



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA TRANSFERENCIA DE  
SOLUTOS DESDE EL LECHO EN FLUJOS TURBULENTOS**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
MENCION RECURSOS Y MEDIOAMBIENTE HÍDRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**CARLOS ALEJANDRO REIHER NÚÑEZ**

PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS  
MANUEL CONTRERAS LEIVA

SANTIAGO DE CHILE  
NOVIEMBRE 2012

## RESUMEN

En relación a los procesos de transferencia de masa que pueden tener lugar en la interfaz agua – sedimentos (por ejemplo, penetración de oxígeno disuelto hacia el interior de los sedimentos, o liberación de nutrientes desde los sedimentos hacia la columna de agua), se analiza teóricamente la influencia de la turbulencia en el flujo sobre la interfaz como factor que altera las tasas de transporte, así como determinante de la mezcla en medios con y sin estratificación.

Para efectuar este estudio, se parte desde una base teórica que incluye las ecuaciones básicas que describen el flujo y su turbulencia, y la difusión molecular y turbulenta de masa. Adicionalmente, se incorpora evidencia experimental en la determinación de coeficientes de intercambio de masa, para la calibración de modelos numéricos que relacionen la intensidad de turbulencia con la magnitud de los flujos en la mencionada interfaz, así como dando cuenta de la mezcla que se produce en la columna de agua, de los mismos solutos que son transferidos entre el agua y el lecho. Además, se realiza un estudio experimental, adaptando una instalación de columna con turbulencia generada por grillas, para representar diversos estados de flujo y analizar la influencia de la distribución vertical de la turbulencia en los procesos de transferencia, comparando casos de mezcla inducida por viento soplando sobre la superficie libre, o flujo gravitacional desarrollado en un canal.

Se aplica el conocimiento desarrollado en la implementación de estas herramientas en el análisis de un caso real apoyado con datos de terreno, del cual se tiene conocimiento de la importancia de los procesos de intercambio de oxígeno y la demanda de éste en los sedimentos de oxígeno, para la conservación de un ecosistema basado en el crecimiento de algas, que son alimento para otras especies.

Finalmente, se concluye sobre las relaciones encontradas entre los principales parámetros del sistema que gobiernan la transferencia y mezcla de solutos, estableciendo indicadores para cuantificar estos fenómenos, y entregando herramientas numéricas para el análisis detallado de las variaciones temporales de estos procesos.

*A mis padres*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organización y Contenido de la Tesis.....	3
2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES .....	5
2.1. Antecedentes Generales.....	5
2.2. Modelos de Transferencia de Masa en Flujos Turbulentos.....	11
2.3. Generalidades sobre Procesos Geoquímicos y Biológicos en los Sedimentos.....	12
3. METODOLOGÍA .....	17
3.1. Modelación Numérica.....	17
3.1.1. Modelo PROBE .....	18
3.1.2. Modelo de Transporte de Masa de Diferencias Finitas.....	22
3.2. Estudio Experimental .....	23
4. MEZCLA Y TRANSFERENCIA DE MASA CAUSADA POR TURBULENCIA DEL FLUJO.....	27
4.1. Introducción.....	27
4.2. Planteamiento Teórico .....	28
4.3. Modelación Numérica.....	31
4.4. Resultados y Discusión de Simulaciones.....	33
4.5. Síntesis del Análisis .....	47
5. TRANSPORTE VERTICAL DE MASA EN FLUJOS ESTRATIFICADOS TURBULENTOS.....	49
5.1. Introducción.....	49
5.2. Planteamiento Teórico .....	50
5.3. Modelación Numérica.....	51
5.4. Resultados y Discusión de Simulaciones.....	53
5.5. Síntesis del Análisis .....	65

6. ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS EN UNA COLUMNA AGITADA POR GRILLAS .....	68
6.1. Introducción.....	68
6.2. Estudio Experimental .....	69
6.2.1. Descripción de la Instalación .....	70
6.2.2. Instrumentación y Metodología Experimental.....	74
6.2.3. Condiciones Experimentales .....	76
6.3. Modelo Numérico .....	83
6.4. Resultados Experimentales.....	87
6.5. Resultados del Modelo Numérico .....	92
6.6. Síntesis del Análisis .....	100
7. APLICACIÓN AL ESTUDIO DE INTERCAMBIO DE OXÍGENO EN LA INTERFAZ AGUA – SEDIMENTO EN LAGUNAS SALINAS.....	101
7.1. Introducción.....	101
7.2. Estudio de Terreno.....	103
7.3. Modelo Numérico .....	104
7.4. Resultados del Trabajo de Terreno.....	107
7.5. Resultados del Estudio Numérico .....	111
7.6. Síntesis del Análisis .....	115
8. ANÁLISIS INTEGRADO Y CONCLUSIONES.....	118
8.1. Modelo de Transferencia Simplificado con Coeficiente $K_L$ .....	118
8.2. Modelación de Perfiles Verticales de Concentración en la Columna de Agua y los Sedimentos .....	120
8.3. Procesos de Mezcla en Flujos Turbulentos.....	121
8.4. Conclusiones Finales .....	123
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	124

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Gráficos complementarios de simulaciones numéricas de difusión de masa desde la interfaz agua – sedimento.	128
ANEXO B. Puesta en marcha de la instalación experimental en dependencias del Laboratorio de Hidráulica F. J. Domínguez.	143
ANEXO C. Diseño de inyección del soluto por el fondo de la columna, modificación a la instalación base (Saraiva, 2003).	154
ANEXO D. Datos medidos de conductividad en los experimentos finales.	156
ANEXO E. Discretización de ecuaciones de transporte de masa en agua y sedimento para su solución numérica mediante un esquema de diferencias finitas.	170
ANEXO F. Síntesis de resultados de modelación numérica de transferencia de masa desde los sedimentos, aplicada a condiciones experimentales.	174
ANEXO G. Código fuente de programa de cálculo de transferencia de oxígeno en la interfaz agua – sedimento.	178

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. MOTIVACIÓN**

En el tema del aprovechamiento de los recursos hídricos, resulta fundamental ligar dos conceptos: disponibilidad y calidad. El primero de ellos guarda relación con la existencia de agua, o bien la capacidad de un sistema de almacenarla; el segundo abarca el análisis de las propiedades de los cursos o cuerpos de aguas, midiendo aquellos parámetros relevantes, desde el punto de vista del uso que se quiere hacer de los recursos. Sobre esta última materia, es necesario tener en cuenta que los diferentes componentes que pueden estar presentes en la columna de agua interactúan entre sí, haciendo que el estudio de la calidad del agua se vuelva complejo, al requerir de un enfoque múltiple de los factores involucrados: variables meteorológicas e hidrodinámicas, características de los ecosistemas presentes, propiedades de los contaminantes que puedan existir, entre otros.

La necesidad constante de buscar recursos hídricos para el aprovechamiento en actividades humanas, y el marcado interés de las últimas décadas en la protección medioambiental, hacen imprescindible la investigación de la dinámica de los cuerpos acuáticos, analizando los parámetros que se determinen como esenciales para conservar la calidad de las aguas, y los factores que en ellos inciden. En particular, se requiere profundizar el conocimiento científico en la transferencia, mezcla y transporte de contaminantes, para comprender la interrelación entre las sustancias presentes en el agua y el medio ambiente acuático.

Ejemplos de la importancia de estos procesos los hay en todo tipo de medios acuáticos: condiciones de oxígeno y salinidad en los sedimentos de lagunas someras en ecosistemas andinos, donde existe una interdependencia entre microalgas que se desarrollan en el lecho (fitobentos) y especies superiores que se alimentan de ellas; movilización de contaminantes presentes en los sedimentos de ríos y lagos, originados en actividades antrópicas con impactos negativos sobre el medioambiente, que vuelven a presentarse cuando las condiciones de transferencia y mezcla naturales redistribuyen en la columna de agua estos solutos; interacción de compuestos y alteración del ciclo de nutrientes, vinculado con los procesos difusivos en el interior de los sedimentos, separando zonas aeróbicas y anaeróbicas, donde ocurren diferentes procesos químicos y se presentan diversos tipos de microorganismos reductores de materia orgánica (en sedimentos marinos, lacustres, o incluso en zonas particulares de ríos y estuarios).

El tema propuesto para el desarrollo de esta tesis se enfoca en los procesos de transferencia de solutos, en particular en el intercambio de éstos entre el sedimento y la columna de agua. Los sedimentos pueden actuar como receptores o emisores de sustancias, mediante fenómenos de adsorción y desorción asociados a los granos que los conforman, o bien comportarse como un estrato, dentro del cual cambia la química de los contaminantes, ya sea por los elementos componentes del lecho o por las condiciones específicas que pueden alcanzarse dentro de éste (p. ej., ambiente anóxico). Los flujos desde o hacia los sedimentos que ocurren a partir de la acumulación o reacción de compuestos pueden ser determinantes de la calidad del agua. A grandes rasgos, estos flujos son gobernados por las diferencias de concentración entre el lecho y la columna de agua, por las tasas de reacción de las especies presentes, y por la existencia de fenómenos turbulentos, que pueden llegar a incidir de tal forma sobre estos procesos de transporte, que los procesos de difusión molecular quedan confinados en una subcapa de dimensiones inapreciables, comparadas al resto de las escalas de longitud del problema. Esta turbulencia existente en los medios naturales constituye un factor determinante en el transporte de momentum, masa y calor, y por su naturaleza tridimensional, aleatoria y de múltiples escalas, se ha destacado dentro de los temas de mayor significación en el estudio actual de la hidrodinámica de sistemas acuáticos superficiales. La conjugación de estos elementos motiva el interés en el estudio del efecto de la turbulencia en estos procesos de transferencia, tal como se podría observar, por ejemplo, en el lecho de un río, o en una corriente de densidad por el fondo de un lago.

## **1.2. OBJETIVOS**

Se plantean a continuación los objetivos que conforman el soporte del desarrollo de esta tesis, separados en un objetivo general y una serie de objetivos específicos:

### *General:*

Estudiar la influencia de la turbulencia en la columna de agua, sobre los procesos de transferencia de solutos, entre los sedimentos del lecho y la fase líquida.



### *Específicos:*

Analizar, mediante el uso de herramientas computacionales de modelación de flujos turbulentos (usando las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas, RANS, modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$ , y ecuaciones de difusión molecular y turbulenta de masa), la influencia de determinadas distribuciones de velocidades y esfuerzos de corte sobre los flujos de solutos en la interfaz agua-sedimentos, y la consiguiente distribución de la masa transportada en la columna de agua.

Contrastar los resultados obtenidos mediante soluciones numéricas, con datos experimentales existentes sobre indicadores de turbulencia y mezcla, y con nuevas mediciones experimentales desarrolladas especialmente para la validación de la simulación numérica llevada a cabo, a partir de una instalación de laboratorio donde se inducen procesos de transferencia de masa y mezcla en una columna agitada por grillas.

Aplicar las herramientas de modelación desarrolladas en el análisis de datos de terreno, asociados a procesos de transferencia de oxígeno en la interfaz agua – sedimentos de aguas someras y cámaras bénticas, mejorando la comprensión de la dinámica de cursos o cuerpos de agua.

### **1.3. ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO DE LA TESIS**

El presente trabajo está compuesto por un total de ocho capítulos, donde el primero está representado por la presente introducción.

El capítulo 2 presenta una revisión de antecedentes que incluye aspectos generales de la física del fenómeno a estudiar, además de abarcar temas como la modelación de transferencia de masa, y los procesos químicos y biológicos relacionados con la interfaz agua – sedimentos.

El capítulo 3 se refiere a la metodología empleada, tanto en los aspectos de modelación numérica como en el trabajo experimental, de manera de sentar las bases a los estudios detallados posteriormente.

En el capítulo 4 se analiza el fenómeno de mezcla y transferencia de masa, causada por turbulencia del flujo. Se basa en modelación numérica en columnas de agua sin

estratificación, donde se analiza el comportamiento de un soluto liberado desde los sedimentos hacia la columna de agua.

El capítulo 5 extiende el análisis del capítulo previo, modelando numéricamente el transporte vertical de masa en flujos estratificados turbulentos. En este caso, interviene tanto la concentración de un soluto neutralmente boyante, transportado desde los sedimentos, como la salinidad como mecanismo de generación de estratificación vertical de la columna de agua.

El capítulo 6 detalla el estudio experimental y numérico del transporte de solutos, realizado en una instalación experimental que genera turbulencia mediante grillas de agitación. Los fenómenos de transferencia de los sedimentos y mezcla en la columna son contrastados con mediciones realizadas para la presente investigación.

En el capítulo 7, se rescatan datos de mediciones de terreno realizadas por otros autores, para el análisis de modelos numéricos que permitan estudiar la transferencia de un soluto en particular, en este caso oxígeno disuelto.

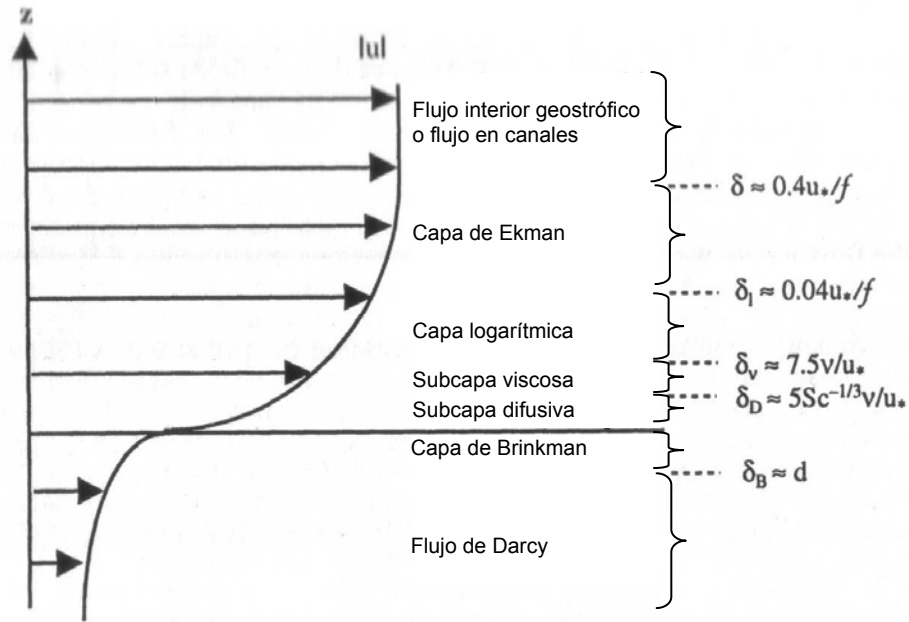
Finalmente, el capítulo 8 sintetiza los principales resultados de los capítulos previos, para concluir sobre la forma de interpretar las diversas investigaciones que componen este trabajo.

## **2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES**

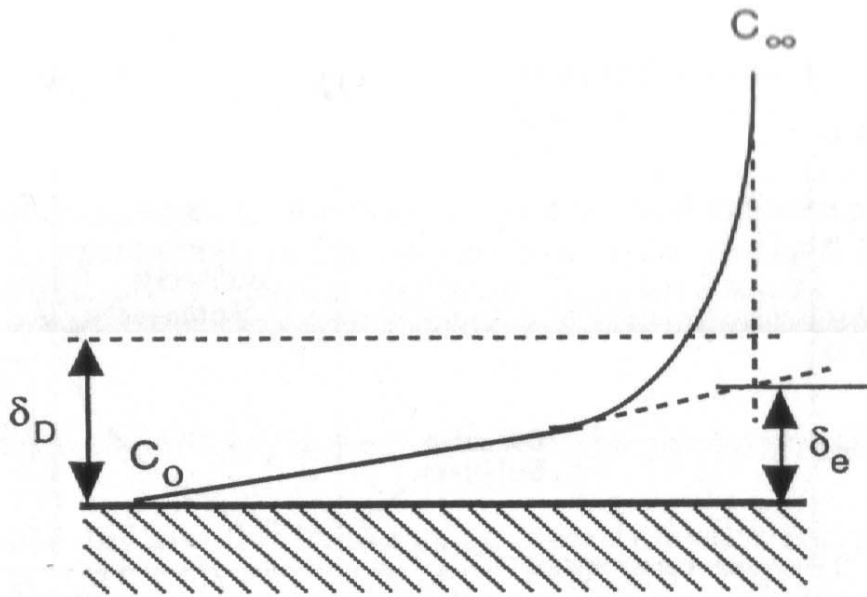
### **2.1. ANTECEDENTES GENERALES**

En la interfaz agua-sedimento existe una región denominada subcapa difusiva, que puede actuar como una región de impedancia para el transporte, y de esta forma ocasiona un retardo en las reacciones químicas que ocurren justo bajo el fondo (Dade, 1993) (ver Figuras 2.1 y 2.2). Esta subcapa es contigua a la interfaz donde la difusión molecular excede al transporte asociado a la turbulencia del fluido ambiente. Tanto para cuerpos de agua de grandes dimensiones (lagos y particularmente océanos), como para flujos en canales (por ejemplo, ríos y estuarios), en esta región carecen de importancia los efectos geostróficos, pero constituye, a pesar de sus pequeñas dimensiones (del orden de  $10^{-2}$  m), una de las principales resistencias a la transferencia de masa, calor y momentum en la interfaz agua-sedimentos (Svensson y Rahm, 1998). Se ha demostrado la incidencia de la turbulencia intermitente cercana al lecho, afectando el transporte turbulento de masa en la zona cercana al fondo, gobernando el transporte de sustancias desde y hacia los sedimentos, y la mezcla de solutos a través de la columna (Dade, 1993; Mackentun y Stefan, 1998; Hondzo, 1998; Steinberg y Hondzo, 1999; Gualtieri, 2004; Hondzo y Wüest, 2009; Higashino y Stefan, 2011).

Uno de los aspectos más importantes dentro de la hidrodinámica de cuerpos naturales de agua, como lagos y estuarios, es el rol que cumple la turbulencia en los procesos de transporte de masa, calor y momentum en la columna de agua. Las investigaciones recientes han apuntado al estudio de la interacción de las partículas con la turbulencia del flujo, tanto en su papel dentro del transporte de sedimento (Niño y García, 1996), como en la importancia de la turbulencia en la modificación de los procesos de transporte en la interfaz agua-sedimento (Dade, 1993). Respecto a esto último, se ha estudiado la presencia de una subcapa de difusión, adyacente al lecho, en la cual predominan los efectos moleculares sobre los turbulentos (Steinberg y Hondzo, 1999), surgiendo el interés de caracterizar las propiedades de esta zona del flujo.



**Figura 2.1** Esquema de la estructura vertical de la capa límite béntica, indicando sus capas por bajo y sobre la interfaz agua – sedimentos. Las fórmulas señalan los espesores aproximados de cada capa (adaptado de Dade et al., 2001).



**Figura 2.2** Esquema de subcapa difusiva en la interfaz agua – sedimentos. La subcapa tiene un espesor  $\delta_D$ , o se puede representar mediante un espesor efectivo  $\delta_e$ , con un gradiente lineal que produce el mismo flujo (Boudreau, 1997).

El mecanismo de transferencia, además de estar gobernado por las características propias del flujo y las fuerzas actuantes sobre éste, mantiene una estrecha relación con la microtopografía del lecho, incluso afectado por la presencia de madrigueras de animales acuáticos. En general, las conclusiones obtenidas bajo el marco de este razonamiento es que existe una intensificación de los procesos de transporte de masa al existir obstáculos en el flujo, traducido en el aumento de las tasas de transferencia con respecto a los efectos de difusión puramente molecular (Hutchinson y Webster, 1998).

Lo antes descrito se ha referido a investigación orientada a la transferencia de solutos hacia o desde la columna de agua; sin embargo, los procesos de transporte estudiados son extensivos a la transferencia de gas en la interfaz agua-sedimento. Por ejemplo, Steinberg y Hondzo (1999), correlacionaron coeficientes de transferencia de oxígeno en dicha interfaz con propiedades del flujo, como su velocidad, considerando su relación con la intensidad de la turbulencia.

Un proceso diferente de intensificación de la interacción en la interfaz agua-sedimento ocurre por el efecto de la fluctuación de los niveles de agua en lagos, resultando en el aumento de la concentración de partículas y nutrientes en estos cuerpos de agua (Vila et al., 2000). Cuando se trata de evaluar concentración de determinados elementos en la columna de agua, este fenómeno que afecta a la transferencia resulta tan importante como el de los flujos bénticos en lagos, cuya naturaleza eventualmente turbulenta conlleva los efectos de transporte desde el lecho antes descritos.

El interés puesto en la temática del intercambio de masa entre el sedimento y la columna de agua ha sido enfatizado por la necesidad de comprender las interacciones que afectan a los nutrientes presentes en las aguas, y su íntima relación con la calidad del agua, analizada desde la perspectiva del uso humano. Por ejemplo, se ha analizado la transferencia de nutrientes en aguas afectadas por descarga de aguas servidas (Garban et al., 1995), logrando un análisis conjunto del ciclo de los nutrientes junto a las tasas de transferencia de las distintas especies. Otro ejemplo lo constituye la demostración experimental de cómo la turbulencia de pequeña escala afecta el crecimiento de microorganismos (bacterias y algas) y el consumo de nutrientes por parte de éstos, en comparación a condiciones de aguas quietas (Hondzo y Wüest, 2009).

Las herramientas teóricas y numéricas desarrolladas hasta ahora permiten una caracterización de la turbulencia y su asociación a los procesos de transporte de sedimento, pero no ha estado tan clara su vinculación al transporte de solutos. De todas maneras, contar con estos elementos avanzados, basados en los principios de la hidrodinámica, junto a expresiones empíricas adecuadas, significa un gran avance para la concepción de nuevos modelos. Ejemplos de estas herramientas los constituyen la modelación tridimensional desarrollada por Wu (2000), la cual permite un análisis de la turbulencia y el transporte de sedimentos en casos particularmente complejos, como lo constituyen los estuarios, o el modelo de transferencia de oxígeno en la interfaz agua-sedimentos, afectadas por turbulencia y efectos de flujo en medios porosos, desarrollado por Higashino y Stefan (2011).

En general, se puede considerar que hasta ahora la investigación llevada a cabo ha definido adecuadamente las variables que controlan el transporte de masa en la interfaz agua-sedimento, pero se requiere mayor detalle respecto a la interacción entre la turbulencia cerca del lecho y la capa límite de difusión. El estado actual de la investigación abre las puertas al planteamiento de tareas experimentales bien definidas, las cuales, entrelazadas con los aspectos teóricos de la hidrodinámica, formarán la base del conocimiento sobre estas materias, y llevarán a una mejor comprensión de los procesos físicos y químicos que tienen lugar en el medioambiente, así como significarán un avance esencial en el manejo de la contaminación de cuerpos de agua y la interferencia del hombre en los ecosistemas naturales.

### Modelos de turbulencia

Para analizar adecuadamente los sistemas que se planteen, se requiere de contar con herramientas de modelación de la turbulencia, cuyo efecto se está planteando desde el comienzo como fundamental para cualquier fenómeno de transferencia de masa en medios acuáticos naturales. En particular, se plantea el uso de un modelo  $k-\epsilon$  de cierre de la turbulencia, uno de los más usados para relacionar variables como velocidad ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), energía cinética turbulenta ( $k$ ), disipación de energía cinética turbulenta ( $\epsilon$ ) y viscosidad de remolinos ( $\nu_T$ ).

Las principales componentes de este esquema de modelación se presentan a continuación (Svensson, 1986), considerando un esquema unidimensional donde las velocidades en las dos direcciones del plano horizontal, varían sólo en la vertical, lo cual aplica para la modelación de procesos en la interfaz agua – sedimentos. Además,

con ello la ecuación de difusión de masa sólo representa este transporte en la vertical, sin componente advectivo al considerar que la velocidad del flujo en la dirección vertical es nula.

Ecuaciones de momentum:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( (v + v_t) \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial z} \right) + f \rho v + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( (v + v_t) \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial z} \right) + f \rho u + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Ecuación de difusión de masa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{v_t}{Sc_t} + \frac{v}{Sc} \right) \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad \text{Ec. 2.3}$$

Modelo de turbulencia de dos ecuaciones (modelo k-ε):

Cálculo de la viscosidad turbulenta  $v_t$ , en base a la energía cinética turbulenta  $k$  y su tasa de disipación  $\varepsilon$  (relación de Prandtl/Kolmogorov):

$$v_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_t \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + P_b - \varepsilon \quad \text{Ec. 2.5}$$

Disipación de energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{ef}}{\rho \cdot \sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_{1\varepsilon} \cdot \nu_t \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + c_{3\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P_b - c_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$$

**Ec. 2.6**

$x, y$ :	Coordenadas del plano horizontal [L]
$z$ :	Coordenada vertical [L]
$t$ :	Tiempo [T]
$u, v$ :	Velocidad del flujo en las direcciones $x$ e $y$ , respectivamente [L·T <sup>-1</sup> ]
$C$ :	Concentración de soluto [M·L <sup>-3</sup> ]
$f$ :	Parámetro de Coriolis [T <sup>-1</sup> ]
$K$ :	Energía cinética turbulenta [L <sup>2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$\varepsilon$ :	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta [L <sup>2</sup> ·T <sup>-3</sup> ]
$\rho$ :	Densidad del fluido [M·L <sup>-3</sup> ]
$g$ :	Aceleración de gravedad [L·T <sup>-2</sup> ]
$\frac{\partial \hat{p}}{\partial x}, \frac{\partial \hat{p}}{\partial y}$ :	Gradiente de presión motriz en las direcciones $x$ e $y$ , respectivamente [L <sup>2</sup> ·T <sup>-2</sup> ]
$\nu, \nu_t$ :	Viscosidad cinemática (molecular y turbulenta, respectivamente) [L <sup>2</sup> ·T <sup>-1</sup> ]
$Sc, Sc_t$ :	Número de Schmidt (molecular y turbulento, respectivamente) (adimensional)
$\sigma_K, \sigma_\varepsilon, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{3\varepsilon}, c_\mu$ :	Constantes adimensionales empíricas del modelo K- $\varepsilon$

$P_b$  es la producción de energía cinética turbulenta debida a efectos de boyancia, que incluye contribuciones de energía calórica, salinidad y concentraciones de diferentes especies. Por ejemplo, frente a variaciones verticales de la concentración de un soluto, este término queda dado por la siguiente expresión:

$$P_b = \beta g \frac{\nu_t}{Sc_t} \frac{\partial C}{\partial z}$$

**Ec. 2.7**

donde  $\beta$  representa un coeficiente de expansión volumétrica para este soluto (con unidades de [L<sup>3</sup>·M<sup>-1</sup>]).



## 2.2. MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA EN FLUJOS TURBULENTOS

Los procesos de transferencia de masa están gobernados fundamentalmente por los gradientes de concentración dentro del medio donde ocurre su transporte. En el caso particular del análisis de la transferencia desde el lecho de un cuerpo de agua, el gradiente de interés corresponde a las tasa de variación de concentración en la vertical, en un ambiente con un flujo que ocurre en la dirección vertical, y sin un flujo neto en la vertical.

Al igual como ocurre en el caso de la transferencia de gases a través de una interfaz aire – agua (Brumley y Jirka, 1988), el proceso está influenciado por la difusión molecular y la estructura de la turbulencia en la vecindad de la interfaz. El flujo a través de ésta, por unidad de área, se puede describir mediante una expresión semejante a la ley de Fick que incluye los efectos de difusión turbulenta (Dade, 1993):

$$J = -(D + D_T) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Ec. 2.8}$$

- C: concentración de soluto
- z: distancia vertical desde el fondo del lecho
- J: flujo escalar por unidad de área
- D: Coeficiente de difusión molecular del soluto
- D<sub>T</sub>: Coeficiente de difusión turbulenta del soluto

La ecuación de continuidad de masa adicionalmente señala, sin considerar términos advectivos en la dirección vertical:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial t} + R \quad \text{Ec. 2.9}$$

- J: Flujo escalar por unidad de área
- R: Tasa de reacciones químicas asociadas a la masa.

La gran dificultad surge en la estimación de aquel coeficiente de difusión turbulenta que resulte de la naturaleza del flujo. Para ello, se requieren algunas consideraciones adicionales para poder estimar este parámetro en función de los términos fuente del movimiento del flujo.

Modelos planteados para el transporte de solutos en un lecho liso, determinan en definitiva el flujo de masa mediante un coeficiente de transferencia de masa  $\beta$  (Dade, 1993), de forma que:

$$J = \beta \cdot (C_{\infty} - C_0) \quad \text{Ec. 2.10}$$

$C_{\infty}$ : Concentración media, lejos del lecho

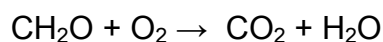
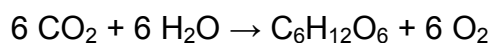
$C_0$ : Concentración cerca del lecho

El coeficiente  $\beta$  se ha mostrado directamente proporcional a la velocidad de corte, indicando un incremento de los fenómenos de transferencia turbulenta al aumentar el flujo. Distintas son las teorías que han intentado modelar este coeficiente, pero hasta en las más sencillas aparece la viscosidad turbulenta, los coeficientes de difusión y las características del flujo como variables fundamentales.

### **2.3. GENERALIDADES SOBRE PROCESOS GEOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN LOS SEDIMENTOS**

Dentro de los sedimentos, ocurre una serie de procesos geoquímicos y biológicos de diversa importancia, los cuales afectan su grado de interacción y dependencia con la capa límite béntica (Jørgensen & Boudreau, 2001). Existe una zonificación vertical y temporal para la ocurrencia de las reacciones diagenéticas primarias, las cuales reducen su potencial redox a medida que aumenta la profundidad. A continuación se listan los procesos más relevantes, como referencia para los casos que pueden analizarse a partir de las herramientas desarrolladas en esta investigación:

*Fotosíntesis y Respiración óxica:*



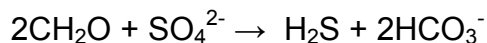
Corresponde a los procesos mediante los cuales determinados organismos producen o consumen, respectivamente, oxígeno disuelto. Este proceso determina la presencia de

zonas aeróbicas en la columna de agua y sedimentos. La respiración óxica, junto con la reducción de sulfatos (detallada más adelante), son consideradas la mayor fuente de oxidación de carbono orgánico, tanto en sedimentos marinos como en columnas de agua de menor profundidad, pero con oxígeno suficiente (Canfield et al., 1993).

Un ejemplo de organismos relacionado con la producción y consumo de oxígeno disuelto lo constituyen los fitobentos, denominación de las microalgas presentes en los sedimentos de los sistemas acuáticos, dentro de las cuales se encuentra el grupo de las diatomeas, que contribuyen con cerca del 90% de la productividad de los sistemas. Por ejemplo, las diatomeas de gran tamaño sirven de alimento a especies superiores, como los flamencos presentes en el norte de Chile (Rodríguez, 2005).

Conceptualmente, los fitobentos se representan en modelos numéricos como unidades de clorofila o de carbono. Su tasa de crecimiento máxima guarda relación con factores de temperatura, en tanto que se puede ver limitada por luz, fósforo, nitrógeno y sílice (Hipsey y Hamilton, 2008). La salinidad también juega un rol importante en la dinámica de los microorganismos acuáticos. Para especies de agua dulce (por ej., cianobacterias, clorofíceas y diatomeas de agua fresca), existe una salinidad óptima, por sobre la cual las tasas de respiración se ven incrementadas. En tanto, para especies marinas (dinoflagelados, criptofíceas y diatomeas marinas) también existe un umbral de salinidad, aumentando la respiración a medida que decrece la salinidad.

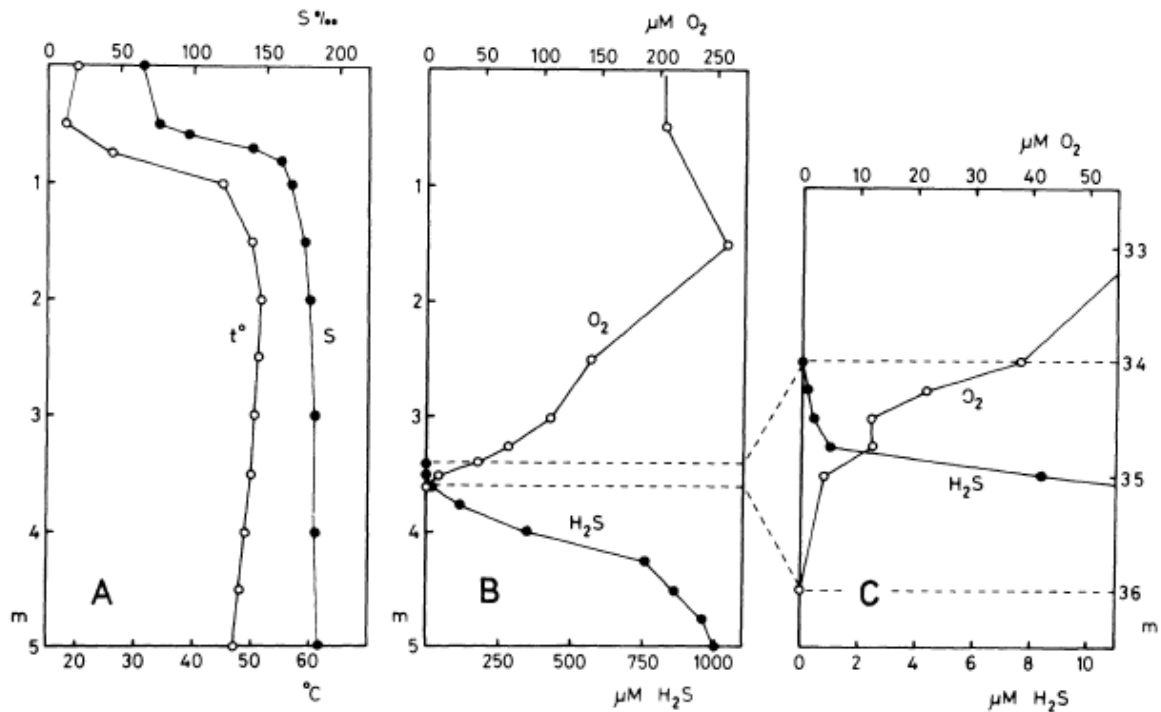
*Reducción de sulfatos:*



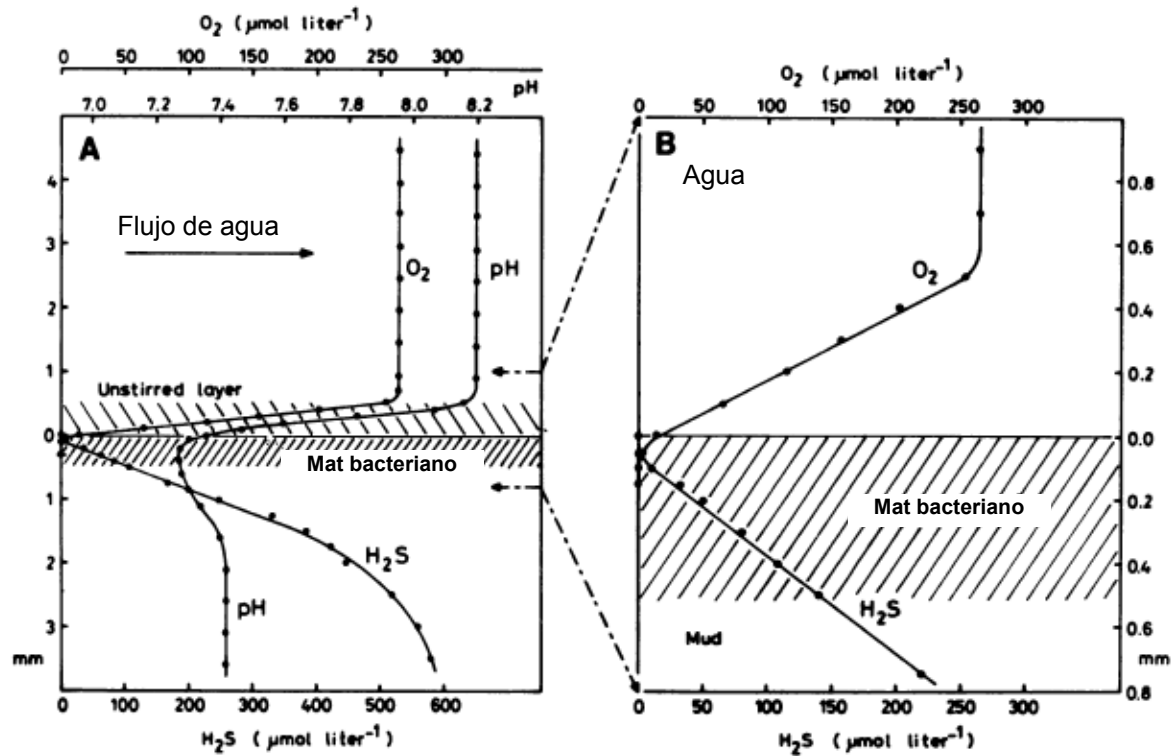
Esta reacción se da en condiciones anaeróbicas, donde bacterias sulfatorreductoras participan en la liberación de sulfuros. Éstas se organizan en mats bacterianos que se ubican en posiciones determinadas dentro de los sedimentos, quedando esta profundidad determinada por la capacidad de penetración del oxígeno disuelto, gobernado por sus propios gradientes de difusión. Las bacterias que requieren condiciones anaeróbicas para realizar su función de sulfato-reductoras, toman el sulfato como agente oxidante, reduciéndolo a sulfuro (Jørgensen et al., 1979). En términos de la modelación de la columna de agua y lechos de sedimentos, es crucial tener en cuenta la variable oxígeno disuelto para representar adecuadamente el crecimiento de estos organismos, especialmente considerando que dentro de la matriz de sedimentos, en unos pocos centímetros, se pueden dar las condiciones para procesos de diferente

naturaleza, creándose un frágil equilibrio de los compuestos presentes (Jørgensen & Revsbech, 1983).

Las Figuras 2.4 y 2.5 presentan ejemplos de equilibrio de oxígeno y sulfuro en columnas de agua estratificadas e interfaces de agua – sedimentos, respectivamente.

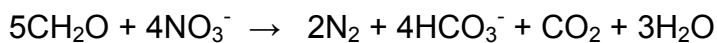


**Figura 2.3** Perfiles de temperatura y salinidad (A), oxígeno disuelto y sulfuro (B y C) en una columna de agua estratificada. Se advierte la presencia de zonas aeróbicas y anaeróbicas, donde operan diferentes procesos químicos y biológicos (Jørgensen et al., 1979).



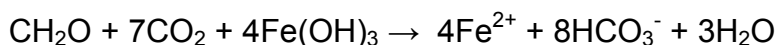
**Figura 2.4** Perfiles de oxígeno disuelto, sulfuro y pH en la interfaz agua – sedimentos. El oxígeno disuelto se encuentra presente en la columna de agua y reduce en la cercanía de la capa límite béntica, donde comienzan a predominar los procesos anaeróbicos y la presencia de sulfuros (Jørgensen & Revsbech, 1983).

*Denitrificación:*



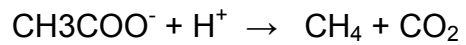
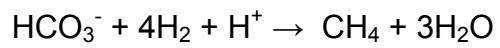
En este proceso, actúan bacterias denitrificadoras que convierten nitrato en nitrógeno gaseoso, bajo condiciones de falta de oxígeno, haciendo que la respiración de estos microorganismos emplee nitrato en vez de oxígeno.

*Reducción de óxido de metales (manganeso y hierro):*



En estas reacciones intervienen bacterias reductoras que actúan dentro de los sedimentos y bajo condiciones óxicas. Estas reacciones están asociadas a alteraciones del pH del medio. Dependiendo de la presencia de estos metales, estas reacciones pueden transformarse en predominantes en la oxidación de carbono orgánico.

*Producción de metano:*



Al igual que la reacción anterior, la metanogénesis está asociada a condiciones anaeróbicas, favorecida por niveles orgánicos altos, aunque en presencia de bajos niveles de nitrato y sulfato. A nivel global, aproximadamente el 80% del metano presente en la atmósfera se genera a partir de esta reacción en lo profundo de los sedimentos marinos.

### **3. METODOLOGÍA**

Para desarrollar la investigación concerniente a este trabajo, se emplearán herramientas numéricas y métodos experimentales que permitan aplicar los conceptos descritos en el capítulo previo al estudio de los fenómenos de mezcla y transferencia de masa. En particular, es necesario determinar tasas de transferencia de masa, perfiles de velocidad, concentración y energía cinética turbulenta en la columna de agua.

A continuación se describirán las herramientas empleadas, profundizándose su aplicación en los capítulos respectivos.

#### **3.1. MODELACIÓN NUMÉRICA**

La modelación numérica del transporte de masa en la interfaz analizada se aborda desde dos enfoques diferentes:

- Simulaciones con un modelo  $k-\epsilon$ , adaptado para las ecuaciones de transporte de masa. Esta parte del estudio se basa en una herramienta validada en otros estudios para enfocarse en los procesos de mezcla, bajo condiciones sin y con estratificación, bajo condiciones impuestas de concentraciones o flujos de solutos desde la interfaz agua – sedimentos.
- Simulaciones con un modelo de cierre de la turbulencia de una ecuación, para la columna de agua, resolviendo el transporte tanto en el medio líquido como dentro del sedimento. En este caso, el estudio se enfoca en los coeficientes de transferencia bajo condiciones de flujos turbulentos, resultantes en la interfaz agua – sedimentos, incluyendo la modelación de solutos que experimentan fluctuaciones por procesos químicos y biológicos en la columna de agua o dentro de la matriz de sedimentos.

A continuación se detallan las principales características de cada uno de estos modelos, señalando las condiciones en que se emplearán y su aplicación a casos de interés.

### 3.1.1. Modelo PROBE

Una de las herramientas empleadas para el estudio de la columna de agua es el software PROBE (**Program for Boundary Layers in the Environment**), desarrollado por Svensson (1986).

Este programa incluye un algoritmo que permite resolver las ecuaciones que gobiernan un flujo en capas límites unidimensionales y transientes, analizando simultáneamente la distribución de velocidad, energía cinética turbulenta, concentraciones y temperatura (cantidad de calor) en un cuerpo de agua.

PROBE resuelve la turbulencia a través de un modelo  $k-\epsilon$ , determinando de esta forma coeficientes de mezcla. Junto con las ecuaciones de momentum, conforman el núcleo del programa, agregándose a las anteriores las ecuaciones para el transporte de masa y calor. En su forma original básica, PROBE permite analizar las variaciones de cantidad de calor, salinidad y concentraciones de cuatro solutos, cuyas densidades son ingresadas por el usuario.

La Figura 3.1 presenta un diagrama de flujo que muestra la estructura de PROBE, basada en subrutinas. Esta estructura está dividida en dos secciones principales: una sección general y una sección del usuario. La sección general está compuesta por diferentes subrutinas que interactúan entre sí, en tanto que la sección del usuario está compuesta por una subrutina CASE la cual incluirá las modificaciones que el usuario precise para especificar valores, condiciones de borde, condiciones iniciales, visualización de resultados y cualquier otro dato del problema.

A continuación se describen brevemente las subrutinas que lo componen:

Subrutina MAIN: Esta subrutina controla todos los cálculos que se realizan, interactuando con otras subrutinas, y está dividido en diversos *chapters*. El *Chapter 1* provee los datos de entrada, inicialmente están guardados en la subrutina DEFAULT. Algunos de estos datos pueden ser modificados por el input del usuario en la subrutina CASE. La geometría del problema y la malla de cálculo son especificadas en DEFAULT y CASE, y los cálculos necesarios que utilizan estos datos son realizados en las subrutinas GRID y AREAD, las cuales son llamadas desde el *Chapter 2* de MAIN. En el *Chapter 3* se inicializan las variables. En el *Chapter 4* se avanza en el tiempo según lo especificado por el usuario en la subrutina CASE. El *Chapter 5* especifica las condiciones de borde, que pueden variar o no en el tiempo, según lo especificado



también por el usuario. *Chapter 6* llama a la subrutina COMP la cual calcula la solución de las ecuaciones. Cuando termina este *chapter*, los cálculos han avanzado un paso en el tiempo. Posteriormente, en *Chapter 7*, la densidad, la temperatura y la viscosidad de remolino son actualizadas según las nuevas condiciones calculadas. Se realiza además un chequeo para asegurarse que la energía cinética y la disipación de la turbulencia son positivas. Esto se debe a que en algunos casos, cuando el efecto de las fuerzas de flotación es muy grande, se pueden generar valores negativos de estas variables. En estos casos se estipula un valor positivo muy pequeño. En el *Chapter 8* se llama a las subrutinas OUTPUT y también se leen datos ingresados por el usuario en CASE con especificaciones relacionadas al archivo de salida. Por último, en el *Chapter 9* se decide si se continúa o se termina el cálculo. Si se continúa se vuelve al *Chapter 4*.

