

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**OBSERVACIONES DEL EFECTO DE OLEAJE Y CORRIENTES SOBRE LA
TRANSFERENCIA DE MASA EN LA INTERFAZ AGUA-SEDIMENTO**

**JORGE MUÑOZ Q.¹
YARKO NIÑO²
ALDO TAMBURRINO³**

RESUMEN

Se realizó una investigación experimental acerca de los procesos de flujo y transporte en la capa límite béntica de estuarios afectados por oleaje. Específicamente, se estudió el efecto de la interacción entre oleaje y corrientes en la transferencia de masa en la interfaz agua/sedimento. Los experimentos fueron realizados en un canal abierto de 12 m de largo y 0.3 m de ancho, con un lecho de sedimentos de arena uniforme de 0.5 mm. Se instaló un generador de oleaje en el extremo de aguas abajo. Se utilizó una solución salina de baja concentración inyectada como trazador en el lecho de sedimento, para poder detectarlo en la columna de agua con la ayuda de un sensor de conductividad. Se utilizó un modelo lineal de intercambio de masa para determinar un valor del coeficiente total de intercambio a partir de las observaciones experimentales. Se adimensionalizó el coeficiente de intercambio mediante el número de Sherwood y se graficó en función del número de Reynolds del flujo. Los resultados obtenidos demuestran que existe un aumento del número de Sherwood a medida que aumenta el número de Reynolds, es decir, la turbulencia generada por el flujo provoca el aumento de la transferencia de masa. El efecto de las olas modifica la estructura del flujo y la turbulencia, aumentando los gradientes de velocidad, la energía cinética turbulenta y la componente vertical de la velocidad, lo que provoca el aumento del intercambio de masa entre la columna de agua y los sedimentos.

¹ Ingeniero Civil Hidráulico, Universidad de Chile – mail: jorgemunoq@gmail.com

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - mail: ynino@ing.uchile.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - mail: atamburr@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCION

La calidad del agua de los sistemas acuáticos está condicionada por los procesos de transporte y transferencia de contaminantes y otras sustancias disueltas o en suspensión en la columna de agua. La estructura de la turbulencia es la principal responsable de la transferencia hacia la columna de agua de materias contenidas en los sedimentos del lecho y de la mezcla de sustancias disueltas y en suspensión en la columna de agua, tales como salinidad, concentración de sedimento y materia orgánica (Boudreau and Jørgensen, 2001). Esta transferencia será analizada en profundidad en el presente estudio.

La capa límite béntica constituye aquella región de la columna de agua y el sedimento del lecho que es afectada directamente en la distribución de sus propiedades y procesos, por la presencia de la interfaz agua-sedimento. Esta zona es de suma importancia para la biogeoquímica y física de océanos, zonas costeras, estuarios, lagos e incluso ríos. Además es en esta zona donde ocurre la mayor disipación de energía generada por olas, vientos y turbulencia. También existe un intenso intercambio de masa (solutos y materias orgánicas) entre la columna de agua y el lecho provocado por transportes difusivos o turbulentos. La turbulencia es el principal responsable del transporte vertical en la CLB, siendo, en general, mucho más eficiente que los procesos de transporte por difusión molecular (Dade et al., 2001).

Los resultados presentados en este documento se basan en un estudio experimental realizado en el laboratorio hidráulico de la Universidad de Chile sobre los efectos de la interacción entre corrientes y oleajes en la transferencia de masa en una capa límite béntica.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El estudio experimental se realizó en un canal abierto de sección rectangular de 30 cm de ancho, 30 cm de alto y 11 m de longitud, con un lecho móvil de sedimentos de tamaño uniforme de 0.5 mm, en el que el flujo está influenciado por oleaje, simulando las condiciones imperantes en sistemas costeros y estuarios. Un generador de oleaje fue instalado en el extremo de aguas abajo, cuya frecuencia de oscilación fue controlada mediante una computadora. El periodo y altura de las olas generadas fueron determinadas en función de las condiciones de operación. A una distancia de 4.5 m aguas abajo de la cámara de entrada se instaló un difusor, el cual permite la incorporación de un trazador a una zona aislada de los sedimentos del lecho. Para medir la transferencia de masa hacia la columna de agua se utilizó una solución de agua salina con una concentración de 3.5%, la que se inyectó en forma uniforme al lecho del canal mediante orificios ubicados en el fondo de éste.

