

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**XVIII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

**EFFECTO COMBINADO DEL VIENTO Y LA TURBULENCIA DE UN CUERPO  
DE AGUA EN EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO**

**ALDO TAMBURRINO T.<sup>1</sup>  
SEBASTIÁN RAYO V.<sup>2</sup>  
YARKO NIÑO C.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental respecto al efecto conjunto que tienen el viento y la turbulencia de un cuerpo de agua en la tasa de transferencia de oxígeno a través de la interfaz aire-agua. Los experimentos se realizaron en un túnel de viento acoplado a un estanque con agua, la que puede ser agitada mediante la acción de microchorros ubicados en la base del estanque. Mediciones de perfiles de velocidad del viento y del agua permitieron determinar los parámetros del flujo característicos del fenómeno, la velocidad friccional del flujo de viento, la energía cinética turbulenta y la escala integral de longitudes del movimiento del agua, en la cercanía de la superficie libre. Además de los parámetros anteriores, la tasa de transferencia de oxígeno (estandarizada a 20 °C) se correlacionó con el coeficiente de difusión del oxígeno en agua y la viscosidad cinemática del agua. En términos adimensionales, la transferencia queda definida mediante una relación del tipo  $St\sqrt{Pe} = az^b$ , donde  $St$  es el número de Stanton,  $Pe$  es el número de Peclet y  $z$  es una nueva variable adimensional que involucra al número de Reynolds y la razón entre velocidad friccional asociada al viento y la raíz de la energía cinética turbulenta. Los valores de  $a$  y  $b$  se determinaron a partir de los datos experimentales, obteniéndose un buen colapso de ellos.

---

<sup>1</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mail: [atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)

<sup>2</sup> Ingeniero de Proyectos, Área Hidráulica. JRI Ingeniería S.A. – mail: [srayo@jri.cl](mailto:srayo@jri.cl)

<sup>3</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mail: [ynino@ing.uchile.cl](mailto:ynino@ing.uchile.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Para un cuerpo de agua natural, la concentración de oxígeno disuelto (OD) juega un rol muy importante en la calidad del mismo. Debido a distintas causas (tanto naturales como por acción humana) se puede producir un déficit en la concentración de OD, lo que a su vez induce un flujo de oxígeno desde la atmósfera a través de la interfaz aire-agua, lo que se conoce como “reaeración”. Para poder predecir la capacidad que un cuerpo de agua de recuperar el nivel apropiado de OD, se fundamental conocer la velocidad o tasa a la cual se produce la transferencia de oxígeno desde la atmósfera,  $K_L$ .

La reaeración de un cuerpo de agua bajo condiciones tanto de viento sobre la superficie como también con agua en movimiento es un evento común en la naturaleza, y ha sido estudiada tanto en terreno como en laboratorio. Aunque existe cierto consenso en el proceso general de reaeración bajo efecto del viento y se han propuesto algunas aproximaciones teóricas, para propósitos prácticos se requiere de resultados empíricos para poder cuantificar la tasa de transferencia.

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de un estudio experimental en el que se busca cuantificar y modelar el efecto combinado de la turbulencia del cuerpo de agua y la acción el viento en la tasa de transferencia de oxígeno disuelto.

## 2. TRANSFERENCIA DE GASES A TRAVÉS DE INTERFAZ AIRE-AGUA

El efecto del viento en la tasa de reaeración en cuerpos de agua quietos o en movimiento ha sido investigado experimentalmente tanto en estudios de laboratorio como en terreno por diversos autores. En estos últimos, es frecuente encontrar a  $U_{10}$ , la velocidad medida a 10 m sobre la superficie, como la velocidad característica utilizada para describir el comportamiento del coeficiente de transferencia de oxígeno,  $K_L$ , o del coeficiente de reaeración,  $K_2 = K_L/h$  (donde  $h$  es la profundidad del flujo) (Banks, 1975, Wanninkhof, 1992, Crusius and Wanninkhof, 2003). Estudios realizados en túneles de viento también usan la velocidad medida a una cierta distancia sobre la superficie como velocidad característica (Mattingly(1977), Plate and Friedrich (1984)), o la velocidad media del viento (Zappa et al., 2001). Evidentemente, estas velocidades son arbitrarias, lo que dificulta la comparación de resultados obtenidos en terreno y en laboratorio. De este modo, parece más adecuado emplear la velocidad de corte del viento,  $u_{*a}$ , para representar el efecto del viento sobre la superficie libre (Komori et al., 1993, Peirson et al., 2007, Chu and Jirka, 1995, 2003).

Muchas de las relaciones propuestas en la literatura no son dimensionalmente homogéneas (Banks, 1975, Mattingly, 1977, Crusius and Wanninkhof , 2003), por lo que su uso bajo condiciones distintas para las que fueron deducidas debe hacerse con cautela. Por ejemplo, Banks (1975) propuso  $K_L = a_1 U_{10}^{1/2}$ ,  $K_L = a_2 U_{10}$ , y  $K_L = a_3 U_{10}^2$ , para lo que él definió velocidades de viento pequeñas, medias o altas, respectivamente, con  $K_L$  y  $U_{10}$  in m/s.  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son coeficientes con diferentes dimensiones, dependiendo de la fórmula. Entre los

investigadores que presentan relaciones adimensionales para el coeficiente de transferencia, pueden citarse Eloubaidi y Plate (1972) y Chu y Jirka (2003).