Subrutina DEFAULT: Contiene valores dados de todos los datos que son de interés para el usuario y que podrían ser alterados en la subrutina CASE.

Subrutina GRID: Especifica la malla que se utilizará para realizar los cálculos, pudiendo ser uniforme, más fina cerca de los bordes, etc. Esto requiere calcular variables como tamaño de cada celda, distancias, entre otras.

Subrutina AREAD: Esta subrutina es de especial interés en lagos y embalses que tienen un área horizontal que varía con la profundidad. Aquí se determina la distribución vertical de esta variable.

Subrutina OUTPUT: Especifica la presentación de los datos, dada la frecuencia especificada por el usuario en CASE, y la selección de variables de interés.

Subrutina SURF: Realiza los cambios necesarios en la malla, cuando la superficie libre está en movimiento.

Subrutina PHYS: Proporciona coeficientes de transporte,  $\Gamma_\phi$ , y términos fuente,  $S_\phi$ , para todas las ecuaciones generales utilizadas.

Subrutina COMP: Avanza en el tiempo y determina el nuevo valor de todas las variables especificadas. Los coeficientes y términos fuente de la subrutina PHYS se utilizan en este paso. Los coeficientes de las ecuaciones de diferencias finitas, presentados en la sección anterior, son calculados y las ecuaciones son resueltas. Dependiendo de lo seleccionado por el usuario, se entregan valores o flujos de las diferentes variables.

Subrutina BOUND: Calcula coeficientes de transporte cerca de los bordes. Para esto se utiliza la ley logarítmica de velocidad y la ley de transporte para el calor, la salinidad y las otras concentraciones, que incluyen el número de Stanton para la variable en cuestión, las cuales necesitan información acerca de la condición hidrodinámica de la pared. Las características acerca de la rugosidad de la pared son especificadas por el usuario en CASE.

Subrutina PEA: Esta subrutina utiliza el Partial Elimination Algorithm (Spalding, 1976), el cual permite una solución más estable del sistema de ecuaciones de diferencias finitas.

La Figura 3.2 presenta un esquema con la malla vertical y discretización espacio-temporal que resulta en la aplicación del modelo PROBE.

Para la aplicación a esta investigación, se emplea un compuesto neutralmente boyante, con una concentración fija en el lecho, y se considera una columna de agua inicialmente en reposo (Capítulo 4). A partir de un determinado instante, se permite que un término fuente de moméntum ponga en movimiento el flujo, pudiendo tratarse de una simulación de un término de viento soplando sobre la superficie libre, o el efecto de un gradiente de presiones en una dirección horizontal, simulando un flujo inducido por gravedad. Esto genera un esfuerzo de corte sobre el lecho, que a su vez gatilla la transferencia de masa en la interfaz agua – sedimentos y su posterior mezcla a la columna. En los casos con estratificación (Capítulo 5), se agrega la variable salinidad para producir este efecto, que interactúa con la mezcla del soluto produciendo un diferente efecto de mezcla.

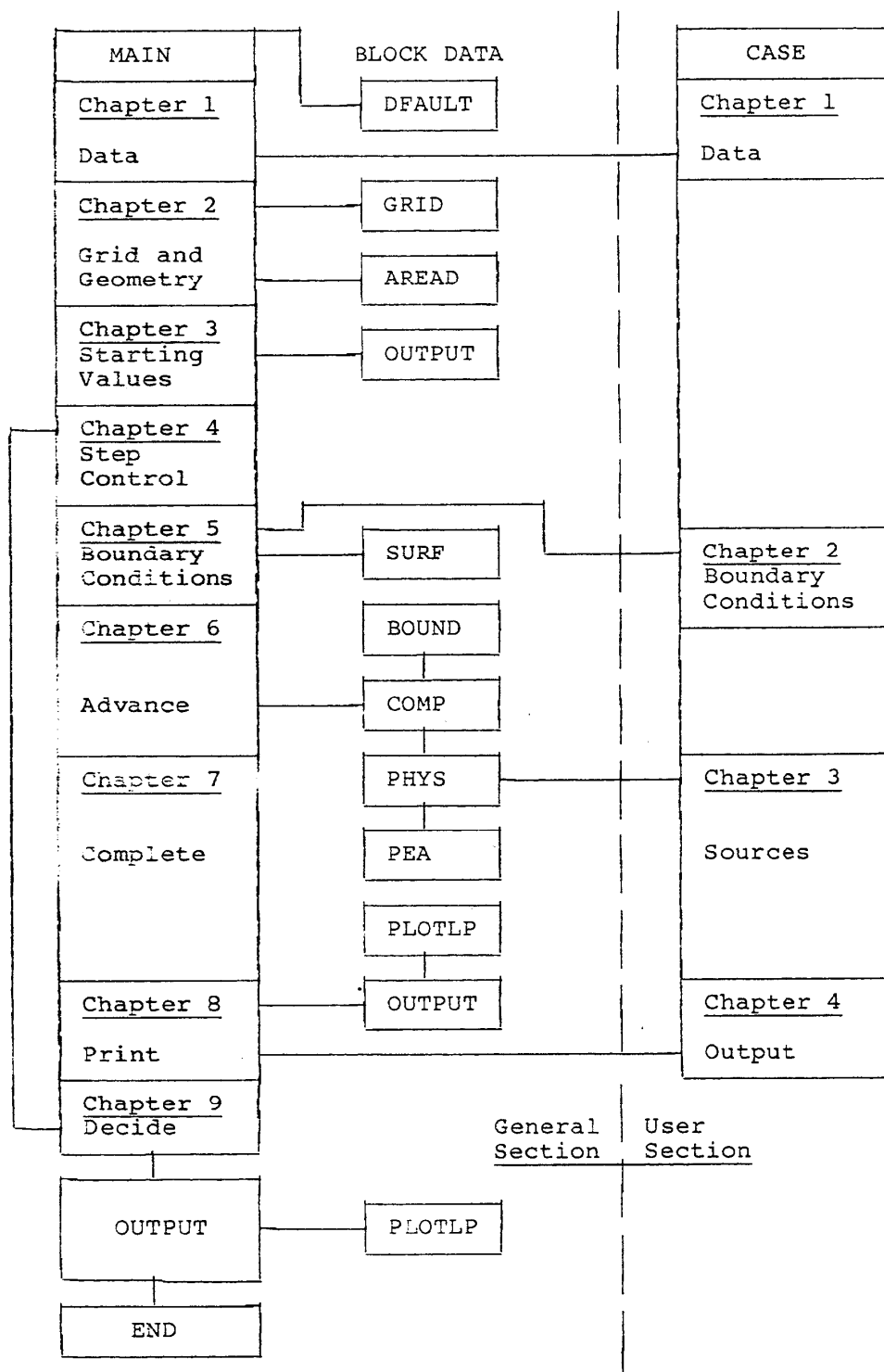
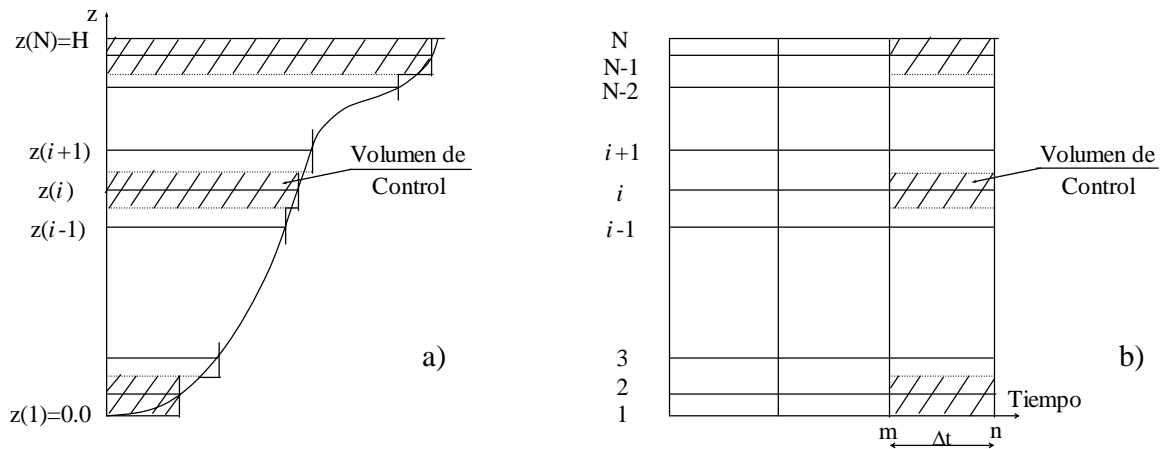


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa PROBE (Svensson, 1986).



**Figura 3.2** Ilustración de la malla espacio-temporal y de los volúmenes de control (Hillmer, 1999). a) Discretización vertical, con posibles variaciones verticales del área horizontal; b) Malla espacio – temporal.

### 3.1.2. Modelo de Transporte de Masa de Diferencias Finitas

Para el análisis más detallado de los perfiles verticales de concentración, tanto en la columna de agua como dentro de los sedimentos, se implementó un modelo numérico programado en Fortran 90, que se basa en las ecuaciones indicadas a continuación:

Difusión molecular y turbulenta en la columna de agua:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (D_o + D_t) \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Difusión molecular en los sedimentos, con consumo y producción:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\mu C}{K+C} + P \quad \text{Ec. 3.2}$$

Este modelo discretiza estas ecuaciones de transporte de masa de acuerdo a una escala característica de longitud, y permite incorporar reacciones de consumo y producción de la especie analizada (por ejemplo, para el análisis de oxígeno disuelto).

En la aplicación de esta investigación, este modelo se empleó de dos diferentes maneras:

- Transferencia desde el lecho de una especie que no reacciona en la columna de agua, con fuente ilimitada desde los sedimentos. El soluto es liberado en condiciones de flujo nulo para la calibración de un coeficiente de difusión molecular (usando datos experimentales). Luego, se comparan los resultados numéricos de modelaciones conducidas en flujos turbulentos, bajo condiciones de turbulencia bien desarrollada en la columna, con mediciones experimentales, para el análisis de los coeficientes de transferencia de masa (Capítulo 6).
- Transferencia de oxígeno disuelto desde y hacia los sedimentos, calibrando coeficientes de transferencia en condiciones turbulentas usando datos de terreno. Para este caso, se incorpora la cinética de la especie, incluyendo reacciones de consumo y producción, asociadas a reacciones químicas y procesos biológicos (Capítulo 7).

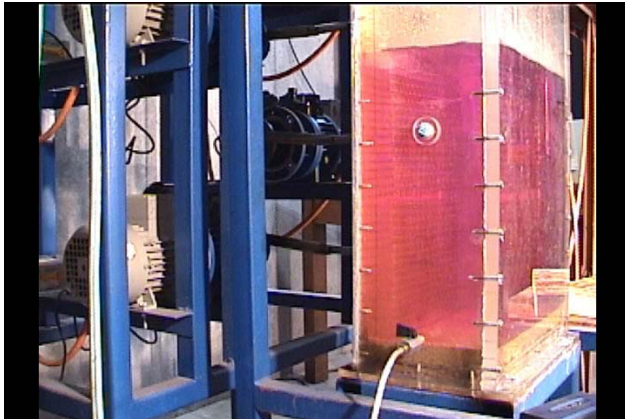
### **3.2. ESTUDIO EXPERIMENTAL**

La sección experimental de este trabajo contempla el análisis de la transferencia de masa en un sistema unidimensional, como lo es una columna simple, dentro de la cual se creará una estructura de turbulencia mediante una grilla de agitación. Se provoca la agitación del sistema suficiente para la transferencia de masa desde un lecho de arena de un soluto particular, en este caso correspondiente a sal mezclada con permanganato de potasio. La primera de estas especies es la que se mide a través de conductivímetros para determinar perfiles de concentración, en tanto que la segunda corresponde a un trazador neutralmente boyante que permite identificar la evolución de la mezcla.

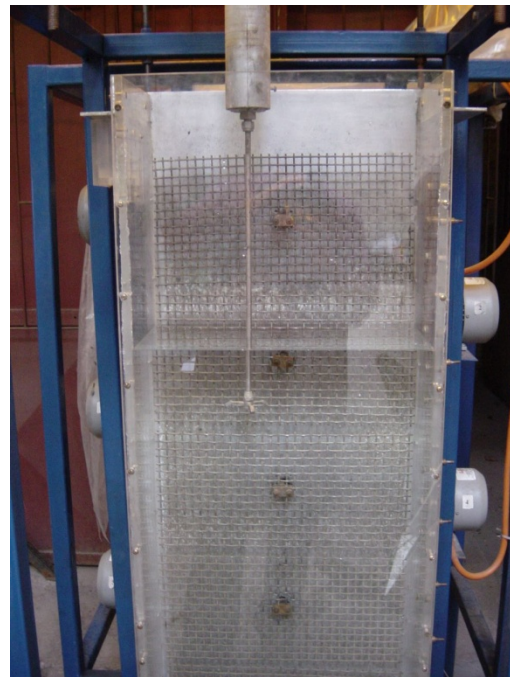
La sección experimental, abordada en el Capítulo 6, se basa en la instalación experimental diseñada, construida y puesta en marcha por Saraiva (2003), la cual fue modificada para mejorar aspectos relacionados con la transferencia de masa desde el lecho, y otras mejoras relacionadas con su sujeción, anclaje y aislamiento de vibraciones (Figura 3.3).

En términos generales, esta columna de experimentación es una estructura de acrílico de 120 cm de alto, 42 cm de ancho y 20 cm de profundidad, con una placa de aluminio

en su parte posterior, conteniendo cinco mallas verticales de 40 x 20 cm tejidas con barras de acero inoxidable, espaciadas con 1 cm entre ellas. Cada malla está conectada a un eje ligado a un motor, que puede variar su frecuencia entre 190 y 600 RPM, lo cual permite el movimiento oscilante en una dirección de la grilla, produciendo agitación en el agua contenida en la columna, y por ende induciendo una distribución de la turbulencia en ésta.



a) Vista lateral de columna con solución salina y trazador.



b) Vista frontal de la instalación con el ADV.

**Figura 3.3** Vistas de la instalación experimental.

El fondo de la columna fue adecuado para representar un lecho que uniformemente suministra un soluto a la columna de agua, cuya turbulencia transfiere esta especie hacia el resto de la columna. Esto incluyó la instalación de un sistema de inyección con múltiples mangueras y el uso de un medio poroso (2 cm. de esponja) para repartir horizontalmente el soluto antes de inducir su transporte vertical. Por sobre este fondo más poroso se ubicó un lecho de arena (4 cm. de espesor) sin producirse movilización de partículas de arena, sino que sólo mezcla del soluto inyectado.

Las mediciones sobre esta instalación se hicieron en dos diferentes instancias:

- Registro de velocidades en las tres componentes, medición de velocidades medias y RMS, indicadores de correlación y ruido de la señal y cálculo de propiedades de la turbulencia. Estas mediciones se realizaron mediante un velocímetro acústico Doppler (ADV), con tiempos de registro que superan los 20 minutos por cada punto medido. Es decir, la medición de un perfil vertical de velocidades o propiedades de la turbulencia implica el funcionamiento continuo por varias horas de la instalación, midiendo cada punto hasta obtener medidas estables, variando la posición del instrumento y registrando el nuevo punto, y así sucesivamente hasta completar las medidas. Los datos son capturados mediante el software WinADV incluido con el instrumento, filtrados para obtener señales bien correlacionadas y con bajo nivel de ruido, y exportadas a planillas de cálculo para su post-procesamiento.
- Obtención de muestras de agua con solutos a diversas alturas, mediante un sistema de muestreo instalado por el costado de la columna. Iniciando con el sistema en reposo (a similitud de las modelaciones numéricas), se encienden los motores que determinan una determinada configuración de turbulencia de la columna y se capturan muestras con una frecuencia de entre 30 segundos hasta 4 minutos, hasta obtener un sistema bien mezclado (por inspección visual mediante el uso del trazador). Una campaña de registro completo no toma más allá de media hora en la toma de muestras, por lo que es impracticable un registro simultáneo de velocidades y concentraciones, lo que lleva a realizar la toma de datos de esta forma. A cada frasco que contiene muestras de agua con soluto se le mide su conductividad eléctrica con un conductivímetro multi-rango portátil, registrándose estos datos en tablas.

Antes y después de cada experiencia, se limpia el sistema para eliminar los restos de salinidad, por el efecto que ésta puede tener sobre futuras mediciones y por el daño que pueden sufrir las componentes del sistema expuestas al agua salina.

El conjunto de datos resultante es analizado para determinar flujos de masa desde el lecho y masa total transferida hacia la columna de agua, en función del tiempo, para diferentes niveles de agitación y distribuciones de agitación de las grillas. Los coeficientes de transferencia de masa e intensidades de turbulencia se sintetizan en dos números adimensionales que son relacionados entre sí:

- El número de Sherwood ( $Sh$ ), que relaciona la escala de longitud del proceso difusivo  $D / k_c$  (donde  $D$  [ $L^2/T$ ] es el coeficiente de difusión del soluto y  $k_c$  es su coeficiente de transferencia en la interfaz agua – sedimentos [ $L / T$ ]) con la escala de longitud característica del medio estudiado (en este caso la altura  $h$  de la columna de agua)
- El número de Reynolds ( $Re$ ), usado habitualmente para relacionar los efectos viscosos con el transporte de moméntum. En este caso, incluye una escala de velocidad relacionada con la turbulencia generada (una velocidad de corte  $u^*$ ), la altura de la columna de agua  $h$  y la viscosidad cinemática  $\nu$ .

La relación entre ambos números adimensionales permite el análisis integrado de las mediciones realizadas, y la comparación con los casos modelados numéricamente.



## **4. MEZCLA Y TRANSFERENCIA DE MASA CAUSADA POR TURBULENCIA DEL FLUJO**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Al abordar el estudio de los fenómenos de transporte de masa en la interfaz agua – sedimento, es importante comenzar por entender la interrelación entre los procesos que ocurren a escala de la columna de agua completa, y aquellos que tienen lugar en la interfaz señalada. Para ello, es crucial entender cómo la turbulencia tiene la capacidad para producir mezcla en un medio líquido y cómo la evolución de las variables mezcladas afecta las tasas de transporte desde y hacia los sedimentos. A su vez, la presencia o ausencia de determinados elementos determinan la dinámica de diversas reacciones químicas que condicionan la habitabilidad del ecosistema o determinan condiciones de calidad de las aguas y los sedimentos, desde el punto de vista del interés humano en el uso y aprovechamiento de estos recursos.

Estos procesos son analizados a escala de la subcapa difusiva, región de pequeñas dimensiones (del orden de fracción de milímetros) que puede actuar como una zona de impedancia para el transporte y de esta forma ocasionar un retardo en las reacciones químicas que ocurren justo bajo el fondo. Esta subcapa es contigua a la interfaz donde la difusión molecular excede al transporte asociado a la turbulencia del fluido ambiente. Se ha demostrado la incidencia de la turbulencia intermitente cercana al lecho, afectando el transporte turbulento de masa, así como de calor y momento, en la zona cercana al fondo, gobernando el transporte de sustancias desde y hacia los sedimentos y la mezcla de solutos a través de la columna.

El objetivo de este capítulo es presentar los resultados de simulaciones numéricas, bajo un modelo de turbulencia  $K-\epsilon$ , del transporte de un soluto en un flujo con superficie libre, para estudiar la relación de la intensidad y origen de la turbulencia, con los flujos de solutos en la interfaz agua-sedimentos y la consiguiente distribución de la masa transportada en la columna de agua. El algoritmo de solución de las simulaciones permite incorporar efectos boyantes y determinar coeficientes de difusión turbulenta de masa. Se ha utilizado como base el modelo PROBE, implementando algunos cambios, esencialmente en la manera como se transfiere masa cerca del fondo, considerando explícitamente un coeficiente de transferencia de masa que se ve modificado según las

condiciones del flujo cerca del fondo, para determinar si el transporte es gobernado por difusión molecular o turbulenta.

## 4.2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Las ecuaciones básicas para el desarrollo de las situaciones a simular son esencialmente las ecuaciones promediadas de Reynolds, ecuación de difusión de masa y cierre de la turbulencia mediante el modelo  $K-\varepsilon$ . El problema a simular consiste en analizar los perfiles verticales de velocidad, turbulencia y concentración de masa en un flujo unidireccional uniforme.

Las ecuaciones del modelo  $K-\varepsilon$  aparecen descritas previamente en la revisión de antecedentes del Capítulo 2 (Svensson, 1986), agregando una definición para el término  $P_b$ , que es la producción de energía cinética turbulenta debida a efectos de boyancia. Esta pueda incluir contribuciones de energía calórica, salinidad y concentraciones de diferentes especies, y en este caso se representa en función de las variaciones verticales de la salinidad,  $C(z)$ :

$$P_b = \beta g \frac{v_t}{Sc_t} \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde:

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica para el soluto

$g$ : Aceleración de gravedad

$v_t$ : Viscosidad cinemática turbulenta

$Sc_t$ : Número de Schmidt turbulento

Se le da especial énfasis al uso de una función puente para la transferencia de masa en la zona cercana al fondo, determinándose el flujo de masa desde el fondo  $f_m$  mediante el número de Stanton ( $St$ ), parámetro adimensional formado por el cociente entre el coeficiente de transferencia de masa  $k_c$  y la velocidad del flujo (Spalding, 1991):

$$St = \frac{k_c}{U_{ref}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$f_m = k_c \cdot (C - C_b) = St \cdot U_{ref} \cdot (C - C_b) \quad \text{Ec. 4.3}$$

donde  $C_b$  es la concentración del soluto en el fondo (sedimentos). El número de Stanton se determina con el máximo entre  $St_m$  y  $St_t$ , los respectivos números de Stanton molecular y turbulento:

$$St_m = \frac{1}{Sc \cdot Re_b} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$\left( Re_b = \frac{U_{ref} Z_{ref}}{\nu} \right)$$

$$St_t = \frac{u_{*b}^{\infty 2}}{Sc_t \cdot U_{ref}^2} \quad \text{Ec. 4.5}$$

donde  $U_{ref}$  y  $Z_{ref}$  son la velocidad y distancia al fondo medidos en un punto cercano a la interfaz,  $u_{*b}^{\infty}$  es una medida de la velocidad de corte de fondo (asociada al esfuerzo de corte de fondo en un tiempo suficientemente grande como para considerar que se llega a condiciones de régimen permanente), y  $Sc$  y  $Sc_t$  son los números de Prandtl o Schmidt (denominados según se trate del transporte de calor o masa, respectivamente) molecular y turbulento, respectivamente. El primero depende exclusivamente de las propiedades moleculares y es conocido para diversos solutos. El segundo guarda una relación estrecha con el transporte de momentum, lo cual está asociado a la analogía de Reynolds empleada para describir los coeficientes de transferencia de masa en régimen turbulento. Empíricamente se ha determinado que en flujos turbulentos no estratificados los números de Prandtl o Schmidt tienen un valor de 0.63, incrementándose este valor conforme a la existencia de efectos boyantes sobre la turbulencia (Launder, 1975).

Las condiciones de borde dependen de la modelación a realizar; en general se considera válida la condición de no resbalamiento en el fondo de la columna ( $U|_{z=0} = 0$ ). Para el transporte de masa, se simula el transporte de una especie presente en abundancia en los sedimentos, imponiéndose un valor constante para la concentración de masa de este soluto en el punto más cercano al lecho, permitiendo que desde éste empiece a transferirse masa a la columna, que inicialmente tiene concentración nula de esta misma especie. Esta condición es considerada más adecuada que un valor impuesto de flujo de masa, ya que de esta forma la transferencia depende directamente del gradiente de concentración, y éste último a su vez evoluciona conforme se

desarrolla la mezcla del soluto. Este caso puede presentar un comportamiento que discrepa con el de otras especies, como el oxígeno disuelto, donde típicamente en sistemas reales se presenta en mayor concentración en la columna de agua y menor o incluso nulo en los sedimentos, produciéndose de esta manera flujos en dirección opuesta al que acá se está induciendo.

Con respecto a las ecuaciones de cierre de la turbulencia, las condiciones de borde son las mismas recomendadas por Rodi (1984), dependiendo de la existencia o no de esfuerzo de corte en la superficie libre.

El análisis dimensional del problema revela que hay dos parámetros adimensionales fundamentales a considerar:

Número de Reynolds:

$$Re_{*h} = \frac{u_{*b}^{\infty} \cdot H}{\nu} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Número de Froude densimétrico:

$$Fr_{*d} = \frac{u_{*b}^{\infty}}{\sqrt{\beta \cdot C_b \cdot g \cdot H}} \quad \text{Ec. 4.7}$$

donde  $u_{*b}^{\infty}$  es la velocidad de corte de fondo que se alcanza en régimen permanente,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido y  $H$  es la altura de la columna de agua. El primero de estos parámetros adimensionales aparece como un indicador de la existencia de la turbulencia y de la importancia relativa de los efectos viscosos en el flujo, el segundo señala la intensidad de los efectos boyantes con respecto a las fuerzas inerciales.

Hay un tercer parámetro que tiene importancia a lo largo del transiente que experimenta la columna para alcanzar su condición de régimen permanente, y que corresponde al número de Froude ( $Fr_*$ ), definido como:

$$Fr_* = \frac{u_{*b}^{\infty}}{\sqrt{g \cdot H}} \quad \text{Ec. 4.8}$$

En la adimensionalización de la ecuación de momentum, con respecto a los parámetros  $u_{*b}^\infty$  y  $H$ , se obtiene:

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} = -\frac{1}{\rho g} \frac{gH}{u_{*b}^{\infty 2}} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ \left( \frac{1}{\text{Re}_{*h}} + \nu_t^* \right) \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \right] \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$i = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \quad \text{Ec. 4.10}$$

(válido para escurrimiento uniforme)

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} = \frac{i}{Fr^{*2}} + \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ \left( \frac{1}{\text{Re}_{*h}} + \nu_t^* \right) \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \right] \quad \text{Ec. 4.11}$$

Adimensionalización:

$$u^* = \frac{u}{u_{*b}^\infty}, \quad \nu_t^* = \frac{\nu_t}{u_{*b}^\infty \cdot H}, \quad z^* = \frac{z}{H}, \quad t^* = \frac{t \cdot u_{*b}^\infty}{H} \quad \text{Ec. 4.12}$$

En las ecuaciones anteriores, conviene recordar que  $u$  es la velocidad del flujo,  $t$  es el tiempo,  $\partial \hat{p} / \partial x$  es el gradiente de presión motriz en la dirección del flujo ( $x$ ),  $\rho$  es la densidad del fluido e  $i$  es la pendiente del lecho.

Para cauces muy anchos, bajo el supuesto de escurrimiento normal (uniforme),  $u_{*b} = \sqrt{g \cdot H \cdot i}$ . Puede demostrarse que al alcanzarse en el fondo el esfuerzo de corte final  $u_{*b}^\infty$ , entonces  $i = Fr^{*2}$ . En conclusión, es necesario tener en consideración el número de Froude como parámetro significante, a menos que no existan gradientes de presiones ( $i=0$ ) o que exista estabilidad en el perfil de velocidades ( $i = Fr^{*2}$ ).

### 4.3. MODELACIÓN NUMÉRICA

La metodología adoptada en la fase de modelación numérica se basa en el algoritmo desarrollado por Svensson (1986) en el modelo PROBE, que constituye una aplicación del método de volúmenes finitos (Patankar, 1980) al conjunto de ecuaciones de momentum, continuidad de masa y modelo  $K-\varepsilon$ , previamente descrito (Capítulo 2), incorporando la función puente para transferencia de masa propuesta por Spalding (1991). Este algoritmo ha sido ampliamente ocupado en múltiples problemas de

hidrodinámica ambiental, ya que permite el cálculo de capas límites unidimensionales en régimen impermanente.

Las situaciones a modelar constan de una columna de agua de altura  $H$ , constante, y densidad uniforme, que se encuentra inicialmente en reposo. En el instante inicial  $t=0$  comienza a actuar el término fuente de cantidad de movimiento, que puede ser un esfuerzo de corte superficial (simulando el efecto del viento) o un gradiente de presión en la dirección del flujo (simulando el efecto de la pendiente del lecho, en un flujo inducido por fuerzas gravitacionales), manteniéndose este término fuente durante todo el proceso. A lo largo de la modelación, se impone que el valor de concentración del soluto en el lecho es un determinado valor constante,  $C_b$ , generándose un gradiente de concentración que induce el flujo de masa a través de la columna, como queda reflejado en la Ecuación 4.3. Como simplificación del problema, se usa un soluto que no afecta la densidad de la columna, por lo que se eliminarán los efectos boyantes ( $\beta=0$ ). De esta forma, los parámetros adimensionales significativos serán sólo los números de Reynolds y Froude.

Tanto la altura de la columna como el valor del esfuerzo de corte o el del gradiente de presión, dependiendo del tipo de modelación, son definidos externamente, con el fin de extender el análisis a un rango amplio de números de Froude y Reynolds. Es decir, una vez elegidos  $Fr^*$  y  $Re_{*h}$ , se determina la altura de la columna de agua y la velocidad de corte de fondo a usar como:

$$H = \left( \frac{Re_{*h} \cdot v}{Fr^* \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad \text{Ec. 4.13}$$

$$u_{*b}^\infty = (Re_{*h} \cdot v \cdot Fr^{*2} \cdot g)^{1/3} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Conviene señalar que en el algoritmo esta velocidad de corte de fondo se impone indirectamente como un gradiente de presiones o un esfuerzo de corte superficial.

#### 4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE SIMULACIONES

El algoritmo de solución entrega resultados coherentes con los perfiles experimentales recopilados por Rodi (1984) para el flujo en canales abiertos, permitiendo validar el uso del modelo en estas simulaciones, según lo mostrado en la Figura 4.1, en cuanto a perfil de velocidades y estructura de la turbulencia, presentándose en forma adimensionalizada según las ecuaciones 4.15 a 4.17:

Adimensionalización de la velocidad de escurrimiento:

$$u_{\text{adim}} = \frac{u}{u_{\text{max}}} \quad \text{Ec. 4.15}$$

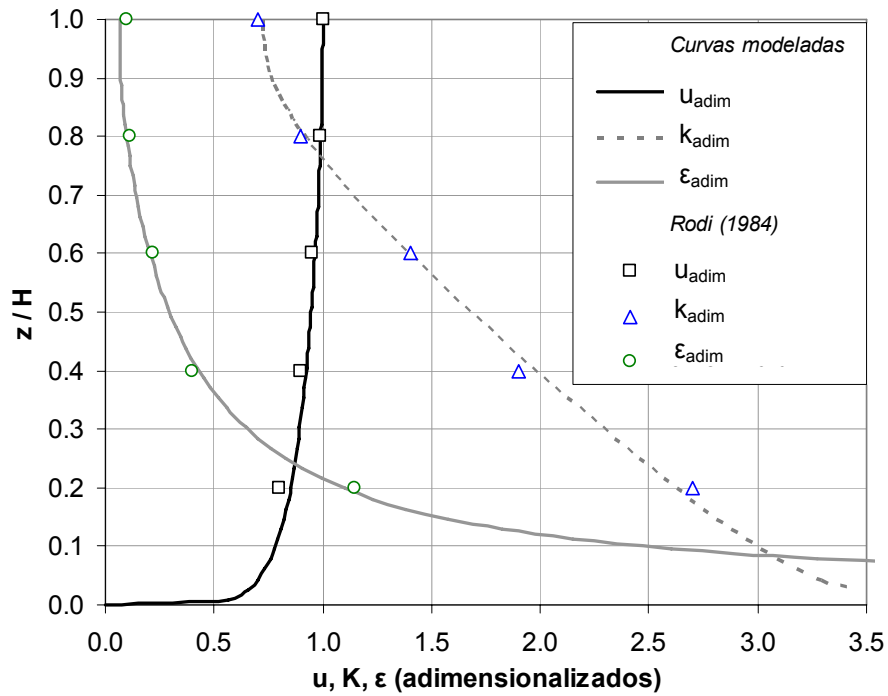
Adimensionalización de la energía cinética turbulenta:

$$k_{\text{adim}} = \frac{k}{u_{*b}^{\infty 2}} \quad \text{Ec. 4.16}$$

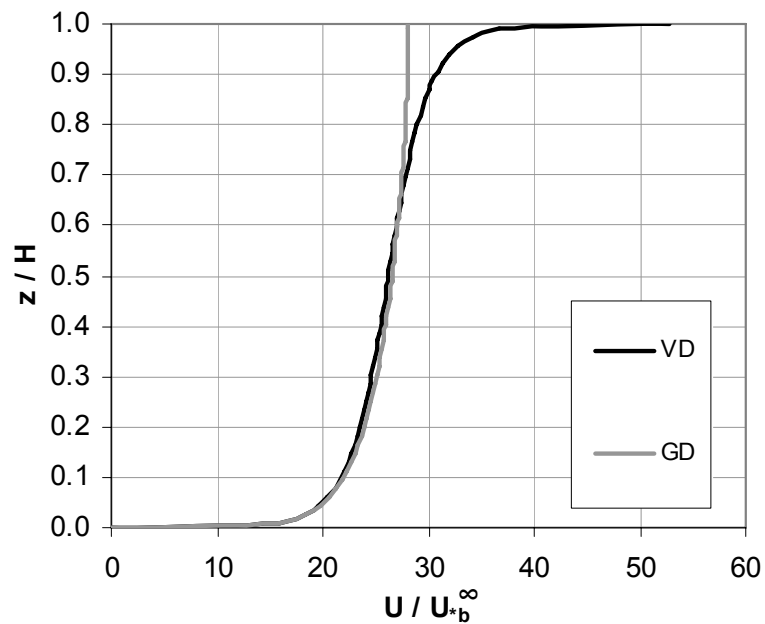
Adimensionalización de la velocidad de escurrimiento:

$$\varepsilon_{\text{adim}} = \frac{0.1 \varepsilon H}{u_{*b}^{\infty 3}} \quad \text{Ec. 4.17}$$

Una descripción más cabal de las características del flujo y su turbulencia asociada se presenta en la Figura 4.2 y 4.3, donde se comparan los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta ( $K$ ), su tasa de disipación ( $\varepsilon$ ), y viscosidad cinemática turbulenta ( $\nu_t$ ), para los casos de flujo inducido gravitacionalmente o por viento.

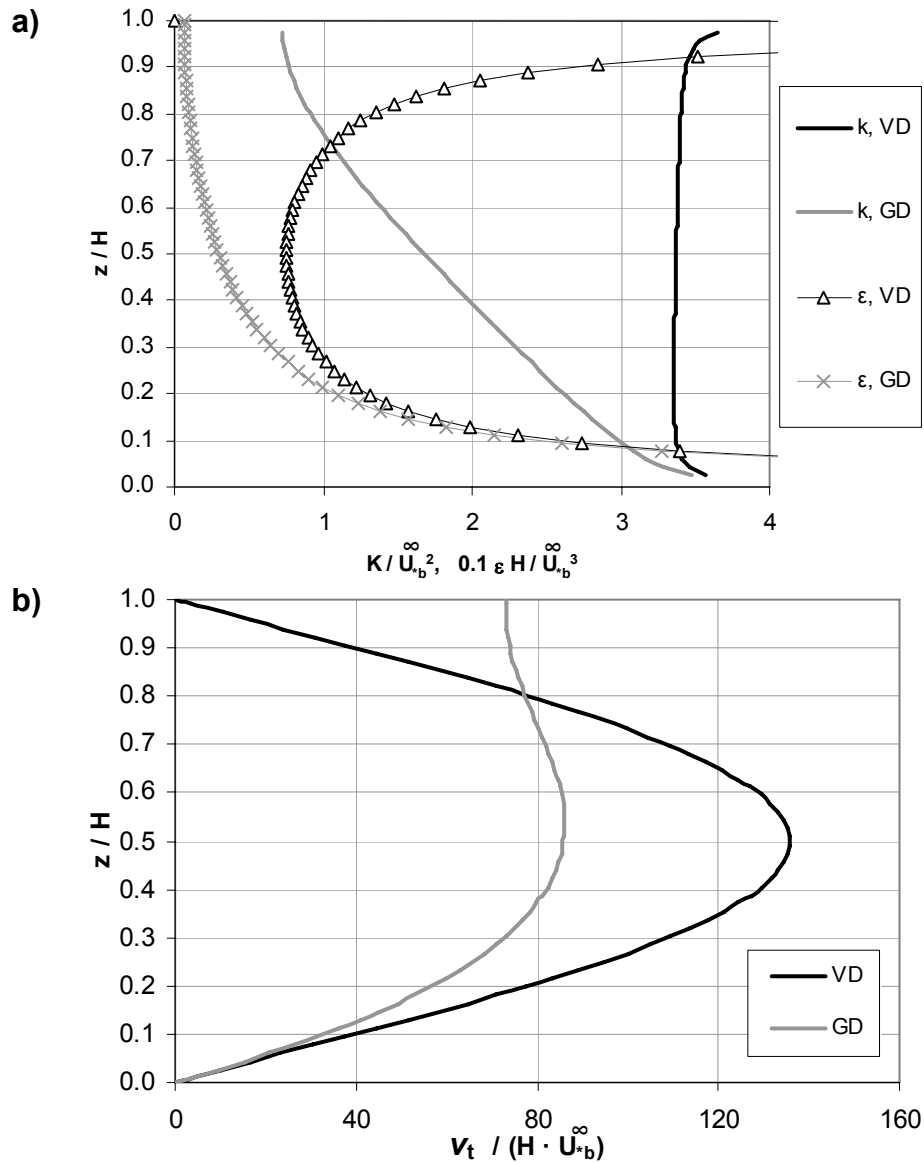


**Figura 4.1** Distribución de velocidad y propiedades de turbulencia en flujo desarrollado de canal bidimensional. Modelación numérica comparados con resultados experimentales (Rodi, 1984).



**Figura 4.2** Comparación de perfiles de equilibrio de velocidad en casos simulados. (ejemplo para  $Re_{\tau_h} = 4000$ ). (VD: Flujo inducido por viento; GD: Flujo inducido gravitacionalmente)



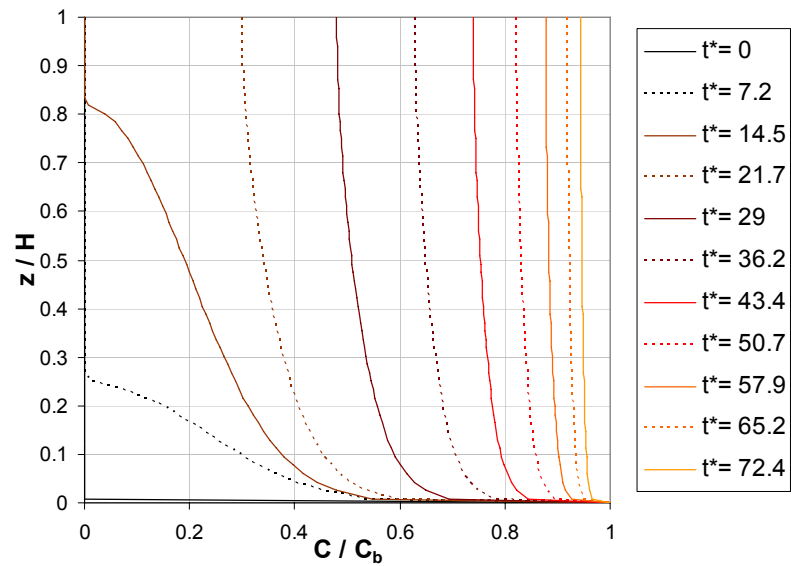


**Figura 4.3** Comparación de perfiles de equilibrio de propiedades de la turbulencia en casos simulados (ejemplo para  $Re_{\gamma_h} = 4000$ ). (VD: Flujo inducido por viento; GD: Flujo inducido gravitacionalmente) a) Energía cinética turbulenta ( $K$ ) y disipación de energía cinética turbulenta ( $\epsilon$ ) adimensionalizadas; b) Viscosidad cinética turbulenta  $\nu_t$ .

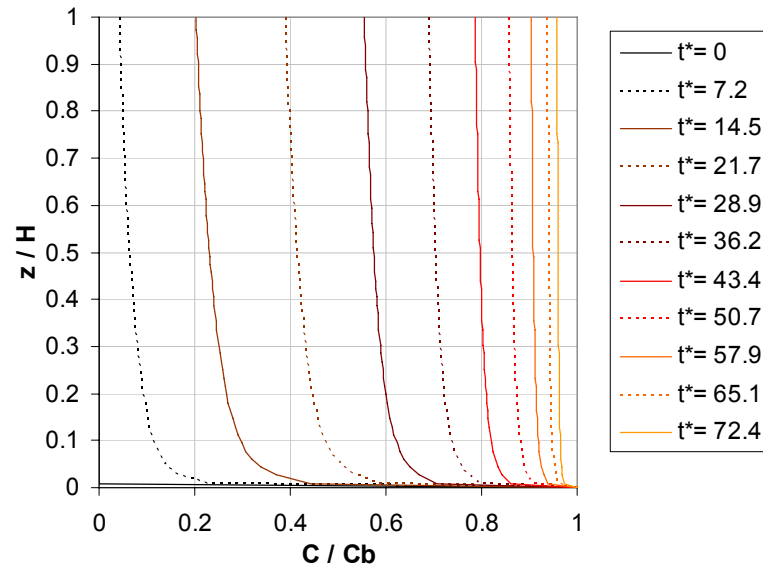
Los perfiles de concentración obtenidos guardan relación con el tipo de turbulencia presente en el sistema. La Figura 4.4 muestra que, para un flujo inducido gravitacionalmente, se desarrolla un perfil donde inicialmente la masa transferida desde el lecho se acumula en la zona inferior, difundiéndose luego hasta alcanzar la columna completa. Esto es distinto al caso de mezcla inducida por el viento, donde la estructura

uniforme de turbulencia asociada a este tipo de flujo, mezcla con mayor efectividad en toda la columna la masa proveniente del fondo.

a) Mezcla inducida por flujo gravitacional



b) Mezcla inducida por viento

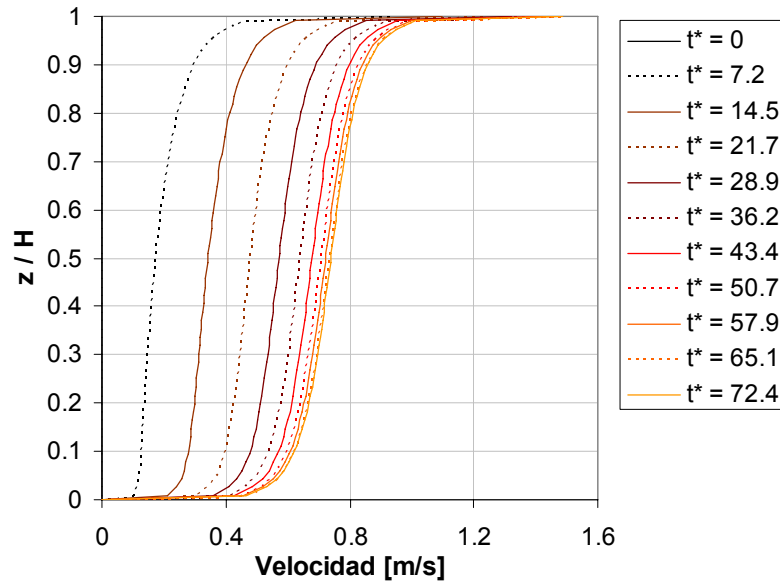


**Figura 4.4** Ejemplo de perfiles de concentración en función del tiempo adimensionalizado  $t^* = t \cdot u_{*b}^\infty \cdot H^{-1}$ .  $Re_{\tau_h} = 15000$ ,  $Fr_* = 0.01$ .