En la zona del lecho donde se incorporó el trazador se instalaron barreras aguas arriba y abajo de los orificios antes mencionados. Estas barreras impiden que exista flujo del trazador fuera de la zona de inyección y que la concentración de la solución salina en el lecho sea constante durante toda la experiencia, evitando así efectos impermanentes de la concentración en la columna de agua.

En la zona donde se inyectó el trazador se instaló una esponja de 20 mm de espesor, en el fondo del canal inmediatamente debajo del lecho de arena, la cual produce un aumento de la difusión horizontal, mejorando así las condiciones de homogeneidad de la concentración de la solución salina dentro de los sedimentos que componen el lecho.

Para registrar la concentración del trazador en la columna de agua, se utilizó un sensor de conductividad, a partir de cuyas mediciones y mediante una relación calibrada entre concentración, temperatura y conductividad eléctrica, se determinó la concentración del trazador.

Un estanque permitió la acumulación de la mezcla de agua potable y sal que fue utilizada en todos los experimentos. La concentración de sal fue de 3.5% en todos los casos. Este estanque posee una bomba de recirculación que tiene como fin mantener la cota de la superficie libre dentro del estanque igual a la cota media dentro del canal. Para esto se dispone de dos válvulas, las cuales permiten regular la entrada y salida de solución en recirculación. Además se tienen dos piezómetros, los cuales permiten comparar dichas alturas y corroborar que ambas cotas sean iguales. El principio que se busca mediante este sistema de recirculación es imponer externamente un flujo vertical nulo en la zona de inyección, para así no imponer un flujo artificial hacia la columna de agua. Es decir, toda la solución incorporada al sistema es solo la demandada por la difusión tanto turbulenta como molecular del flujo o advección. Finalmente, el estanque posee una salida en la parte inferior, la que está conectada mediante una manguera hacia un difusor ubicado en la parte inferior del canal, el cual se conecta a los orificios antes mencionados

Un sensor de presión eléctrico fue utilizado para registrar la altura y periodo de ola. Además se utilizó un sensor ADV, el cual permite medir la estructura de la turbulencia en la columna de agua. Con el sensor de conductividad ya mencionado, se realizaron mediciones de concentración a lo largo de siete perfiles verticales situados en la línea central del canal, distribuidos uniformemente sobre la zona donde el trazador fue inyectado a los sedimentos (Figura 1)

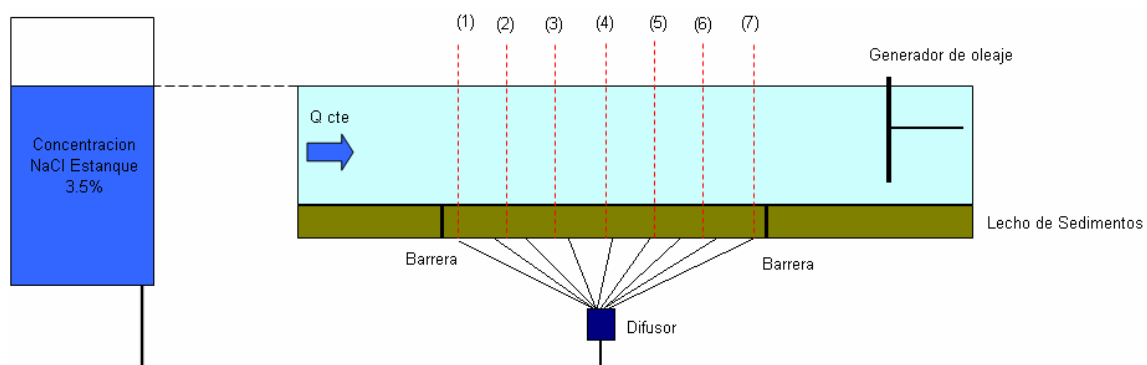


Figura 1: Posición de perfiles de medición

Las experiencias que se realizaron en el modelo se pueden dividir en dos tipos: a) Experiencias con corriente sin oleaje y b) Experiencias con corriente y oleaje. Además se realizaron experiencias previas las cuales permitieron determinar el tiempo de estacionalidad y la verificación del buen estado de los instrumentos.