El efecto en la tasa de reaeración de olas generadas por el viento lo han estudiado, por ejemplo, Eloubaidi and Plate (1972), Jähne et al. (1987), Frew et al. (2004), y recientemente Peirson et al. (2007).

La reaeración debido al efecto combinado de los esfuerzos de corte generados en la interfaz aire-agua y en el fondo fue abordado por Chu and Jirka (1995, 2003), quienes propusieron una superposición lineal de ambos efectos.

Además del oxígeno, también se ha usado como trazadores otros gases para determinar el coeficiente de transferencia, entre los que se encuentra SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, He, Kr, Xe, Rn, solutos orgánicos, etc.) (Wanninkhof et al., 1985; Crusius and Wanninkhof, 2003; Mackay and Yeun, 1983; Komori et al., 1993; Jähne, 1990). La tasa de transferencia medida con estos gases se lleva a la de O<sub>2</sub> usando la proporcionalidad  $K_L \propto Sc^{-1/2}$ .

### **3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA**

#### **Instalación experimental**

La instalación experimental se esquematiza en la Fig. 1. Básicamente, es un túnel de viento de 8 m de longitud con sección rectangular de 50 cm de ancho por 40 cm de alto. En su extremo de aguas abajo, y a 1 m del término del túnel, se encuentra ubicado un estanque de 2 m de largo y 50 cm de profundidad, el que contiene agua. El flujo de aire se genera mediante un ventilador centrífugo, de 3 HP de potencia, el que permite generar velocidades medias de viento en la instalación en el rango 1,5 – 15 m/s. en las experimentaciones aquí reportadas, la velocidad del viento se midió mediante un anemómetro de hilo caliente 1-D (Extech, modelo 407123), instrumento que permite la adquisición de datos con frecuencia de 1 Hz. La velocidad media del flujo de viento ( $U_a$ ) es uno de los parámetros de control de los experimentos.

El desarrollo de la capa límite fue acelerado mediante listones de madera, de 10 mm de altura y 5 mm de ancho, dispuestos en forma transversal al eje del túnel, al inicio de este. El fondo del túnel fue cubierto con papel lija, definiendo una rugosidad de 0,2 mm. Las paredes y cielo del túnel se dejaron bajo una condición aerodinámicamente lisa. La capa límite se encuentra plenamente desarrollada al inicio del estanque de agua. La evolución de la capa límite sobre la superficie de agua fue reportada en Tamburrino y Rayo (2004).

En la base del estanque de agua se dispone de un arreglo de 9 x 39 boquillas de 3 mm de diámetro interior, separadas entre si 5 cm en direcciones ortogonales y a 5 cm de las paredes del estanque. El agua es inyectada y evacuada a través de una serie de mangueras, lo que genera un circuito cerrado y permite la generación de turbulencia isotrópica (Pujol, 1999). El agua es impulsada mediante una bomba centrífuga horizontal de 4 HP de potencia instalada. La velocidad de los microchorros,  $U_C$ , es otro parámetro de control de los experimentos.

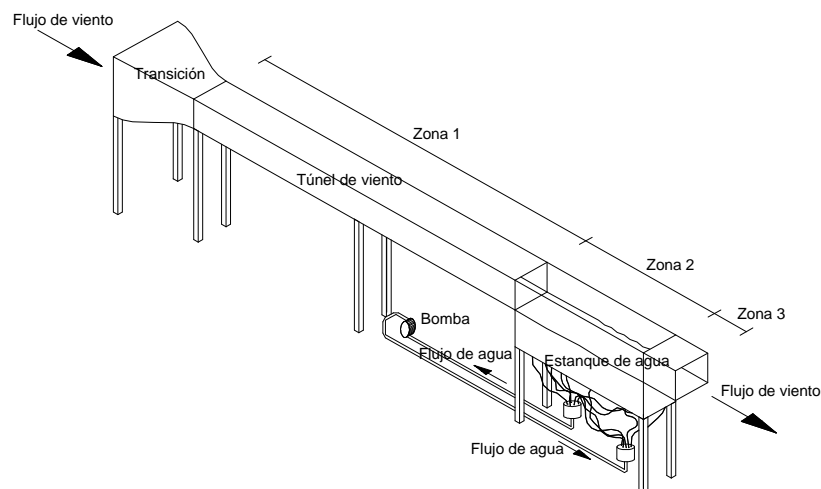


Fig. 1. Esquema de la instalación experimental

La determinación de la energía cinética turbulenta del flujo se hizo a partir de registros de velocidad del flujo en la fase líquida mediante un ADV (anemómetro acústico Doppler) Sontek 3-D microADV, el que permite medir las tres componentes de la velocidad a una tasa de 50 Hz.

La concentración de oxígeno disuelto en el agua se midió con un oxímetro, modelo TriOximatic 300 con microprocesador Oxi 3000, el que permite la adquisición de datos con frecuencia de 1 Hz y una precisión de 0,1 mg/l.

Finalmente, la instalación experimental fue instalada dentro de una cámara cerrada, con el objetivo de mantener el ambiente libre de polvo. En la Fig. 2 se presenta una foto de la instalación experimental utilizada en el presente estudio, antes de instalar la cámara.



Fig. 2.- Instalación experimental

### Procedimiento experimental

Se consideró 8 velocidades medias de viento, en el rango 0 a 11,4 m/s y 5 velocidades medias de chorros, en el rango 0 a 2,2 m/s (ver Tabla 1), con un total de 39 condiciones experimentales, para cada una de las cuales se procedió a generar un déficit en el oxígeno disuelto presente en el cuerpo de agua, mediante la adición de sulfito de sodio. La concentración de oxígeno disuelto se midió durante un período de 2 horas. Paralelamente,

se midió la distribución vertical de velocidad del viento sobre el estanque a lo largo del eje del túnel en perfiles verticales equiespaciados cada 20 cm.