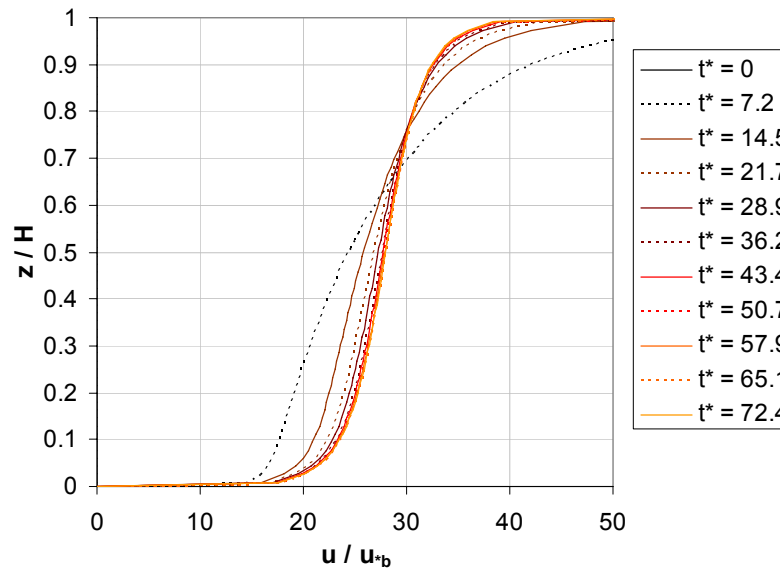
Es importante señalar que durante la evolución del proceso, mientras se alcanza el equilibrio del sistema, la distribución del flujo experimenta cambios, los cuales se manifiestan como un aumento de la velocidad de escurrimiento en términos absolutos, pero manteniendo una distribución coherente con respecto al origen de la fuerza que moviliza la columna de agua. Esto se puede distinguir en las Figuras 4.5 y 4.6, en las

cuales se ve en un caso típico cual es la distribución de velocidades, en términos absolutos y adimensionalizando con la velocidad de corte de fondo  $u_{*b}$ , la cual también varía en el tiempo y se estabiliza en un valor que se ha denominado  $u_{*b}^\infty$ .

a) Perfil de velocidades

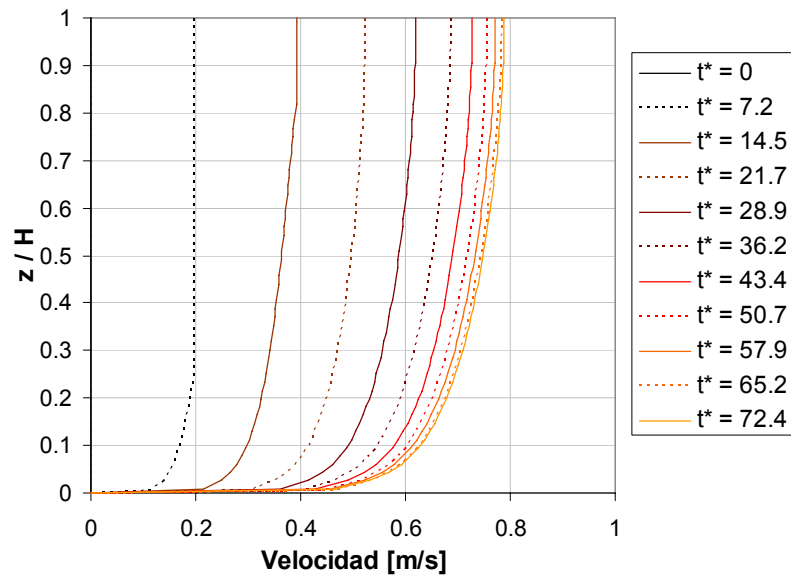


b) Perfil de velocidades adimensionalizadas con la velocidad de corte de fondo.

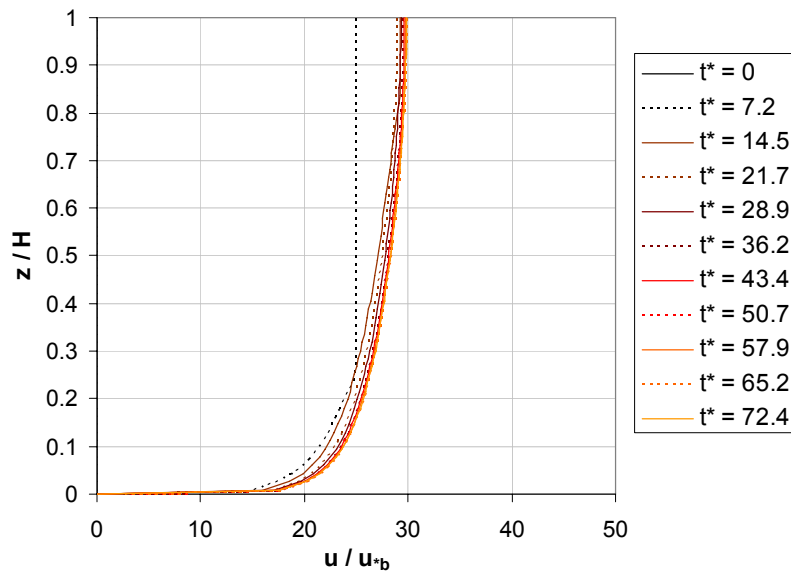


**Figura 4.5** Ejemplo de perfiles de velocidad en función del tiempo adimensionalizado  $t^* = t \cdot u_{*b}^\infty \cdot H^{-1}$ .  $Re_{*h} = 15000$ ,  $Fr^* = 0.01$ . Caso de flujo inducido por viento.

a) Perfil de velocidades



b) Perfil de velocidades adimensionalizadas con la velocidad de corte de fondo.



**Figura 4.6** Ejemplo de perfiles de velocidad en función del tiempo adimensionalizado  $t^* = t \cdot u_{*b}^\infty \cdot H^{-1}$ .  $Re_{*h} = 15000$ ,  $Fr_* = 0.01$ . Caso de flujo inducido gravitacionalmente.

En el análisis de las simulaciones se emplea la cantidad de masa presente en la columna,  $M$ , que se obtiene a través de la integración de la ecuación de difusión de masa en una coordenada vertical, desde el fondo ( $z=0$ ) hasta la superficie libre ( $z=H$ ), considerando además que no hay flujo de masa a través de esta última:

$$M = \int_0^H C \, dz \quad \text{Ec. 4.18}$$

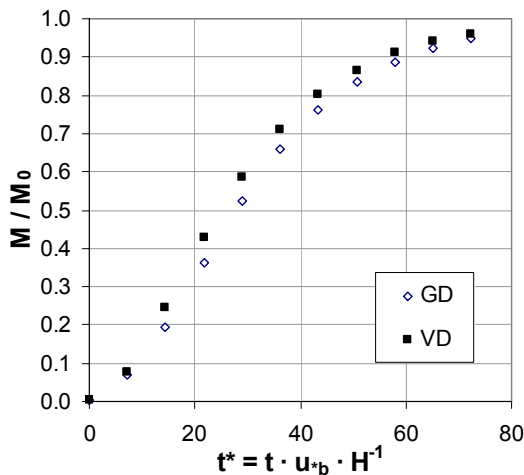
$$\int_0^H \frac{\partial C}{\partial t} \, dz = \left[ \left( \frac{v_t}{Sc_t} + \frac{v}{Sc} \right) \frac{\partial C}{\partial z} \right]_0^H \Rightarrow \frac{dM}{dt} = - \left( \frac{v_t}{Sc_t} + \frac{v}{Sc} \right) \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = f_m \quad \text{Ec. 4.19}$$

Lo que se desprende de la Ecuación 4.19 es que la tasa de cambio de la masa total del sistema es igual al flujo másico desde el fondo,  $f_m$ . De esta forma, los resultados se enfocan al estudio de la evolución temporal de la masa en la columna,  $M(t)$ .

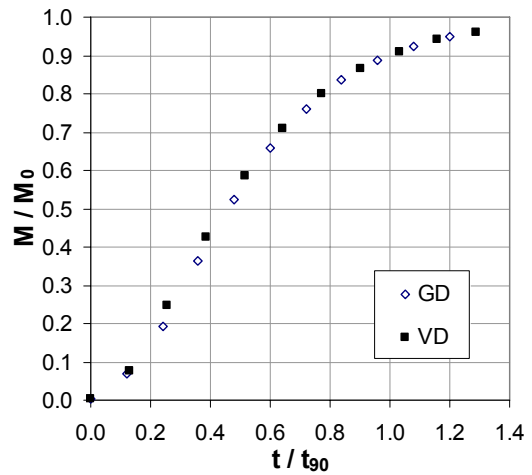
El proceso, por sus características turbulentas, sugiere una escala de tiempo que considere algún parámetro que dé cuenta de la intensidad de la turbulencia, como por ejemplo la usada en la adimensionalización de la Ecuación 4.9:

$$\lambda_t = H / u_{*b}^\infty \quad \text{Ec. 4.20}$$

Sin embargo, la diferencia en la estructura de la turbulencia cobra importancia por la forma de mezclar la columna, como se puede ver en la Figura 4.4. Por esta razón, se elige como escala de tiempo la cantidad denominada  $t_{90}$  (análisis presentado en la Figura 4.7), equivalente al tiempo que demora la columna en alcanzar un 90% de la cantidad máxima de masa que puede recibir ( $M/M_0 = 0.9$ , donde  $M_0$  es la cantidad máxima de masa en el sistema, equivalente a una concentración constante en la columna de valor igual a la concentración de fondo  $C_b$ , usada como condición de borde).



a) Adimensionalización del tiempo con escala de tiempo turbulenta  $H/u_{tb}$



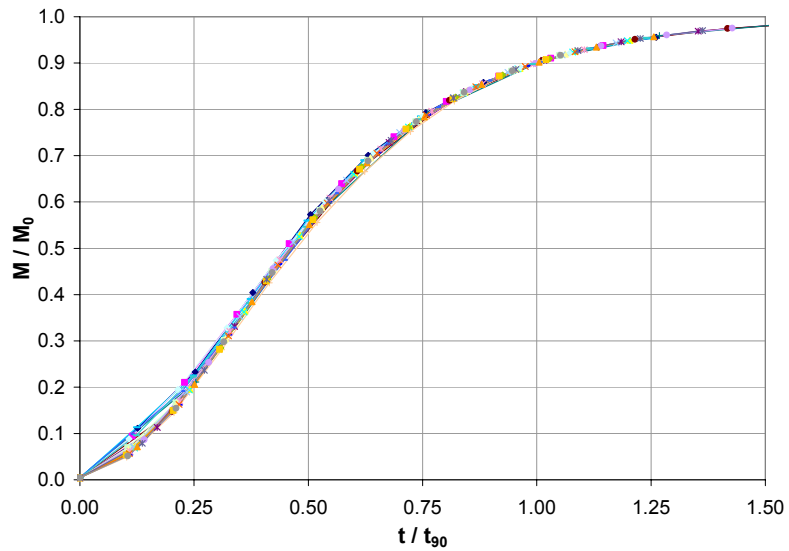
b) Adimensionalización del tiempo con escala de tiempo de mezcla  $t_{90}$ .

**Figura 4.7** Análisis de escala de tiempo para adimensionalización de perfiles de evolución de mezcla.  $Re_{\eta} = 15000$ ,  $Fr^* = 0.01$ .

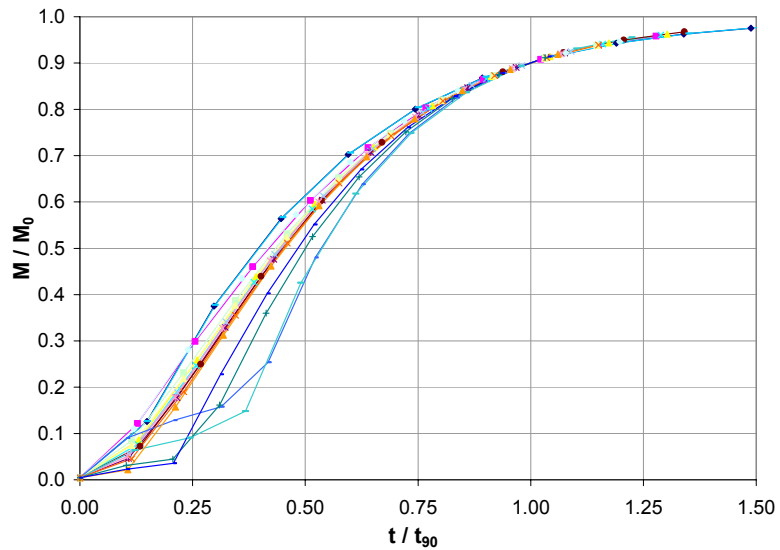
La Figura 4.8 muestra la evolución de la mezcla originada por flujos inducidos por gravedad o por viento, en términos del tiempo adimensionalizado  $t/t_{90}$ . En ésta se aprecia que en el caso de mezcla inducida por flujo gravitacional hay un colapso de las simulaciones de la evolución de la masa total en la columna en una sola curva, independientemente de las condiciones de flujo; en tanto que en el caso de mezcla inducida por viento hay una dispersión de curvas en las simulaciones para pequeños tiempos en el proceso, aunque las curvas colapsan para tiempos mayores, similarmente a lo obtenido para el caso de flujo gravitacional. Para entender este último fenómeno, hay que considerar que en las simulaciones del flujo con viento, la turbulencia se genera en la zona superficial, por lo que inicialmente la transferencia de masa desde el lecho se debe a procesos moleculares. A continuación se analizará la manera de estudiar el proceso de mezcla para este caso, distinguiendo una escala de temporal que define el retardo entre el inicio del efecto forzante (viento) y su efecto sobre la interfaz de fondo.

En el Anexo A se presenta un mayor detalle de estas curvas, según los valores de  $Fr^*$  y  $Re_{\eta}$  asociado a cada caso. En este detalle, se puede identificar que la dispersión ocurre para simulaciones de flujos inducidos por viento con valores mayores de  $Fr^*$  (0.01) en tanto que para los otros casos (0.01 y 0.001) se presenta un comportamiento similar al caso de flujo gravitacional.

a) Mezcla inducida por flujo gravitacional

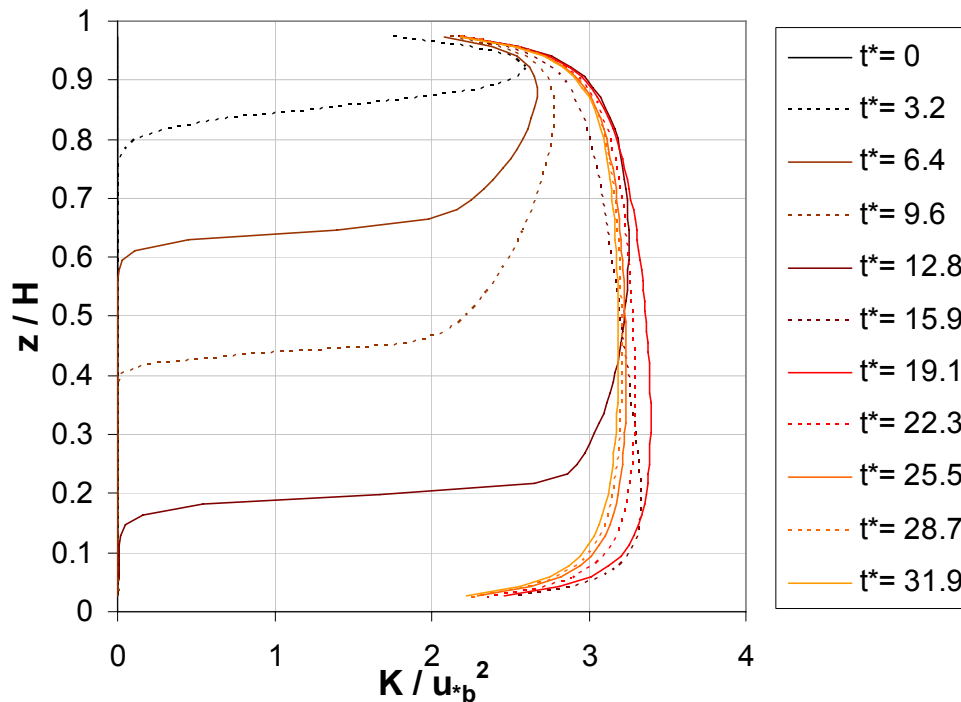


b) Mezcla inducida por viento



**Figura 4.8** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado  $t/t_{90}$ . Se presentan casos con valores de  $Re_{\tau_h}$  de  $5 \times 10^2$ ,  $2 \times 10^3$ ,  $7.5 \times 10^3$ ,  $1.5 \times 10^4$ ,  $6 \times 10^4$  y  $1.2 \times 10^5$ , y valores de  $Fr_{\tau}$  de  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$  (total: 18 casos en cada figura).

Un ejemplo de este proceso se consigna en la Figura 4.9. Se observa que cuando la mezcla es un proceso lento, este lapso es de despreciable importancia relativa; sin embargo, para casos de mezcla rápida (por ejemplo, en la combinación de alturas bajas y esfuerzos de corte altos), el tiempo de transporte de turbulencia puede ser comparable al tiempo de mezcla. En plena coherencia con lo descrito, esta situación no se observa para el caso de flujo inducido gravitacionalmente, ya que en este tipo de flujo la turbulencia se genera cercana al fondo.



**Figura 4.9** Evolución de la distribución de energía cinética turbulenta en función del tiempo adimensionalizado  $t^* = t \cdot u_{*b}^\infty \cdot H^{-1}$  para flujo inducido por viento. Caso para  $Fr^* = 0.1$ ,  $Re_{*h} = 250$ .

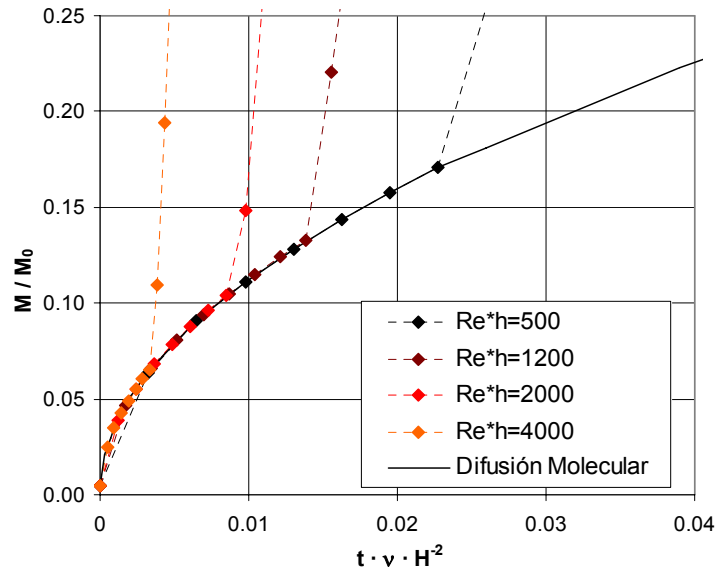
La Figura 4.10 representa una porción reducida del gráfico de la Figura 4.8b donde, al no haberse desarrollado un perfil de turbulencia cercano al fondo, carece de sentido la definición de una escala temporal basada en  $u_{*b}^\infty$ . Por ello se introduce una escala temporal viscosa, de acuerdo a la cual se define la siguiente adimensionalización del tiempo:

$$t' = t / \lambda_{visc} \quad \text{Ec. 4.21}$$

$$\lambda_{visc} = H^2 / \nu \quad \text{Ec. 4.22}$$

Según los resultados presentados en esta figura, el fenómeno comienza siguiendo una evolución determinada por la difusión molecular, hasta que la turbulencia alcanza el fondo y acelera notablemente el proceso de mezcla.





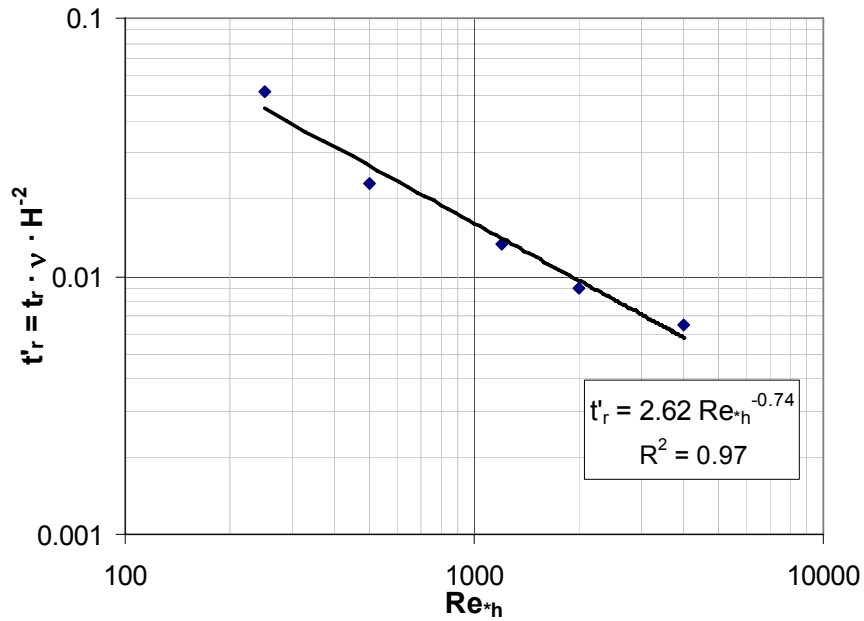
**Figura 4.10** Evolución de la mezcla, adimensionalización con escala temporal viscosa. ( $Fr=0.1$ ).

El tiempo que demora la turbulencia en alcanzar el fondo,  $t_r$ , depende del número de Reynolds, de la forma que se muestra en la Figura 4.11. Además, se puede estimar bajo estas condiciones cuál es la masa  $M_r$  que se alcanza a transferir durante el período de retardo, aumentando a medida que mayor es este tiempo, en una función que tiene un comportamiento exponencial con el tiempo, y que es ilustrada en la Figura 4.12.

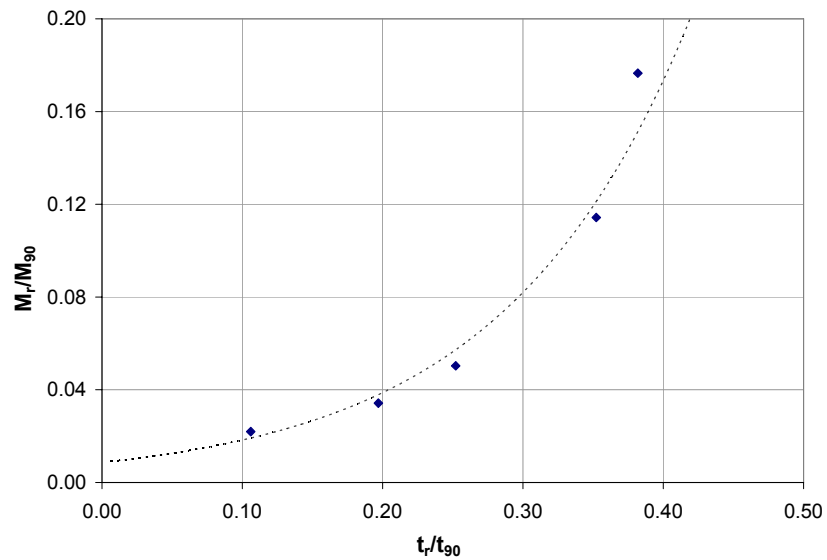
La relación encontrada en la Figura 4.11 entre  $t'_r$  y  $Re_{*h}$  es:

$$t'_r = 2.62 \cdot Re_{*h}^{-0.74} \quad \text{Ec. 4.23}$$

$$t_r = \frac{2.62 \cdot u_{*b}^{\infty -0.74} \cdot H^{1.26}}{\nu^{0.26}} \quad \text{Ec. 4.24}$$

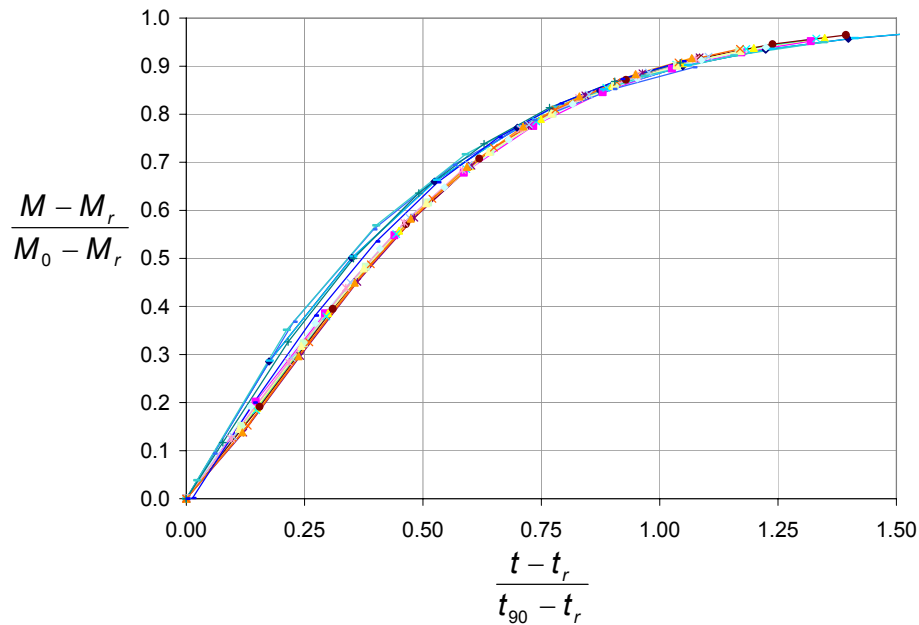


**Figura 4.11** Relación entre tiempo de retardo en la transferencia de turbulencia adimensionalizado,  $t'_r$ , y  $Re_{*h}$ . ( $Fr_* = 0.1$ )



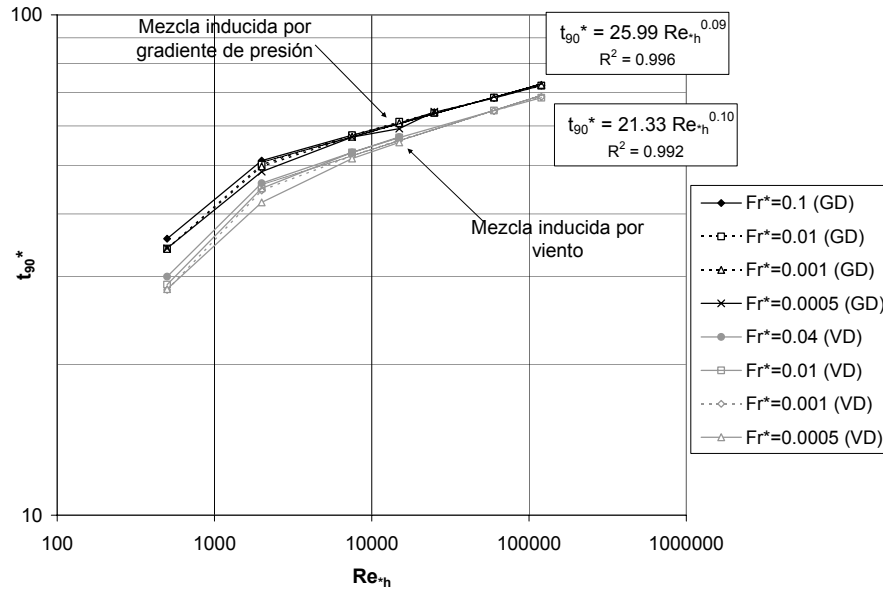
**Figura 4.12** Masa transferida durante el período de llegada de los efectos turbulentos del viento a la interfaz de fondo, en función del tiempo de desfase  $t_r$  (adimensionalizado con el tiempo de mezcla  $t_{90}$ ). Se presentan casos con valores de  $Re_{*h}$  de  $2 \times 10^3$ ,  $7.5 \times 10^3$ ,  $1.5 \times 10^4$ ,  $6 \times 10^4$  y  $1.2 \times 10^5$ , para un valor de  $Fr_*$  de  $10^{-1}$ .

Finalmente, a partir de este análisis de escalas de tiempo y procesos moleculares y turbulentos, es posible establecer una corrección para la evolución de la mezcla, mostrándose en la Figura 4.13 en términos del tiempo adimensionalizado  $t/(t_{90}-t_r)$ , donde  $t'$  corresponde al tiempo medido a partir de  $t_r$ , es decir, definiendo el inicio del proceso a contar de cuando se produce la mezcla acelerada por la presencia de turbulencia. Además, se corrige el indicador de masa, presentándose un adimensional  $(M-M_r)/(M_0-M_r)$ , donde  $M_r$  responde a la masa total transferida durante este proceso difusivo inicial, previo a la mezcla turbulenta intensiva, el cual corrige tanto numerador como denominador del indicador de mezcla.



**Figura 4.13** Evolución de la mezcla en función del tiempo, medido a contar del tiempo  $t_r$ , adimensionalizado con respecto al tiempo  $t_{90}$  corregido  $t_{90}-t_r$ . Se presentan casos con valores de  $Re_{*h}$  de  $5 \times 10^2$ ,  $2 \times 10^3$ ,  $7.5 \times 10^3$ ,  $1.5 \times 10^4$ ,  $6 \times 10^4$  y  $1.2 \times 10^5$ , y valores de  $Fr_*$  de  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$  (total: 18 casos)

El tiempo de mezcla adimensionalizado,  $t_{90}^* = t_{90} \cdot u_{*b}^\infty \cdot H^{-1}$  resulta ser un parámetro dependiente exclusivamente de  $Re_{*h}$ , como se aprecia en la Figura 4.14. Existe una influencia leve de  $Fr_*$  para ciertos valores de este parámetro, pero que guarda relación con el retardo en la generación de turbulencia cerca del fondo, como se señaló antes, pero este análisis sólo es relevante para el análisis de los instantes iniciales del proceso de mezcla.



**Figura 4.14** Tiempo adimensionalizado de mezcla en función de los parámetros adimensionales significativos del proceso,  $Re_h$  y  $Fr^*$ . (VD: Flujo inducido por viento; GD: Flujo inducido gravitacionalmente)

La relación encontrada para el tiempo de mezcla adimensionalizado en función de  $Re_h$  es:

$$t_{90}^* = 25.99 Re_h^{0.09} \quad (\text{para mezcla por flujo gravitacional}) \quad \text{Ec. 4.25}$$

$$t_{90}^* = 21.33 Re_h^{0.10} \quad (\text{para mezcla por viento}) \quad \text{Ec. 4.26}$$

Ambas expresiones han sido definidas para  $Re_h > 2000$ .

Empleando la definición de los parámetros  $t_{90}^*$  y  $Re_h$ , se puede expresar:

$$t_{90} = \frac{25.99 \cdot u_b^{\infty -0.91} \cdot H^{1.09}}{V^{0.09}} \quad \text{Ec. 4.27}$$

(para mezcla por flujo gravitacional)

$$t_{90} = \frac{21.33 \cdot u_{*b}^{\infty -0.90} \cdot H^{1.10}}{\nu^{0.10}}$$

Ec. 4.28

(para mezcla por viento)

Los exponentes que definen las leyes de potencia en las ecuaciones 4.25 y 4.26 son prácticamente idénticos entre los casos de flujo gravitacional y con viento.

#### 4.5. SÍNTESIS DEL ANÁLISIS

Mediante las simulaciones realizadas, se han obtenido indicadores que cuantifican la influencia de la turbulencia en la transferencia de masa. El modelo empleado resuelve la estructura de la turbulencia en toda la columna, encontrándose que la turbulencia afecta tanto al flujo desde los sedimentos hacia la columna, como a la mezcla dentro de ésta, incidiendo en el tiempo de mezcla, caracterizado por una escala de tiempo  $t_{90}$ , correspondiente al tiempo que demora en incorporarse a la columna un 90% de la masa máxima total.

Mediante la definición de esta escala de tiempo  $t_{90}$ , se pueden colapsar los perfiles de evolución de mezcla de esta masa en la columna en una sola curva para las simulaciones de flujo inducido gravitacionalmente y para gran parte de los casos de flujo inducido por viento. Las diferencias se hacen presentes cuando el tiempo  $t_r$ , definido como el tiempo que demora en manifestarse en el fondo la energía cinética turbulenta originada por el esfuerzo de corte aplicado en la superficie libre, es comparable al tiempo de mezcla del sistema,  $t_{90}$ . Esto ocurre cuando la mezcla del soluto ocurre en forma muy rápida, ya que el tiempo  $t_r$ , asociado a la difusión de turbulencia, es en general de pequeña magnitud. En los casos de mezcla lenta, el lapso  $t_r$  carece de relevancia relativa comparado con  $t_{90}$ , permitiendo apreciar un comportamiento autosimilar de la evolución de la mezcla. A través del análisis de las modelaciones numéricas, el tiempo  $t_r$  se ha relacionado directamente con el número de Reynolds,  $Re_{*h}$ .

Cuando la turbulencia se desarrolla en superficie y demora en manifestarse en el fondo, la transferencia de masa desde el lecho ocurre durante los primeros instantes, como un proceso molecular, cuya escala de tiempo característica es  $\lambda_t = H^2 / \nu$ . En cambio, cuando existe turbulencia cerca del lecho, como ocurre con flujos inducidos gravitacionalmente o cuando un flujo inducido por viento desarrolla en toda la columna

su estructura turbulenta, la escala de tiempo que permite analizar la mezcla es  $\lambda_t = H / u_{*b}^\infty$ .

El tiempo de mezcla adimensionalizado,  $t_{90}^*$  resulta ser un parámetro dependiente exclusivamente del número de Reynolds,  $Re_{*h}$ . Sin embargo, para valores bajos de  $Re_{*h}$  se aprecia una leve influencia de  $Fr^*$ , la cual guarda relación con el retardo en la generación de turbulencia cerca del fondo, y con limitaciones del algoritmo de solución numérica, cuando la discretización espacial no consigue reflejar la existencia de la subcapa viscosa en la vecindad del lecho. Las relaciones encontradas para  $t_{90}^*$  muestran que este parámetro aumenta con  $Re_{*h}$ , y que la mezcla ocurre más rápidamente para flujo inducido por el viento, lo cual se asocia a su estructura de turbulencia uniforme en toda la columna. La interpretación de estos parámetros adimensionales lleva a establecer que  $t_{90}$  aumenta conforme la altura de la columna sea mayor, o que la velocidad de corte de fondo sea menor (menor turbulencia en el sistema). Los exponentes en la ley de potencia encontrada entre  $t_{90}$  y sus parámetros gobernantes son prácticamente idénticos en los casos de flujo inducido gravitacionalmente o por viento.

## 5. TRANSPORTE VERTICAL DE MASA EN FLUJOS ESTRATIFICADOS TURBULENTOS

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Al analizar los factores que mantienen el equilibrio de ecosistemas ligados a procesos que ocurren en los sedimentos y la columna de agua, cobran importancia variables ambientales, como la salinidad del agua y la presencia de nutrientes, los cuales resultan en limitantes para el crecimiento de determinadas especies de algas, que sólo se desarrollan bajo determinados rangos de estos elementos. Estas variables guardan una relación estrecha con los procesos de transferencia de masa en la interfaz agua-sedimentos, así como la mezcla turbulenta de la columna de agua, producida por viento y por el flujo inducido por la gravedad.

De la dependencia que se reconoce de estos procesos naturales, surge la necesidad de predecir el transporte de masa, bajo el escenario de la eventual interacción del flujo turbulento y estratificación salina en la columna de agua. El objetivo en este capítulo es el uso de un modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  (implementado a través del modelo PROBE) para simular el transporte vertical de masa en flujos en canales abiertos, estratificados por salinidad, bajo gradientes de presión o circulación ocasionada por el viento, de forma de describir como estas diferentes condiciones, aplicadas sobre la columna de agua, afectan la capacidad de mezcla, tasas de mezcla en el lecho y las escalas de tiempo involucradas en los procesos. Con esto, se apunta a cuantificar el efecto de la estratificación en la difusión turbulenta que determina el transporte de masa desde la interfaz agua-sedimentos hacia la columna de agua.

Los escenarios de modelación definidos para alcanzar los objetivos, consideran condiciones de flujo uniforme, de acuerdo a un modelo unidimensional (vertical) de transporte. Los términos fuentes para inducir la circulación del agua pueden ser tanto gravedad como viento, bajo estratificación de una cuña salina o sin ésta. Tanto la salinidad como las otras especies a estudiar (por ejemplo, oxígeno, nutrientes, u otra) requieren ser modeladas. Los escenarios elegidos permiten la comparación entre las estructuras turbulentas inducidas por viento o por un gradiente de presiones.

En cada caso, se alcanzan diferentes niveles de turbulencia al cambiar la altura de la columna de agua, el esfuerzo de corte en la superficie libre (en el caso dominado por el viento) y el valor del gradiente de presión (en el caso gobernado por fuerzas

gravitacionales). Las condiciones de borde consideradas para las ecuaciones de moméntum son las comunes para flujos en canales abiertos: condición de no resbalamiento en el fondo y un valor fijo del esfuerzo de corte en el límite superior del dominio de solución. Para las ecuaciones de transferencia de masa, es considerado un compuesto conservativo, imponiendo una concentración constante para la especie en la interfaz agua-sedimento, lo que implica un monto ilimitado de soluto disponible para ser transportado a la columna de agua. Adicionalmente, se considera que no existe flujo de masa a través de la superficie libre.

## 5.2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Las ecuaciones básicas formuladas para describir el problema estudiado son: ecuaciones de Navier-Stokes (promediadas en la turbulencia), ecuaciones de conservación de masa y aquellas que involucran a la energía cinética turbulenta y su disipación en el modelo  $k-\varepsilon$ . Estas últimas corresponden al modelo de cierre de la turbulencia aquí seleccionado, considerado como en Rodi (1984). Este grupo de ecuaciones fue usado para la simulación de perfiles verticales de velocidad, parámetros de la turbulencia y concentración de masa, en un flujo unidireccional uniforme. Las ecuaciones (Svensson, 1986) han sido descritas previamente en la revisión de antecedentes (Capítulo 2), así como se han hecho algunas consideraciones adicionales en el Capítulo 4 referidas a como se considera la producción de energía cinética turbulenta por efectos de boyancia en el modelo PROBE.

La principal modificación al esquema teórico empleado, se realiza para la caracterización de la transferencia de masa cercana al lecho, donde una función especial de pared es usada, determinando la tasa de transferencia de masa  $f_m$  a través del cálculo del número de Stanton,  $St$ , como se describe en el Capítulo 4 anterior y se resume en la Ecuación 5.1:

$$f_m = k_c \cdot (C - C_b) = St \cdot U_{ref} \cdot (C - C_b) \quad \text{Ec. 5.1}$$

donde:

- $C$ : concentración del soluto lejos del lecho;
- $C_b$ : concentración del soluto cerca del lecho;
- $k_c$ : coeficiente de transferencia de masa;
- $U_{ref}$ : velocidad de referencia del flujo.



Debe recordarse que, tal como en el capítulo anterior, el número de Stanton representativo a usar se determina como el máximo entre los valores de los números de Stanton molecular y turbulento (Spalding, 1991; Dade, 1993). Esto se interpreta como que la mínima tasa de transferencia ocurre bajo condiciones puramente de difusión molecular, y aumenta conforme se hace más importante el efecto turbulento.

Las condiciones de borde en la superficie libre dependen del caso modelado (con y sin viento), pero en ambos casos se cuenta con un valor fijo del esfuerzo de corte superficial. En el fondo, la condición de no resbalamiento es impuesta directamente usando un valor de velocidad nula en la posición del fondo del lecho (y se usa un perfil logarítmico de velocidades para representar las velocidades cercanas al éste). Para los cálculos de transferencia de masa, los sedimentos son considerados la fuente de solutos para la columna, al usar una concentración constante en el tiempo en el lecho. Este último tipo de condición es preferida, en vez de usar una condición de flujo constante a través de la interfaz, dado que esta tasa de transferencia puede experimentar variaciones en el tiempo, a medida que evoluciona la mezcla. Finalmente, las condiciones de borde usadas en el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  son aquellas recomendadas por Rodi (1984).

### **5.3. MODELACIÓN NUMÉRICA**

La solución numérica para este sistema de ecuaciones es calculado a través del algoritmo desarrollado por Svensson (1986) en el modelo PROBE, que resuelve problemas de capas límites unidimensionales en condiciones impermanentes usando el método de los volúmenes finitos (Patankar, 1980). Este código tiene incorporado el modelo  $k-\varepsilon$ , y ha sido usado en varios estudios sobre estructuras de flujo turbulento y aplicaciones de transferencia de masa y calor (Svensson & Rahm, 1988; Niño et al., 2000). La función pared para la transferencia de masa previamente descrita, fue implementada dentro del algoritmo para los actuales cálculos.

Los casos simulados corresponden a columnas de agua de diferente altura  $H$ , inicialmente en reposo. Esta columna puede tener una densidad homogénea, o estar estratificada en dos capas de diferentes densidades, ambas de igual altura  $H/2$ . En  $t = 0$ , los términos fuentes de moméntum comienzan a actuar, correspondiendo a un esfuerzo de corte superficial aplicado en el límite superior del dominio de solución (simulando el efecto del viento soplando sobre la superficie del agua), o bien a un gradiente de presión en la dirección del flujo (simulando al flujo gravitacional asociado a

la pendiente del escurrimiento). Esto se denomina en el resto del análisis como flujos inducidos por viento o por gravedad, respectivamente.

En las simulaciones, se determina el transporte de dos especies: sal (la cual crea la estratificación inicial de la columna de agua), y un compuesto neutralmente boyante. Ambas especies tienen un valor de concentración constante en el fondo de la columna, excepto en el caso no estratificado donde no se emplea sal. De esta forma, el gradiente de concentración, más la intensidad de la turbulencia, inducen la transferencia de masa desde el fondo y la mezcla en la columna. Para los casos no estratificados, el único parámetro adimensional relevante es el número de Reynolds,  $Re_{*h}$ . Cuando hay estratificación, un segundo parámetro, el número de Richardson,  $Ri_{*0}$ , afecta el proceso. Ambos parámetros adimensionales se definen en las ecuaciones 5.2 y 5.3.

Número de Reynolds:

$$Re_{*h} = \frac{u_{*b}^{\infty} \cdot H}{\nu} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Número de Richardson:

$$Ri_{*0} = \frac{\sqrt{\beta \cdot C_b \cdot g \cdot H}}{u_{*b}^{\infty}} \quad \text{Ec. 5.3}$$

donde  $u_{*b}^{\infty}$  = velocidad de corte en el fondo, alcanzada bajo condiciones de equilibrio (cuando  $t \rightarrow \infty$ ).