Para el caso de las experiencias sin oleaje se definieron 2 caudales de experimentación: 2.5 l/s y 1 l/s. Estos caudales fueron los mismos que se utilizaron en las experiencias con oleaje a los que se les adicionaron 2 períodos de oleajes y por ende 2 alturas de ola distintas. En la Tabla 1 se presenta la matriz de experimentación la cual consta de 6 experiencias a analizar.

Tabla 1: Condiciones experimentales.

EXP	Q [l/s]	T [s]	H [cm]	u_* [cm/s]
1	1,0	-	16	0,20
2	1,0	3,0	16	0,20
3	1,0	2,0	16	0,22
4	2,5	-	16	0,47
5	2,5	3,0	16	0,40
6	2,5	2,0	16	0,42

Para todas las experiencias se determinaron los perfiles de conductividad y velocidad en la columna de agua, además se determinaron los perfiles de energía cinética turbulenta y los esfuerzos de Reynolds entre otros.

3. RESULTADOS

Se obtuvieron los perfiles de velocidad media, mediante el promedio simple de la señal de velocidad en cada punto del perfil para las experiencias con y sin oleaje. En la Figura 2 se presentan los perfiles de velocidad media de todas las experiencias. Estos perfiles corresponden al promedio sobre la turbulencia de la serie de velocidades obtenidas por el ADV. Es evidente que se experimentaron 2 grupos caudales distintos (Tabla 1).

Para las experiencias de velocidad baja se puede apreciar que esta variable no tuvo variaciones significativas en cada experiencia, es decir, que el oleaje no afecta mayormente el perfil de velocidad, obteniéndose una velocidad media de 2.8 cm/s. Para el caso de las experiencias que poseen un mayor caudal, se puede observar que el oleaje tiene el efecto de disminuir la velocidad del flujo, sobre todo en la zona más cercana a la superficie libre, en mayor magnitud a medida que el período aumenta. (Figura 2)