Se registró las tres componentes de velocidad del flujo de agua en el plano central del estanque, en cinco perfiles equiespaciados 40 cm entre sí y a distintas alturas desde el fondo del estanque, separadas entre si cada 3 cm.

#### 4. RESULTADOS

La tasa de reaeración se determinó a partir de las series de tiempo de concentración de OD en la masa de agua. Los valores, para cada una de las condiciones experimentales, estandarizado a 20 °C, se presentan en la Tabla 1.

En las Figs. 3 y 4 se muestran los resultados de la tasa de reaeración para las condiciones experimentales que consideran sólo el efecto del viento ( $U_C = 0$ ), los que muestran la misma tendencia que los resultados obtenidos por otros autores: Zappa et al. (2001), Chu y Jirka (2003), Wanninkhof et al. (1985), Mackay y Yeun (1983), Liss (1973), Kraft (1983) y Nakayama (2000) (estos tres últimos presentados por Chu y Jirka (2003)). En la Fig. 3, la acción del viento se caracteriza mediante la velocidad media  $U$  y en la Fig. 4, a través de la velocidad friccional  $u_{*a}$ .

Tabla 1. Tasa de transferencia de oxígeno para distintas condiciones experimentales

		Tasa de reaeración $K_L$ (cm/h)				
		Velocidad microchorros $U_C$ (m/s)				
		0,0	0,7	1,2	1,7	2,2
Velocidad media del viento $U$ (m/s)	0,0	–	2,3	2,9	4,6	4,9
	1,5	2,0	3,3	4,5	4,9	7,1
	3,2	6,1	6,3	5,9	7,6	8,6
	4,8	10,7	7,6	8,3	9,3	12,6
	7,1	17,3	19,6	23,2	26,0	26,6
	7,9	30,1	26,0	28,0	21,7	27,6
	10,3	38,4	34,1	38,3	32,4	33,2
	11,4	42,9	33,7	39,6	40,5	39,4

Es frecuente encontrar en la literatura que la relación entre la tasa de transferencia y la velocidad del viento no se presente de manera adimensional, sino como se ha hecho en la Fig. 3. La línea corresponde a la relación  $K_L = 2,1 \times 10^{-7} U^{3/2}$ , donde  $K_L$  y  $U$  están en cm/s.

Las líneas de la Fig. 4 corresponden a la relación de Chu y Jirka (2003), dadas por  $K_L = 6 \times 10^{-5} u_{*a}^{0,8}$  y  $K_L = 9,87 \times 10^{-7} u_{*a}^{2,25}$ , para  $u_{*a} < 17$  cm/s y  $u_{*a} > 17$  cm/s, respectivamente. Tanto el coeficiente de transferencia como la velocidad friccional están en cm/s.

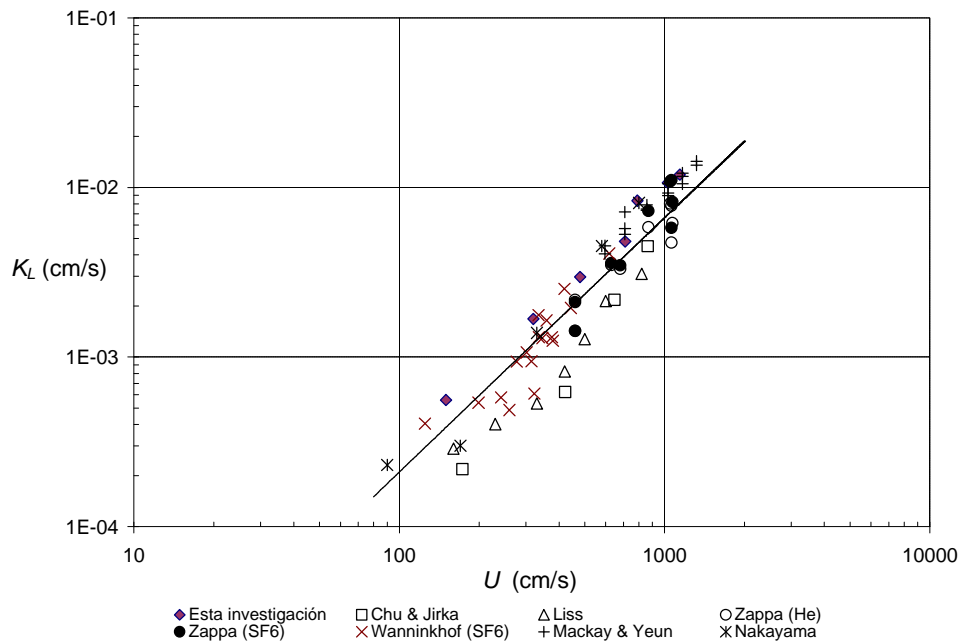


Fig. 3. Tasa de reaeración  $K_L$  en función de la velocidad media del viento  $U$