Los valores de esfuerzos de corte y gradientes de presión son definidos externamente al algoritmo, imponiéndose como parámetros, para representar situaciones dentro de rangos deseados de  $Re_{*h}$  y  $Ri_{*0}$ . La altura de la columna,  $H$ , y la velocidad de corte en el fondo  $u_{*b}$  son determinadas a partir de las ecuaciones anteriores para cada valor de los parámetros adimensionales considerados, y se muestran en las ecuaciones 5.4 y 5.5:

Velocidad de corte:

$$u_{*b}^{\infty} = \frac{Re_{*h} \cdot \nu}{H} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Altura de la columna de agua:

$$H = \left( \frac{Ri_{*0} \cdot Re_{*h} \cdot \nu}{\sqrt{\beta \cdot C_b \cdot g}} \right)^{2/3} \quad \text{Ec. 5.5}$$

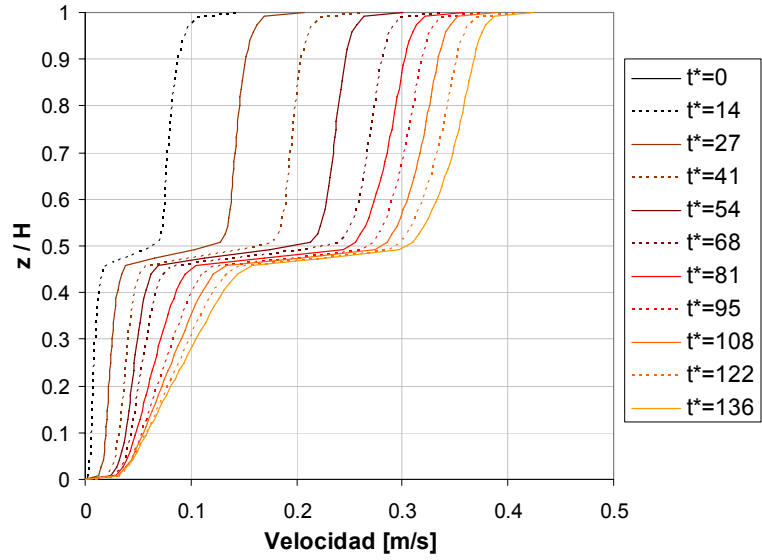
La velocidad de corte en el fondo es usada para calcular el gradiente de presiones o el esfuerzo de corte superficial para ser definido en el algoritmo.

Debe notarse que el producto  $\beta \cdot C_b$  dentro de la ecuación 5.3 puede ser expresado como  $\Delta\rho_{max}/\rho$ , un parámetro comúnmente usado para mostrar como la boyancia afecta la gravedad reducida. Como la diferencia de densidades dentro de la columna varía a medida que progresa la mezcla (en los casos estratificados), para efectos de estas simulaciones el número de Richardson se fija con la diferencia inicial de densidad.

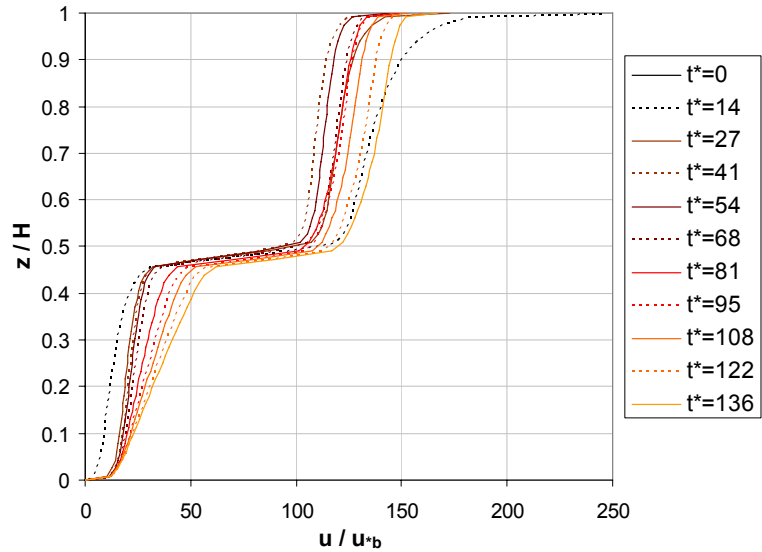
#### **5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE SIMULACIONES**

La simulación numérica entrega perfiles de velocidad, propiedades de la turbulencia y concentración, variando en el tiempo. Las características de la turbulencia y las velocidades obtenidas a través de las simulaciones muestran una buena concordancia con observaciones experimentales (tal como se precisó en el Capítulo 4 al describir la estructura de la turbulencia resultante de la aplicación del modelo). En las Figuras 5.1 y 5.2 se presentan ejemplos de perfiles de velocidades obtenidos a partir de la modelación, evolucionando en el tiempo a partir de la condición de reposo inicial. A diferencia del caso sin estratificación, en estas figuras se aprecia el efecto de la interfaz de densidad ubicada a la altura  $H/2$ , produciendo un marcado cambio de tendencia de los perfiles de velocidad. Además, la evolución del sistema ya no responde a un patrón de velocidades asociado a una forma característica única, lo que se aprecia también al graficar la velocidad adimensionalizada con la velocidad de corte de fondo  $u_{*b}^{\infty}$ .

a) Perfil de velocidades

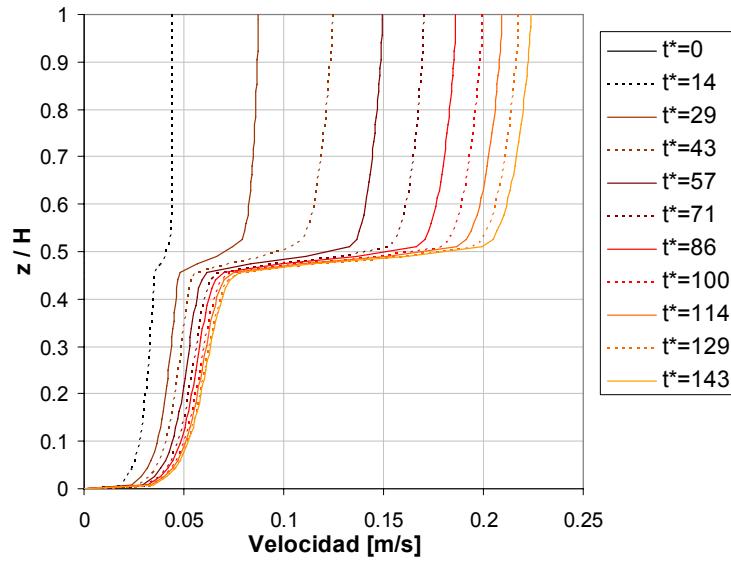


b) Perfil de velocidades adimensionalizadas con la velocidad de corte de fondo.

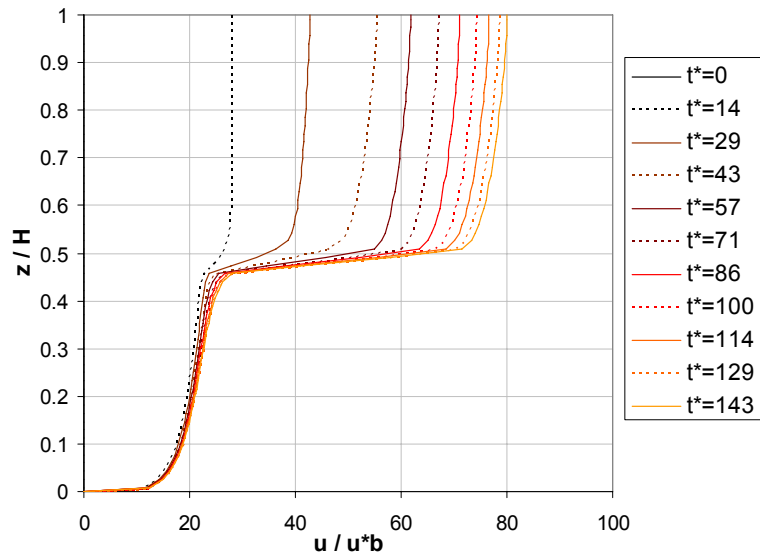


**Figura 5.1** Ejemplo de perfiles de velocidad en función del tiempo adimensionalizado  $t^* = t \cdot u_{s_b}^\infty \cdot H^{-1}$ .  $Re_{y_h} = 2000$ ,  $Ri_{y_h} = 155$ . Caso de flujo inducido por viento.

a) Perfil de velocidades

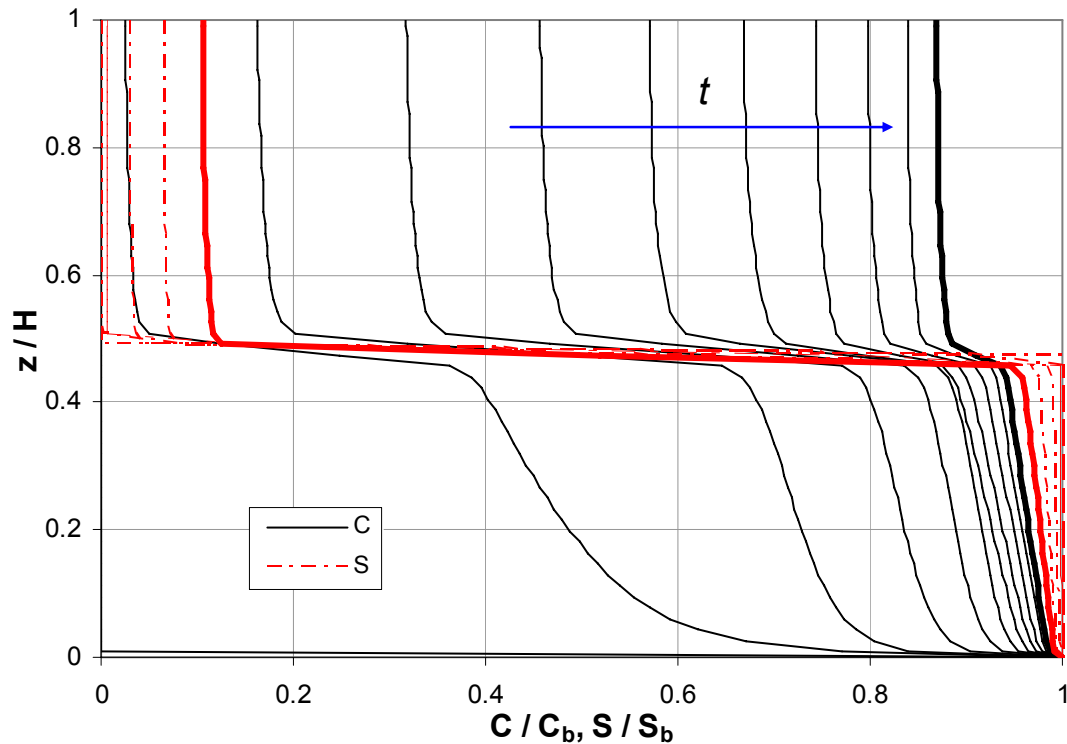


b) Perfil de velocidades adimensionalizadas con la velocidad de corte de fondo.



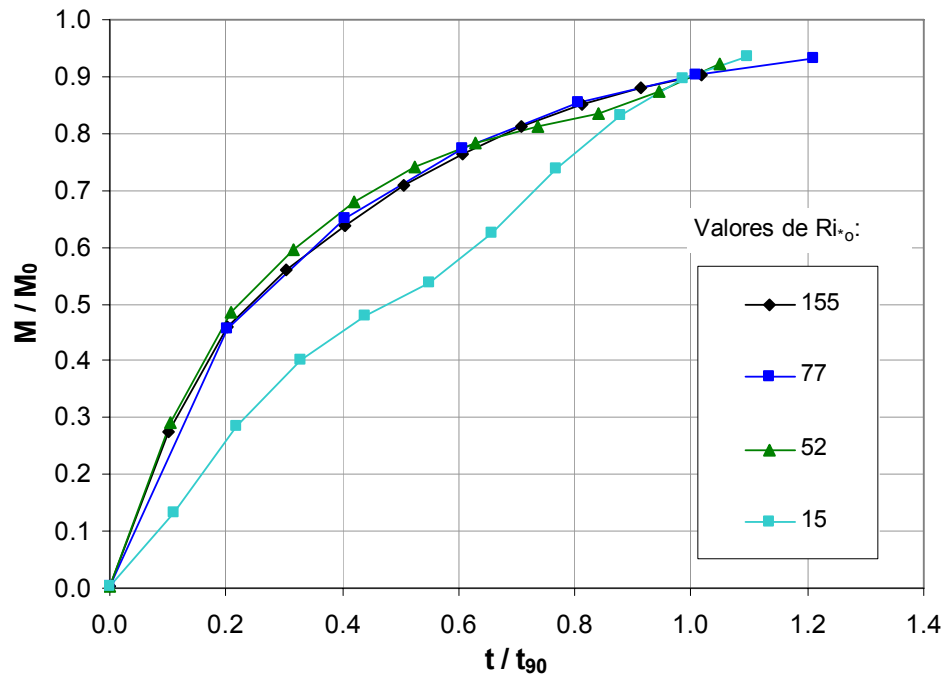
**Figura 5.2** Ejemplo de perfiles de velocidad en función del tiempo adimensionalizado  $t^* = t \cdot u_{sfb}^\infty \cdot H^{-1}$ .  $Re_{*h} = 2000$ ,  $Ri_{*h} = 155$ . Caso de flujo inducido por gravedad.

Un ejemplo del transporte de masa obtenido se presenta en la Figura 5.3, que muestra que la estratificación salina afecta la mezcla de otras especies (no boyantes), debido a que el gradiente de densidad en el medio de la columna reduce la transferencia de energía turbulenta, de esta forma afectando la transferencia de masa en la capa superior.

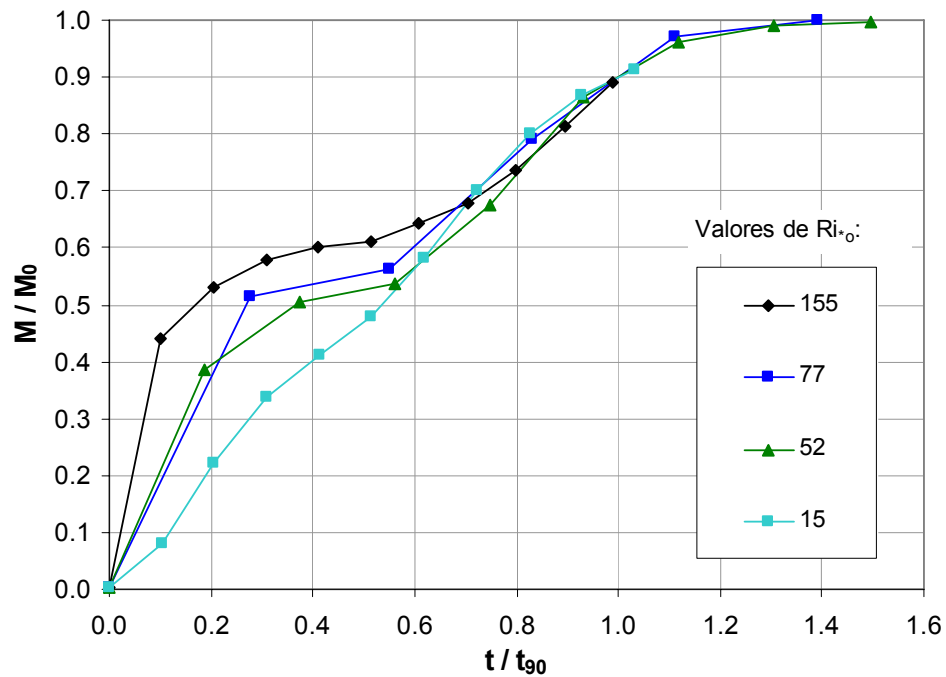


**Figura 5.3** Ejemplo de evolución de la mezcla en una columna estratificada con flujo inducido por viento, para  $Re_{\eta} = 2000$  y  $Ri_{\ast 0} = 155$ , mostrando perfiles de concentración de soluto (C) y salinidad (S) desde  $t = 0$  s hasta  $t = 47,000$  s, en intervalos regulares de 4700 s. Ambas concentraciones son adimensionalizadas con sus valores en el límite inferior,  $C_b$  y  $S_b$  respectivamente. Las líneas de mayor grosor dentro de cada familia de curvas representa el perfil resultante para  $t = 47,000$  s.

Para analizar y resumir la información generada numéricamente relativa a tasas de transferencia de masa desde el fondo y mezcla vertical, se emplea una escala de tiempo  $t_{90}$ , como el tiempo para el cual la masa transferida a la columna desde los sedimentos,  $M$ , alcanza el 90% del máximo de masa de soluto permitida en la columna (equivalente a una concentración uniforme  $C_b$  en toda la columna). Las Figuras 5.4 a 5.11 muestran como la razón  $M/M_0$  se aproxima a un valor de 1 asintóticamente. Resultados análogos a los mostrados en la Figura 5.3 son obtenidos para todas las otras condiciones probadas, con ciertas modificaciones, particularmente cuando existen condiciones de alta intensidad de turbulencia, que son capaces de destruir la estratificación salina en una escala de tiempo similar a  $t_{90}$  (ver Anexo A con detalle de resultados). Cuando esto ocurre, la velocidad de mezcla se incrementa, definiendo dos etapas del proceso de mezcla: una etapa inicial lenta afectada por la estratificación, y una etapa final rápida una vez que la estratificación salina ha sido destruida. Cuando la sal y el soluto neutralmente boyante son mezclados simultáneamente, favorecido por la menor relevancia de la estratificación en el fenómeno (valores de  $Ri^*_0$  bajos), las curvas de  $M / M_0$  versus  $t/t_{90}$  colapsan en una (casos de Figuras 5.6 y 5.10, para diferentes tipos de flujo). Un colapso similar a éste es el que se obtiene en el caso de columnas no estratificadas ( $Ri^*_0 = 0$ ). En el caso de valores de  $Ri^*_0$  altos, se hace más claro el proceso en dos etapas mencionado anteriormente.

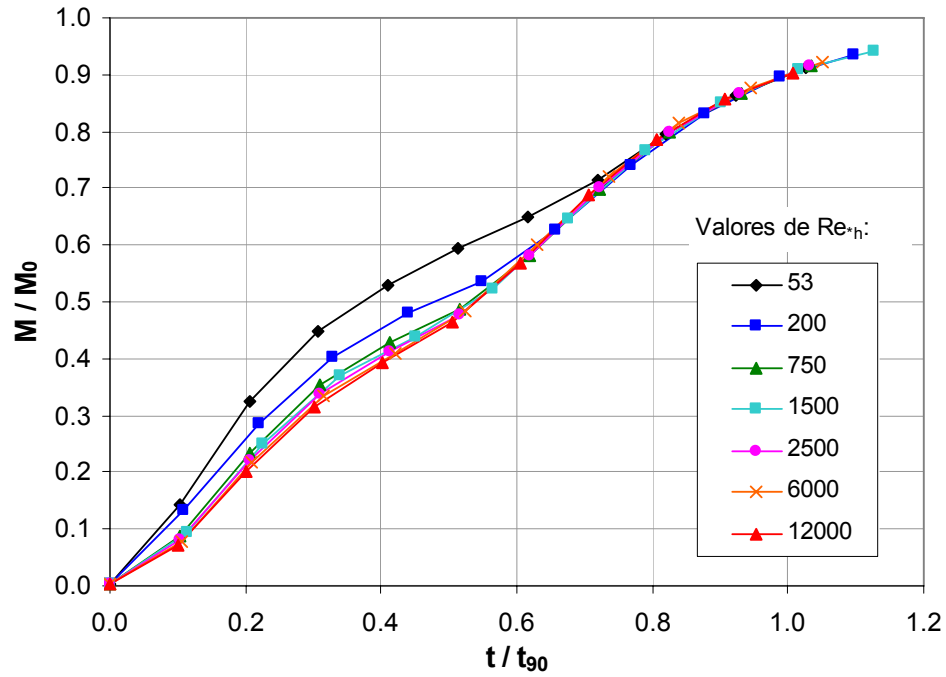


**Figura 5.4** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por gravedad, para  $Re_{th}^* = 200$ , bajo diferentes condiciones de  $Ri_{*0}$ .

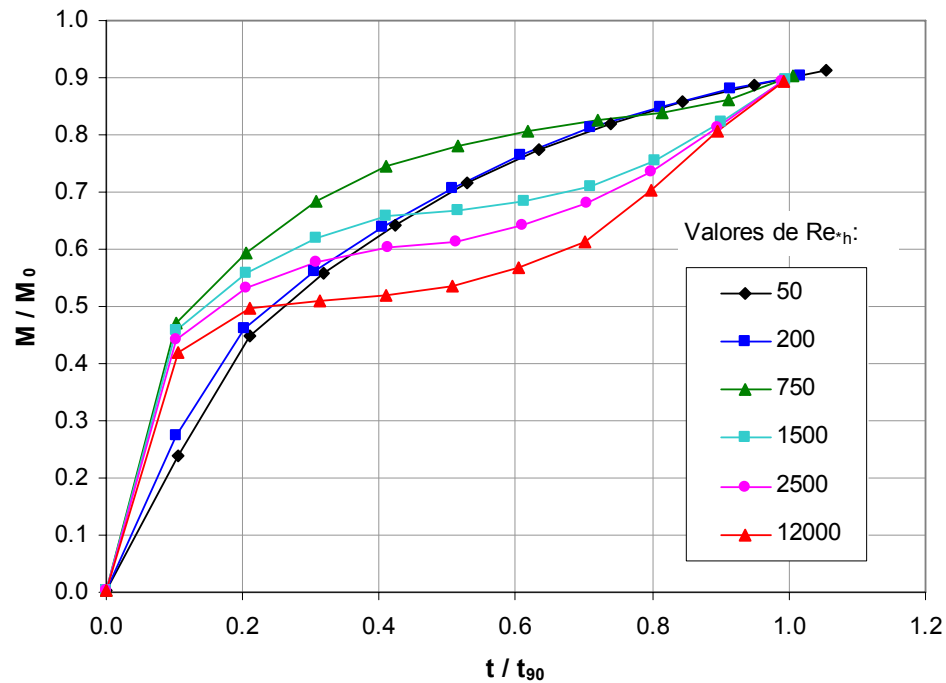


**Figura 5.5** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por gravedad, para  $Re_{th}^* = 2500$ , bajo diferentes condiciones de  $Ri_{*0}$ .

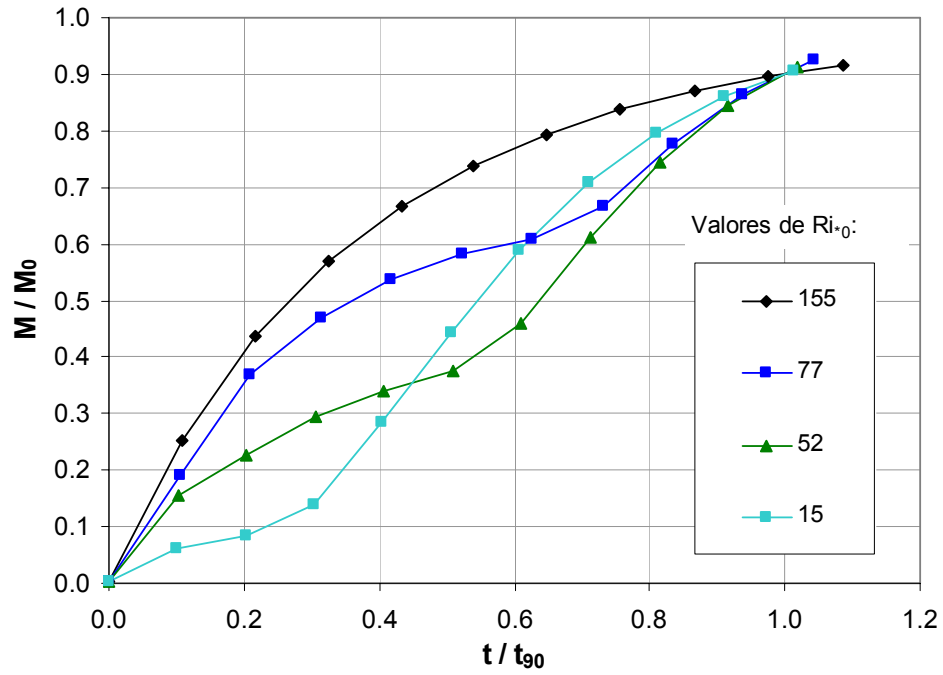




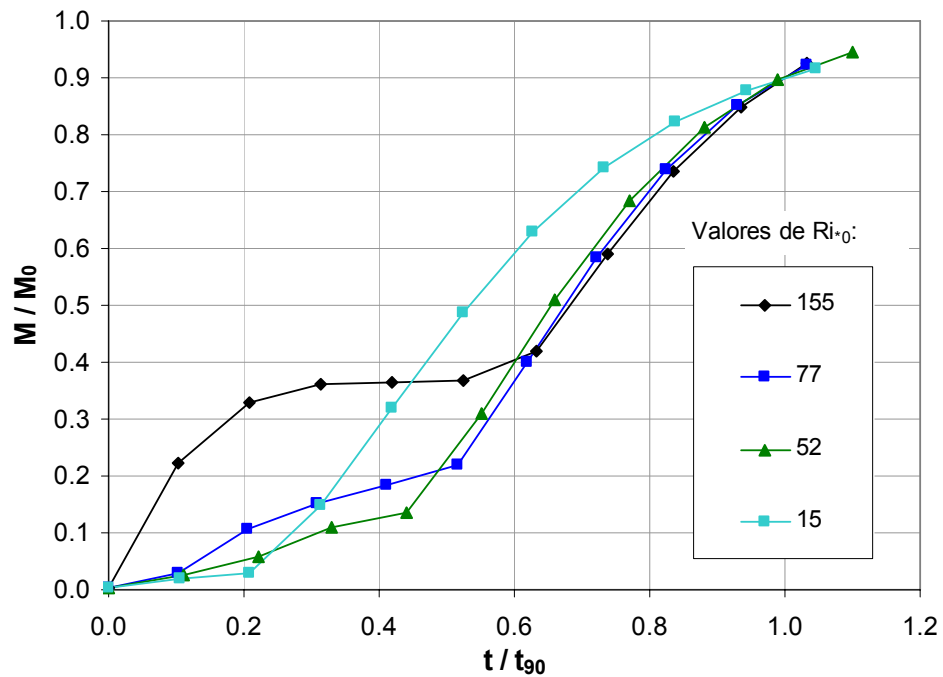
**Figura 5.6** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por gravedad, para  $Ri^*_0 = 15$ , bajo diferentes condiciones de  $Re^*_{h_1}$ .



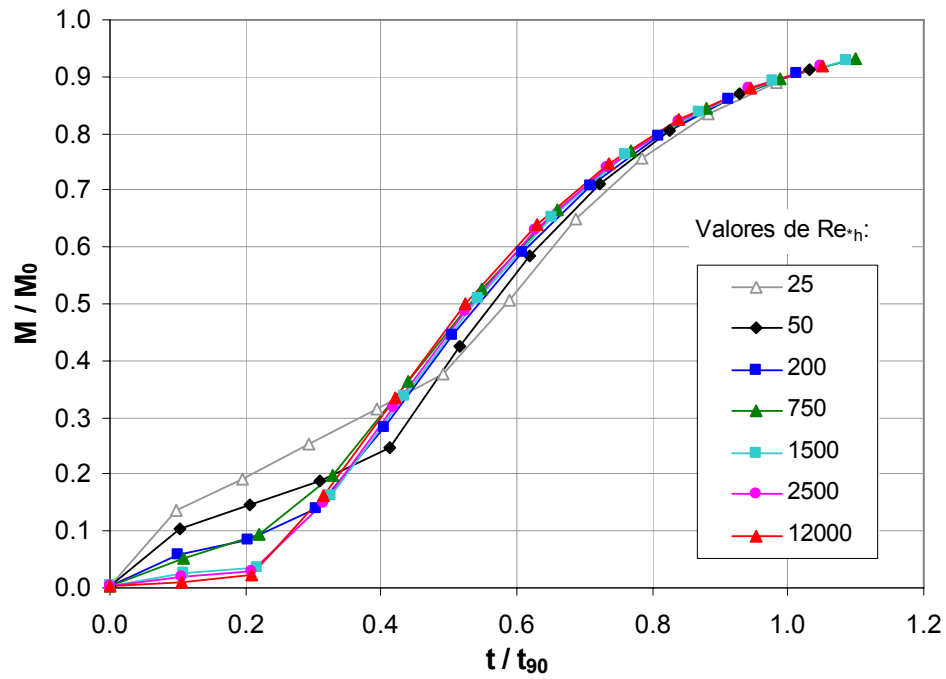
**Figura 5.7** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por gravedad, para  $Ri^*_0 = 155$ , bajo diferentes condiciones de  $Re^*_{h_1}$ .



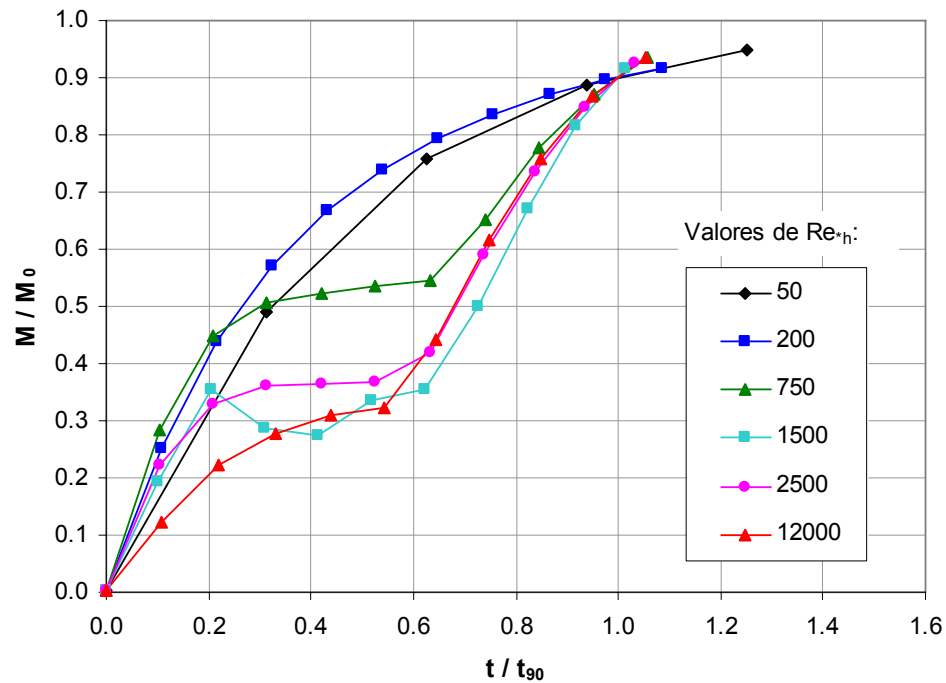
**Figura 5.8** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por viento, para  $Re_{\eta} = 200$ , bajo diferentes condiciones de  $Ri_{\ast 0}$ .



**Figura 5.9** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por viento, para  $Re_{\eta} = 2500$ , bajo diferentes condiciones de  $Ri_{\ast 0}$ .

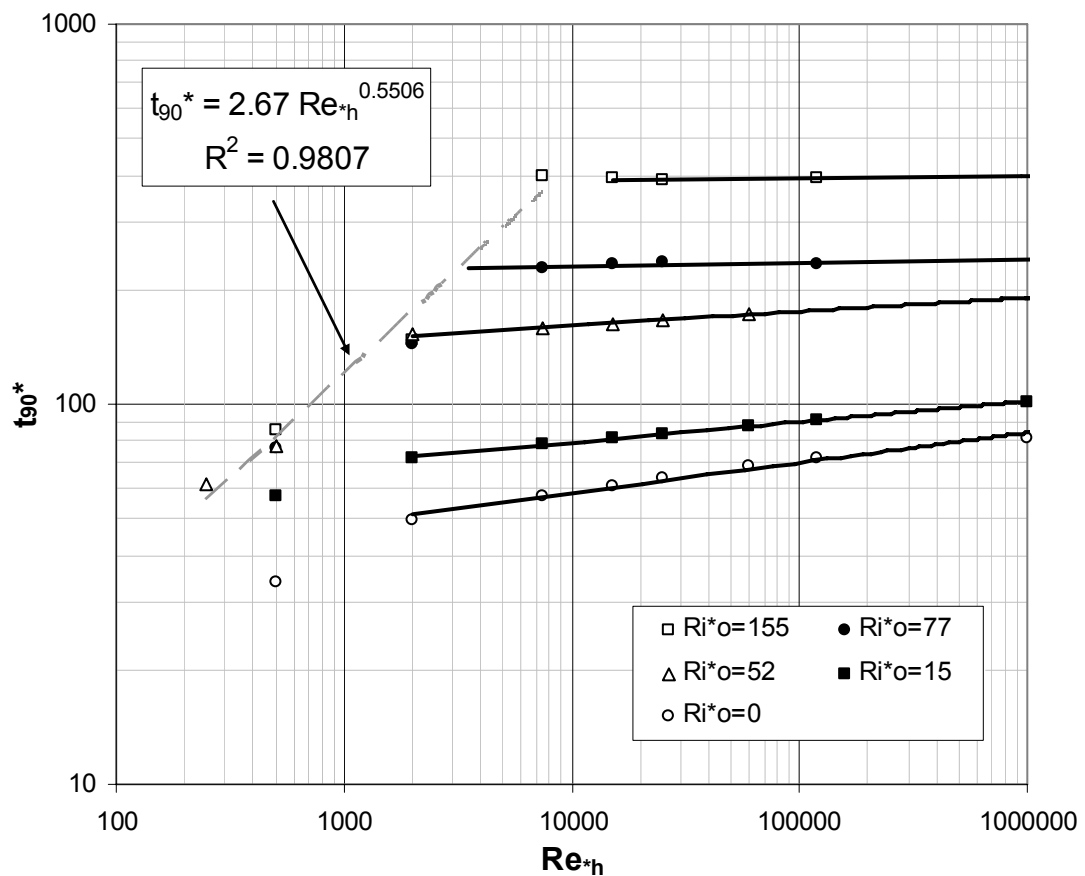


**Figura 5.10** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por viento, para  $Ri_{*0} = 15$ , bajo diferentes condiciones de  $Re_{*h}$ .

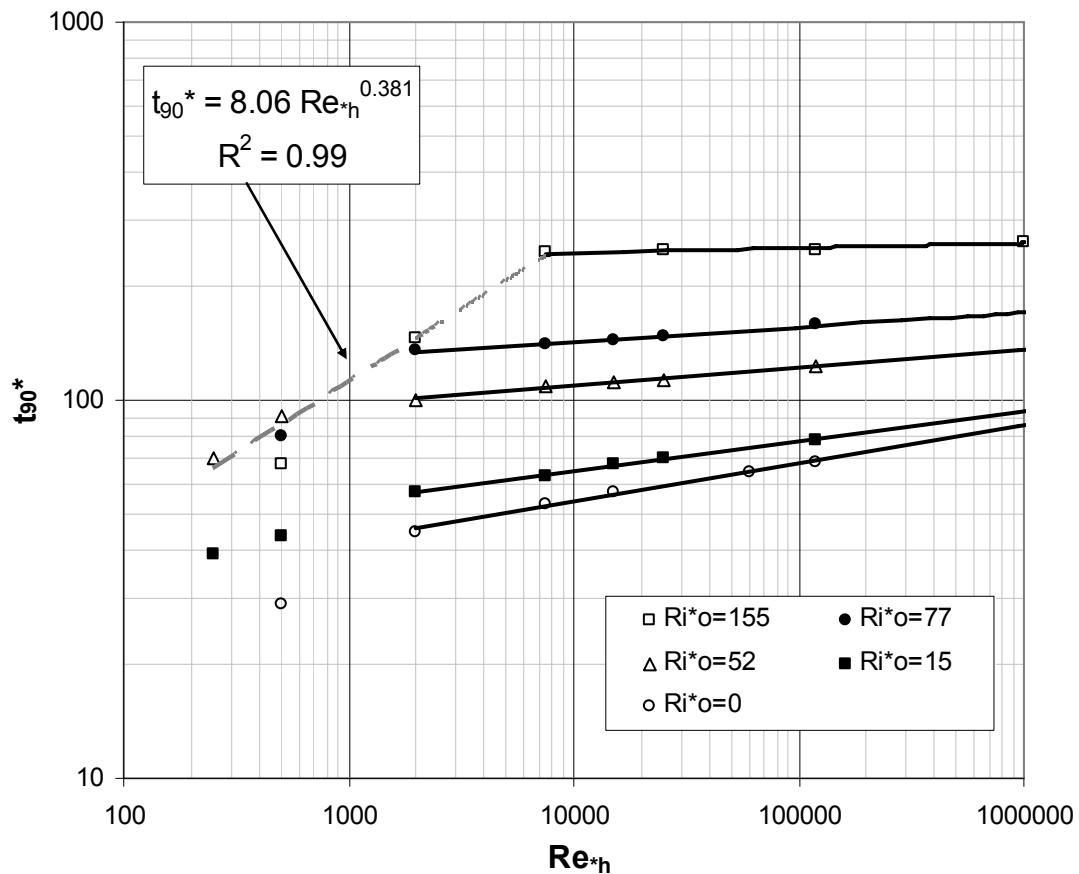


**Figura 5.11** Evolución temporal de la masa transferida adimensionalizada  $M / M_0$ , a una columna estratificada con flujo inducido por viento, para  $Ri_{*0} = 155$ , bajo diferentes condiciones de  $Re_{*h}$ .

La escala de tiempo adimensional calculada  $t_{90}^* = t_{90} \cdot u_{sb}^\infty \cdot H^{-1}$ , fue analizada para un amplio rango de valores de  $Re_{*h}$  y  $Ri_{*0}$ . Los resultados se muestran en las Figura 5.12 y 5.13, para flujos gobernados por pendiente y viento, respectivamente. A bajos valores de  $Re_{*h}$ ,  $t_{90}^*$  se incrementa junto el número de Reynolds, independientemente del número de Richardson. Esta región corresponde a casos en los cuales la estratificación salina se mantiene bien definida durante el proceso de mezcla del soluto, debido a una débil capacidad de la turbulencia para romper la estratificación por densidad. Una ley de potencia puede ser definida en esta región particular, mostrando que no depende del número de Richardson (los resultados del mejor ajuste se indican en las Figuras 5.12 y 5.13).



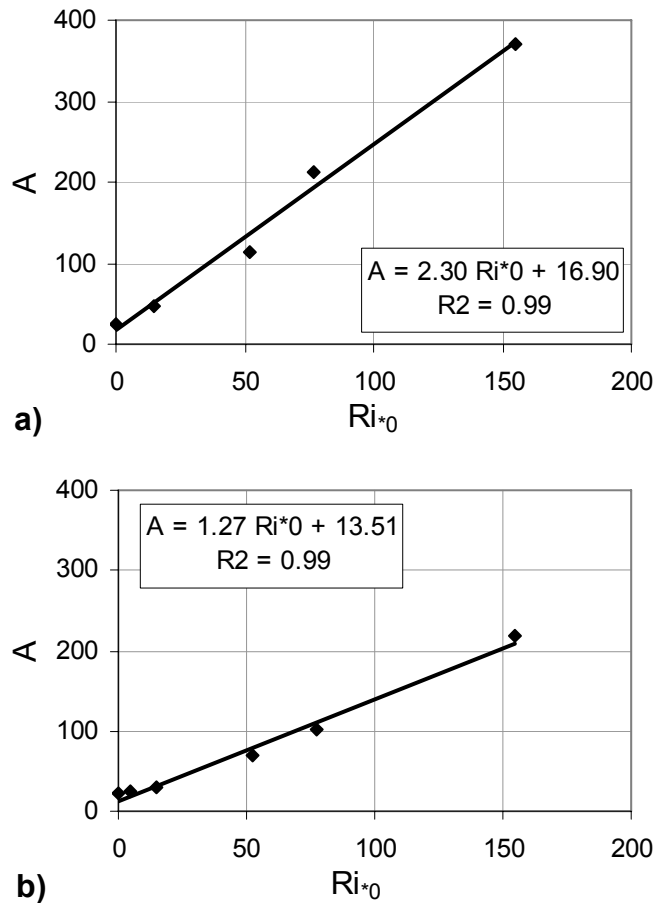
**Figura 5.12** Variación del tiempo de mezcla adimensionalizado  $t_{90}^*$  con  $Re_{*h}$  y  $Ri_{*0}$ . Flujos gobernados por fuerzas gravitacionales.



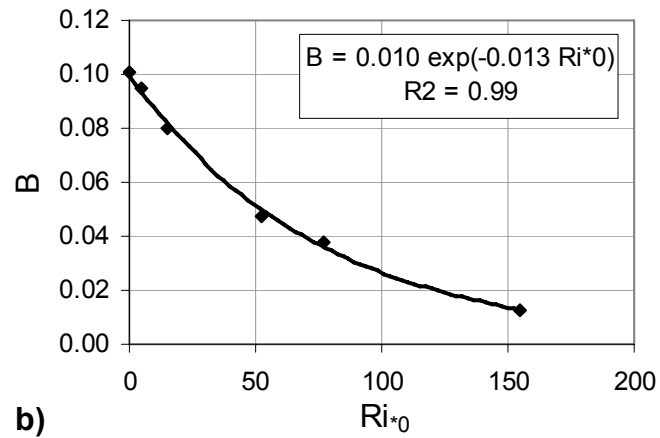
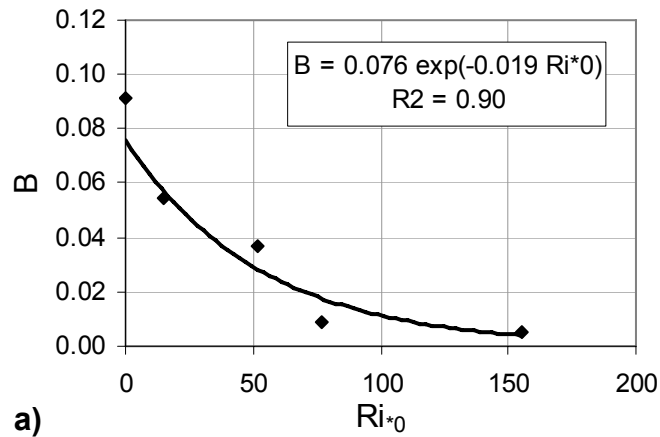
**Figura 5.13** Variación del tiempo de mezcla adimensionalizado  $t_{90}^*$  con  $Re_{*h}$  y  $Ri_{*0}$ . Flujos gobernados por viento.

A valores suficientemente altos de  $Re_{*h}$ , la transferencia de soluto desde el fondo y la mezcla de las capas definidas por la estratificación salina ocurren a escalas de tiempo similares. El parámetro  $t_{90}^*$  se incrementa con  $Re_{*h}$  siguiendo una ley de potencia cuyo exponente depende del valor particular de  $Ri_{*0}$ . Las simulaciones sin presencia de salinidad ( $Ri_{*0} = 0$ ) muestran la misma dependencia potencial de  $t_{90}^*$  con  $Re_{*h}$ . Se encuentra que  $t_{90}^*$  se incrementa en forma más drástica con  $Ri_{*0}$ , mostrando la alta dependencia de los procesos de mezcla con las condiciones de estratificación. Adicionalmente, a medida que  $Ri_{*0}$  se incrementa, la dependencia del tiempo de mezcla adimensionalizado con  $Re_{*h}$  se vuelve menos importante. Estos últimos dos hechos pueden ser detectados en las Figuras 5.14 y 5.15, donde se ajusta una ley de potencia del tipo  $t_{90}^* = A Re_{*h}^B$ , donde los parámetros A y B son presentados en función del número de Richardson,  $Ri_{*0}$ . A partir de esta figura se puede deducir que el tiempo de mezcla adimensional crece linealmente con  $Ri_{*0}$ , para valores fijos de  $Re_{*h}$ , y el exponente de la ley de potencia tiende a cero para altos valores de  $Ri_{*0}$ .

El comportamiento previamente descrito es análogo para flujos gobernados por fuerzas gravitacionales o viento; sin embargo, el tiempo de mezcla adimensionalizado tiende a ser ligeramente menor en el ultimo caso, debido a la distribución más uniforme de la energía cinética turbulenta en la columna de agua, que se obtiene para esta condición de flujo.



**Figura 5.14** Ajuste lineal para parámetro  $A$ , proveniente de ley de potencia de  $t_{90}^* = A Re_h^B$ , donde  $A$  y  $B$  son funciones del número de Richardson  $Ri^*_0$ . a) Flujo inducido por gravedad; b) Flujo inducido por viento.



**Figura 5.6** Ajuste exponencial para parámetro  $B$ , proveniente de ley de potencia  $t_{90}^* = A Re_{\tau h}^B$ , donde  $A$  y  $B$  son funciones del número de Richardson  $Ri^*_0$ . a) Flujo inducido por gravedad; b) Flujo inducido por viento.