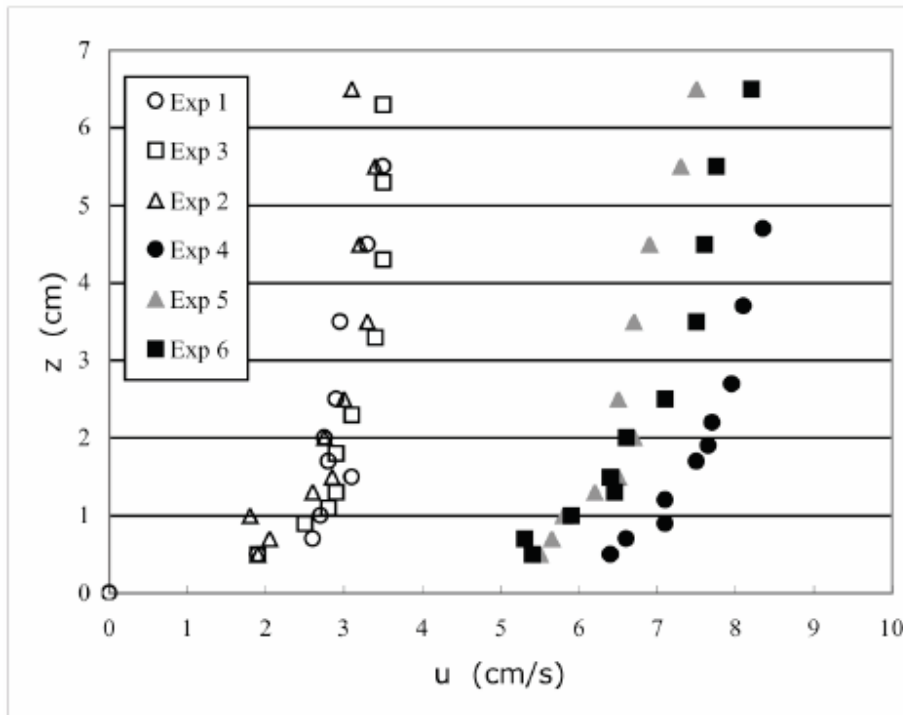


Figura 2: Perfiles de velocidad media

Si se considera que existe una distribución logarítmica de velocidad del flujo en la zona de la pared, suficientemente alejada del fondo, en donde los esfuerzos de corte viscosos son despreciables en comparación con los esfuerzos turbulentos, se puede determinar el espesor de la subcapa viscosa y los esfuerzos de corte en el fondo.

La determinación de la velocidad de corte, u_* , adoptada se hizo mediante un ajuste de la Ecuación 1 a los puntos medidos en cada experiencia, poniendo mayor atención a la zona cercana pero no adyacente al fondo, en donde la Ecuación 1 tiene validez, al menos para flujo sin oleaje.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{u_* \cdot z}{\mathbf{n}} \right) + 5 \quad (1)$$

Para estimar las características de la turbulencia del flujo con oleaje, se realizó una descomposición de la velocidad en un valor medio más una variación periódica asociada al oleaje y más una fluctuación turbulenta. El valor de la velocidad media se obtuvo mediante el promedio simple de la velocidad instantánea (Figura 2). La componente del oleaje se obtuvo filtrando la serie de tiempo usando un promedio móvil, el cual permitió mediante la diferencia entre la velocidad media obtener la fluctuación correspondiente.

La Figura 3 muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos de los perfiles de energía cinética turbulenta adimensionalizado por K/u_*^2 para las experiencias con y sin oleaje. A

pesar de que los valores de K/u_*^2 son similares en las zonas cercanas al fondo, la energía cinética turbulenta es mayor para las experiencias con oleaje en las zonas cercanas a la superficie libre. Para las experiencias sin oleaje, la energía cinética turbulenta es creciente en las zonas cercanas al fondo. Esta generación de energía es provocada por la presencia del lecho de sedimento, lo que impone la condición de no resbalamiento y por ende altos gradientes de velocidad. Ahora bien, en las experiencias con oleaje, se pudo apreciar que existe una generación de energía en las zonas alejadas del fondo. Se concluye que los flujos con oleaje tienen una energía cinética turbulenta substancialmente más grande en la región más cercana a la superficie libre.