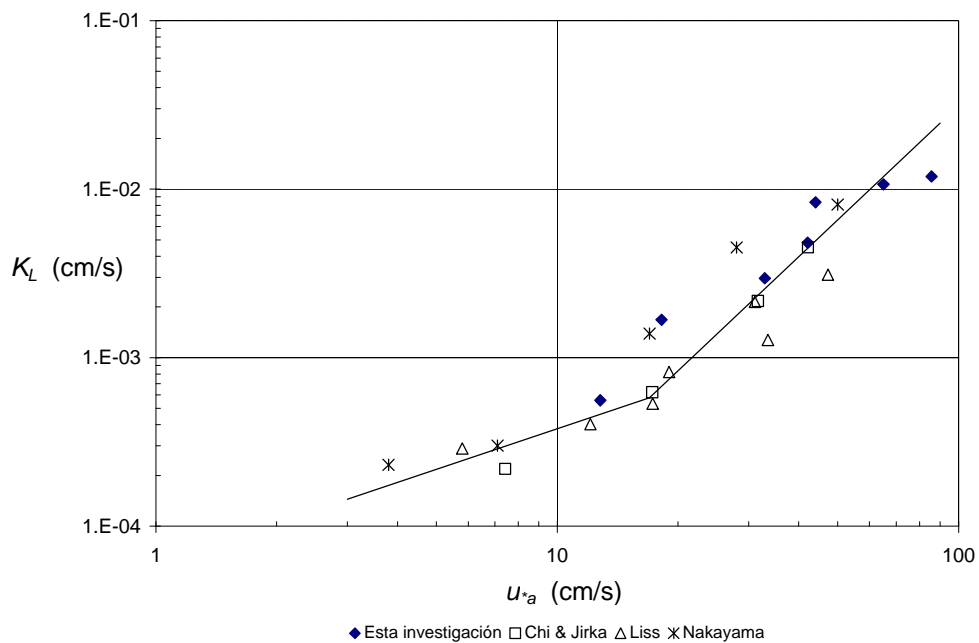


Fig. 4. Tasa de reaeración  $K_L$  en términos de la velocidad friccional del viento  $u_{*a}$

La Fig. 5 reúne todos los datos experimentales mostrando el efecto combinado de la agitación del agua en el estanque a través de los microchorros como la acción del viento.

Los primeros están caracterizados por su velocidad  $U_C$  y el viento por su velocidad friccional.

Con el objeto de generalizar los resultados obtenidos, y hacerlos independientes del mecanismo de generación de la turbulencia, se considera como una variable apropiada la energía cinética turbulenta  $k$ , evaluada en la cercanía de la superficie libre (Tamburrino, 2004). En el análisis que sigue se utiliza el valor promedio espacial de esta energía y se denota  $k_{top}$ . En la Fig. 6 se presenta  $k_{top}$  en función de la velocidad de los microchorros,  $U_C$ , para las distintas series de velocidad media de viento,  $U$ . (En la leyenda de esta figura y en las que siguen,  $U_v$  corresponde a  $U$ ). Se considera que esta energía es un parámetro adecuado ya que es resultado del efecto conjunto de la transferencia de energía hacia el cuerpo producto del viento como de la agitación producida por los microchorros.

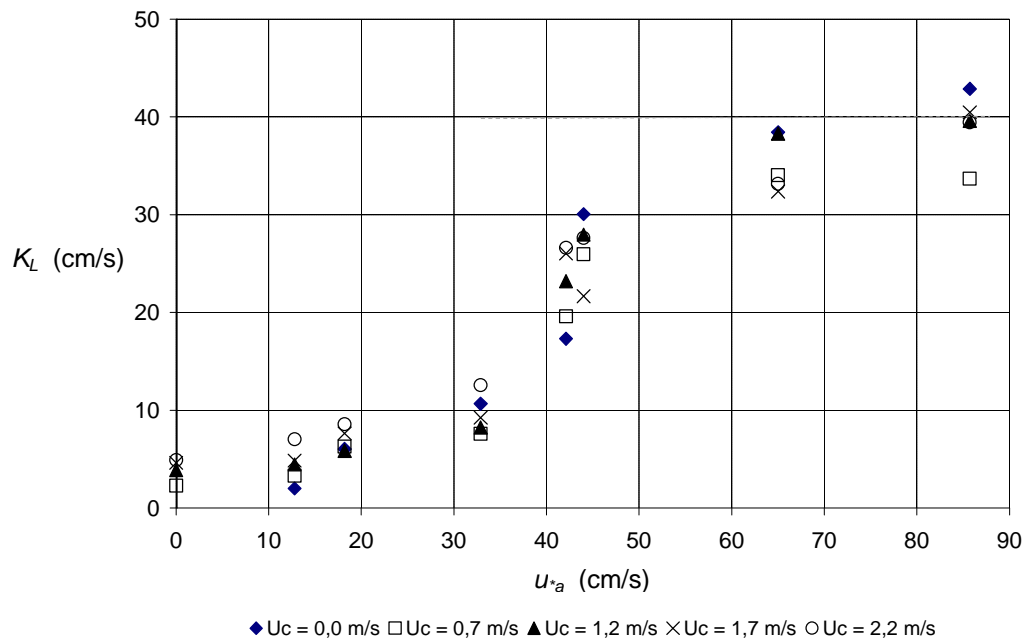


Fig. 5. Efecto combinado de la acción del viento y agitación del agua en el estanque sobre la tasa de reaeración.

La dependencia de la tasa de reaeración con la energía cinética turbulenta en la cercanía de la superficie libre se presenta en la Fig. 7.