## 5.5. SÍNTESIS DEL ANÁLISIS

Los resultados de la simulación numérica de transferencia de masa muestran la influencia tanto de la intensidad de la turbulencia como la presencia de estratificación en el perfil de concentración y las escalas de tiempo de mezcla asociadas. El parámetro principal usado para describir este proceso es  $t_{90}$ , el tiempo requerido para alcanzar el 90% del máximo de masa admitido en la columna de agua, y su cantidad adimensional,  $t_{90}^*$ . Con esta escala de tiempo, las curvas  $M / M_0$  versus  $t / t_{90}$  colapsan en el caso de columnas no estratificadas de agua, y cuando la salinidad y un soluto de boyancia neutral son mezclados simultáneamente en columnas estratificadas.

La estratificación afecta el mecanismo de transferencia de masa desde el lecho de sedimentos. Mientras que la estructura de dos capas permanece bien definida, el soluto experimenta mezcla en la capa inferior, cercana a la fuente del soluto, con sólo una pequeña cantidad transferida a la capa superior, producto de la reducción de la difusión turbulenta de masa y moméntum en la zona de altos gradientes de densidad (específicamente, en la interfaz entre capas de diferente densidad).

A medida que la estratificación comienza a desaparecer, producto de la mezcla turbulenta sobre la estabilidad de su estructura, el perfil de concentración del soluto se vuelve más uniforme. Cuando la escala de tiempo de mezcla es más larga que la requerida para destruir la estratificación salina, un comportamiento particular de  $t_{90}^*$  variando sólo con  $Re_{*h}$  es observado, y una ley de potencia puede ser ajustada a los datos computados:

Flujos gobernados por fuerzas gravitacionales:

$$t_{90}^* = 2.67 Re_{*h}^{0.5506} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Flujos gobernados por viento:

$$t_{90}^* = 8.06 Re_{*h}^{0.381} \quad \text{Ec. 5.7}$$

De otra forma, el tiempo de mezcla adimensionalizado muestra una fuerte dependencia con  $Ri_{*0}$ , definiendo una serie de curvas con propiedades similares a las obtenidas en columnas no estratificadas. Estas curvas también pueden ser representadas por leyes de potencia del estilo  $t_{90}^* = A Re_{*h}^B$ , pero con  $A$  y  $B$  como funciones de  $Ri_{*0}$ .  $t_{90}^*$  se incrementa linealmente con  $Ri_{*0}$  para valores fijos del número de Reynolds, mientras que su dependencia con  $Re_{*h}$  se vuelve menos importante a medida que  $Ri_{*0}$  crece, ya que  $B$  tiende a cero para altos números de Richardson:

Flujos gobernados por fuerzas gravitacionales:

$$t_{90}^* = A Re_{*h}^B$$

$$A = 16.90 + 2.30 Ri_{*0} \quad \text{Ec. 5.8}$$

$$B = 0.076 \exp(-0.019 Ri_{*0})$$



Flujos gobernados por viento:

$$t_{90}^* = A Re_{*h}^B$$

$$A = 13.51 + 1.27 Ri_{*0}$$

$$B = 0.010 \exp(-0.013 Ri_{*0})$$

**Ec. 5.9**

## **6. ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE TRANSPORTE DE SOLUTOS EN UNA COLUMNA AGITADA POR GRILLAS**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

En capítulos previos se ha analizado el tema de la mezcla, en columnas de agua con y sin estratificación, afectando el transporte de masa originado desde los sedimentos. A continuación, se ahondará el análisis de la transferencia en la interfaz agua – sedimentos, ya sea por acumulación previa de solutos en el lecho o por la producción de compuestos, fruto de la actividad biológica y química que toma lugar en la capa de lecho más cercana a la interfaz. La interacción entre los sedimentos de un sistema acuático y el medio líquido que sobre ellos existe, es tan variada como compleja; simultáneamente se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos, que se manifiestan en un constante intercambio de compuestos, calor y energía entre ambos medios (Boudreau, 1997).

Los análisis de este capítulo buscan abordar la posibilidad de predecir las tasas de intercambio, a través de dos enfoques: por un lado, actividades experimentales que permitan relacionar propiedades físicas (esencialmente, velocidades e intensidades de turbulencia) y químicas (concentración de especies); y la implementación de una herramienta matemática, que mediante simulaciones numéricas permita extender los resultados a otros casos posibles de interacción existentes en medios acuáticos reales.

El trabajo experimental se basa en el desarrollo de mediciones en una instalación de columna agitada por grillas, la cual cuenta con una base formada por una matriz de sedimentos desde donde se produce la difusión de compuestos hacia la columna de agua, controlada de manera predominante por la turbulencia generada en esta última. A través de la medición de las variables dinámicas de esta instalación (muestreo de velocidades con sensor acústico y toma de muestras de agua a lo largo de la columna) se genera la información básica para el análisis del proceso de transferencia de solutos. El uso de este tipo de instalación permite generar experiencias con difusión predominante en la dirección vertical, y el control mediante las grillas de la intensidad de turbulencia en esta misma dirección, para generar casos relacionados a los modelados en capítulos previos, al situar la fuente de la turbulencia cerca o lejos de los sedimentos.

El modelo teórico – numérico que compone la segunda parte de este análisis, permite comparar los resultados experimentales con un modelo conceptual que incorpora la mecánica del transporte de momentum y masa en la columna, y los procesos difusivos dentro de los sedimentos. Este modelo matemático, mediante un esquema de diferencias finitas, representa los procesos de difusión molecular y turbulenta en la columna de agua, y la difusión molecular en la matriz de sedimentos, igualando flujos másicos en la interfaz. Los resultados obtenidos se resumen en un modelo simple de intercambio de masa, expresado en términos de un coeficiente de intercambio. El modelo numérico predice que este coeficiente, adimensionalizado en la forma del número de Sherwood, se correlaciona linealmente con el número de Reynolds del flujo. Los resultados experimentales, con mayor dispersión, confirman este resultado.

## 6.2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El objetivo del estudio experimental es determinar las concentraciones de una solución salina transportada a una columna de agua agitada por grillas desde un lecho de arena.

En investigaciones previas se han utilizado diversos tipos de estanques agitados por grillas para el estudio de la turbulencia y su influencia en procesos de transporte. Rouse y Dodu (1955) utilizaron un estanque agitado por una grilla para el estudio de difusión turbulenta a través de discontinuidades de densidad. Estudios realizados por Thompson y Turner (1975) y Hopfinger y Toly (1976) tenían como objetivo determinar la tasa de incorporación o mezclas de un fluido a través de una interfaz de densidad. También se han realizado estudios experimentales con la finalidad de estudiar la estructura de la turbulencia cercana a la superficie libre y su relación con la transferencia de oxígeno a través de la interfaz aire-agua (Brumley, 1984; Brumley y Jirka, 1987; Chu y Jirka, 1992; y Orlins y Gulliver, 2000). Por su parte, estudios realizados por Tsai y Lick (1986) y Orlins (1996), tuvieron como objetivos estudiar la resuspensión de sedimentos. Hopfinger y Toly (1976) establecieron las escalas de longitud y de tiempo asociadas a la turbulencia generada por grillas, y propusieron la siguiente relación para la velocidad RMS (Root Mean Square) paralela al movimiento:

$$\frac{u'}{f \cdot S} = C_1 \cdot \left( \frac{S^{1/2} \cdot M^{1/2}}{x} \right) \quad \text{Ec. 6.1}$$

donde:

$u'$ : velocidad RMS paralela al movimiento de la grilla.

$f$ : frecuencia de oscilación de la grilla.

$S$ : desplazamiento de la grilla.

$M$ : tamaño de la abertura de la grilla.

$x$ : distancia perpendicular a la grilla.

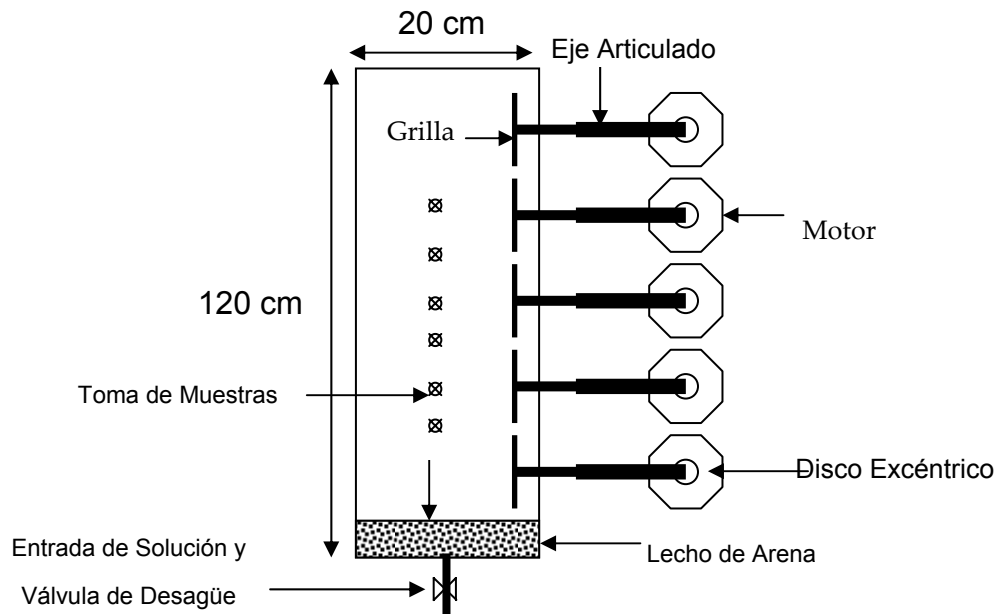
$C_1$ : constante que depende de la geometría de la grilla.

Saraiva (2003) basado en investigaciones previas, como las de Brumley y Jirka (1987), De Silva y Fernando (1992) y Orlins (1996), diseñó y construyó la instalación que fue utilizada en el presente estudio experimental. Esta instalación fue movida de su ubicación original donde fue construida y puesta en marcha, aplicándosele algunas mejoras sustanciales, sobre todo en términos de anclaje y aislamiento de vibraciones, por lo que se efectuó una serie de mediciones de prueba con el propósito de verificar el funcionamiento, caracterizar la turbulencia dentro de la columna de agua y determinar los tiempos óptimos de registro de datos. El Anexo B contiene un detalle de estos antecedentes complementarios.

### **6.2.1. Descripción de la Instalación**

El estudio experimental se realizó en una columna cuyas dimensiones internas son: 120 cm de alto, 42 cm de ancho y 20 cm de profundidad, y está compuesta por acrílico transparente en su parte frontal y costados (de 20 y 10 mm de espesor, respectivamente), y por una placa de aluminio de 10 mm de espesor en su parte posterior (Saraiva, 2003) (ver Figura 6.1). La columna descansa sobre un soporte de fierro construido con perfiles de 50 x 50 x 5 mm, cuyas dimensiones son: 42 cm de ancho, 28 cm de profundidad y 50 cm de altura (Saraiva, 2003).

Al interior de la columna están dispuestas cinco mallas verticales de 40 x 20 cm tejidas con barras de acero inoxidable de 2.67 mm de diámetro ( $d$ ) y abertura media ( $M$ ) de 1.27 cm (ver Figuras 6.2a y 6.2b). El espaciamiento vertical entre cada grilla es de 1 cm. Las grillas se encuentran a 3 cm de la tapa posterior (posición neutra de las mallas), con la primera malla ubicada a 6 cm del fondo de la columna. Cada malla está conectada a un eje articulado de bronce a través de una pequeña placa apernada del mismo material, la cual cubre, aproximadamente, un 2% del área de la malla.



**Figura 6.1** Vista esquemática lateral de la instalación experimental.

El eje pasa por la parte posterior de la columna a través de una pieza que sirve de guía (ver Figura 6.2c), también de bronce, la cual tiene en su interior un retén y un O-ring (sello de goma) para evitar fugas de agua a través del acrílico. Además, la guía cuenta con un sistema exterior de sellos (sistema de prensa estopa grafitada), para evitar fugas de agua a través del eje.

Los ejes están conectados, con un perno de acero, a un disco del mismo material (ver Figura 6.2d), de 10 cm de diámetro y 9,5 mm de espesor (disco excéntrico) perforado a distintas distancias desde su centro (0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5 y 2,0 cm) lo que permite modificar el alcance (S) de la malla, que en este caso se fijó en la posición señalada de  $S = 2,0$  cm. El alcance puede ser modificado de 1 a 4 cm en incrementos de 5 mm.

Cada disco está conectado a un motor – reductor de 1 HP que puede variar su frecuencia (nominal) de rotación de 190 a 600 RPM (ver Figura 6.2e). La medición de la velocidad de rotación de cada motor se realiza con un sensor de proximidad, el cual conectado a un tacómetro permite medir, con una precisión de  $\pm 0,1$  RPM, las revoluciones de cada motor. El conjunto de motores funciona mediante una instalación eléctrica trifásica montada en el Laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, controlada por un tablero general (ver Figura 6.2g)

Los cinco motores están ubicados en compartimentos individuales sobre una estructura de acero (ver Figura 6.2h), construida con perfiles cuadrados de 40 x 40 x 5 mm, la cual

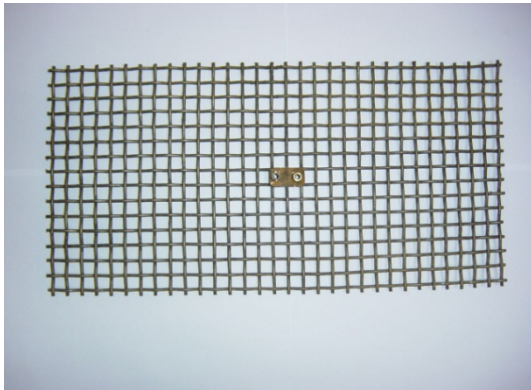
tiene 100 cm de ancho, 60 cm de profundidad y 180 cm de altura. Esta estructura posee pernos de anclaje en sus patas lo que permite su nivelación a través del ajuste de los pernos.

El fondo de la columna fue cubierto con paños absorbentes de fibra sintética, alcanzando éstos un espesor de 2 cm, los cuales actúan como filtro para evitar la evacuación de los sedimentos, y permiten una mejor distribución del soluto inyectado en la columna. Sobre éstos fue colocado un lecho de arena (con un tamaño homogéneo de partículas de 0.2 mm) de 4 cm de espesor, cuya porosidad ( $\phi$ ) fue medida y estimada en 0.46.

La introducción de agua fresca o cualquier otro líquido en la columna, puede realizarse directamente desde arriba; sin embargo, si se desea generar una estratificación en la columna inyectando un líquido más denso, o incorporar una solución en el lecho de arena, como en el presente estudio, es posible introducirlos desde el fondo de la columna a través de 10 orificios de 0.62 cm. Estos orificios están dispuestos ordenadamente sobre el área del fondo y están conectados a mangueras que conducen el líquido desde una cámara de distribución, correspondiente a un dispositivo cilíndrico de PVC de 15 cm de diámetro y 10 cm de altura, en cuyo extremo opuesto va conectada una manguera de 1.27 cm. A través de esta manguera se realiza tanto el llenado con agua potable (almacenado en un estanque de 150 l de capacidad), como la inyección de soluciones al sedimento (desde un bidón de 25 l de capacidad). Esta manguera es posible conectarla, a través de conectores rápidos, a cualquiera de estos depósitos. Los caudales provenientes del estanque como del bidón son controlados por válvulas de compuerta ubicadas inmediatamente aguas abajo de dichos depósitos (ver Anexo C, sobre distribución de orificios de fondo y modificación de instalación experimental, sobre este aspecto).

A un costado de la columna se encuentra el sistema de muestreo formado por 15 válvulas de globo ubicadas a diferentes alturas desde el fondo: 11, 16, 21, 32, 37, 42, 53, 58, 63, 74, 79, 84, 95, 100 y 105 cm. La llave de cada válvula está conectada a una barra de cobre, que al girarla en 90°, permite obtener en forma simultánea muestras de cualquier líquido contenido al interior de la columna. Al otro costado de la columna se encuentra sólo un punto de muestreo, ubicado a 6,5 cm de altura desde el fondo de la columna, y cuyo caudal está regulado por una válvula de globo.

Sobre la columna se encuentra dispuesto un sistema de carros (ver Figura 6.2f), sobre los cuales va montado el ADV (instrumento que mide las velocidades), permitiendo que éste se pueda mover en las tres direcciones espaciales.



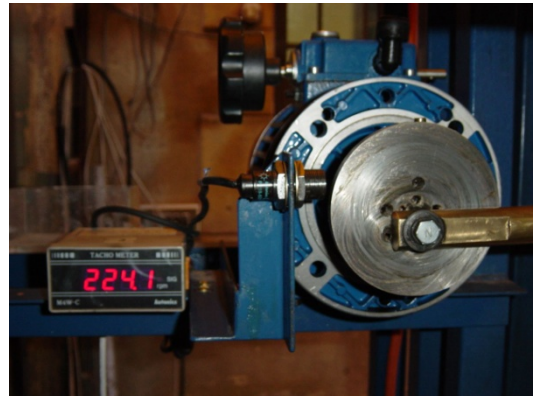
a) Grilla de agitación



b) Grilla de agitación montada en el experimento



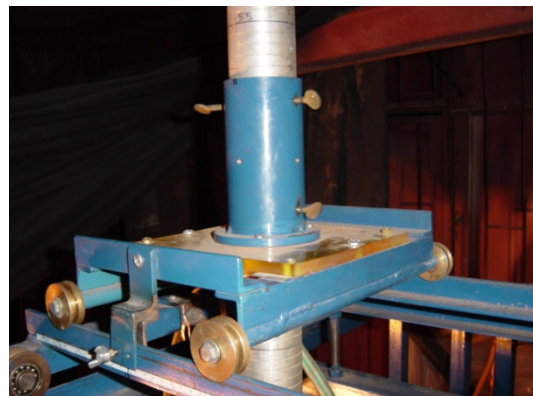
c) Guía para entrada de eje



d) Conexión de eje en disco excéntrico



e) Motor



f) Carro de desplazamiento de sensor ADV

**Figura 6.2** Componentes de instalación experimental.



g) Tablero eléctrico de control



h) Estructura de soporte de motores y columna

**Figura 6.2** Componentes de instalación experimental (continuación)

### 6.2.2. Instrumentación y Metodología Experimental

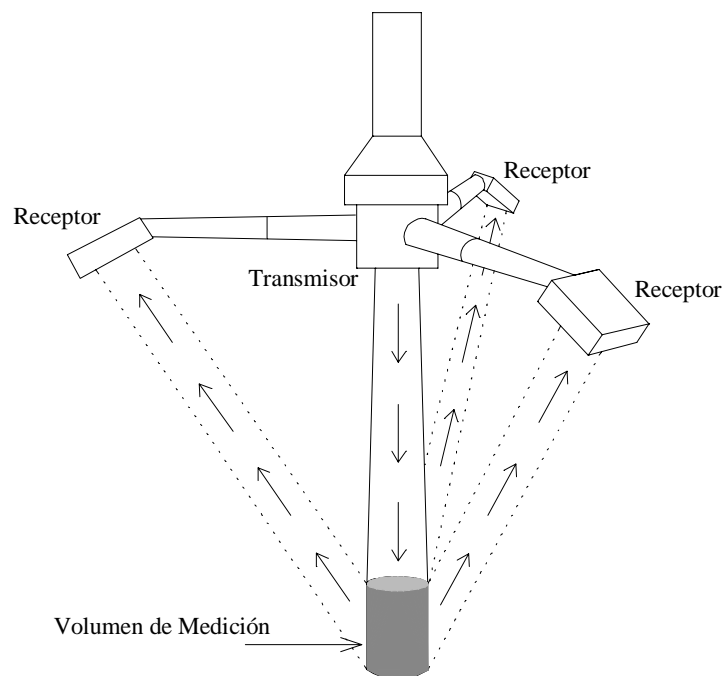
El registro de las tres componentes de la velocidad local instantánea, al interior de la columna, se realizó utilizando un sensor Micro ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) Sontek (3D-Down Looking). Este equipo consiste en una sonda Sontek de frecuencia acústica de 16 MHz, con una velocidad de muestreo desde los 1.1 a los 50 Hz y con un volumen de medición de  $0.09 \text{ cm}^3$ , una tarjeta de adquisición de datos ADV LabSontek y un computador Pentium I 233.

El Micro ADV funciona de acuerdo al sistema Doppler coherente pulso a pulso, el cual consiste en que la sonda emite un par de pulsos acústicos de frecuencia conocida. Al atravesar el volumen de medición, la energía acústica contenida en los pulsos es reflejada en todas las direcciones por el material particulado en suspensión, existente o agregado al flujo como trazador (sedimento, burbujas, pequeños organismos, etc.). Parte de esta energía llega a los receptores, los cuales registran el cambio de frecuencia experimentado por ambos pulsos, y este cambio de frecuencia permite determinar la velocidad instantánea que poseen las partículas que cruzan el volumen de medición. Este volumen de medición se puede representar por un cilindro de



aproximadamente 6 mm de diámetro y 4,5 mm de altura, donde su centro se encuentra ubicado a aproximadamente 5 cm del transmisor, evitando así la interferencia del instrumento con el flujo (ver Figura 6.3).

Para operar el equipo se deben ingresar como datos de entrada la temperatura (en °C) y la salinidad del agua (en ppm). Con estos datos el equipo determina la velocidad del sonido en el agua, la que se sirve para determinar el cambio de frecuencia de los pulsos emitidos debido al efecto Doppler, cambio que se traduce en velocidad del flujo en el volumen de control. También se debe ingresar el rango de velocidades, el cual determina la máxima velocidad medible. El equipo trae cinco rangos de velocidad predeterminados: 3, 10, 30, 100 y 250 cm/s. Para hacer las mediciones se debe escoger el menor rango de velocidades que contenga las máximas velocidades del flujo, ya que al aumentar el rango de velocidades aumenta también el nivel de ruido en la medición.



**Figura 6.3** Esquema del sistema de medición del micro ADV.

En cada medición el ADV registra el tiempo transcurrido desde el inicio de la medición, las tres componentes de la velocidad, tres valores de correlación y tres valores de la razón señal/ruido SNR (uno por cada receptor). La correlación indica cuán similares son los pulsos emitidos por el transmisor al propagarse en el agua. Esta puede variar de

0%, es decir, de una señal absolutamente ruidosa y sin ninguna correlación, hasta 100%, lo que indica una correlación perfecta. El SNR (Signal to Noise Ratio) indica cuán grande es la amplitud de la señal recibida (I), con respecto al ruido existente (N). Esta variable se mide en decibeles (dB) y se define como:

$$SNR = 20 \log\left(\frac{I}{N}\right) \quad \text{Ec. 6.2}$$

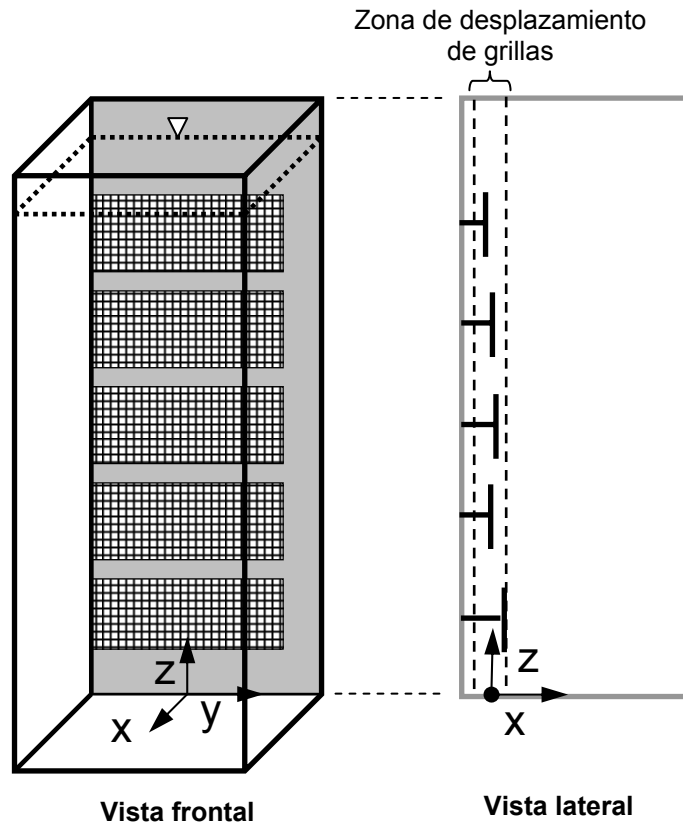
La referencia del fabricante del instrumento sugiere que, en mediciones de turbulencia, el coeficiente de correlación y el SNR sean mayores o iguales que 70% y 15 dB, respectivamente. Si se respetan estas condiciones, el ruido en las componentes de la velocidad ortogonales al eje del transmisor se estima en un 1% del rango de velocidad y en la componente en la dirección del transmisor en un 0.25% del rango de velocidad. Esta componente es más precisa debido al método de cálculo de las velocidades que ocupa el instrumento.

La conductividad, tanto de la solución salina contenida en el bidón como de las muestras de líquido tomadas de la columna, fueron medidas con un conductivímetro Multi-Rango Hanna Instruments HI 8733. Este conductivímetro incorpora un sensor de temperatura, que permite compensar la diferencia entre la temperatura de la solución y la temperatura patrón (20° C), entregando la lectura de la conductividad de la solución referida a esta última. La compensación se realiza en forma automática, para lo cual fue necesario determinar el coeficiente de temperatura  $\beta$  de la solución para ajustarlo en el instrumento. Este coeficiente  $\beta$  es ajustable desde 0 a 2,5 %/°C dependiendo del tipo de solución a medir, y para el caso de las soluciones salinas utilizadas en este estudio, los ensayos de laboratorio indicaron que el coeficiente  $\beta$  es aproximadamente igual a 2 %/°C.

### 6.2.3. Condiciones Experimentales

Se definió un sistema de coordenadas cartesianas al interior de la columna, sobre el cual fueron establecidas todas las posiciones características de ésta (ver Figura 6.4): x corresponde a un eje perpendicular a las grillas, a 3 cm de la cara posterior de la columna, y cuyo sentido positivo es hacia la cara anterior de la columna; y es un eje horizontal cuyo origen está ubicado en el centro de las grillas y cuyo sentido positivo es

hacia la derecha (mirando la columna de frente), y z es el eje vertical hacia arriba, donde su cero está ubicado sobre el lecho de arena.



**Figura 6.4** Definiciones de ejes de coordenadas en el montaje experimental.

A la columna se le incorporó agua potable a través del fondo hasta una altura  $h$  de 42 cm, altura que cubre las dos grillas inferiores, a las cuales denominaremos G5, que corresponde a la grilla que está más cercana al lecho de arena, y G4, que corresponde a la grilla que está inmediatamente arriba de G5. La columna no fue llenada completamente, ya que se estableció previamente que este volumen de agua diluía demasiado la solución salina utilizada, impidiendo que se pudiesen notar claramente los cambios y diferencias de conductividad debidos a la incorporación de dicha solución en la columna. Por esta razón, se eligió una altura de agua tal que incorporara más de una grilla, para poder considerar más de una estructura de agitación, pero que a su vez fuese lo suficientemente pequeña como para distinguir los cambios y diferencias de conductividad producidos en la columna de agua.

Las mediciones de velocidad se hicieron considerando dos estructuras diferentes de agitación de las grillas, con cuatro niveles de frecuencia de agitación para cada una de

ellas. Las dos estructuras de agitación fueron: agitación de ambas grillas, y agitación sólo de la grilla más cercana al lecho. Por su parte, los cuatro niveles de frecuencia de agitación fueron: 150, 200, 250 y 300 RPM. Para una determinada estructura y nivel de frecuencia de agitación, se registraron, por un lapso de al menos 20 minutos, las velocidades en dos líneas verticales de 6 puntos cada una, a lo largo de la columna de agua, ubicadas en las siguientes coordenadas (x, y): (9.5, 9.7) cm y (9.5, -9.7) cm, respectivamente. Esta disposición de los puntos de medición respeta las restricciones  $x > 4S$  (De Silva y Fernando, 1992) y  $x > 2M$  (Atkinson et al., 1987), rango para el cual la turbulencia se puede considerar homogénea. Se requirió de al menos 20 minutos de medición ya que, previamente, se determinó que para este tiempo los promedios móviles de las tres componentes de la velocidad convergían a un valor constante, respectivamente. Una vez tomados los datos con el ADV, se seleccionaron para su análisis sólo aquellas velocidades cuyo coeficiente de correlación y SNR eran mayores o iguales que 70% y 15 [dB], respectivamente. Con esta información fue posible determinar para la columna de agua variables como la energía cinética turbulenta y los esfuerzos de corte producidos sobre el lecho de arena, a través de:

$$K = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2} \quad \text{Ec. 6.3}$$

$$u_{\tau xz} = \sqrt{\overline{u'w'}}; \quad u_{\tau yz} = \sqrt{\overline{v'w'}}; \quad u_{\tau} = \sqrt{u_{\tau xz}^2 + u_{\tau yz}^2} \quad \text{Ec. 6.4}$$

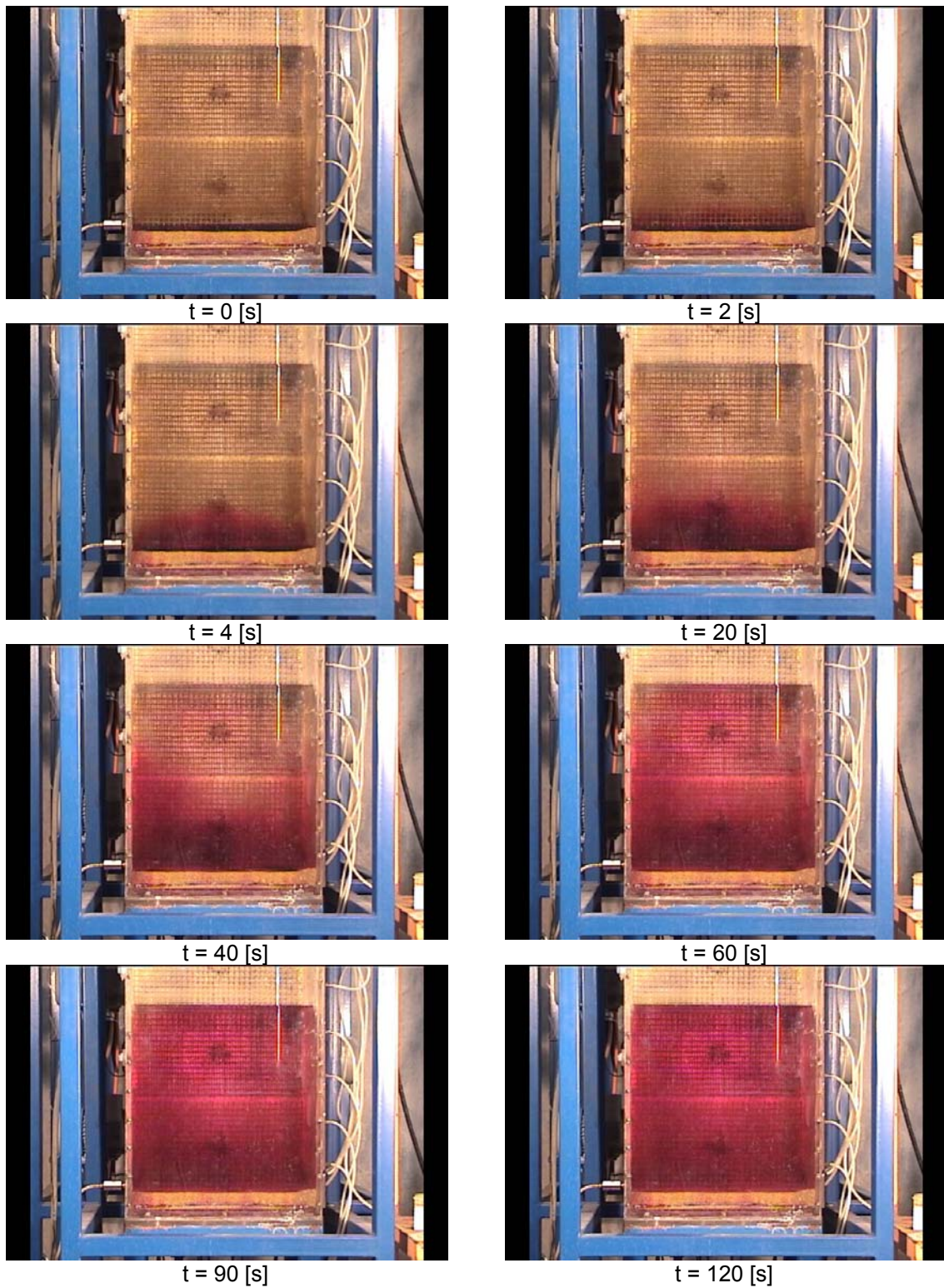
donde  $u'$ ,  $v'$  y  $w'$  representan las fluctuaciones de velocidad en torno al promedio, en las coordenadas x, y y z, respectivamente,  $K$  corresponde a la energía cinética turbulenta en el punto de medición, y  $u_{\tau}$  corresponde a una escala de velocidad asociada a esfuerzos de corte turbulentos (para puntos cercanos al lecho tiende a la velocidad de corte en la interfaz).

Posteriormente, se realizaron las mediciones de conductividad de la columna de agua, considerando la agitación de las rejillas y la presencia de solución salina en el lecho de arena. Para ello, en primer lugar, se incorporó agua potable a través del fondo de la columna hasta alcanzar el nivel  $z = 42$  cm. Enseguida, se incorporó solución salina al lecho de arena (a través del fondo) hasta alcanzar la superficie de éste; esta solución fue preparada con 30 g/l de cloruro de sodio (NaCl) y 1.5 g/l de permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>). Estas concentraciones fueron definidas de tal manera de obtener una solución cuya conductividad fuese similar a la conductividad del agua de mar; cabe

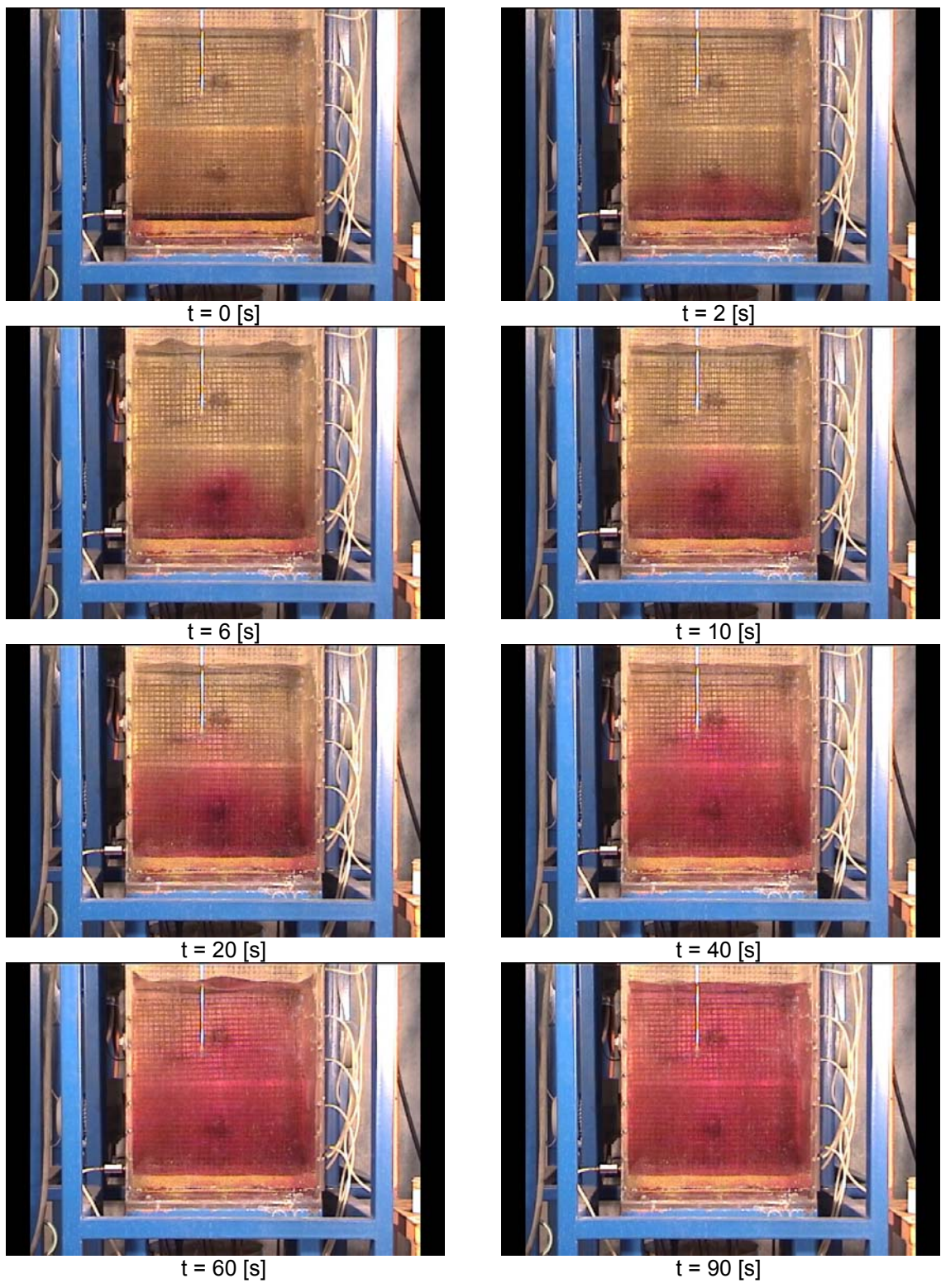
mencionar que el  $\text{KMnO}_4$  fue utilizado básicamente como colorante para poder visualizar la solución tanto en su incorporación al lecho como a la columna de agua. Una vez incorporada la solución salina al lecho, se tomó un conjunto de muestras desde la columna para la condición “sin agitar” y, además se tomó una muestra de solución salina desde la manguera que conduce dicha solución al lecho de arena, la cual fue denominada “solución bulk”. En seguida, se procedió a agitar las rejillas con una determinada estructura y nivel de frecuencia, y se tomaron, desde la columna, entre 5 y 7 conjuntos de muestras en un lapso de tiempo que varió entre 9 y 25 minutos; cada conjunto de muestras está compuesto por 5 frascos, los que reciben el líquido desde la columna a través de mangueras conectadas a 5 de las válvulas colocadas para el muestreo, ubicadas correlativamente a 0.5, 5, 15, 26 y 36 cm. Por último, se midió y se registró la conductividad de cada una de las muestras. Este procedimiento se repitió para cada una de las estructuras y niveles de frecuencia consideradas en la medición de las velocidades. Con esta información, se procedió a relacionar las conductividades con sus respectivas concentraciones, a través de una curva previamente calibrada con diferentes soluciones salinas. El detalle de las mediciones registradas se detalla en el Anexo D.

Las Figuras 6.5 y 6.6 a continuación ilustran la evolución temporal de dos experiencias tipo, con agitación de una y dos grillas respectivamente.

Un hecho singular, pero que sin embargo no reviste de una gran relevancia para los resultados experimentales presentados más adelante, es la detección de fenómenos de resonancia en la generación de ondas en la superficie libre de la columna. La Figura 6.7 muestra el aspecto de la superficie libre para 3 frecuencias diferentes, notándose en el caso de  $f = 200$  [RPM] la formación de ondas de hasta 2 [cm] de amplitud, las cuales no se forman o bien son destruidas por la agitación de la grilla, para otras frecuencias. Al manifestarse este fenómeno en la interfaz agua – aire, no resulta ser relevante para la transferencia en la interfaz agua – sedimentos.

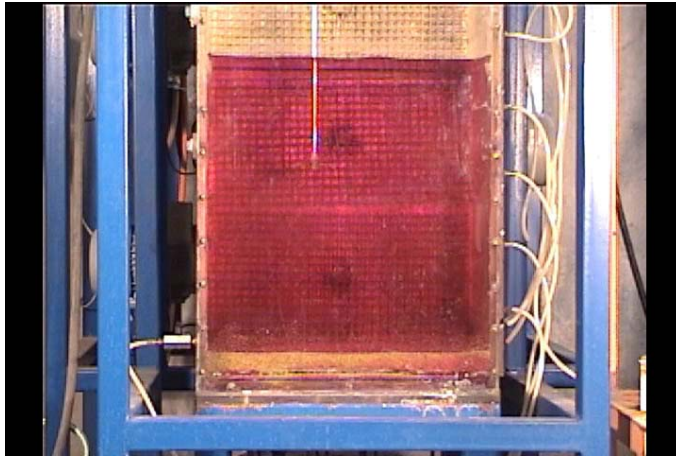


**Figura 6.5** Evolución de la mezcla y transferencia a lo largo de un experimento. Condiciones: Agitación en grilla inferior (G5) a 150 RPM.

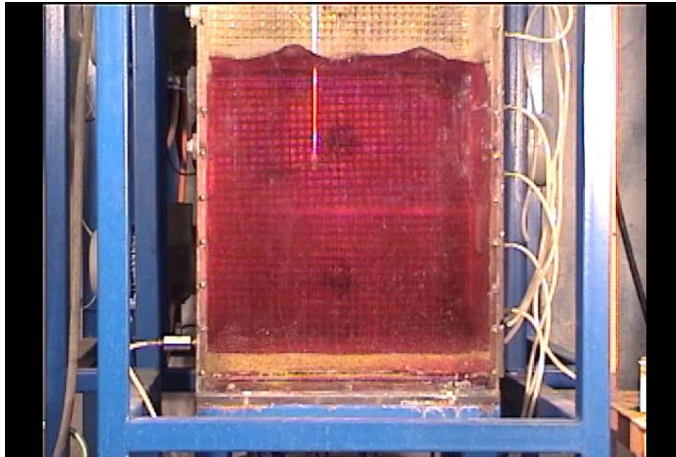


**Figura 6.6** Evolución de la mezcla y transferencia a lo largo de un experimento. Condiciones: Agitación en dos grillas (G4 y G5) a 200 RPM.

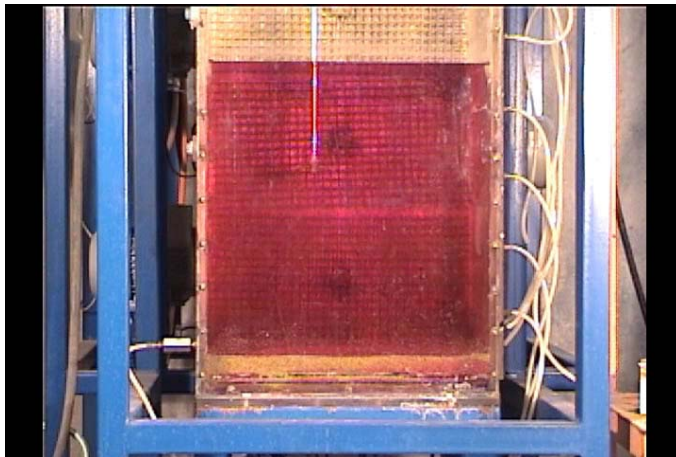
$f = 150$  [RPM]



$f = 200$  [RPM]



$f = 300$  [RPM]



**Figura 6.7** Formación de ondas en la superficie libre bajo diferentes condiciones de agitación (dos grillas, G4 y G5, a 150, 200 y 300 RPM).



### 6.3. MODELO NUMÉRICO

Junto al trabajo experimental desarrollado, se implementó un modelo numérico que permite ligar el estudio de la columna agitada con la teoría sobre transferencia y mezcla de solutos, tanto en el medio acuático como dentro de los sedimentos.

Las ecuaciones fundamentales que debe resolver este modelo matemático son las siguientes:

Ecuación de difusión molecular y turbulenta en la columna de agua:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (D_o + D_t) \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad \text{Ec. 6.5}$$

Ecuación de difusión molecular en los sedimentos:

$$\frac{\partial(\phi C)}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2(\phi C)}{\partial z^2} \quad \text{Ec. 6.6}$$

donde  $C$  representa la concentración de una determinada especie a estudiar,  $t$  es el tiempo,  $z$  es la coordenada vertical, medida hacia arriba desde la interfaz agua – sedimento,  $\phi$  es la porosidad de los sedimentos,  $D_o$  es el coeficiente de difusión molecular de masa para la especie estudiada (que toma un valor  $D_s$  dentro de los sedimentos), y el  $D_t$  es el coeficiente de difusión turbulenta de masa.

