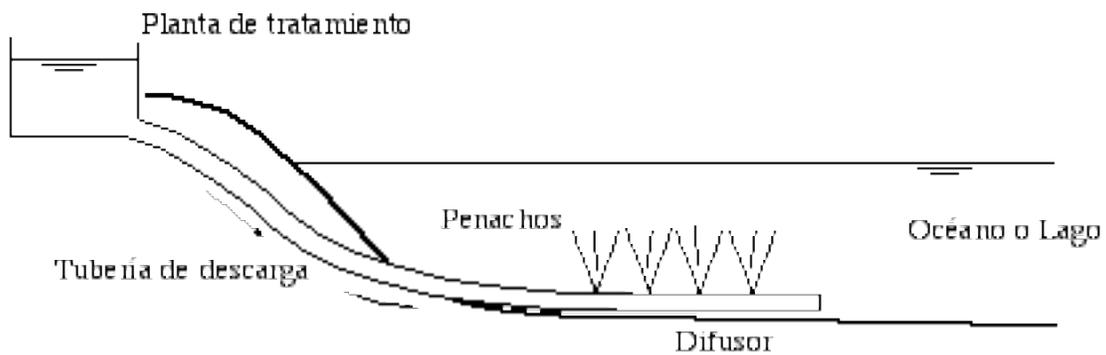


Fig. 5. Difusor para la descarga de aguas servidas en un cuerpo de agua.

## Referencias

Algunas referencias que se pueden consultar respecto de los temas aquí mencionados son las siguientes:

Fisher, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. y Brooks, N. H. (1979). "Mixing in Inland and Coastal Waters". Academic Press.

García, M. H. (1994). "Hidrodinámica Ambiental". Apuntes del curso pre-congreso. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Santiago, Chile.

Martin, J. L., y McCutcheon, S. C. (1999). "Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling". CRC Press. Lewis Publishers.

Pedersen, F. B. (1986). "Environmental Hydraulics: Stratified Flows". Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, vol 18. Springer-Verlag.