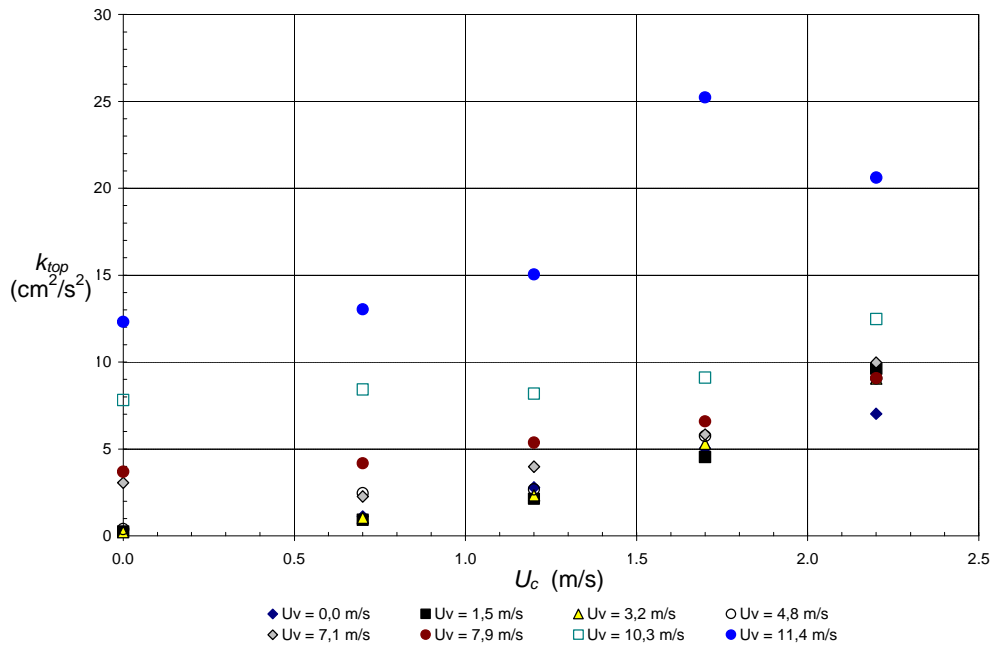


Fig. 6. Energía cinética turbulenta promedio cerca de la superficie libre  $k_{top}$

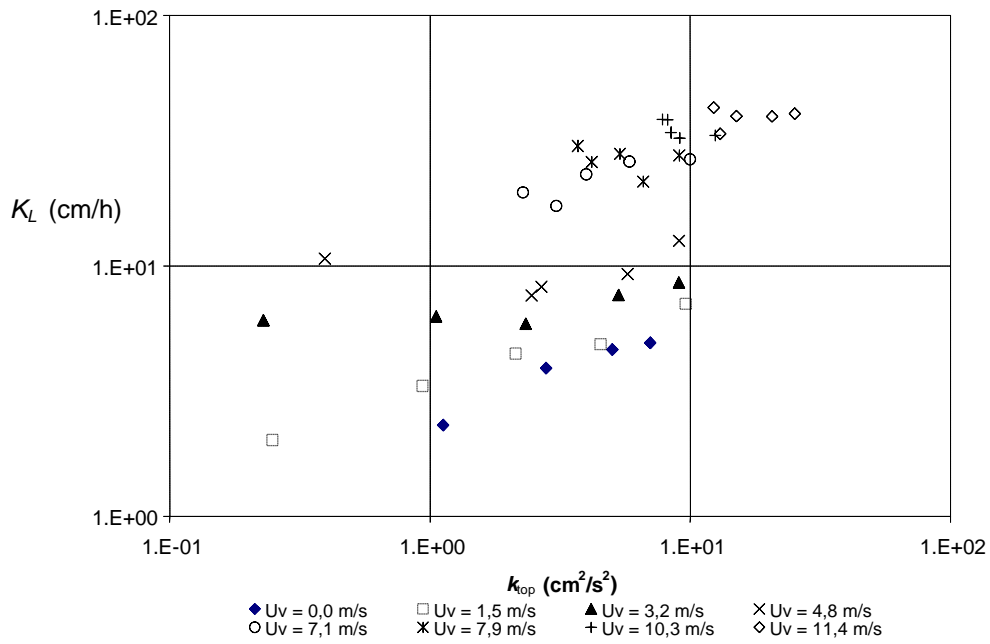


Fig. 7. Tasa de reaeración  $K_{20}$  vs. energía cinética turbulenta cerca superficie libre  $k_{top}$



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Desarrollo de una relación funcional general para el coeficiente de transferencia de masa

El flujo de oxígeno a través de la interfaz aire-agua es controlada por la fase líquida, y está dada por

$$F = K_L(C_S - C_B) \quad (1)$$

donde  $F$  es el flujo por unidad de área a través de la interfaz,  $C_S$  es la concentración de saturación de oxígeno en el agua,  $C_B$  es la concentración de OD en la masa de agua, y  $K_L$  es el coeficiente de transferencia.

Si se considera la transferencia de oxígeno disuelto a través de la superficie libre de un cuerpo de agua sometida a la acción del viento en su forma más general,  $K_L$  puede considerarse que depende del coeficiente de difusión del oxígeno en el agua,  $D$ , de las propiedades del agua, las características del flujo de agua, la acción del viento y las características del canal o cuerpo de agua, i.e.,

$$K_L = f(D, \mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{r}, \mathbf{r}_a, U_{Ca}, U_{Cw}, L_{Cw}, S, W, k_s, SF, g) \quad (2)$$