Dentro de los sedimentos, la trayectoria que debe seguir una partícula para recorrer una determinada distancia vertical, es mayor que en la columna de agua, debido a que debe ir recorriendo los espacios que dejan los poros de la matriz de sedimentos. Se define de esta forma la tortuosidad, como la longitud media del camino a través del espacio poroso entre dos puntos ( $dL$ ), con respecto al largo de una línea recta entre los mismos dos puntos ( $dx$ ):

$$\theta^2 = \frac{dL}{dx} \quad \text{Ec. 6.7}$$

La difusión molecular dentro de los sedimentos, se relaciona con la tortuosidad a través de la siguiente expresión (Boudreau, 1997):

$$D_s = \frac{D_o}{\theta^2} \quad \text{Ec. 6.8}$$

Para estimar la tortuosidad se han propuestos diversas expresiones, que consideran esencialmente la dependencia de la tortuosidad con la porosidad. Para el presente modelo se seleccionó la relación obtenida por Iversen y Jørgensen (1993):

$$\theta^2 = 1 + n(1 - \phi) \quad \text{Ec. 6.9}$$

donde  $n$  es un coeficiente empírico, que vale 2 para sedimentos arenosos, como los empleados en la instalación experimental, o toma un valor de 3 para sedimentos arcillosos.

Previamente a solucionar las ecuaciones 6.5 y 6.6, se procede a realizar la adimensionalización de éstas, quedando como:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left\{ \left( \frac{1}{Sc} + \frac{D_t}{\nu} \right) \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right\} \quad \text{Ec. 6.10}$$

$$\phi \frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{\phi}{Sc \theta^2} \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} \quad \text{Ec. 6.11}$$

$$C^* = \frac{C}{C_b}; \quad t^* = t \frac{\nu}{L^2}; \quad z^* = \frac{z}{L}; \quad Sc = \frac{\nu}{D_o} \quad \text{Ec. 6.12}$$

donde  $C_b$  es la concentración de la solución inyectada en la base de los sedimentos,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido,  $Sc$  es el número de Schmidt, y  $L$  es la escala de longitud en la subcapa difusiva, definida como  $L = 100 \nu u_*^{-1}$  (Higashino et al., 2004), donde  $u_*$  es la velocidad de corte del flujo.

En la ecuación 6.10 se requiere de alguna expresión para estimar  $D_t$ . Este coeficiente de difusión turbulento se relaciona con la viscosidad turbulenta  $\nu_t$  a través del número de Schmidt turbulento  $Sc_t = \nu_t / D_t$ , que empíricamente se ha encontrado que tiene un valor de aprox. 0.63 (Launder, 1975). En tanto, la viscosidad turbulenta puede ser descrita en la vertical a través de la expresión de O'Connor (1995) (para pared lisa):

$$\nu_t^* = \frac{\nu_t}{\nu} = \frac{\kappa z^{+3}}{\Gamma_o^3 + z^{+2}} \quad \text{Ec. 6.13}$$

donde  $z^+$  es la coordenada vertical adimensionalizada con la velocidad de corte y la viscosidad cinemática ( $z^+ = u_* z / \nu$ ),  $\kappa = 0.4$  y  $\Gamma_o = 7.4$ . Esta expresión ha sido desarrollada para la turbulencia en tuberías y canales abiertos, pero en este caso es aplicable, por cuanto el factor limitante de la transferencia de masa corresponde a la difusión molecular dentro de los sedimentos, y la turbulencia contribuye a lograr una buena mezcla de la masa transferida a la columna. Por el tamaño de los sedimentos y las velocidades de corte que se alcanzan en los experimentos, es posible indicar que en ellos se cumple también la condición de pared lisa en la instalación.

De esta forma, el coeficiente de difusión turbulenta queda expresado como:

$$\frac{D_t}{\nu} = \frac{D_t}{\nu_t} \frac{\nu_t}{\nu} = \frac{1}{Sc_t} \frac{\kappa z^{+3}}{\Gamma_o^3 + z^{+2}} \quad \text{Ec. 6.14}$$

Las ecuaciones 6.5 y 6.6 son expresadas como diferencias finitas, usando un esquema de Crank-Nicholson, y una discretización espacial ( $\Delta z^*$ ) de 0.01 y un paso temporal ( $\Delta t^*$ ) de 0.001. El algoritmo que resuelve estas ecuaciones funciona a través de matrices conformadas por los términos descritos en las siguientes ecuaciones:

Columna de agua:

$$\begin{aligned}
 & C_{i+1}^{*n+1} \frac{\alpha}{2} \left( \frac{1}{Sc} + \frac{v_{t\ i+1/2}^*}{Sc_t} \right) - C_i^{*n+1} \left[ \frac{\alpha}{2} \left( \frac{2}{Sc} + \frac{v_{t\ i-1/2}^*}{Sc_t} + \frac{v_{t\ i+1/2}^*}{Sc_t} \right) + 1 \right] + \\
 & + C_{i-1}^{*n+1} \frac{\alpha}{2} \left( \frac{1}{Sc} + \frac{v_{t\ i-1/2}^*}{Sc_t} \right) = - C_{i+1}^{*n} \frac{\alpha}{2} \left( \frac{1}{Sc} + \frac{v_{t\ i+1/2}^*}{Sc_t} \right) + \\
 & + C_i^{*n} \left[ \frac{\alpha}{2} \left( \frac{2}{Sc} + \frac{v_{t\ i-1/2}^*}{Sc_t} + \frac{v_{t\ i+1/2}^*}{Sc_t} \right) - 1 \right] - C_{i-1}^{*n} \frac{\alpha}{2} \left( \frac{1}{Sc} + \frac{v_{t\ i-1/2}^*}{Sc_t} \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 6.15}$$

Sedimentos:

$$\begin{aligned}
 & - C_{i+1}^{*n+1} \frac{\alpha}{2 \theta^2 Sc} + C_i^{*n+1} \left[ \frac{\alpha}{\theta^2 Sc} + 1 \right] - C_{i-1}^{*n+1} \frac{\alpha}{2 \theta^2 Sc} = \\
 & C_{i+1}^{*n} \frac{\alpha}{2 \theta^2 Sc} + C_i^{*n} \left[ 1 - \frac{\alpha}{\theta^2 Sc} \right] + C_{i-1}^{*n} \frac{\alpha}{2 \theta^2 Sc}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 6.16}$$

donde  $\alpha = \Delta t^* / \Delta z^{*2}$ .

Las condiciones de borde empleadas para la solución de este sistema de ecuaciones representan un sistema cerrado, tal como el usado en la instalación experimental, donde se incorpora una cierta cantidad de soluto y después se cierra, manteniéndose la masa incorporada dentro del sistema, al no existir flujo másico en la base de los sedimentos ni a través de la superficie libre. Las expresiones matemáticas se describen a continuación:

Condición en la superficie libre ( $z = h$ ):

$$\left. \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=h/L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{C^*(z^*=h/L) - C^*(z^*=h/L - \Delta y^*)}{\Delta z^*} = 0
 \tag{Ec. 6.17}$$

Condición en la base de los sedimentos ( $z = -h_s$ ):

$$\left. \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=-h_s/L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{C^*(z^*=-h_s/L + \Delta z^*) - C^*(z^*=-h_s/L)}{\Delta z^*} = 0
 \tag{Ec. 6.18}$$

Relación para la interfaz ( $z = 0$ ) (igualación de flujos):

$$\frac{\phi}{Sc \theta^2} \left. \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right|_{z=0^-} = \left( \frac{1}{Sc} + \frac{D_t}{\nu} \right) \left. \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right|_{z=0^+} \Rightarrow$$

$$\frac{\phi}{Sc \theta^2} \frac{C^*(z^*=0) - C^*(z^*=-\Delta z^*)}{\Delta z^*} = \left( \frac{1}{Sc} + \frac{D_t(z^*=\Delta z^*/2)}{\nu} \right) \frac{C^*(z^*=\Delta z^*) - C^*(z^*=0)}{\Delta z^*}$$

**Ec. 6.19**

Las condiciones de simulación guardan relación con la mayor parte de los parámetros determinados en la instalación experimental, en lo referente a altura de agua, espesor de los sedimentos, porosidad, y velocidad de corte, relacionada con las energías cinéticas turbulentas y esfuerzos de corte turbulentos medidos.

Un mayor detalle sobre los pasos seguidos para la discretización de las ecuaciones de transporte de masa se presenta de manera complementaria en el Anexo E.

#### **6.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES**

En campañas separadas se midieron las velocidades a través del sensor ADV y se obtuvieron las muestras para la determinación de concentraciones a lo largo de la columna. Con los datos registrados de velocidades se determinaron intensidades de turbulencia, y velocidades de corte, según las ecuaciones 6.3 y 6.4, para las dos configuraciones de agitación consideradas, las cuales alcanzan valores de  $K$  similares cerca del lecho, pero disímiles en la mitad superior de la columna (ver Tabla 6.1 y Figura 6.8).

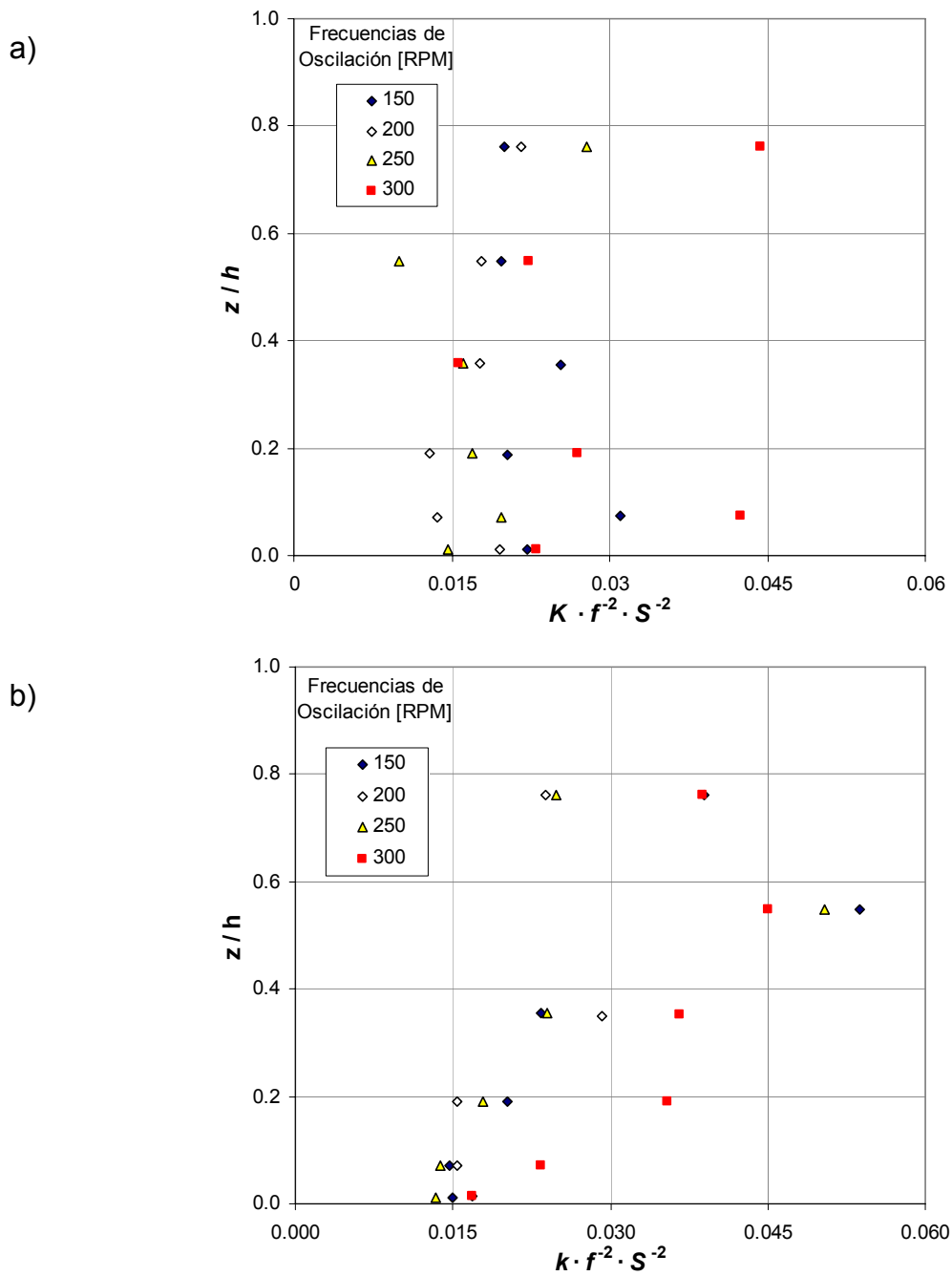
Con relación a perfiles tipo de turbulencia (ver Figura 4.3 para casos de flujos inducidos por viento o gravitacionalmente), se aprecian algunas características comunes, con diferencias propias de la forma en que se genera la agitación y mezcla en cada caso. En el caso de agitación con sólo grilla inferior se presenta mayor turbulencia cerca del fondo, similar al caso de in flujo gravitacional, pero con valores más parejos en la parte inferior de la columna, y no creciente al acercarse al lecho, debido a que la grilla agita en forma relativamente pareja toda la parte baja. En tanto, en el caso de agitación con ambas grillas, se distingue una turbulencia más pareja en su intensidad, con un máximo en una posición intermedia, relacionada a una singularidad local por interacción de grillas.

La Figura 6.9 muestra que para todas las experiencias realizadas, la razón  $K_b^{0.5}/u_\tau$  entrega un valor cercano a 2, tal como el que se observa en canales y en otras estructuras de agitación experimentales (Muñoz, 2002).

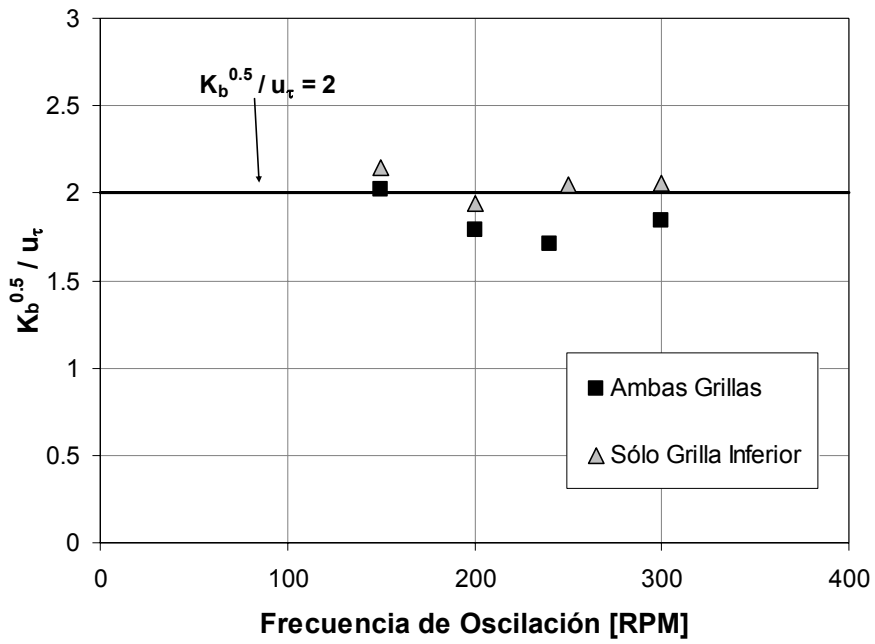
En la Figura 6.10 se muestra el tipo de resultados obtenidos de la toma y medición de muestras desde la columna, apreciándose una fuerte mezcla en la columna, que logra una concentración prácticamente uniforme en la vertical, salvo la zona cercana al lecho, desde donde se produce la difusión de masa. Además, durante los primeros minutos de agitación se produce un aumento rápido de la masa agregada a la columna, por cuanto se produce la mezcla rápida de la masa que inicialmente se encuentra en las inmediaciones de la interfaz, tal como se discutirá más adelante.

**Tabla 6.1.** Energías cinéticas turbulentas y velocidades de corte a distintas frecuencias de agitación ( $K_b$ ,  $K_m$ : energías cinéticas turbulentas, cerca del lecho y como valor medio en la columna, respectivamente).

	$f$		$K_b$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$K_m$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$u_\tau$ [cm/s]
	[RPM]	[Hz]			
Grilla Inferior	150	2.5	0.55	0.58	0.347
	200	3.3	0.87	0.76	0.479
	250	4.2	1.02	1.22	0.493
	300	5.0	2.3	2.91	0.736
Ambas Grillas	150	2.5	0.37	0.69	0.302
	200	3.3	0.75	1.24	0.484
	240	4.0	0.86	1.54	0.542
	300	5.0	1.69	3.27	0.706



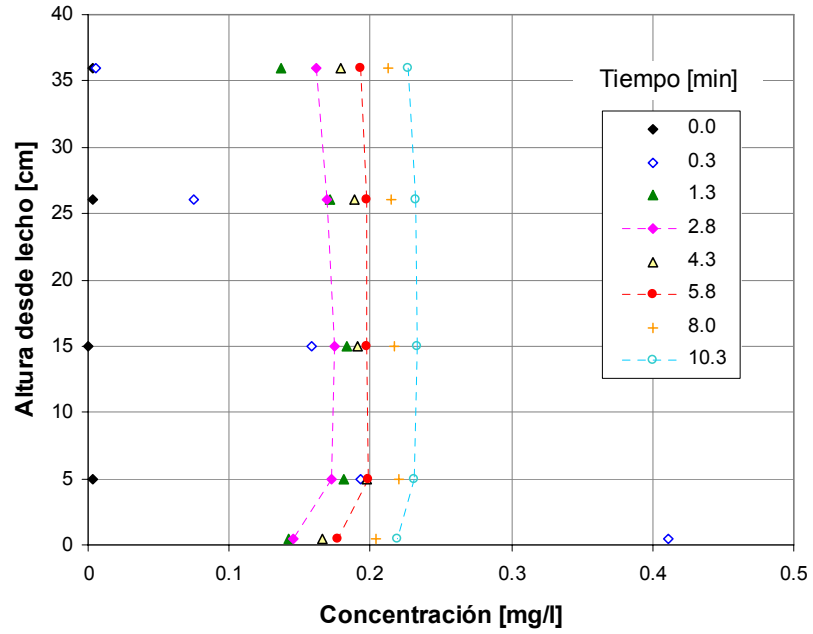
**Figura 6.8** Perfiles verticales de energía cinética turbulenta medidos, adimensionalizados con  $f$  (frecuencia de oscilación) y  $S$  (recorrido de la grilla): a) Sólo grilla inferior,  $S=2$  [cm]; b) Ambas grillas funcionando,  $S=2$  [cm].



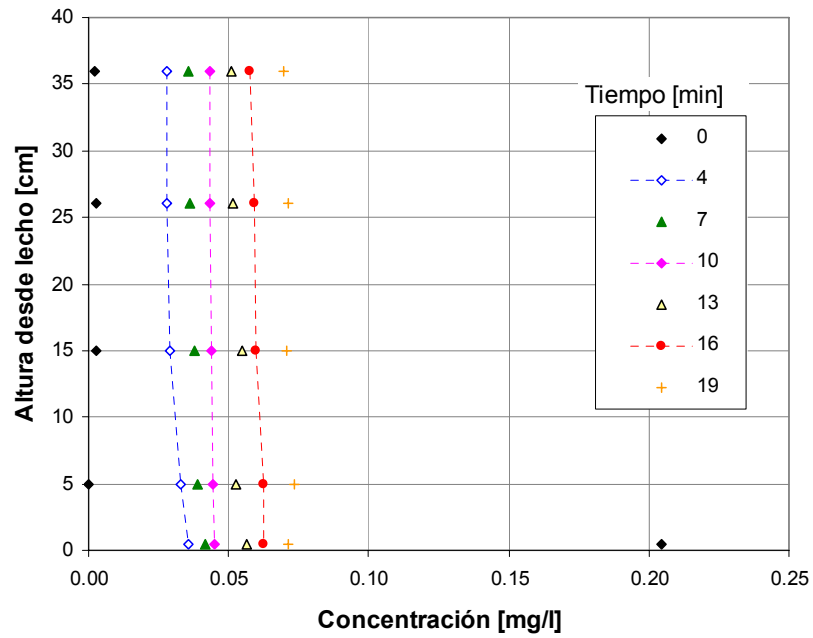
**Figura 6.9** Relación entre energía cinética turbulenta cerca del fondo,  $K_b$ , y velocidad de corte calculada con los esfuerzos de corte turbulentos,  $u_\tau$ .



a)



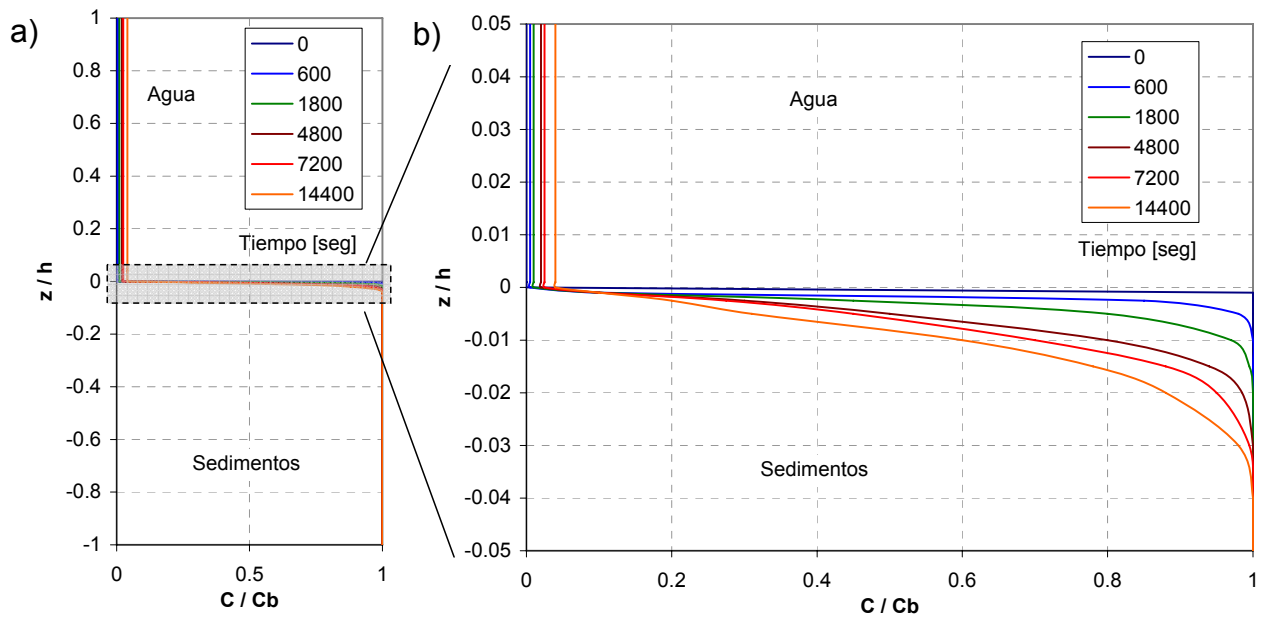
b)



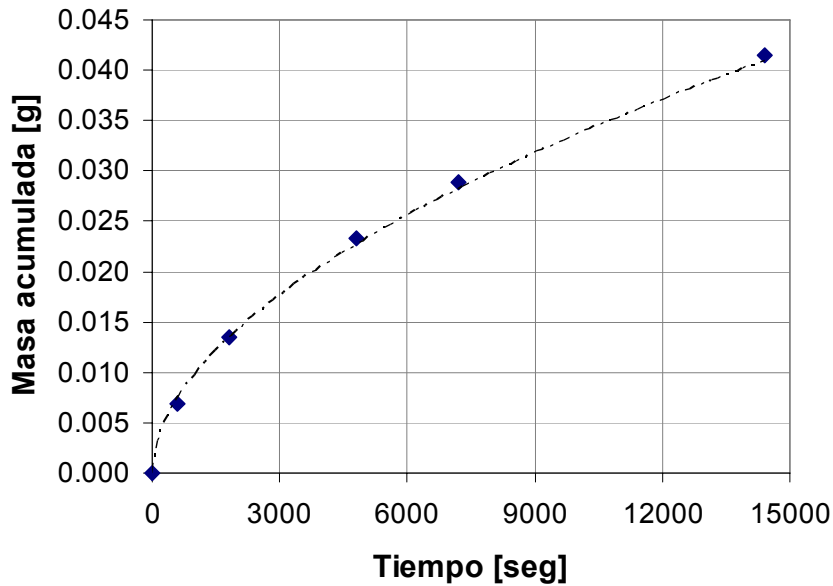
**Figura 6.10** Ejemplos de perfiles verticales de concentración medidos: a) Sólo grilla inferior,  $f=250$  [RPM]; b) Ambas grillas funcionando,  $f=250$  [RPM]. Tiempos en minutos.

## 6.5. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

Las Figuras 6.11 y 6.12 muestran ejemplos de la información obtenida gracias al modelo: perfiles de concentración para diferentes tiempos durante la simulación, y evolución temporal de la masa acumulada en la columna, para una matriz de sedimentos de altura  $h_s$  saturada con un soluto a una concentración  $C_b$ , y una columna de agua de altura  $h$ , sin presencia de solutos.

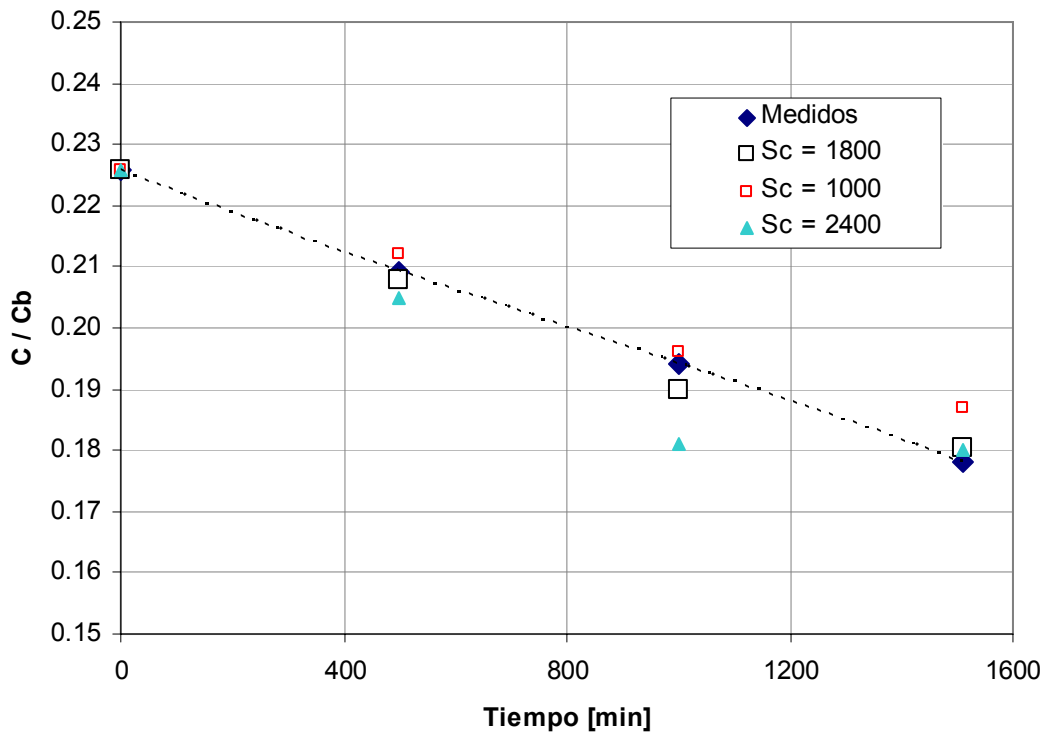


**Figura 6.11** Perfiles de concentración para diferentes tiempos para  $Sc=500$ ,  $\phi=0.50$ ,  $u^*=1$  cm/s,  $h=5$  cm,  $h_s=5$  cm,  $C_b = 21.2$  mg/l. a) dominio completo; b) detalle entre 2.5 mm por sobre y bajo la interfaz agua – sedimento,  $-0.05 < z/h < 0.05$ .



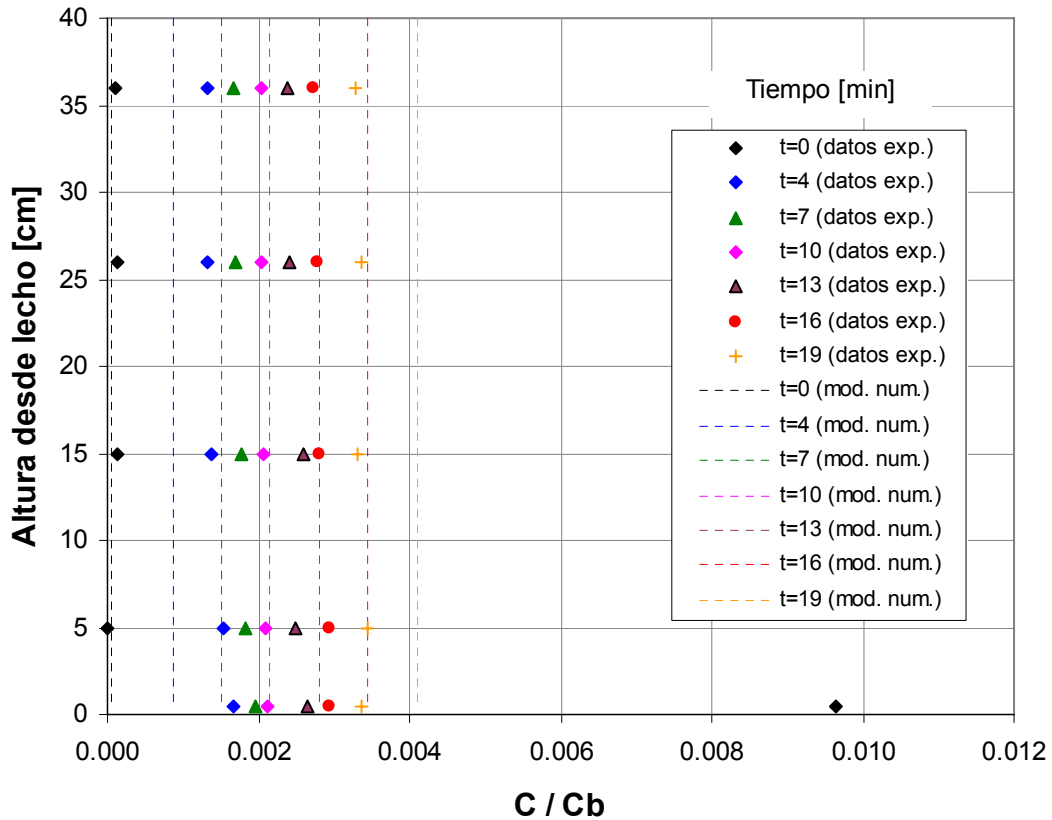
**Figura 6.12** Ejemplos de curva de masa total acumulada, en una columna de  $1 \text{ m}^2$  de área transversal para  $Sc=500$ ,  $\phi=0.50$ ,  $u^*=1 \text{ cm/s}$ ,  $h=5 \text{ cm}$ ,  $h_s=5 \text{ cm}$ ,  $C_b = 21.2 \text{ mg/l}$ .

Un ejemplo particular de aplicación de este modelo sirvió para la calibración del número de Schmidt, usando información de transferencia de masa en la instalación experimental, sin producir agitación en la columna. Para efectos de la modelación numérica, basta imponer  $D_t = 0$ . Se realizaron simulaciones numéricas para diferentes números de Schmidt, partiendo de una misma condición inicial semejante a lo medido en la instalación experimental. El mejor ajuste se obtuvo para un número de Schmidt igual a 1800, de acuerdo a lo presentado en la Figura 6.13.



**Figura 6.13** Perfiles de concentración para diferentes tiempos para  $Sc=500$ ,  $\phi=0.50$ ,  $u^*=1$  cm/s,  $h=5$  cm,  $h_s=5$  cm,  $C_b = 21.2$  mg/l. a) dominio completo; b) detalle entre 2.5 mm por sobre y bajo la interfaz agua – sedimento,  $-0.05 < z/h < 0.05$ .

A partir de la información experimental, se determina una velocidad de corte  $u^*$ , usando el valor medido de la energía cinética turbulenta cerca del fondo,  $K_b$ . Esta velocidad se usa como dato de entrada al modelo numérico, generando perfiles de concentración comparables a los medidos (ejemplificado en la Figura 6.14, y presentándose una síntesis de los resultados de la modelación numérica aplicada a las condiciones experimentales en el Anexo F).



**Figura 6.14** Ejemplo de comparación de datos experimentales (ambas grillas funcionando,  $f=250$  [RPM]) con modelación numérica ( $u_* = 0.46$  cm/s)

Un aspecto fundamental de la modelación numérica es la alta dependencia de los resultados con la condición inicial, tanto a lo largo de la columna como dentro de los sedimentos. Esta dependencia guarda relación con las mediciones experimentales realizadas, donde inicialmente se produce una mezcla rápida del soluto que se encuentra inmediatamente próximo a la interfaz agua – sedimento, para dar paso a continuación de un proceso más lento de transferencia entre ambos medios. Además, la ocurrencia probable de procesos dispersivos en la carga de solutos dentro del sedimento puede determinar una distribución vertical de concentración diferente a la supuesta (constante en toda la matriz de sedimentos). Por tanto, se aborda la comparación de resultados experimentales y numéricos a través de un modelo simplificado de transferencia de masa (e.g., Dade, 1993):

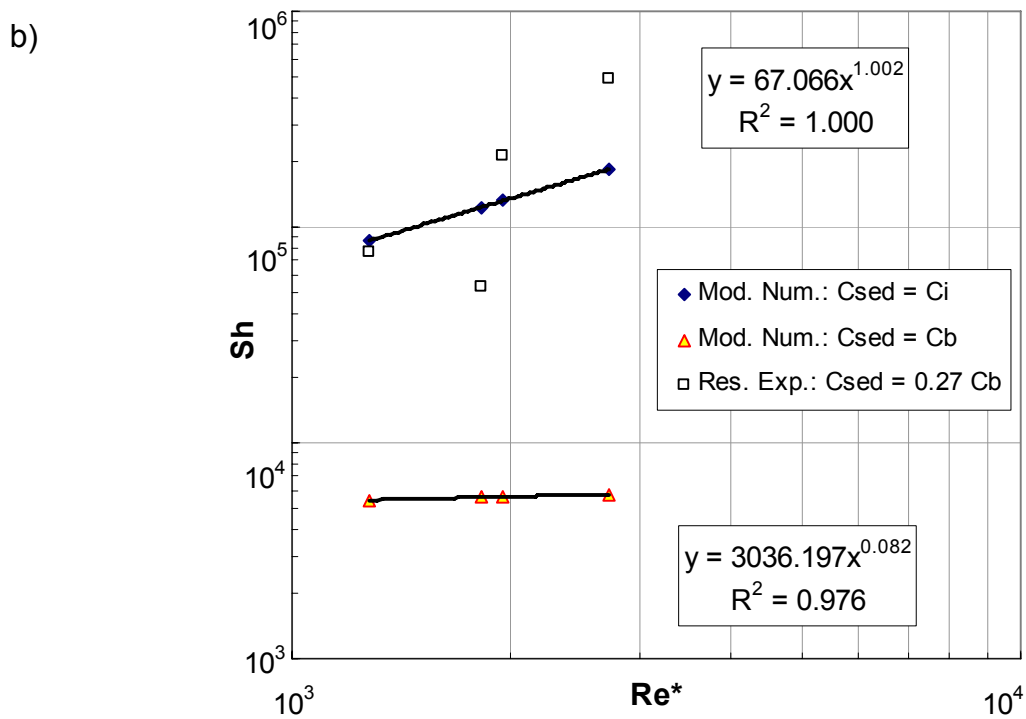
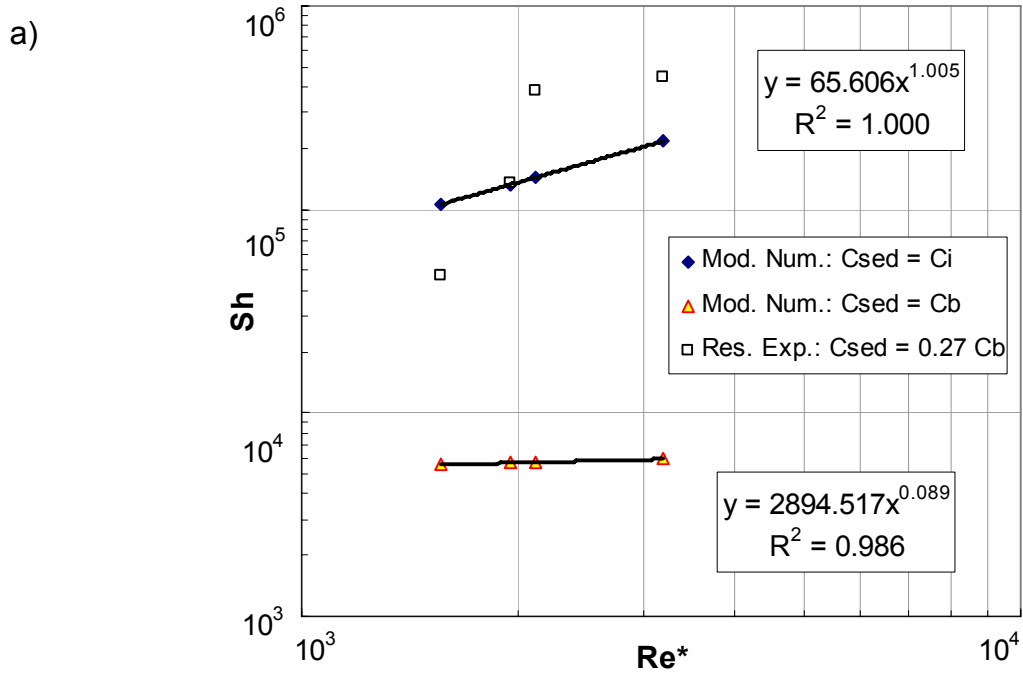
$$\frac{dM}{dt} = K_L A (C_{sed} - C_w) \quad \text{Ec. 6.20}$$

donde  $dM/dt$  corresponde a la tasa de variación de la masa total de soluto incorporada en la columna de agua,  $K_L$  es un coeficiente de transferencia de masa,  $A$  es el área transversal de la columna, en tanto que  $C_{sed}$  y  $C_w$  representan concentraciones de soluto representativas de los sedimentos y la columna de agua, respectivamente.

La elección de la concentración representativa de los sedimentos puede afectar los resultados obtenidos, ya que incide directamente sobre la forma de calcular  $K_L$ . En un modelo más general, se podría emplear  $C_{sed} = C_b$ , lo cual resulta válido cuando hay poca variación de la cantidad de soluto dentro del lecho. Un modelo más específico consideraría  $C_{sed} = C_i$ , donde  $C_i$  es la concentración de la especie en la interfaz ( $z = 0$ ). Ambos datos son factibles de obtener en la modelación numérica, no así en la instalación experimental, ya que la determinación exacta de la posición  $z = 0$  y la concentración asociada resultan inciertas. De todas formas, las observaciones en la columna permitieron notar que existe una disminución de la concentración en los sedimentos en un espesor de aproximadamente 1 cm, lo que permite afirmar que la aplicación para estos datos de un modelo  $C_{sed} = C_b$  resulta erróneo. Se determinó que un valor  $C_{sed} = 0.27 C_b$  permite una buena concordancia de los resultados experimentales con los numéricos, cuando se considera  $C_{sed} = C_i$  para estos últimos, y resulta una estimación razonable de las observaciones experimentales. La Figura 6.15 muestra estas comparaciones, en función de los números de Sherwood ( $Sh$ ) y Reynolds ( $Re^*$ ), definidos como:

$$Sh = \frac{K_L h}{D_o} \quad \text{Ec. 6.21}$$

$$Re^* = \frac{u_* h}{\nu} \quad \text{Ec. 6.22}$$



**Figura 6.15** Relación de números de Sherwood ( $Sh$ ) y Reynolds ( $Re^*$ ) para resultados experimentales y sus correspondientes simulaciones numéricas: a) Sólo grilla inferior; b) Ambas grillas.

Estos datos experimentales son comparados con los obtenidos por Steinberg y Hondzo (1999), obtenidos en un canal con medición de transferencia de oxígeno en la interfaz agua – sedimentos. Los valores presentan diferencias de un orden de magnitud en términos de la magnitud del número adimensional  $Re$ , indicando que la turbulencia es más intensa en la instalación experimental de este estudio, aún en el caso de menor agitación de las grillas. Además, existe una diferencia en el número de Schmidt usado, ya que para el caso de Steinberg & Hondzo, considerando la difusión de oxígeno disuelto, se usa un valor típico  $Sc = 500$ , diferente al calibrado para la difusión de los solutos de este estudio.

De todas maneras, estos investigadores ajustan la siguiente expresión a sus datos:

$$Sh = 0.012 Re^{0.89} Sc^{0.33} \quad \text{Ec. 6.23}$$

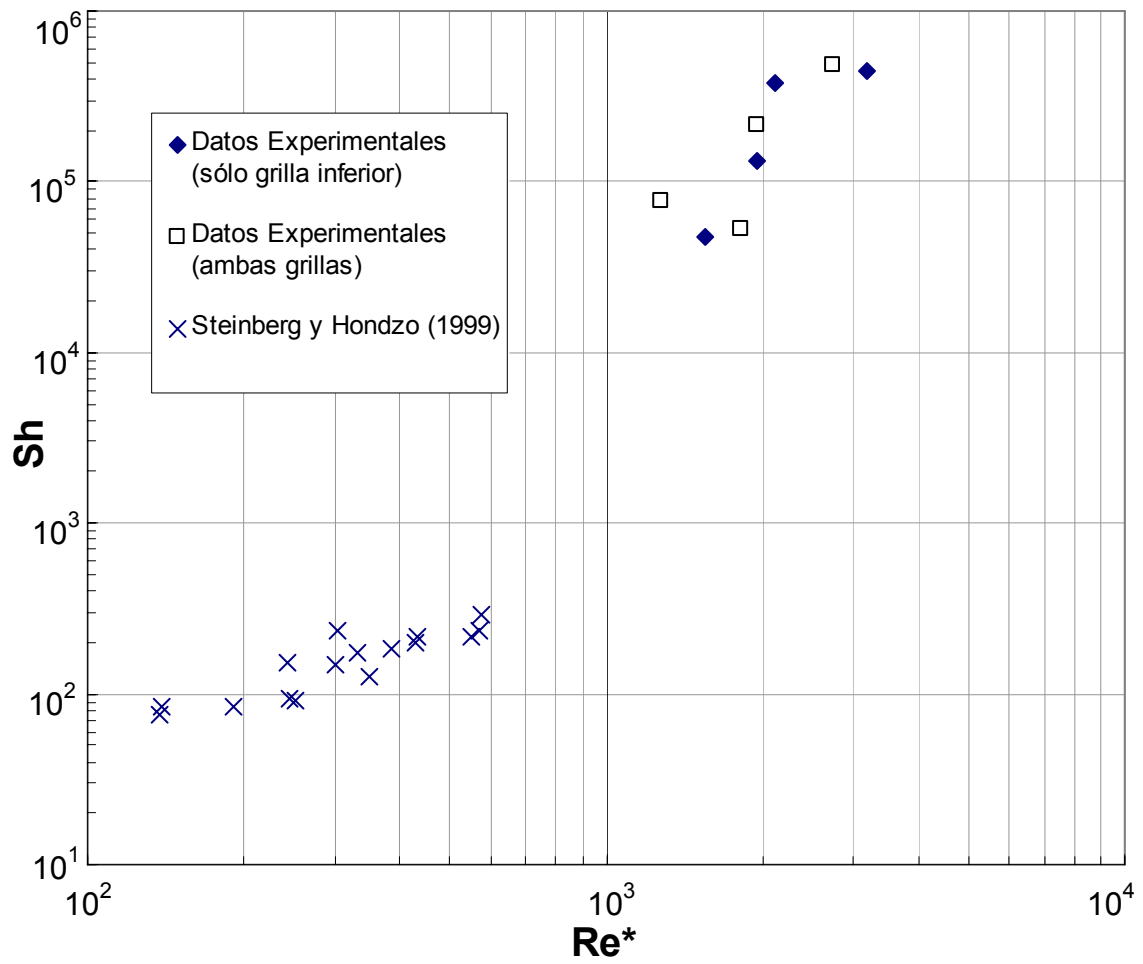
donde el número de Reynolds  $Re$  está escalado con la velocidad media del flujo,  $U$ :

$$Re = \frac{U h}{\nu} \quad \text{Ec. 6.24}$$

La revisión de estos datos presentados en la Figura 6.16 permite establecer un ajuste de potencia similar al de la presente investigación:

$$Sh = 1.06 Re^{0.86} \quad \text{Ec. 6.25}$$





**Figura 6.16** Comparación de datos experimentales de los números de Sherwood ( $Sh$ ) y Reynolds ( $Re^*$ ) con las experiencias de Steinberg y Hondzo (1999)

## 6.6. SÍNTESIS DEL ANÁLISIS

Se ha realizado un estudio experimental sobre los procesos de transporte y transferencia de masa, entre un lecho de sedimentos y una columna de agua agitada por grillas. Paralelamente, se ha desarrollado un modelo matemático/numérico basado en diferencias finitas, que permite predecir las tasas de transferencia en la interfaz de ambos medios. Las simulaciones representan adecuadamente las distribuciones de concentración en la columna de agua y los procesos observados de intercambio de masa con los sedimentos. Los resultados obtenidos se resumen en un modelo simple de intercambio de masa, expresado en términos de un coeficiente de intercambio,  $K_L$ . El modelo numérico predice que  $K_L$ , adimensionalizado en la forma del número de Sherwood, se correlaciona linealmente con el número de Reynolds del flujo. Los resultados experimentales, con mayor dispersión, confirman este resultado en forma relativamente satisfactoria. El modelo numérico desarrollado y validado a través del estudio experimental, constituye una herramienta útil para el análisis de problemas ambientales en sistemas acuáticos superficiales, y puede ser utilizado en conjunto con modelos eco-hidrodinámicos para la columna de agua.