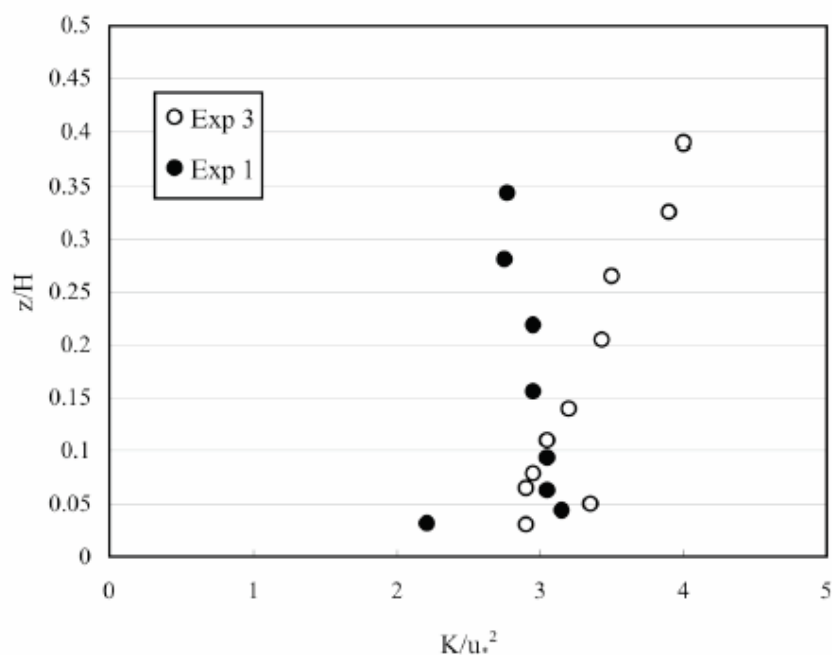


Figura 3 Perfiles de Energía cinética turbulenta adimensionalizados

En la Figura 4 se presentan los perfiles de concentración obtenidos mediante el promedio de la señal de conductividad en cada punto para cada perfil, para luego construir los 7 perfiles asociados a cada experiencia.

Los perfiles se encuentran ordenados según la concentración, desde el perfil 1 hacia aguas abajo, hasta el perfil 7. Esto corresponde efectivamente al orden espacial de los perfiles, con lo que se concluye que la concentración aumenta hacia aguas abajo.

Como era de esperarse, la concentración de sal es máxima en las zonas cercanas al fondo, decreciendo hasta el valor equivalente de concentración del agua potable en la zona cercana a la superficie libre. El flujo de agua potable que ingresa al canal evita la mezcla completa en la columna de agua generando además un alto gradiente de concentraciones. Además, se pudo ver que los perfiles de concentración se desplazan hacia aguas abajo, lo que es consecuente con una tasa de incorporación constante en la interfaz