donde  $\mathbf{n}$  es la viscosidad cinemática del agua,  $\mathbf{s}$  es la tensión superficial aire-agua,  $U_C$  y  $L_C$  son escalas características de velocidad y longitud, y  $g$  es la aceleración de gravedad. Los subíndices  $a$  y  $w$  indican aire y agua, respectivamente.  $W$  es una dimensión característica del cuerpo de agua y  $SF$  un factor de forma del mismo. Si se tiene un cauce, deberá considerarse,  $k_s$ , la rugosidad del fondo y su pendiente,  $S$ . En este caso, la dimensión característica  $W$ , corresponde al ancho del cauce. La acción del viento se ha representado mediante una velocidad característica, lo que es lícito al considerar que existe una relación que permite ligar alguna velocidad asociada al viento con el esfuerzo de corte o arrastre que éste ejerce sobre la superficie libre. De este modo, es posible escribir la siguiente relación funcional:

$$\frac{K_L}{U_{Cw}} = \mathbf{F} \left( SF, S, \frac{U_{Cw}}{U_{Ca}}, \frac{W}{L_{Cw}}, Fr, Re, Sc, We, \frac{k_s}{L_{Cw}} \right) \quad (3)$$

donde  $Fr = \frac{U_{Cw}}{\sqrt{gL_{Cw}}}$ ,  $Re = \frac{U_{Cw}L_{Cw}}{\mathbf{n}}$  y  $We = \frac{\mathbf{s}}{\mathbf{r}U_{Cw}^2L_{Cw}}$  son los números de Froude,

Reynolds y Weber asociados al flujo, respectivamente.  $Sc = \frac{\mathbf{n}}{D}$  es el número de Schmidt.

El coeficiente de transferencia de masa adimensional se presenta a veces como un número de Stanton,  $St = \frac{K_L}{U_{Cw}}$ .

En el flujo en canales,  $SF$ ,  $S$ ,  $Fr$ ,  $Re$  y  $k_s/L_{Cw}$  están ligadas mediante una ley friccional, es decir, existe una relación  $\mathbf{G}(SF, S, Fr, Re, k_s/L_{Cw}) = 0$ , y uno de estos parámetros puede ser excluido del análisis. En canales muy anchos,  $W/L_{Cw}$  y  $SF$  no son relevantes. De este modo, la existencia de una relación funcional suministrada por la ley de resistencia permite tener  $S = \mathbf{G}_S(Fr, Re, k_s/L_{Cw})$ . Alternativamente, es posible también tener  $Fr = \mathbf{G}_{Fr}(S, Re, k_s/L_{Cw})$ , o  $Re = \mathbf{G}_{Re}(Fr, S, k_s/L_{Cw})$ . Despreciando, además, efectos capilares, la relación (3) puede reducirse a:

$$St = \mathbf{F}\left(\frac{U_{Cw}}{U_{Ca}}, Fr, Re, Sc, \frac{k_s}{L_{Cw}}\right) \quad (4)$$

Para el flujo en canales, usualmente se toma a la profundidad como una longitud característica. Como velocidad característica,  $U_{Cw}$ , es frecuente encontrar en la literatura la velocidad media del flujo ( $U$ ) o la velocidad friccional ( $u_{*w}$ ). Del mismo modo, como velocidad característica del aire, la velocidad del viento a una cierta altura o su velocidad de corte ( $u_{*a}$ ) pueden ser usadas. Muchas relaciones de cálculo no contienen al número de Schmidt,  $Sc$ , porque ellas están limitadas a la transferencia de OD, y estandarizadas a 20°C. La ecuación de Van't Hoff- Arrhenius permite ligar el coeficiente de transferencia de masa a 20°C con el que se tiene a otra temperatura  $T$ :  $K_L(T) = K_L(20^\circ\text{C})Q^{T-20}$ ,  $Q = 1,024$ .

La combinación de los parámetros adimensionales involucrados en la relación (4) puede formar otros, también presentes en la literatura, como por ejemplo el número de Peclet:

$$Re Sc = Pe = \frac{U_{Cw} L_{Cw}}{D}$$

La relación (4) se simplifica aún más si se considera el análisis realizado por Tamburrino (2004), en el que se establece que los parámetros que condicionan el fenómeno de transferencia de gas a través de una interfaz aire-agua son aquellos asociados a las escalas turbulentas en la cercanía de la superficie libre. De este modo, es posible prescindir de la aspereza relativa. Considerando, además, que los efectos gravitacionales no son importantes en el fenómeno, se tiene:

$$St = \mathbf{F}\left(\frac{U_{Cw}}{U_{Ca}}, Re, Pe\right) \quad (5)$$

### Aplicación al presente estudio

Siguiendo el análisis establecido por Tamburrino (2004), las escalas de de velocidad y longitud características del proceso de transferencia de masa a través de la interfaz aire-

agua están definidas a partir de la energía cinética turbulenta y la escala integral de longitudes, ambas en la cercanía de la superficie libre. De este modo, se define la velocidad característica como  $u_k \equiv \sqrt{k_{top}}$ . La escala integral de longitud se determina a partir del espectro asociado a la componente turbulenta de la velocidad en la dirección del flujo principal (coincidente con la dirección del viento en este estudio) y está dada por

$$L_x = \sqrt{u'^2} \frac{\int G(\mathbf{j}) d\mathbf{j}}{\int G(\mathbf{j}) \mathbf{j} d\mathbf{j}} \quad (6)$$

donde  $G(\mathbf{j})$  es el espectro de densidad de energía cerca de la superficie del agua,  $\mathbf{j}$  es la frecuencia y  $u'$  corresponde a la componente turbulenta de la velocidad, en la dirección del viento.