## **7. APLICACIÓN AL ESTUDIO DE INTERCAMBIO DE OXÍGENO EN LA INTERFAZ AGUA – SEDIMENTO EN LAGUNAS SALINAS**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

Para el desarrollo de una herramienta numérica que permita abordar tanto el tema de la transferencia en la interfaz agua – sedimento, como los fenómenos relacionados al consumo o producción de un soluto, se ha adaptado un modelo vertical unidimensional desarrollado previamente por Higashino et al. (2004) para la respuesta, en régimen impermanente, del consumo de oxígeno disuelto desde la interfaz agua – sedimento (SOD, por las siglas en inglés de Sediment Oxygen Demand) y de los perfiles de oxígeno disuelto (OD) en la columna de agua cercana a esta interfaz. La adaptación de este modelo ha buscado mejorar la representación de la difusión turbulenta en la vecindad de la capa límite de esta pared, y los procesos biológicos que se desarrollan dentro de los sedimentos.

La demanda de oxígeno de los sedimentos es uno de los mayores términos de consumo de oxígeno disuelto en la columna de agua, y es por tanto un componente integral en estudios de modelación de calidad de aguas (Herzfeld et al., 2001). La demanda de oxígeno de los sedimentos incorpora la demanda biológica de oxígeno, resultante de la respiración de organismos vivos, y la demanda química de oxígeno debido a la oxidación de compuestos reducidos, provenientes del metabolismo anaeróbico (Higashino et al., 2004). La presencia de plantas bénticas o microfitobentos pueden también complicar la determinación de la SOD, particularmente si la producción fotosintética de oxígeno está presente (MacIntyre et al., 1996). Varias técnicas han sido usadas para la medición de la SOD, incluyendo estimaciones indirectas basadas en tasas de agotamiento in situ de oxígeno desde la columna de agua, valores derivados a partir de núcleos incubados en laboratorio o en cámaras bénticas in situ, y medición en los sedimentos mediante microelectrodos sensores de oxígeno (Herzfeld et al., 2001; Lee et al., 2000).

El consumo de oxígeno disuelto en una interfaz agua – sedimento (SOD) es controlado por el transporte de masa y/o reacciones bioquímicas en dos capas límite adyacentes: la subcapa difusiva en el agua y la profundidad de penetración en los sedimentos. El modelo desarrollado por Higashino et al. (2004) para la respuesta impermanente de SOD y perfiles de OD cerca de la interfaz agua – sedimento, puede reproducir profundidades de penetración y espesores de subcapas difusivas. Este modelo usa

cinética de Michaelis-Menten para representar el decaimiento de materia orgánica, sin embargo no toma en cuenta la producción de oxígeno por fotosíntesis o la respiración de los microfitobentos, tal como lo hace el modelo promediado por capas desarrollado por Herzfeld et al. (2001). Como se señaló previamente, en este estudio se realizaron adaptaciones a este modelo numérico para mejorar la representación de la difusión turbulenta dentro de la capa límite, usando el modelo de viscosidad turbulenta de O'Connor (1995), e incorporando un modelo de orden cero para la fotosíntesis y respiración de los microfitobentos.

El modelo es aplicado para simular condiciones prevalecientes en sistemas acuáticos de lagunas salinas en el norte de Chile, y los resultados fueron comparados con mediciones de terreno de SOD usando cámaras bénticas en uno de estos sistemas, realizadas por Alberto de la Fuente en su trabajo para el Centro de Ecología Aplicada (Reiher et al., 2005). Este trabajo de terreno fue desarrollado en el salar de Punta Negra, un lago salino en el norte de Chile (latitud 24.5° S, altitud 2.950 m.s.n.m.), que presenta una serie de sistemas acuáticos con ecosistemas únicos. Estos consisten en sistemas VCL (Vega – Canal – Laguna): vegas recargadas por aguas subterráneas salinas; un desagüe a través de un flujo canalizado de poca profundidad, de un par de kilómetros de longitud; y una laguna de evaporación e infiltración que se desarrolla unos cien a doscientos metros dentro del lecho seco del lago salino. El flamenco andino usa estos sistemas para construir sus nidos (en las lagunas) y para alimentarse (usualmente a partir de microfitobentos que crecen en el lecho del canal de desagüe de la vega). El equilibrio de este sistema es delicado y depende fuertemente de la cantidad de agua disponible, así como de su salinidad.

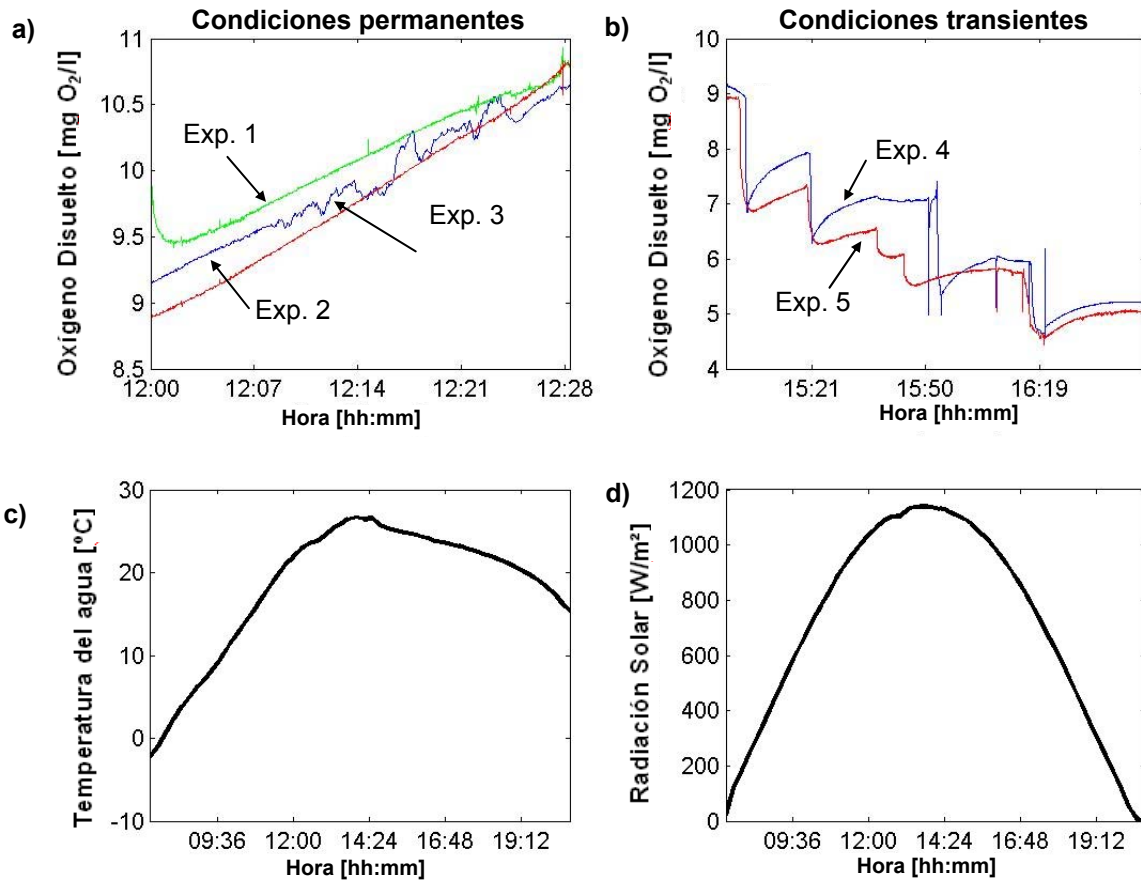
La demanda por los recursos hídricos superficiales y subterráneos en esta región, en constante expansión de la minería, ha llevado a plantearse escenarios con una posible reducción de agua entrante. En este análisis, se han reportado los resultados de una campaña para medir producción y consumo de oxígeno en la interfaz agua – sedimento en un sistema VCL, la calibración de los parámetros que caracterizan la actividad bioquímica en los sedimentos mediante el uso de un modelo promediado por capas, y la comparación de los resultados con las mediciones in situ. La principal hipótesis que está en juego en este análisis es que la fotosíntesis del fitoplancton sea la principal responsable del balance de oxígeno en la interfaz agua – sedimento en un sistema como el estudiado.

## 7.2. ESTUDIO DE TERRENO

A continuación se describen los detalles de la campaña de terreno donde se capturaron los datos base para esta aplicación del modelo numérico. Este trabajo de terreno fue realizado por Alberto de la Fuente junto a personal del Centro de Ecología Aplicada (CEA).

Durante la campaña de terreno, realizada en Enero de 2005, 3 cámaras bénticas fueron equipadas con sondas de oxígeno disuelto y ubicadas en el sistema VCL, para medir consumo y producción de OD en la interfaz agua – sedimento, en el tramo de canal de este sistema. La ubicación fue elegida por tratarse de un lugar donde el flamenco andino se alimenta de diatomeas bénticas. Las cámaras fueron hechas de plexiglass, con una longitud de 50 cm, un ancho de 14 cm, y una altura total de 5 cm. Fueron usadas bombas de acuario para la recirculación de agua dentro de las cámaras con diferentes velocidades de flujo. El diseño sigue lo sugerido por Hickey (1988). Las cámaras fueron insertas en los sedimentos, dejando una capa de 3 cm para el flujo de agua.

Se realizaron medidas a diferentes horas del día, de manera que se capturaran los efectos de diferentes condiciones de irradiación y temperatura. Se contempló la realización de dos conjuntos de experimentos: uno bajo condiciones permanentes, que arrojó tasas de crecimiento constante de oxígeno disuelto dentro de las cámaras (Figura 7.1.a) y otro conjunto bajo condiciones transientes, creadas a través de la periódica renovación del contenido de las cámaras, con agua del canal con menos oxígeno, imponiendo de esta forma rápidas caídas de la concentración de OD dentro de las cámaras, seguida por un incremento gradual de este parámetro en el tiempo (Figura 7.1.b). Las mediciones fueron realizadas bajo diferentes velocidades de flujo en cada conjunto de experimentos. Los datos de radiación solar y temperatura del agua fueron registrados durante las pruebas de terreno (Figura 7.1c y 7.1d).



**Figura 7.1** Datos recolectados en terreno: a) Experimentos bajo condiciones permanentes; b) Experimentos bajo condiciones transientes; c) Temperatura del agua; d) Radiación solar.

### 7.3. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico usado para la descripción de perfiles de OD dentro de los sedimentos y a través de la columna de agua, ha sido construido sobre la base de una ecuación de difusión simple, añadiendo términos que mejoran la representación de los principales procesos bioquímicos involucrados. El consumo de oxígeno disuelto ha sido representado usando la cinética de Michaelis-Menten (Higashino et al., 2004), y la producción neta de oxígeno debido a diatomeas bénticas ha sido modelada con una reacción de orden cero. Las siguientes ecuaciones describen el balance de oxígeno del sistema completo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (D_w + D_t) \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad \text{Ec. 7.1}$$

(para la columna de agua)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\mu C}{K_{O_2} + C} + P \quad \text{Ec. 7.2}$$

(dentro de los sedimentos)

donde  $C$  denota concentración de OD,  $t$  es el tiempo,  $z$  denota la coordenada vertical (medida desde la interfaz agua – sedimento, positiva hacia arriba),  $D_s$  denota el coeficiente efectivo de difusión en los sedimentos,  $\mu$  es la tasa de oxidación máxima,  $K_{O_2}$  es la constante de semi-saturación,  $P$  es la producción neta de OD debida a fotosíntesis y respiración del fitoplancton, y  $D_w$  y  $D_t$  son difusividades molecular y turbulenta, respectivamente, para el oxígeno disuelto en el agua.

La influencia de la turbulencia ambiente en la columna de agua es considerada a través del coeficiente de difusión turbulenta, directamente relacionado con la viscosidad turbulenta,  $\nu_t$ . Este término es considerado de la siguiente forma (O'Connor, 1995):

$$\nu_t/\nu = \kappa z^{+3}/(\Gamma_0^3 + z^{+2}) \quad \text{Ec. 7.3}$$

$$z^+ = u_* z/\nu \quad \text{Ec. 7.4}$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $z^+$  es la coordenada vertical adimensionalizada con la velocidad de corte  $u^*$  y la viscosidad cinemática, según la ecuación 7.4 anterior,  $\kappa = 0.4$  y  $\Gamma_0 = 7.4$ . La difusión turbulenta es estimada finalmente según:

$$D_t = \nu_t/Sc_t \quad \text{Ec. 7.5}$$

donde el número de Schmidt turbulento  $Sc_t$  es aproximadamente igual a 0.63, de acuerdo a datos empíricos (Launder, 1975).

Las ecuaciones 7.1 y 7.2 se adimensionalizan con la longitud de escala ( $L$ ), la viscosidad cinemática ( $\nu$ ), y la concentración de oxígeno de referencia ( $C_b$ , la cual se considera que se mantiene a una distancia  $L$  del fondo, sin verse afectada por los procesos de transferencia en la interfaz agua – sedimento), resultando las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left\{ \left( \frac{1}{Sc} + v_t^* \right) \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right\} \quad \text{Ec. 7.6}$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{1}{2Sc} \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} - \frac{\mu^* C^*}{K_{O_2}^* + C^*} + P^* \quad \text{Ec. 7.7}$$

La definición de los parámetros adimensionales definidos es:

$$C^* = \frac{C}{C_b}; \quad t^* = \frac{t \nu}{L^2}; \quad z^* = \frac{z}{L}; \quad K_{O_2}^* = \frac{K_{O_2}}{C_b};$$

$$\mu^* = \frac{\mu L^2}{\nu C_b}; \quad v_t^* = \frac{v_t}{\nu}; \quad P^* = \frac{P L^2}{C_b \nu} \quad \text{Ec. 7.8}$$

Siguiendo lo planteado por Higashino et al. (2004), la longitud de escala L se define como:

$$L = 100 \nu / u_* \quad \text{Ec. 7.9}$$

El sistema de ecuaciones adimensionales 7.6 y 7.7 es resuelto numéricamente usando un esquema de diferencias finitas de Crank-Nicholson. Las siguientes condiciones de borde son aplicadas:

Ecuación de difusión en la columna de agua:

$$C^* = 1 \quad (C = C_b) \quad \text{en } z^* = 1 \quad (z = L) \quad \text{Ec. 7.10}$$

$$C^* = C_w^* \quad (C = C_w) \quad \text{en } z^* = 0 \quad (z = 0) \quad \text{Ec. 7.11}$$

Ecuación de difusión en los sedimentos:

$$C^* = C_w^* \quad (C = C_w) \quad \text{en } z^* = 0 \quad (z = 0) \quad \text{Ec. 7.12}$$

$$C^* = 0 \quad (C = 0) \quad \text{en } z^* = -z_b/L \quad (z = -z_b) \quad \text{Ec. 7.13}$$



En las ecuaciones anteriores,  $z_b$  es la frontera inferior (verticalmente hacia abajo) que define el dominio de cálculo, y  $C_w$  es la concentración en la interfaz agua – sedimento, que varía en el tiempo, y que se calcula como la concentración media entre las primeras celdas por sobre y por bajo la interfaz. Si se quisiera definir la condición de borde superior en la columna de agua, para representar el comportamiento de una cámara béntica cerrada de altura  $H_c$ , debiera usarse una condición de flujo nulo de oxígeno disuelto en el límite superior del dominio:

$$\partial C^* / \partial z^* (z^* = H_c / L) = 0 \quad \text{Ec. 7.14}$$

De igual forma, la condición de borde superior, ya sea de valor o flujo fijo, puede imponerse en otra posición  $z$  mayor a  $L$ , se restringe a este valor para no aumentar en demasía el tamaño del dominio, pero el resultado no se vería afectado.

El detalle del código fuente del modelo numérico se incluye en el Anexo G, donde dentro del mismo código se definen los valores de las variables de interés para obtener el output en archivos de texto que son post-procesados para su análisis detallado.

#### 7.4. RESULTADOS DEL TRABAJO DE TERRENO

Los datos obtenidos con las cámaras bénticas en los experimentos de terreno muestran que la producción fotosintética es el proceso dominante en el intercambio de oxígeno en la interfaz agua – sedimento del tramo de canal del VCL (Figura 7.1). Para analizar los datos obtenidos en los experimentos, un modelo promediado de volúmenes fue aplicado a la condición de flujo en la cámara béntica (análisis desarrollado por Alberto de la Fuente sobre la base de los datos de terreno capturados por él). Las ecuaciones que describen la dinámica del oxígeno disuelto dentro de la cámara béntica, promediadas en los volúmenes (columna de agua y sedimentos) son, respectivamente:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = -\frac{K_{dif}}{h}(C_w - C_s) - \frac{v}{L_c} C_{ex} \quad \text{Ec. 7.15}$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{K_{dif}}{e\rho}(C_w - C_s) - \frac{K_{con}}{k_{02} + C_s} C_s + P' \quad \text{Ec. 7.16}$$

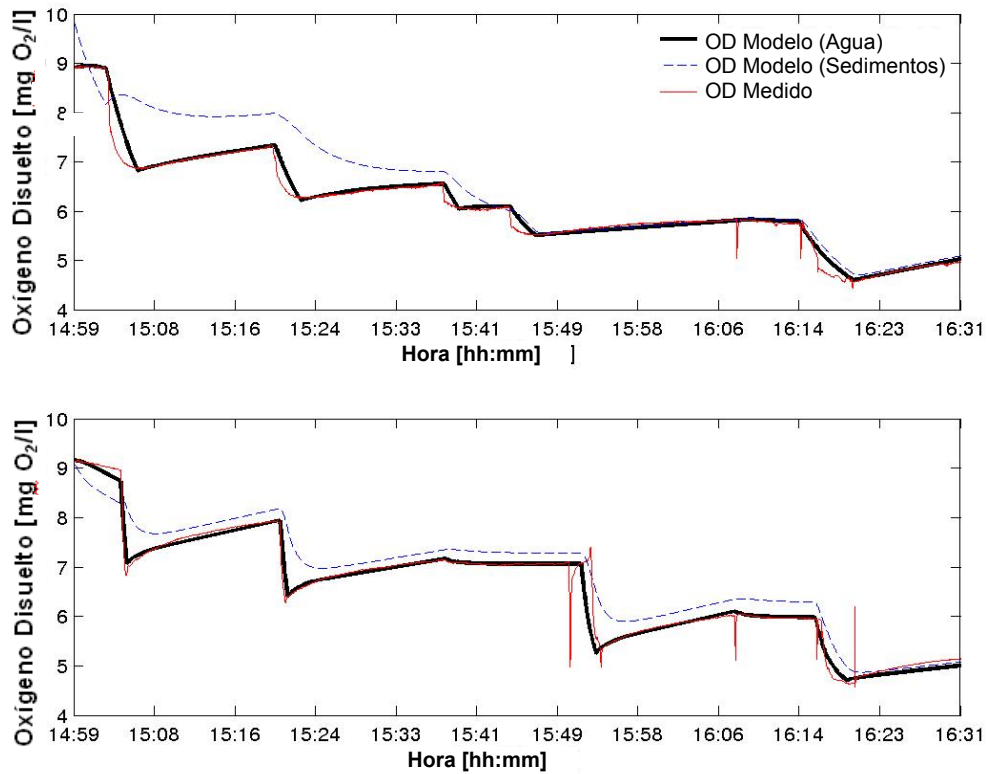
donde  $C_w$  y  $C_s$  son concentraciones de oxígeno disuelto de referencia en la columna de agua y en los sedimentos, respectivamente,  $h$  y  $e$  son los espesores de las capas de agua y sedimentos (con valores de 3 y 1.5 cm), respectivamente,  $\rho$  denota la porosidad (estimada en 0.5),  $v$  denota la velocidad del flujo durante la etapa de renovación en experimentos en régimen transiente,  $L_C$  es la longitud de la cámara béntica, y  $C_{ex}$  es la concentración de oxígeno disuelto en el agua del canal fuera de la cámara. Además,  $K_{diff}$  es el coeficiente de intercambio de masa entre la columna de agua y los sedimentos [ $s^{-1}$ ],  $K_{con}$  es la tasa de oxidación de materia orgánica [ $mg\ O_2/l/s$ ],  $k_{O_2}$  es la constante de semi-saturación para el oxígeno (0.2 [ $mg\ O_2/l$ ], Higashino et. al 2004), y  $P'$  es la producción neta de oxígeno (producción menos respiración) de las diatomeas bénticas. Los parámetros por calibrar son  $K_{con}$ ,  $K_{diff}$  y  $P'$ .

No es posible obtener valores para parámetros de difusión y oxidación a partir de los experimentos con condiciones permanentes, así que los datos de los experimentos en régimen transiente fueron analizados en primera instancia para calibrar estos parámetros y fueron luego usados para analizar los experimentos en régimen permanente. Los resultados del proceso de calibración se presentan en la Tabla 7.1 y Figura 7.2.

Tabla 7.1. Calibración de parámetros.

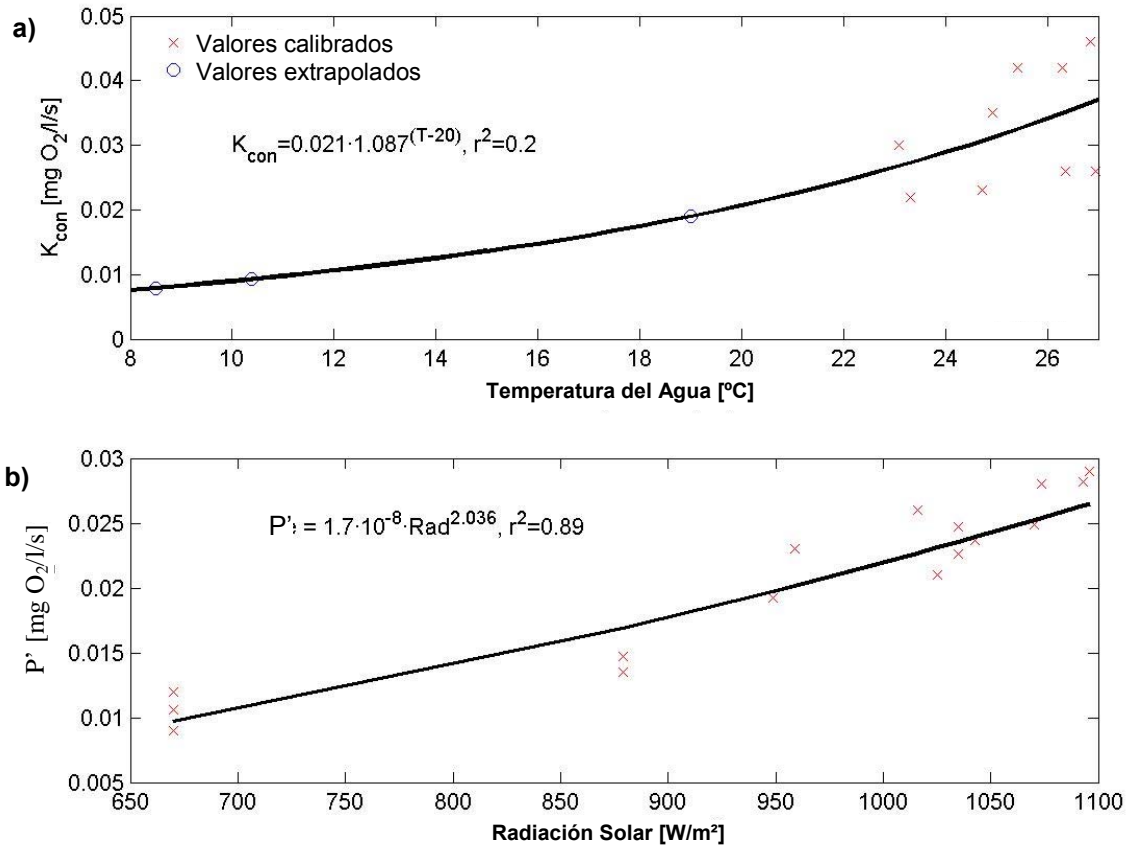
	Hora	Velocidad Media	$K_{diff}$	P'	$K_{con}$	Temp. Agua	Rad. Solar
	[hh:mm]	[cm/s]	[1/s]	[mg O <sub>2</sub> /l/s]	[mg O <sub>2</sub> /l/s]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]
Condiciones permanentes	10:00	0.152	*	0.0106	0.0079	8.5	670
	10:00	0.309	0.0008	0.0090	0.0079	8.5	670
	10:00	0.223	0.0007	0.0120	0.0079	8.5	670
	11:00	0.152	*	0.0135	0.0093	10.4	879
	11:00	0.309	0.0007	0.0135	0.0093	10.4	879
	11:00	0.223	0.0010	0.0147	0.0093	10.4	879
	12:00	0.152	0.0007	0.0226	0.0190	19.0	1035
	12:00	0.309	0.0007	0.0226	0.0190	19.0	1035
	12:00	0.223	0.0003	0.0247	0.0190	19.0	1035
Condiciones transientes	14:59	0.152	0.0030	0.0290	0.0260	26.9	1096
	15:02	0.163	0.0007	0.0282	0.0460	26.8	1093
	15:16	0.199	0.0030	0.0280	0.0260	26.4	1074
	15:18	0.163	0.0007	0.0249	0.0420	26.3	1070
	15:33	0.163	0.0010	0.0237	0.0420	25.4	1043
	15:42	0.214	0.0090	0.0210	0.0350	24.9	1025
	15:47	0.199	0.0030	0.0260	0.0230	24.7	1016
	16:11	0.353	0.0050	0.0230	0.0220	23.3	959
	16:15	0.214	0.0090	0.0192	0.0300	23.1	949

\*: No es posible estimar este valor.



**Figura 7.2** Resultados de la calibración. Experimentos bajo condiciones transientes (2 cámaras diferentes).

El análisis de los resultados obtenidos, muestra una débil dependencia de  $K_{con}$  y  $P'$  con la velocidad del flujo. En vez de ello, fue encontrada una dependencia más fuerte de  $K_{con}$  con la temperatura del agua, y de  $P'$  con la radiación solar. El parámetro de oxidación parece seguir su patrón usual de dependencia con la temperatura:  $K_{con} = K_m \theta^{(T-20)}$  (Figura 7.3a). Esta relación fue ajustada a los datos de los experimentos con condiciones transientes y fueron obtenidos los valores  $K_m = 0.021$  [mg O<sub>2</sub>/l/s] y  $\theta = 1.087$ . Los valores usuales para  $\theta$  están en el rango de 1.025 a 1.06. Usando este modelo,  $K_{con}$  fue extrapolado a las condiciones que prevalecen en los experimentos con condiciones permanentes (Figura 7.3a). Con este procedimiento, fue posible estimar valores de la producción neta de OD en todos los experimentos disponibles (Tabla 7.1, Figura 7.3b). Los valores calibrados de  $Pr-Re$  parecen seguir una dependencia potencial con la radiación solar (ver el mejor ajuste en la Figura 7.3b), mostrando su incremento frente al aumento de este factor.

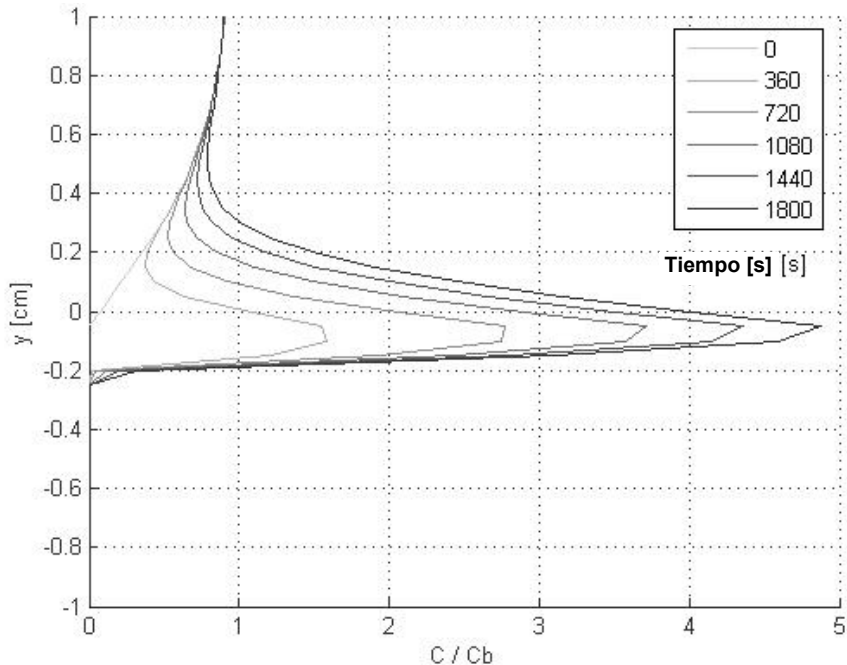


**Figura 7.3** Resultados de la calibración de los parámetros de oxidación y producción neta.

## 7.5. RESULTADOS DEL ESTUDIO NUMÉRICO

El modelo numérico vertical 1D fue aplicado para simular transferencia de oxígeno dentro de las cámaras bénticas de los experimentos de terreno. Las mismas dimensiones y velocidades de flujo (Tabla 7.1) fueron usadas en este análisis. Las simulaciones se iniciaron a partir de un perfil de equilibrio de OD, asumiendo flujo del canal afuera de las cámaras bénticas. En el tiempo inicial, se impuso la condición de flujo nulo en la frontera superior del dominio, y el perfil vertical de concentración de OD evolucionó respondiendo a la producción, consumo y transporte vertical dentro de la columna de agua y los sedimentos. La Figura 7.4 muestra los resultados obtenidos para uno de los experimentos en condiciones permanentes de la Tabla 7.1. Fue usado el correspondiente valor calibrado de  $P'$  (introduciendo la corrección explicada más abajo) y el valor de  $\mu$  fue ajustado según el comportamiento observado de la capa promediada.

Se supuso que la producción fotosintética y la respiración del fitoplancton béntica ocurre en una delgada capa (de 2 mm de espesor) en la interfaz agua – sedimentos, acorde a la capacidad de penetración de la luz dentro de la matriz de sedimentos. La Figura 7.4 muestra que el OD alcanza sus valores máximos dentro de esta capa, a partir de la cual es transportado hacia arriba en dirección a la columna de agua, y hacia abajo en dirección a los sedimentos más profundos. Alrededor de 3 mm bajo la interfaz agua – sedimentos, se obtienen condiciones anóxicas.



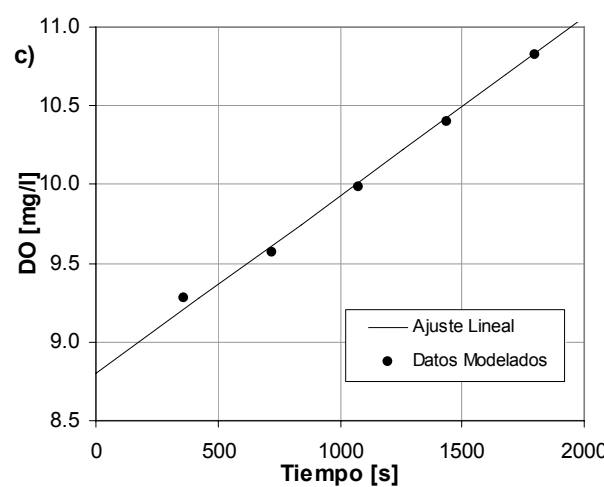
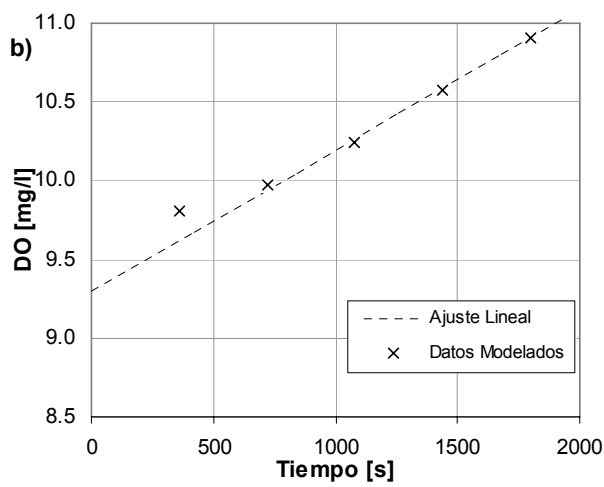
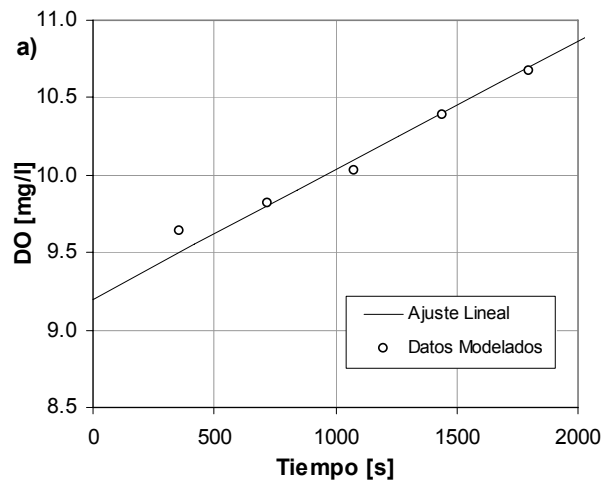
**Figura 7.4** Evolución temporal de perfiles de OD, debido a actividad fotosintética y oxidación de materia orgánica (variando desde un estado inicial sin fotosíntesis ni respiración del fitoplancton).  $\mu = 0.106$  mg/l/s;  $P' = 0.0226$  mg/l/s;  $U = 0.31$  cm/s;  $u^* = 0.02$  cm/s.

Resultados como los mostrados en la Figura 7.4 fueron promediados por capa, tanto en la columna de agua como en los sedimentos. La comparación entre la evolución temporal observada para la concentración media de OD en la columna de agua, para los experimentos de terreno con condiciones permanentes tomadas a las 12:00 hrs (Tabla 7.1) y los resultados de la correspondiente simulación, es presentada en la Figura 7.5. Para obtener estos ajustes, se usaron los valores calibrados de  $P'$  mostrados en la Tabla 7.1. Sin embargo, como el modelo promediado por capas asume que el término fuente de oxígeno está distribuido uniformemente en la capa de sedimentos, al contrario del supuesto usado en el modelo 1D, dando el término fuente está concentrado en una pequeña capa en la interfaz agua-sedimento, los valores de  $P'$  fueron corregidos, multiplicándolos por un factor  $e/\delta$ , donde  $\delta$  es el espesor de la capa

donde el término fuente,  $P'$ , efectivamente se aplica (se asume que es del orden de 2 mm). El ajuste de los resultados de la simulación mostrados en la Figura 7.5 arrojan los valores de  $\mu$  mostrado en la Tabla 7.2. Los correspondientes valores calibrados de  $K_{con}$  a partir de los experimentos de terreno (Tabla 7.1) también son presentados en esta nueva tabla.

**Tabla 7.2.** Comparación de tasas de oxidación de materia orgánica obtenidas del modelo promediado por capas ( $K_{con}$ ) y del modelo vertical 1D ( $\mu$ ).

$U$ (cm/s)	$\mu$ [mg O <sub>2</sub> /l/s]	$K_{con}$ [mg O <sub>2</sub> /l/s]
0.152	0.092	0.0190
0.223	0.138	0.0190
0.309	0.106	0.0190



**Figura 7.5** Comparación entre ajustes lineales de datos de terreno y resultados de las modelaciones numéricas. Los datos de OD fueron obtenidos de los experimentos bajo condiciones permanentes, con velocidades medias del flujo de: a) 0.15 cm/s; b) 0.22 cm/s; c) 0.30 cm/s.



A partir de la Tabla 7.2, se concluye que a pesar de que conceptualmente  $K_{\text{con}}$  y  $\mu$  son equivalentes, no son numéricamente iguales. En particular, en el modelo promediado por capas, se asume que el OD existe distribuido en toda la capa de sedimentos lo que significa que la oxidación de materia orgánica puede ocurrir también distribuida dentro de ellos. Esto no es efectivo, tal como lo predice el modelo vertical 1D. De hecho, este modelo predice que el OD existe sólo en una capa delgada bajo la interfaz agua – sedimentos, y por lo tanto, la oxidación de materia orgánica ocurre tan sólo dentro de esta capa. Todo esto implica que para producir el efecto del mismo término sumidero de OD, la tasa de oxidación de materia orgánica usada en el modelo vertical 1D ( $\mu$ ) debe ser mucho más grande que la del modelo promediado por capas ( $K_{\text{con}}$ ) tal como se observa en la comparación de la Tabla 7.2. Los valores de la razón  $\mu/K_{\text{con}}$  son aproximadamente entre 5 y 7, lo que es cercano a la razón entre el espesor de la capa de sedimentos del modelo promediado, y la dimensión de la capa oxigenada estimada en el modelo vertical 1D (Figura 7.4).

## 7.6. SÍNTESIS DEL ANÁLISIS

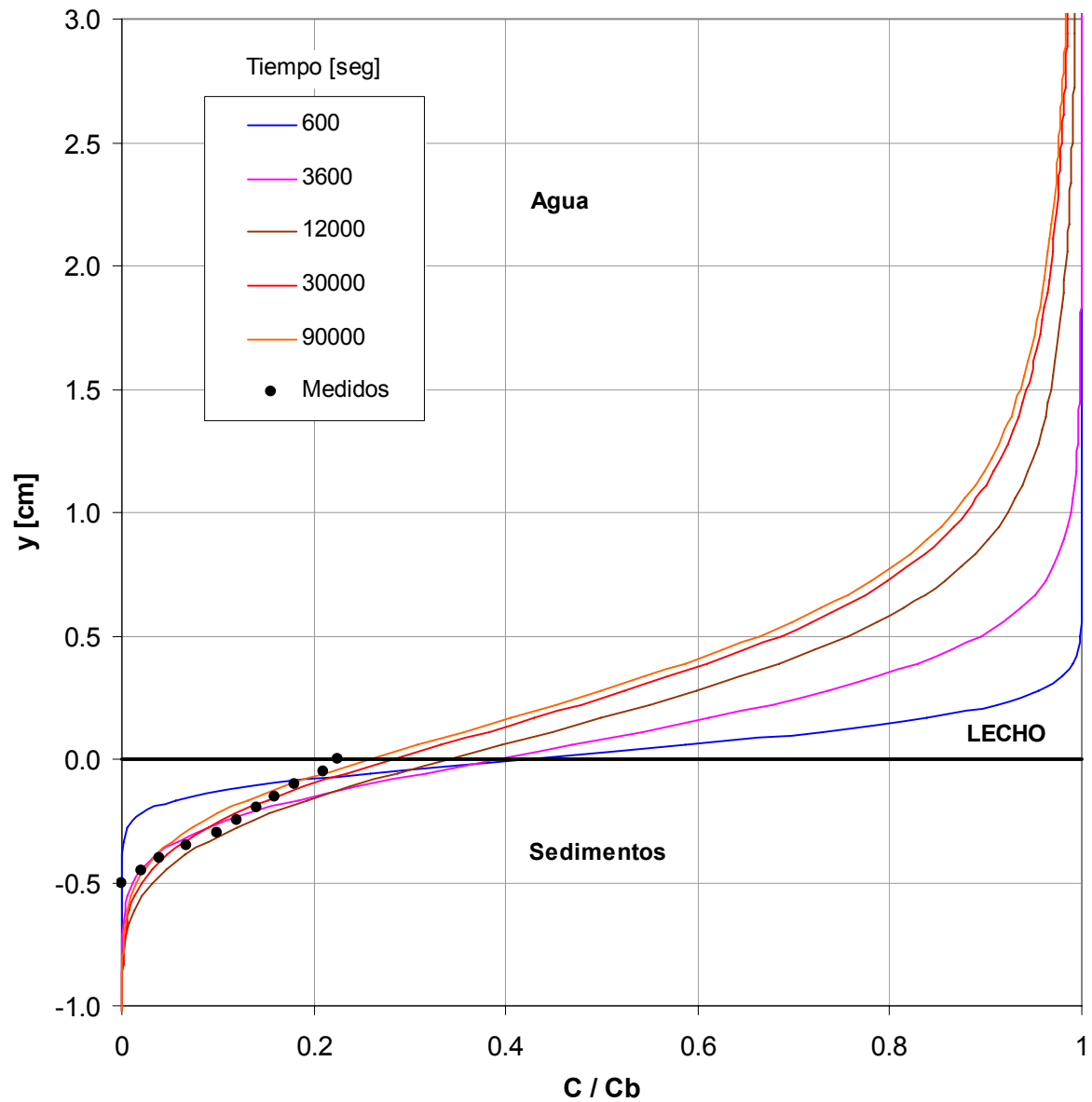
Se han realizado experimentos de terreno y se han aplicado modelos numéricos, al estudio de producción y consumo de OD en la interfaz agua – sedimento de un sistema acuático superficial real. Los datos de terreno obtenidos con cámaras bénticas muestran que la producción fotosintética de OD por microfitobentos es el proceso dominante en el intercambio de oxígeno en la interfaz agua – sedimentos del tramo de canal del VCL.

Mediante el modelo 1D desarrollado, es posible reproducir la estructura vertical de OD, tanto en la columna de agua como en los sedimentos. Este modelo es una adaptación de un modelo existente. Para la calibración de los parámetros biogeoquímicos representados en las reacciones en los sedimentos, ha sido usado un modelo promediado por capas, usando los datos de terreno. Lo mismo fue hecho con el modelo vertical 1D, y un conjunto coherente de parámetros calibrados fue obtenido de ambos modelos. Las simulaciones verticales 1D fueron capaces de reproducir adecuadamente el comportamiento del OD en el sistema estudiado, y toman en cuenta de manera razonable los procesos biogeoquímicos y de transporte que ocurren en los sedimentos y la columna de agua.