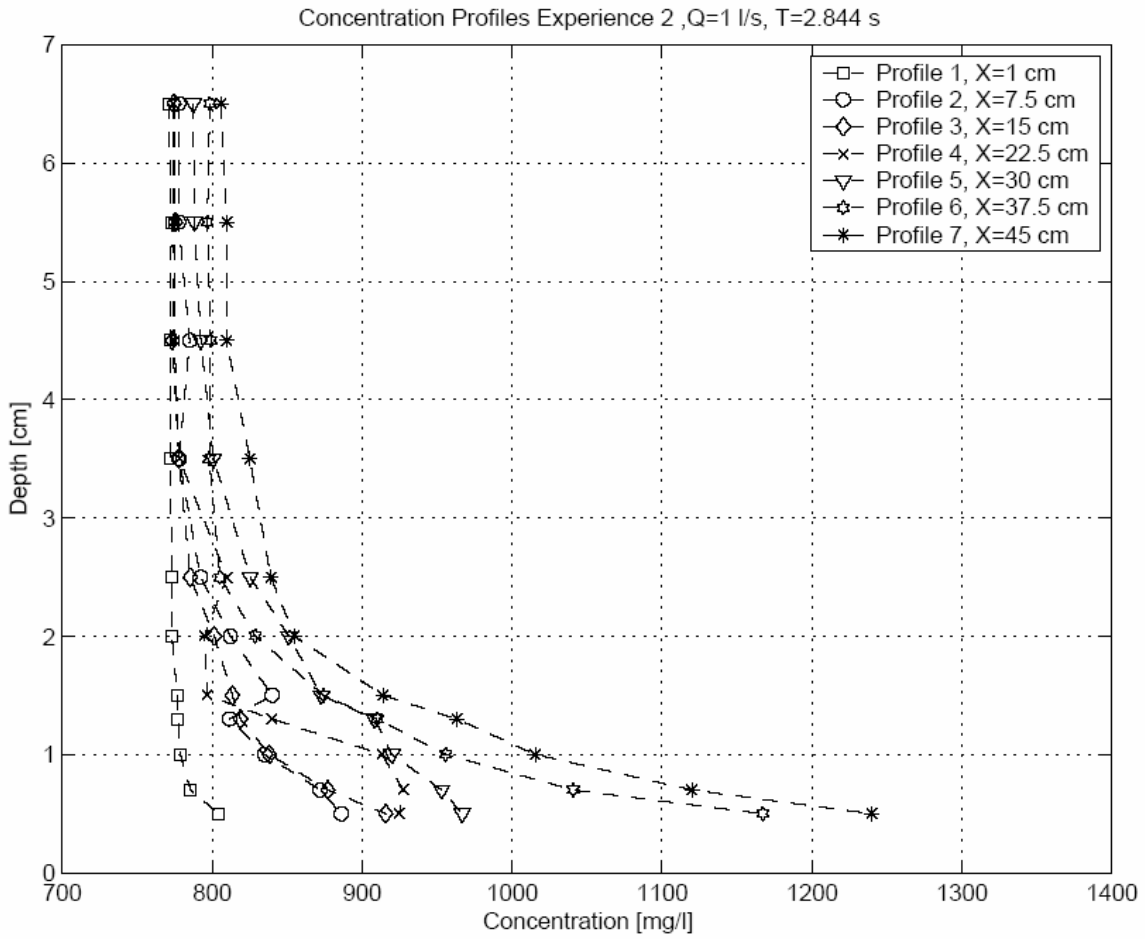


Figura 4: Perfiles de concentración

4. ANALISIS

Ordenando la ecuación de advección-difusión (2) y promediando sobre la turbulencia (3) se puede describir matemáticamente el problema en consideración. De la Ecuación (3) se reconocen los siguientes términos de izquierda a derecha: el primero corresponde al cambio impermanente de la concentración media, el segundo término está relacionado con el flujo advectivo medio y difusivo (turbulento y molecular) respectivamente en la dirección x. Finalmente el tercer término, de igual forma que el segundo, corresponde al flujo advectivo medio y difusivo total en la dirección z.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial wC}{\partial z} = D_{mx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{mz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{u} \cdot \bar{C} - D_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{w} \cdot \bar{C} - D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

donde; \bar{u} es la velocidad media horizontal, \bar{w} es la velocidad media vertical, \bar{C} es la concentración media de sal y D_{mi} y D_i son la difusividad molecular y total (molecular + turbulenta) en la dirección i , respectivamente. Es importante notar que en el segundo término, los efectos advectivos en la dirección del flujo son, en magnitud, mucho mayores que los difusivos. Considerando régimen permanente e integrando espacialmente en toda la columna de agua, luego de imponer que no existe flujo advectivo en la dirección z , se obtiene:

$$\frac{\partial G_m}{\partial x} + \left(D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \Big|_h - D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \Big|_o \right) = 0 \quad (4)$$

Finalmente, considerando que no existe flujo a través de la superficie libre, se obtiene la siguiente expresión (5):

$$\frac{\partial G_{mx}}{\partial x} - G_{mz=0} = 0 \quad (5)$$

Donde, G_{mx} es el flujo másico advectivo en la dirección x y $G_{mz=0}$ es el flujo másico difusivo a través de los sedimentos hacia la columna de agua.

Luego, considerando un modelo lineal de flujo másico hacia la columna (Dade 1993), se puede introducir un valor de coeficiente de intercambio masa, k_L , tal que:

$$G_{mz=0} = \frac{dM}{dt} = k_L \cdot (C_{sed} - \bar{C}_w) \quad (5.7)$$

donde, C_{sed} es la concentración de NaCl en los sedimentos y \bar{C}_w es la concentración media de NaCl en la columna de agua.

El valor de la concentración de NaCl en los sedimentos, se determinó mediante las muestras extraídas de esta zona en los experimentos, mientras que la concentración media de NaCl en la columna de agua se determinó mediante el promedio de la concentración del perfil solo en la zona estratificada.

En la Tabla 2 se presentan los valores del coeficiente de intercambio de masa obtenido para cada experiencia. Además se determinó el número de Sherwood, Sh , el cual permite realizar una comparación entre experiencias graficándolo en función del número de Reynolds de cada experiencia definido en función de u_* .