De esta forma, los parámetros del flujo que describen el proceso de transferencia de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua sometido a la acción del viento se definen a partir de las siguientes variables características:  $U_{Cw} \equiv u_k \equiv \sqrt{k_{top}}$ ,  $L_{Cw} \equiv L_{xtop}$  y  $U_{Ca} \equiv u_{*a}$ , de tal manera que se definen los parámetros adimensionales  $Re_k = \frac{u_k L_{xtop}}{\nu}$  y  $Pe = \frac{u_k L_{xtop}}{D}$ .

Previo a su representación en la forma de la relación funcional  $St = F\left(\frac{u_k}{u_{*a}}, Re_k, Pe\right)$ , los datos medidos se muestran en la Fig. 8 como una relación híbrida  $St = \mathbf{X}(Re_k, Pe, u_k, u_{*a})$ .

Como ya se indicó, las escalas turbulentas evaluadas en la cercanía de la superficie libre incorporan los mecanismos de generación turbulenta asociados tanto al viento como al cuerpo de agua. Sin embargo, existen fenómenos en la superficie libre que no están representados exclusivamente por la turbulencia, como lo son, por ejemplo, el cambio de rugosidad de la superficie de agua (crecimiento de la aspereza que condiciona al perfil de velocidades del viento), fenómeno de *microbreaking* o rompimiento de micro olas, etc. Se postula que todos estos fenómenos quedan definidos por el esfuerzo de corte que el viento ejerce sobre la superficie libre.

Se define una nueva variable,  $\mathbf{z}$ , que involucra tanto el efecto de la turbulencia en la masa de agua, como el de esfuerzo de corte en la superficie:  $\mathbf{z} = Re_k \mathbf{Y}$ , donde

$$\mathbf{Y} = \left(1 + a \left(\frac{u_{*a}}{u_k}\right)^n\right)^m. \text{ Utilizando la nueva variable, el mejor ajuste define } n = 2, m = 1,5 \text{ y}$$

$a = 0,0075$ . Como se muestra en la Fig. 9, los datos tienden a colapsar en una tendencia única. La relación de mejor ajuste está dada por:

$$St\sqrt{Pe} = 0,0047\mathbf{z}^{0,7248} \quad (7)$$

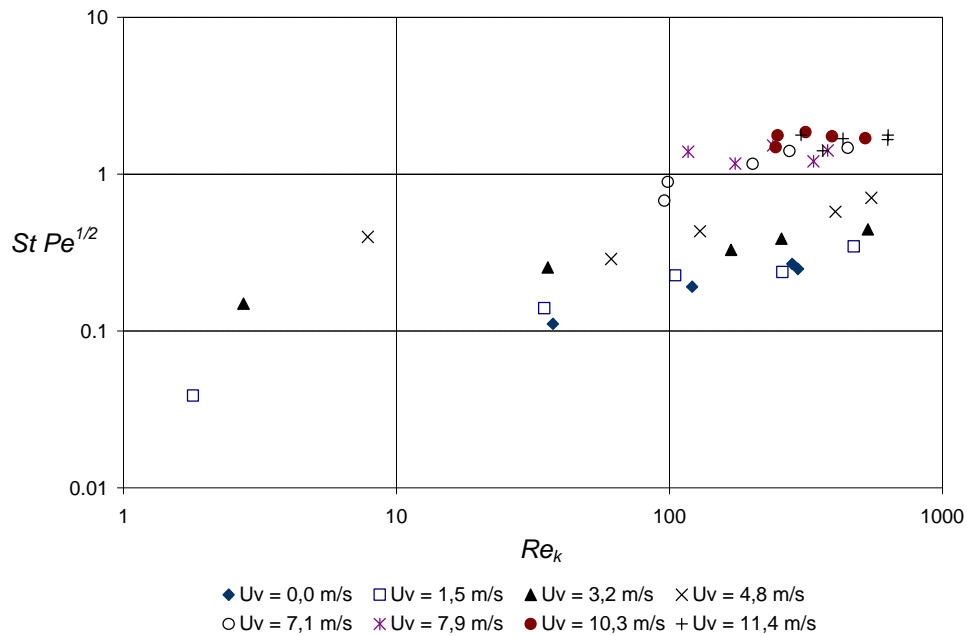


Fig. 8.- Transferencia de gas adimensional en términos de  $Re_k$ , para distintas velocidades del viento

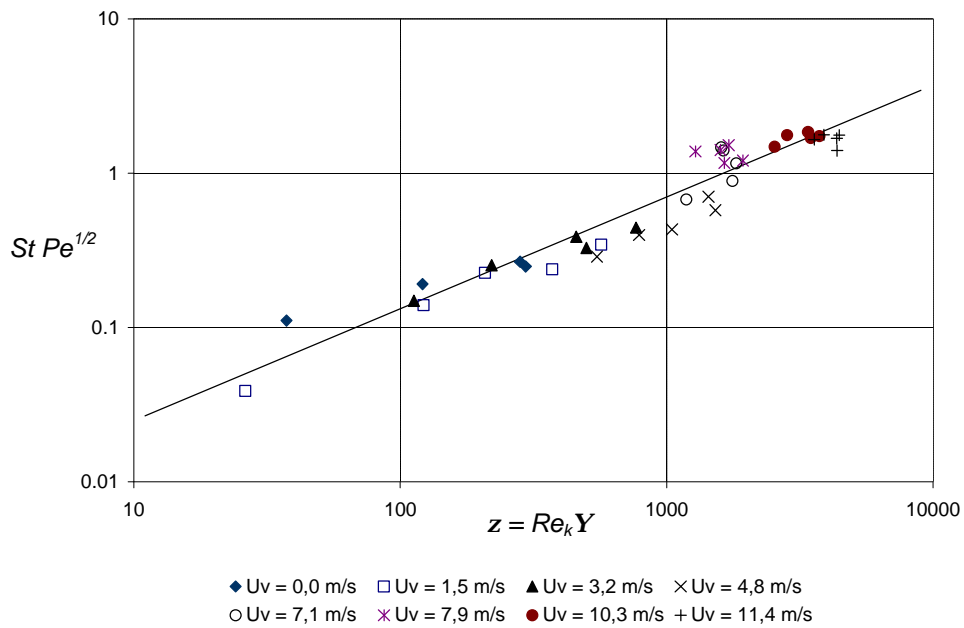


Fig.9.- Relación general para la transferencia de gas, considerando tanto el efecto del viento sobre la superficie libre como la turbulencia del fluido inmediatamente bajo la interfaz aire-agua

## 6. CONCLUSIONES

Siguiendo la línea de investigaciones previas (Tamburrino, 2004), la energía cinética turbulenta y la escala integral de longitudes cerca de la superficie libre son consideradas como las variables relevantes en el proceso de transferencia de oxígeno disuelto a través de la interfaz aire-agua. Otros fenómenos inducidos por el viento sobre la superficie, tales como el cambio de rugosidad de la superficie, rompimiento de micro-olas, etc., se postula que quedan caracterizados por la velocidad friccional del viento. Estas consideraciones permitieron definir una nueva variable,  $z$ , que considera tanto la turbulencia en la cercanía de la superficie libre como el efecto del viento, logrando representar la tasa de transferencia como una relación del tipo  $St\sqrt{Pe} = az^b$ , la que logra un buen ajuste de los datos experimentales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el proyecto Fondecyt 1020822, así como el financiamiento parcial otorgado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Chile, mediante el proyecto ENL 05/5.

## REFERENCIAS

- Banks, R. B. 1975. Some features of wind action on shallow lakes. J. of Env. Eng. Div., ASCE, 101, EE5, 813.
- Chu C. y Jirka G. 1995. Reaeration in Combined Wind/Stream Driven Flows. Air-Water Gas Transfer, (Jähne B. y Monahan E. C., eds.), 79.
- Chu C. y Jirka G. 2003. Wind and Stream Flow Induced Reaeration. J. of Env. Eng., 129, 12, 1129.
- Crusius J. y Wanninkhof R. 2003. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. Limnol. Oceanogr., 48, 3, 1010.
- Eloubaidi A. F. y Plate E. J. 1972. Wind Shear-Turbulence and Reaeration Coefficient. J. Hyd. Div., ASCE, 98, HY1, 153.
- Frew N. W., Bock E. J., Schimpf U., Hara T., Haußecker H., Edson J. B., Mc Gillis W. R., Nelson R. N., Mc Kenna S. P., Uz B. M. y Jähne B. 2004. Air-sea gas transfer: Its dependence on wind stress, small-scale roughness, and surface films. J. Geophys. Res., 109, C08S17.
- Gulliver J. S. y Halverson M. 1989. Air-Water Gas Transfer in Open Channels. Water Res. Res., 25, 1783.

Jähne B. 1985. New Experimental Results on the Parameters Influencing Air-Sea Gas Exchange. Air-Water Mass Transfer, (Wilhelms S. C. y Gulliver J. S., eds.), ASCE, 582.

Jähne B., Munich K. O., Böisinger R., Dutzi A., Huber W. y Libner P. 1987. On the Parameters Influencing Air-Watre Gas Exchange. J. Geophys. Res., 92, C2, 1937.

Komori S., Nagaosa R. y Murakami Y. 1993. Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence. 1993. J. Fluid Mech., 249, 161.

Mackay D. y Yeun A. T. K. 1983. Mass transfer coefficient for volatilization of organic solutes from water. Environm. Sci. Technol., 17, 4, 211.

Mattingly, G. E. 1977. experimental Study of Wind Effects on Reaeration. J. Hyd. Div., ASCE, 103, HY3, 311.

Peirson W. L., Walker J. W., Welch C. y Banner M. L. 2007. Defining the enhancement of air-water interfacial oxygen exchange rate due to wind-forced microscale waves. Transport at the Air – Sea Interface (Garbe C. S., Handler R. A. y Jähne B., eds.), Springer-Verlag, 117.

Plate E. J. y Friedich R. 1984. Reaeration of Open Channel Flow. Gas Transfer at Water Surfaces, (Brutsaert W. y Jirka G. H., eds.), 333.

Pujol J. 1999. Estructura turbulenta de un flujo generado por microchorros. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Tamburrino A. 2004. Scaling-up of gas transfer coefficient from agitated water tank measurements to open channel flow. XXX Congreso IAHR, Thesaloniki, Grecia.

Tamburrino A. y Rayo S. 2004. Estudio experimental del flujo de viento sobre una interfaz aire-agua. XXI Congreso Latinoamericano IAHR, Sao Pedro, Sao Paulo, Brasil.

Wanninkhof R. 1992. Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. J. Geophys. Res., 97, 7373.

Wanninkhof R., Ledwell J. y Broecker W. 1985. Gas exchange-wind speed relation measurements with sulfur hexafluoride on a lake. Science, 227, 1224.

Zappa C., Asher W. y Jessup A. 2001. Microscale Wave Breaking and Air-Water Gas Transfer. J. Geophys. Res., 106, C5, 9385.