Tabla 2: Coeficiente de Intercambio de masa

	EXP 1	EXP2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6
Q [l/s]	1	1	1	2.5	2.5	2.5
T [s]	0	3	2.1	0	3	2.1
u* [cm/s]	0.2	0.2	0.215	0.4	0.47	0.42
v/u* [cm.]	0.05	0.05	0.05	0.025	0.021	0.024
dv [cm.]	0.5	0.5	0.47	0.25	0.21	0.24
δd [cm.]	0.057	0.057	0.053	0.024	0.029	0.027
Re	4537	4336	4776	10347	11909	10773
kl [cm./s]	0.0001215	0.0005990	0.0005207	0.0003651	0.0013993	0.0014224
Sh	131.0	645.8	561.4	393.6	1508.7	1533.6

Los resultados obtenidos se resumen en un modelo simple de transferencia de masa, expresado en función del coeficiente de intercambio de masa. Se concluye que k_L , adimensionalizado en la forma del número de Sherwood es una función potencial del número de Reynolds del flujo, aumentando a medida que aumenta este último. Además, el coeficiente de intercambio de masa resulta ser mayor para las experiencias con oleaje con respecto a las que no lo tienen, a un mismo caudal y número de Reynolds (Figura 5). Los parámetros adimensionales, números de Sherwood, Sh , de Reynolds, Re , y de Schmidt, Sc , se definen como:

$$Sh = \frac{k_L \cdot H}{D}, \quad Re = \frac{u_* H}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

donde D es el coeficiente de difusión de sal en el agua ($1.484 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$),

El valor de k_L es afectado directamente en su magnitud por la concentración C_{sed} que se considere. La determinación exacta de la concentración de sal en las cercanías de la interfaz ($z = 0$), resulta incierta en estos ensayos y en la instalación experimental solo se tiene registros de la concentración media en el lecho. Es importante tener presente que la concentración en la interfaz debería ser menor que la registrada en el experimento, por los gradientes de concentración que se producen en la capa límite de difusión en el lecho, inmediatamente bajo la interfaz agua-sedimento.

En la Figura 5 se presentan los resultados experimentales obtenidos en este estudio junto con aquellos de las experiencias de Hondzo (1999), obtenidos en un estudio de transferencia de oxígeno disuelto en la interfaz agua-sedimento.

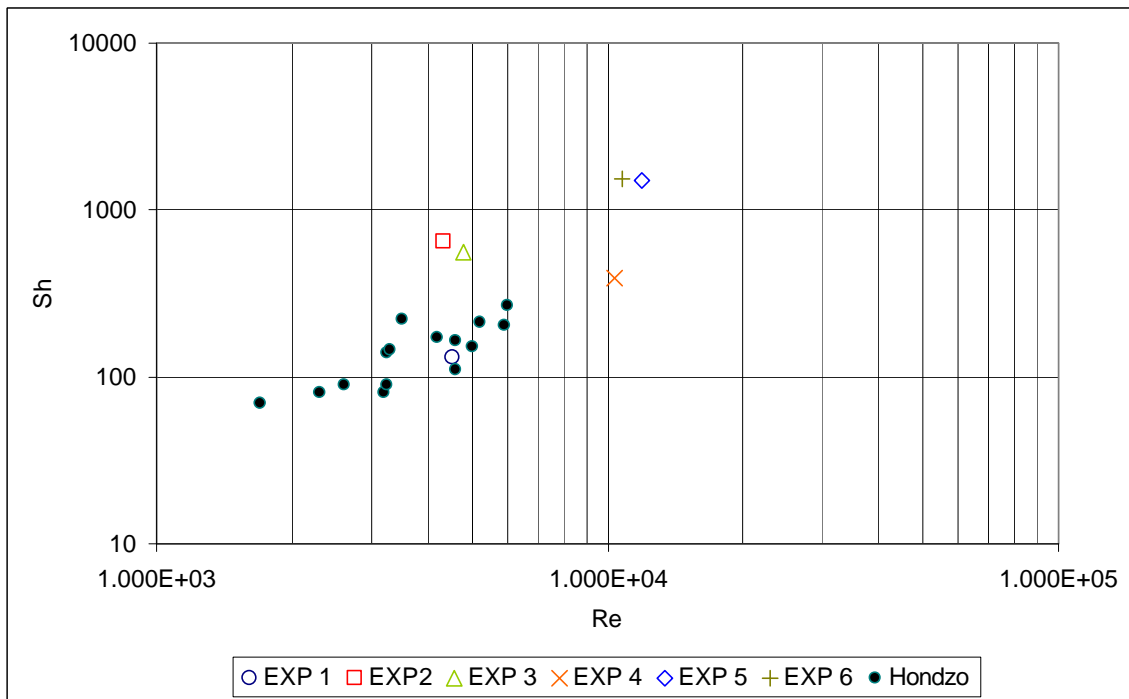


Figura 5: Número de Sherwood y Número de Reynolds

Distintos investigadores han presentado funciones de la transferencia de masa en términos de los números de Sherwood, de Reynolds y de Schmidt, mediante una correlación del tipo $Sh = a Re^b Sc^{1/3}$ (e.g., Probstein et al., 1972; Isaacson and Sonin, 1976; Incropera and Dewit, 1990; Hondzo, 1999). Los valores de las constantes a y b son obtenidos típicamente por mediciones experimentales, Hondzo por su parte determinó que los valores de a y b son 0.012 y 0.89 respectivamente.

De la Figura 5 se concluye que existe una buena correlación de la información con los resultados obtenidos por Hondzo. El comportamiento de las experiencias sin oleaje, tienen un comportamiento similar al obtenido por Hondzo, mientras que las experiencias con oleaje hacen evidente que poseen un coeficiente de transporte de masa mucho mayor y por ende indica que el transporte de masa desde los sedimentos hacia la columna de agua es aumentada por la presencia de oleaje.

5. CONCLUSIONES

Se ha analizado experimentalmente el efecto de la interacción entre oleajes y corrientes sobre la transferencia de masa en la interfaz agua-sedimento. Los experimentos se realizaron inyectando un trazador, consistente en una solución salina de baja concentración, en un volumen de control del lecho, de modo de mantener la saturación constante sin causar un flujo artificial de masa hacia la columna de agua. Las tasas de transferencia de soluto en la interfaz agua-sedimento se adimensionalizaron en la forma de un número de Sherwood. Se comprobó la existencia de una ley de potencia que relaciona el Sherwood con el número de Reynolds del flujo. En el caso de los experimentos sin oleaje, se obtuvo una buena

comparación con resultados experimentales previos de otros autores (transferencia de oxígeno disuelto desde la columna hacia el lecho). Los experimentos con oleaje mostraron que la modificación de la estructura del flujo por parte de las olas incrementan de manera importante la tasa de transferencia de masa en la interfaz agua-sedimento. El incremento de los gradientes de velocidad cerca del lecho y el movimiento orbital inducido por el oleaje parecen incrementar los flujos advectivos entre el lecho y la columna de agua, induciendo un mayor intercambio de masa en la interfaz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado por el Proyecto Fondecyt N° 1040494 y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

1. Boudreau, B., Jorgensen, B. (2001). *“The Benthic Boundary Layer”*, Transport Processes and Biogeochemistry.
2. Dean, R., Dalrymple, R. (1998). *“Water Wave Mechanics For Engineers And Scientists”*, Vol 2, Pág. 171 – 185.
3. Hondzo, M. (1998) *“Dissolved oxygen transfers at the sediment-water interface in a turbulent flow”* Water Resources Research, Vol. 34, No. 12, Pag. 3525-3533.
4. Niño, Y., García, C., Cantero, M., García, M. (2005), *“Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeter”*, Journal of Hydraulic Engineering.
5. Niño, Y., Reiher, C., Quijada, S. *“Estudio Experimental y Numérico de la transferencia de solutos desde el sedimento en una columna de agua agitada por grillas”* Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVII Congreso Chileno de Hidráulica.
6. Niño, Y., (2004). Proyecto FONDECYT *“Turbulencia y transporte en la capa límite béntica de lagos y estuarios, estudio de terreno y modelación”*, concurso regular a fondos FONDECYT.
7. Patil, S., Rastogi, A.K., Mahajan, S.P. (2003), C.W. Li, *“Transport of pollutant in open channel with short waves”*, Environmental Fluids Mechanics 3: Pág. 235-248.