Se concluye que el modelo vertical 1D es capaz de capturar los principales aspectos de la producción y consumo de OD en la interfaz agua – sedimentos de sistemas acuáticos

como el estudiado, proveyendo la calibración de los principales parámetros biogeoquímicos involucrados, particularmente de aquellos relacionados con la producción fotosintética de OD y respiración de organismos. Este tipo de modelo sienta las bases para la implementación de nuevos modelos que consideran otros aspectos de la dinámica de la biomasa microfitobéntica.

Finalmente, mediante la captura de mayor información de terreno es posible mejorar el conocimiento de los parámetros principales que controlan los procesos, tales como la tasa de oxidación de materia orgánica y la profundidad de penetración del oxígeno disuelto en los sedimentos. En la Figura 7.6 se presenta una comparación de perfiles medidos en los sedimentos mediante un microperfilador (Salamanca, 2000) en el mismo ecosistema del Salar de Punta Negra, con una penetración del oxígeno hasta una profundidad de 5 mm (donde comienza hacia abajo una zona anaeróbica, donde se produce reducción de sulfatos y generación de sulfuros). En el ejemplo señalado en la Figura 7.6, se han ajustado como parámetros la tasa de oxidación y la velocidad de corte del flujo sobre el lecho, los cuales inciden en las tasas de transferencia del soluto y su mezcla en la columna de agua, tal como se ha especificado en las ecuaciones que componen el presente modelo numérico.



**Figura 7.6** Evolución temporal del perfil de oxígeno disuelto en una columna con demanda de oxígeno por parte de los sedimentos (concentración de oxígeno  $C$ , adimensionalizada con el valor de saturación en la columna de agua,  $C_b$ ). Comparación con datos medidos con microperfilador in situ (Salamanca, 2000). Parámetros ajustados: velocidad de corte  $u^* = 0.018$  cm/s; tasa de oxidación de materia orgánica  $\mu = 18$  mg/l/día.

## 8. ANÁLISIS INTEGRADO Y CONCLUSIONES

A través de los pasos desarrollados en esta investigación se han empleado diferentes modelos numéricos y realizado comparaciones con datos experimentales y de terreno para calibrar parámetros, de manera de obtener diversos mecanismos complementarios de estimar tasas de transferencia de masa en la interfaz agua – sedimentos y caracterizar la mezcla en una columna de agua afectada por estos fenómenos de transporte.

A continuación se reseñan los principales hitos en el desarrollo de estas herramientas matemáticas y su modo de aplicación a casos concretos, considerando posibles modificaciones y adaptaciones que amplíen la aplicabilidad de estos modelos a otro tipo de casos que no necesariamente hayan sido explícitamente abordados previamente.

### 8.1. MODELO DE TRANSFERENCIA SIMPLIFICADO CON COEFICIENTE $K_L$

Mediante el desarrollo teórico – numérico del Capítulo 6, se determinó que una manera de representar la transferencia de un soluto desde los sedimentos hacia la columna de agua es a través de un modelo simplificado para la masa  $M$  contenida en la columna que incorpora un coeficiente de transferencia de masa  $K_L$ :

$$\frac{dM}{dt} = K_L A (C_i - C_w) \quad \text{Ec. 8.1}$$

A su vez, los números adimensionales de Sherwood y Reynolds presentan entre sí una relación casi lineal:

$$Sh = c_1 Re_*^{c_2} \quad \text{Ec. 8.2}$$

con  $c_2$  muy cercano a 1. De esta forma, es posible escribir el coeficiente  $K_L$  como:

$$K_L = \frac{D_0}{h} c_1 \left( \frac{u_* h}{\nu} \right)^{c_2} \quad \text{Ec. 8.3}$$

Si consideramos que la masa transferida a la columna se puede expresar como una concentración media en una columna bien mezclada, multiplicada por su volumen, a su vez caracterizado por un área transversal  $A$  y una altura  $h$ :

$$M = C_w A h \quad \text{Ec. 8.4}$$

entonces podemos obtener una ecuación diferencial para la concentración media en la columna de agua:

$$A h \frac{dC_w}{dt} = \frac{D_0}{h} c_1 \left( \frac{u_* h}{\nu} \right)^{c_2} A (C_i - C_w) \quad \text{Ec. 8.5}$$

$$\frac{dC_w}{dt} = \frac{c_1 D_0}{h^{2-c_2}} \left( \frac{u_*}{\nu} \right)^{c_2} (C_i - C_w) \quad \text{Ec. 8.6}$$

Si el valor de  $C_i$  permanece constante, la solución analítica de la ecuación anterior es una exponencial que converge asintóticamente a un valor  $C_w^\infty = C_i$ . De otra forma, se debe tomar en cuenta la forma en que el soluto queda disponible para ser transferido a la columna de agua, para determinar  $C_i$  como eventualmente una función del tiempo  $t$ , o de la misma concentración,  $C_w$ , para obtener una nueva ecuación con solución analítica o numérica.

En los casos analizados, se determinaron parámetros  $c_1$  y  $c_2$  para turbulencia generada cerca del fondo (una grilla o dos grillas), con valores de  $c_1 = 66$  y  $c_2 = 1$  (en promedio), por lo que su aplicabilidad para otros casos (por ejemplo, turbulencia generada en la superficie libre o en alguna otra posición lejos del lecho) depende de la calibración de otros set de datos. Junto a esto, los parámetros de los que depende la evolución de la masa en el tiempo son la difusión molecular en la subcapa difusiva,  $D_0$ , la altura de la columna,  $h$ , la velocidad de corte,  $u_*$ , que da cuenta del nivel de turbulencia, y la viscosidad cinemática  $\nu$ .

Los parámetros de ajuste discrepan a los de otras investigaciones (en particular Steinberg y Hondzo, 1999), en los que se aprecia que los números adimensionales de Sherwood y Reynolds están relacionados con coeficientes  $c_1 = 1.06$  y  $c_2 = 0.86$ . Sin embargo, se presentan diferencias en el tipo de montaje, los niveles alcanzados de turbulencia, y el valor base del número de Schmidt, por lo que no son comparables

directamente y corresponden más bien a experiencias complementarias para diferentes escalas de procesos de transferencia.

## 8.2. MODELACIÓN DE PERFILES VERTICALES DE CONCENTRACIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA Y LOS SEDIMENTOS

Si el soluto que se está modelando tiene una dinámica compleja, o presenta importantes variaciones temporales, conviene tomar en cuenta los procesos dentro de la matriz de sedimentos que pueden estar gobernando la concentración de este compuesto. Por ejemplo, la liberación de sulfuros o nitrógeno en procesos anóxicos que estén ocurriendo algunos centímetros por debajo de la interfaz agua – lecho. Para ello, los modelos calibrados en el Capítulo 7 (para el caso específico de la dinámica del oxígeno disuelto) llevan a un modelo similar para la concentración en la columna de agua.

$$\frac{dC_w}{dt} = \frac{K_{dif}}{h} (C_s - C_w) \quad \text{Ec. 8.7}$$

En este caso, se dispone de una forma concreta de expresar la concentración en los sedimentos, a través de otra ecuación con parámetros calibrados:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{K_{dif}}{e\rho} (C_w - C_s) - \frac{K_{con}}{k_{02} + C_s} C_s + P' \quad \text{Ec. 8.8}$$

En vez de aplicar este modelo de dos capas, se puede determinar con mayor detalle el perfil vertical de concentraciones, con el objeto de determinar las condiciones específicas con las cuales se pueden encontrar los microorganismos presentes dentro de los sedimentos, capaces de llevar a cabo las reacciones químicas que producen fotosíntesis, descomposición de materia orgánica y reducción de metales, entre otras. Los coeficientes asociados a las ecuaciones, tanto de este modelo numérico detallado como de los modelos de dos capas, guardan relación con la cinética empleada para representar la dinámica del soluto, de los cuales hay valores en la literatura consultada.

Esta ecuación para la concentración se puede expresar de la forma indicada a continuación en la ecuaciones 8.9 y 8.10:

Columna de agua:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (D_w + D_t) \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad \text{Ec. 8.9}$$

Sedimentos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\mu C}{K_{O_2} + C} + P \quad \text{Ec. 8.10}$$

### 8.3. PROCESOS DE MEZCLA EN FLUJOS TURBULENTOS

Para determinar la mezcla en columnas de agua con una fuente constante de soluto en la interfaz agua – sedimento, se han determinado expresiones que centran el análisis en el tiempo  $t_{90}$  en el cual se ha transferido el 90% de la masa posible de movilizar a la columna (con un comportamiento asintótico hacia  $M = M_0$  o bien  $C_w = C_i$ , en términos de los modelos anteriores). Se distinguen los casos sin y con estratificación vertical de la columna de agua:

a) Sin estratificación

$$\frac{M}{M_0} = f\left(\frac{t}{t_{90}}\right) \quad \text{Ec. 8.11}$$

$$t_{90}^* = 25.99 Re_{*h}^{0.09} \quad (\text{para mezcla por flujo gravitacional}) \quad \text{Ec. 8.12}$$

$$t_{90}^* = 21.33 Re_{*h}^{0.10} \quad (\text{para mezcla por viento}) \quad \text{Ec. 8.13}$$

b) Con estratificación

$$\frac{M - M_r}{M_0 - M_r} = f\left(\frac{t - t_r}{t_{90} - t_r}\right) \quad \text{Ec. 8.14}$$

b.1) Turbulencia baja

$$t_{90}^* = 2.67 Re_{*h}^{0.5506} \quad (\text{para mezcla por flujo gravitacional}) \quad \text{Ec. 8.15}$$

$$\text{Para } Re_{*h} \leq 17.5 Ri_{*0} - 740$$

$$t_{90}^* = 8.06 Re_{*h}^{0.381} \quad (\text{para mezcla por viento}) \quad \text{Ec. 8.16}$$

$$\text{Para } Re_{*h} \leq 70 Ri_{*0} - 3400$$

b.2) Turbulencia alta

$$t_{90}^* = A Re_{*h}^B$$
$$A = 16.90 + 2.30 Ri_{*0} \quad (\text{para mezcla por flujo gravitacional}) \quad \text{Ec. 8.17}$$

$$B = 0.076 \exp(-0.019 Ri_{*0})$$

$$\text{Para } Re_{*h} > 17.5 Ri_{*0} - 740$$

$$t_{90}^* = A Re_{*h}^B$$
$$A = 13.51 + 1.27 Ri_{*0} \quad (\text{para mezcla por viento}) \quad \text{Ec. 8.18}$$

$$B = 0.010 \exp(-0.013 Ri_{*0})$$

$$\text{Para } Re_{*h} > 70 Ri_{*0} - 3400$$

Los límites determinados para los casos b) y c) corresponden a la envolvente según la cual se determinó que la turbulencia no es suficiente para destruir la estratificación, la cual permanece condicionando la mezcla y este proceso sigue una escala de tiempo independiente del número de Richardson  $Ri_{*0}$ .

Contando con estas herramientas numéricas y los modelos descritos en los acápites anteriores, es posible llevar a cabo simulaciones donde se analice la mezcla condicionada por las concentraciones en ambos medios (columna de agua y matriz de sedimentos), y considerando incluso la dinámica de las especies estudiadas.



#### **8.4. CONCLUSIONES FINALES**

A lo largo de los capítulos precedentes se ha desarrollado una serie de modelos numéricos y empíricos, recopilando elementos físicos, químicos y biológicos que dan cuenta de la alta complejidad de los fenómenos de transferencia de masa en la interfaz agua - sedimento, por cuanto son dependientes de parámetros muy diversos y de laboriosa adquisición. En particular, la medición apropiada de los niveles de turbulencia en sistemas naturales, la obtención de tasas de respiración y producción de oxígeno disuelto en condiciones controladas y el muestreo de soluciones con métodos poco invasivos son tareas que requieren una dedicación especial.

No obstante las múltiples aristas que cubre este tema, se ha desarrollado un trabajo que toma en cuenta las múltiples interacciones y da lugar al uso modular de cada una de las herramientas, de manera de poder obtener estimaciones de tasas de transferencias o niveles de mezcla, o bien establecer con mucho mayor detalle las distribuciones de solutos en un sistema acuático. La manera en que se han desarrollado cada uno de los capítulos, en forma de investigaciones independientes entre sí, e integradas en este documento, ha permitido este resultado, amplio en su objetivo final.

Con los modelos desarrollados, es posible analizar sistemas tan diversos como ríos, lagos, embalses o ambientes marinos, y su aplicabilidad puede ser tan amplia como el tipo de datos de los que se pueda disponer: estructuras de corrientes, perfiles de concentración, tasas de transferencia, procesos predominantes, etc. Este trabajo queda abierto a la incorporación de nuevos antecedentes científicos y al perfeccionamiento de las herramientas desarrolladas, con el fin de mejorar nuestra comprensión de los procesos que ocurren en los sedimentos y cómo éstos son capaces de incidir de manera determinante en la calidad de los recursos hídricos e incluso en la generación de compuestos que son liberados a la atmósfera. En suma, es necesario enfatizar que los procesos que ocurren en el fondo de los cauces y cuerpos de agua son de crucial importancia para la comprensión de la dinámica de los ecosistemas y el manejo apropiado de los recursos naturales.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Atkinson, J. F., Damiani, L., & Harleman, D. R. R. 1987. A comparison of velocity measurements using a laser anemometer and hot-film probe, with applications to grid-stirring entrainment experiments. *Physics of Fluids*, 30, 3290.
- Boudreau, B. P. 1997. *Diagenetic Models and their Implementation*. Springer-Verlag.
- Brumley, B. H. 1984. Turbulence measurements near free surface in stirred grid experiments. *Gas Transfer at Water Surfaces*, Brutsaert, W. & Jirka, G., pp. 83-92.
- Brumley, B. H. & Jirka, G. H. 1987. Near-surface turbulence in a grid-stirred tank. *Journal of Fluid Mechanics*, 183, 235-263.
- Brumley, B. H. & Jirka, G. H. 1988. Air-water transfer of slightly soluble gases: turbulence, interfacial processes and conceptual models. *Physicochemical Hydrodynamics*, Vol. 10, No. 3, pp. 295-319.
- Canfield, D. E., Thamdrup, B. & Hansen, J. W. 1993. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: Iron reduction, manganese reduction and sulfate reduction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 57, pp. 3867-3883.
- Chu, C-R., & Jirka, G. H. 1992. Turbulent velocity and oxygen concentration fluctuations in the surface layer of a grid-stirred tank. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(8), 1957-1968.
- Dade, W. B. 1993. Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor. *Limnology and Oceanography*, 38 (1), 52-69
- Dade, W. B., Hogg, A. J. & Boudreau, B. P. 2001. Physics of Flow above the Sediment – Water Interface. In: Boudreau, B. P. & Jørgensen, B. B. *The Benthic Boundary Layer*, pp 211-244. Oxford University Press, New York.
- De Silva, I. P. D. & Fernando, H. J. S. 1992. Some aspects of mixing in a stratified turbulent patch. *Journal of Fluid Mechanics*, 240, 601-625.
- Garban, B., Ollivon, D., Poulin, M., Gaultier, V. & Chesterikoff, A. 1995. Exchanges at the sediment-water interface in the river Sein, downstream from Paris. *Water Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 473-481.
- Gualtieri, C. 2004, Interaction between hydrodynamics and mass-transfer at the sediment-water interface. *Proceedings of the iEMSs Second Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2004)*, Osnabrück (Germany), June 14/17, 2004.

- Herzfeld, M., Hamilton, D.P., & Douglas, G.B. 2001. Comparison of a mechanistic sediment model and a water column model for hindcasting oxygen decay in benthic chambers. *Ecological Modelling*, 136, 255–267
- Hickey, C. W. 1988. Benthic chamber for use in rivers: Testing against oxygen mass balances. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 114(4), 828–845.
- Higashino, M., Gantzer, C. J. & Stefan, H. G. 2004. Unsteady diffusional mass transfer at the sediment/water interface: Theory and significance for SOD measurement. *Water Research*, 38, 1–12. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 137, No. 7, pp. 531-540.
- Higashino, M. & Stefan, H. G. 2011. Dissolved Oxygen Demand at the Sediment-Water Interface of a Stream: Near-Bed Turbulence and Pore Water Flow Effects.
- Hillmer, I. 1999. Estudio numérico sobre los procesos de mezcla y resuspensión de sedimento en cuerpos de agua estratificados y no estratificados. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Hipsey, M.R. & Hamilton, D.P. 2008. Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model: CAEDYM v3 Science Manual. Centre for Water Research Report.
- Hondzo, M. 1998. Dissolved oxygen transfer at the sediment-water interface in a turbulent flow. *Water Resources Research*, 34, pp. 3525-3533.
- Hondzo, M. & Wüest, A. 2009. Do Microscopic Organisms Feel Turbulent Flow? *Environmental Science & Technology*, vol. 43, No. 3, pp. 764-768.
- Hopfinger, E. J., & Toly, J. A. 1976. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, 78(1), 155-175.
- Hutchinson, P. A. & Webster, I. T. 1998. Solute uptake in aquatic sediment due to current-obstacle interactions. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 124, No. 5, pp. 419-426.
- Iversen, N. & Jørgensen, B. B. 1993. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: Influence of porosity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 57, pp. 571-578.
- Jørgensen, B. B., Kuenen, J. G. & Cohen, Y. 1979. Microbial Transformations of Sulfur Compounds in a Stratified Lake (Solar Lake, Sinai). *Limnology and Oceanography*, Vol. 24, No. 5 (Sep. 1979), 799-822.
- Jørgensen, B. B. & Revsbech, N. P. 1983. Colorless Sulfur Bacteria, *Beggiatoa* spp. and *Thiovolum* spp., in O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Microgradients. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 45, No. 4, p. 1261-1270.

- Jørgensen, B. B. & Boudreau, B. P. 2001. Diagenesis and sediment-water exchange. In: Boudreau, B. P. & Jørgensen, B. B. *The Benthic Boundary Layer*, pp 211-244. Oxford University Press, New York.
- Lauder, B. E. 1975. On the effects of a gravitational field on the turbulent transport of heat and momentum. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 67, part 3, pp. 569-581.
- Lee, J. H. W., Kuang, C. P., & Yung, K. S. 2000. Fluid mechanics of triangular sediment oxygen demand chamber. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 126(3), 208-216.
- MacIntyre, H. L., Geider, R. J., & Miller, D. C. 1996. Microphytobenthos: The ecological role of the 'secret garden' of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. Distribution, abundance and primary production. *Estuaries*, 19(1), 186–201.
- Mackenthun, A. A. & Stefan, H. G. 1998. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Experiments. *Journal of Hydraulic Engineering.*, vol. 124, No. 3, pp. 222-230.
- Muñoz, V. 2002. Análisis de resuspensión de sedimento por turbulencia en una columna de agua. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Niño, Y. & García, M. 1996. Experiments on particle-turbulence interactions in the near wall region of an open channel flow: implications for sediment transport. *Journal of Fluid Mechanics*, 326, pp. 285-319.
- Niño, Y., López, F., Pirard, C., Hillmer, I. & García, M.H. 2000. Modelación numérica de procesos de mezcla turbulentos inducidos por el viento en cuerpos de agua estratificados. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XV, Num. 1, pp. 13-25.
- O'Connor, D. J. 1995. Inner region of smooth pipes and open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, 555–560.
- Orlins, J. J. 1996. Construction and calibration of a sediment resuspension and chemical flux chamber driven by an Oscillating grid. Master of Science Degree Project Paper, University of Minnesota.
- Orlins J. J. & Gulliver, J. S. 2000. Measurements of free surface turbulence. Fourth International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, Miami Beach, Florida.
- Patankar, S. V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corp., New York.
- Reiher, C., de la Fuente, A., Niño, Y., & Contreras, M. 2005. Numerical and field study of oxygen exchange at sediment/water interface of shallow flow in salt lake of northern Chile. XXXI IAHR Congress. Seoul, Korea.
- Rodi, W. 1984. *Turbulence Models and their application in hydraulics*. IAHR Monograph.

- Rodríguez, E. 2005. Flamencos Altoandinos en el Norte de Chile: Estado Actual y Plan de Conservación. Corporación Nacional Forestal, CONAF. Antofagasta, Chile.
- Rouse, H., & Dodu, J. 1955. Diffusion turbulente à travers une discontinuité de densité. *La Houille Blanche*, 4, 522-532.
- Salamanca, M. 2000. Caracterización Geoquímica y Microbiológica de los Sedimentos del Salar Punta Negra y Salar de Atacama. Proyecto de investigación. Universidad de Concepción.
- Saraiva, R. 2003. Columna agitada por grillas verticales para el estudio de fenómenos de transporte y mezcla en flujos turbulentos. Diseño, construcción y puesta en marcha. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Spalding, D. B. 1976. Basic Equations of Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer, and Procedures for Their Solution. Imperial College, Heat Transfer Section, Report HTS/76/6.
- Spalding, D. B. 1991. The PHOENICS Reference Manual. CHAM Reference Manual, TR/200A.
- Steinberger, N. & Hondzo, M. 1999. Diffusional mass transfer at sediment-water interface. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 125, No. 2, pp. 192-200.
- Svensson, U. 1986. Program for Boundary Layers in the Environment. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, S-601 76.
- Svensson, U. & Rahm, L. 1988. Modeling the near-bottom region of the benthic boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, 6909-6915.
- Tsai, C. H. & Lick, W. 1986. A portable device for measuring sediment resuspension. *Journal of Great Lakes Research*, 12(4), 314-321.
- Thompson, B. H., & Turner, J. S. 1975. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *Journal of Fluid Mechanics*, 67(2), 349-368.
- Vila, I., Contreras, M., Montecino, V., Pizarro, J. & Adams, D. 2000. Rapel: A 30 years temperate reservoir. Eutrophication or contamination? *Archiv für Hydrobiologie Special Issues Advanced Limnology*, 55, pp. 31-44
- Wu, W., Rodi, W. & Wenka, T. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 1, pp. 4-15.

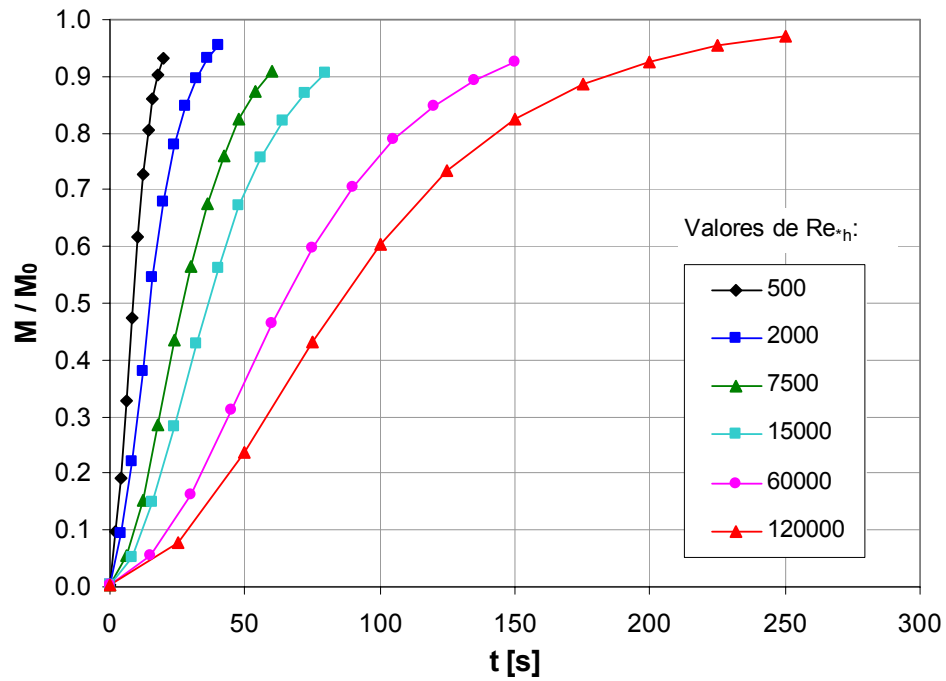
## ANEXO A.

### Gráficos complementarios de simulaciones numéricas de difusión de masa desde la interfaz agua – sedimento.

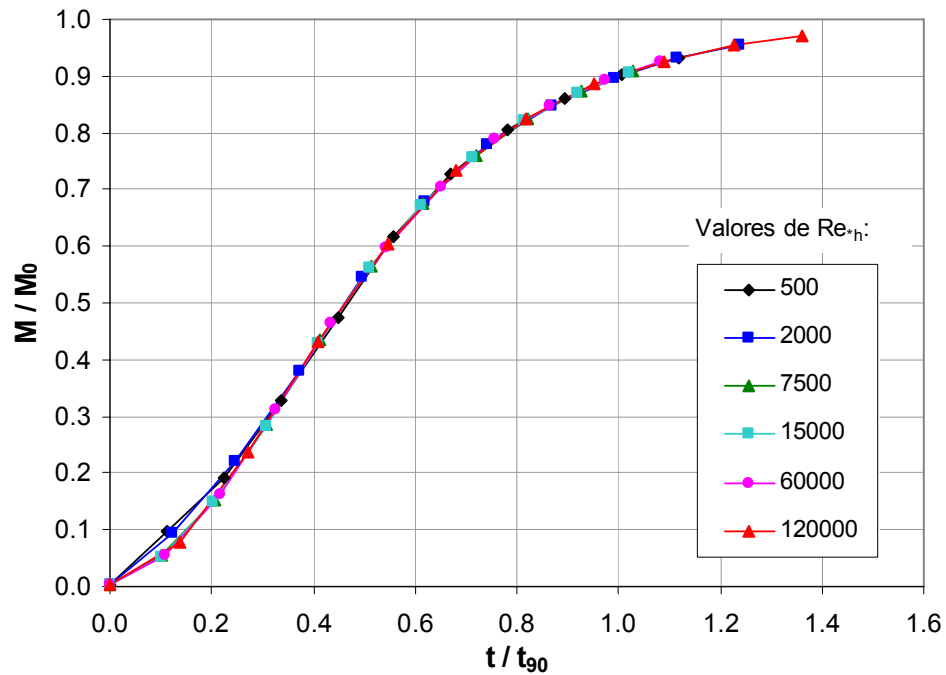
Las figuras a continuación presentan un mayor detalle de los casos modelados en los capítulos 4 y 5, para condiciones sin y con estratificación respectivamente, de la evolución de la masa  $M$  difundida desde el lecho hacia la columna de agua, en función del tiempo ( $t$ ). En el cuerpo principal se encuentra principalmente desarrollado el análisis en torno al colapso de estas curvas (difusión de masa a lo largo del tiempo) en curvas únicas, por lo que en este Anexo se entrega un mayor detalle de los casos simulados, previo a la adimensionalización y una vez aplicada la adimensionalización con respecto a los parámetros  $M_0$  y  $t_{90}$  (masa máxima al alcanzarse igualdad de concentración en la columna de agua y los sedimentos, y tiempo en que se alcanza un 90% de la masa  $M_0$ , respectivamente).

El contenido de este Anexo está constituido de la siguiente manera:

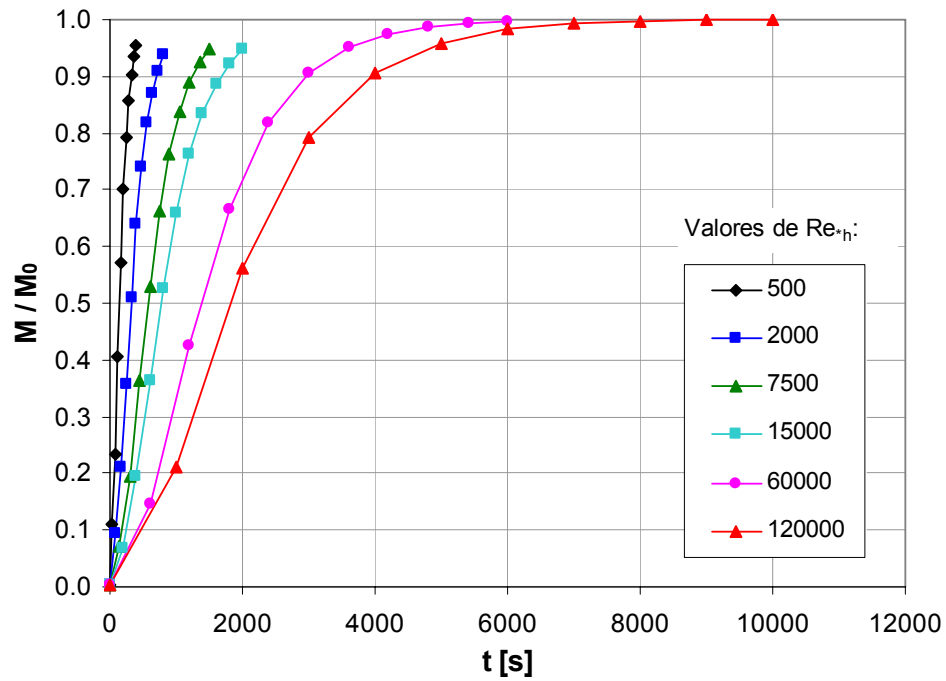
- Figuras A.1 a A.6: Sin estratificación, flujo inducido por gravedad.
- Figuras A.7 a A.12: Sin estratificación, flujo inducido por viento.
- Figuras A.13 a A.20: Con estratificación, flujo inducido por gravedad.
- Figuras A.21 a A.28: Con estratificación, flujo inducido por viento.



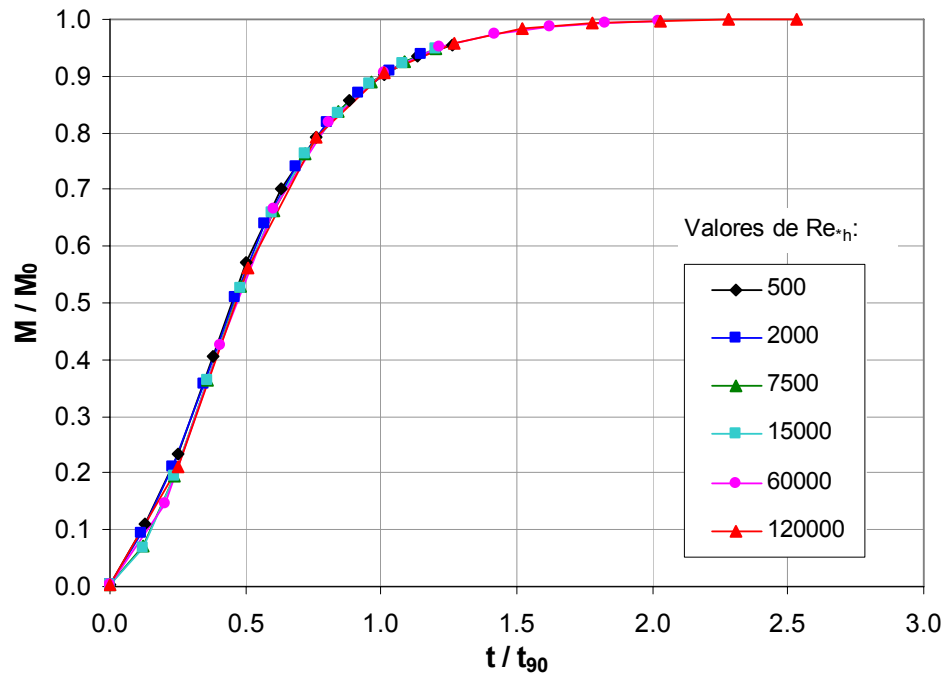
**Figura A.1** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, sin estratificación, para un valor de  $Fr=0.1$ .



**Figura A.2** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, sin estratificación, para un valor de  $Fr=0.1$ .

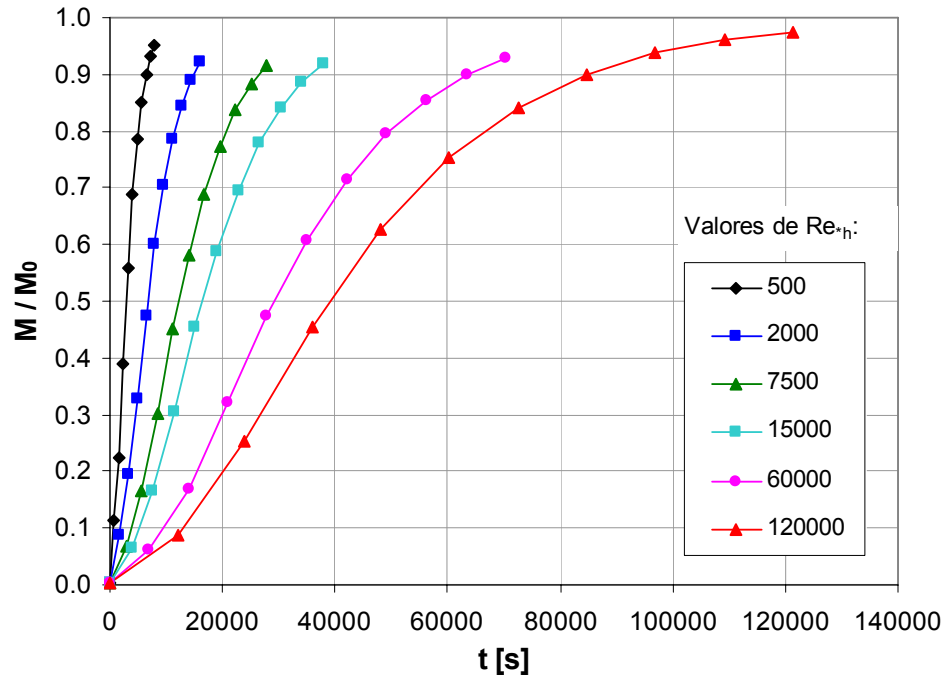


**Figura A.3** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, sin estratificación, para un valor de  $Fr=0.01$ .

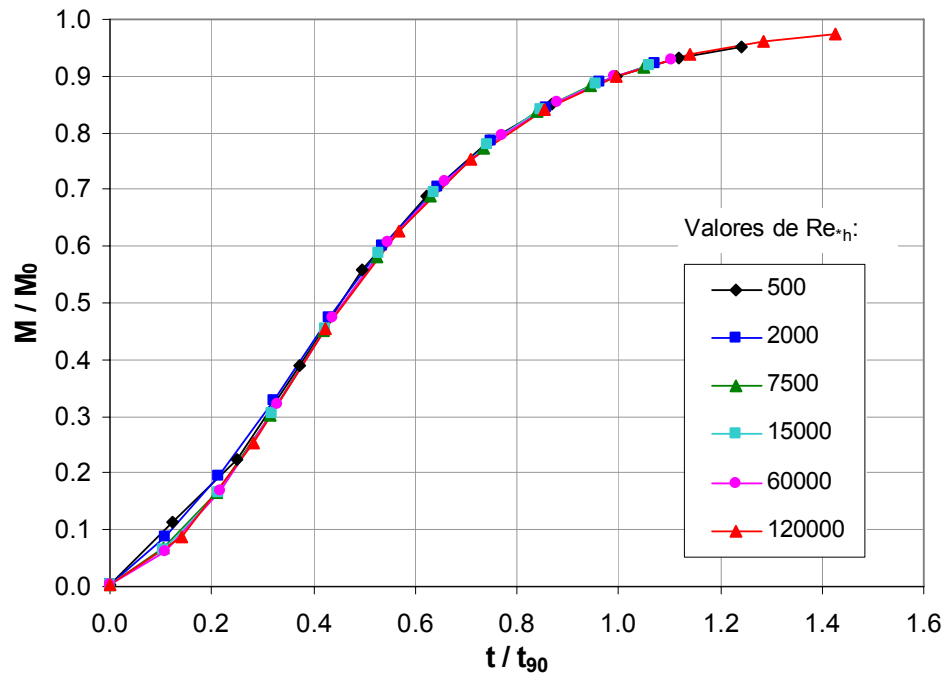


**Figura A.4** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, sin estratificación, para un valor de  $Fr=0.01$ .

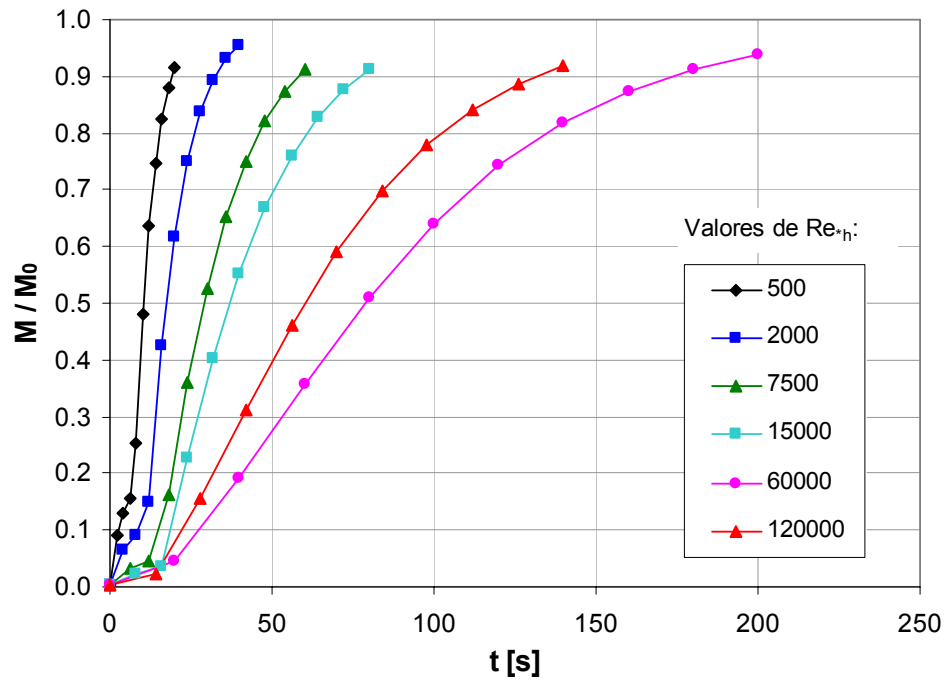




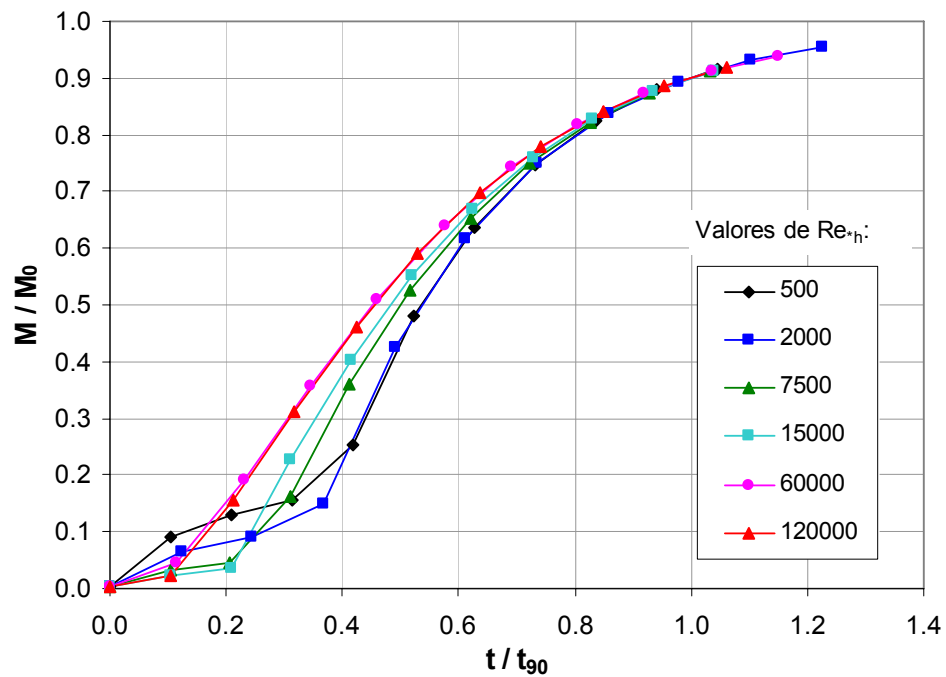
**Figura A.5** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, sin estratificación, para un valor de  $Fr=0.001$ .



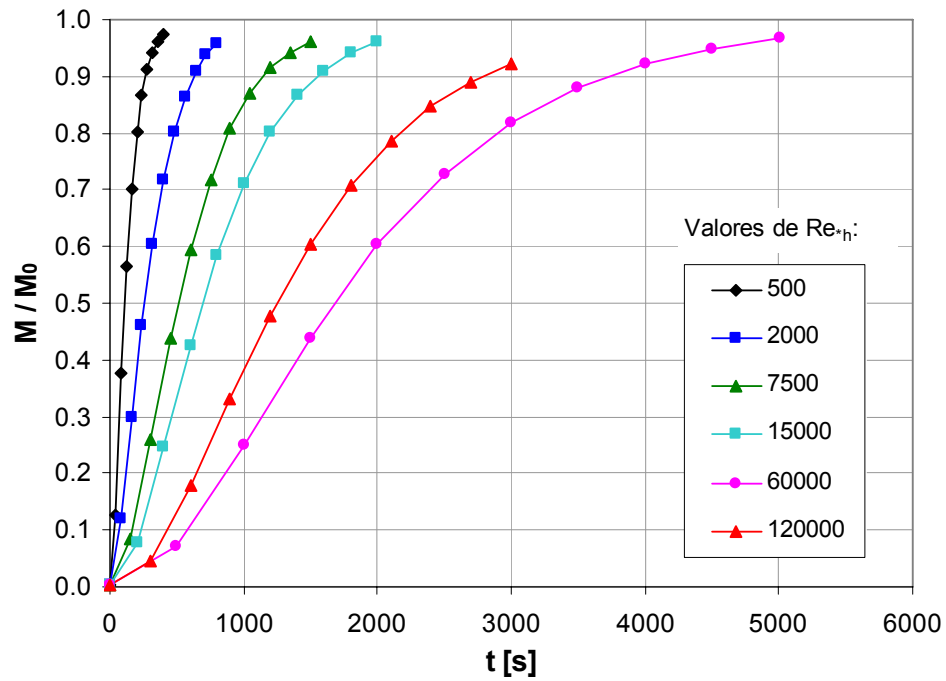
**Figura A.6** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, sin estratificación, para un valor de  $Fr=0.001$ .



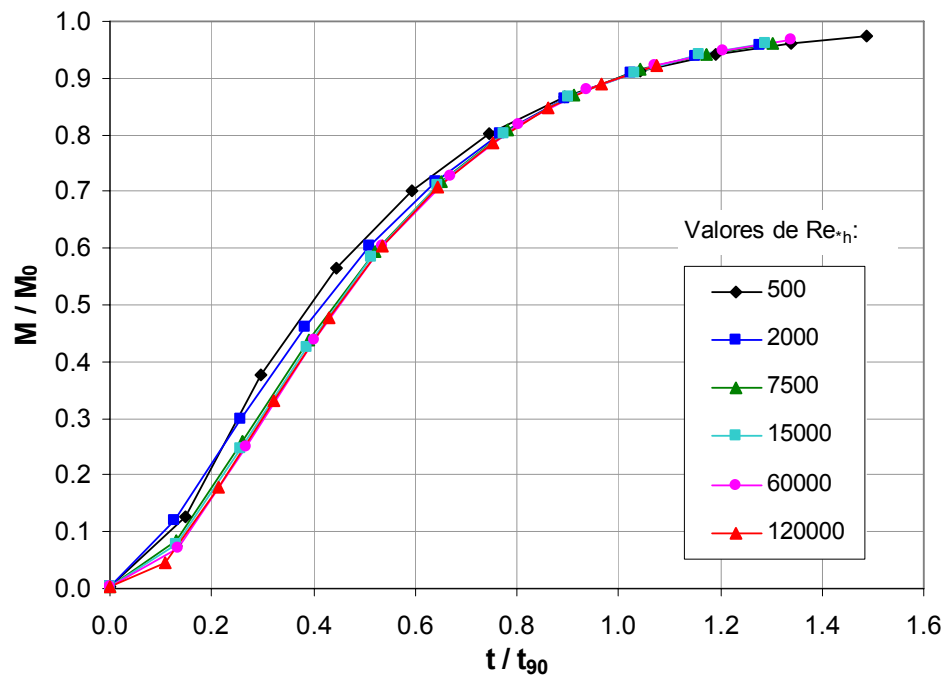
**Figura A.7** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, sin estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.1$ .



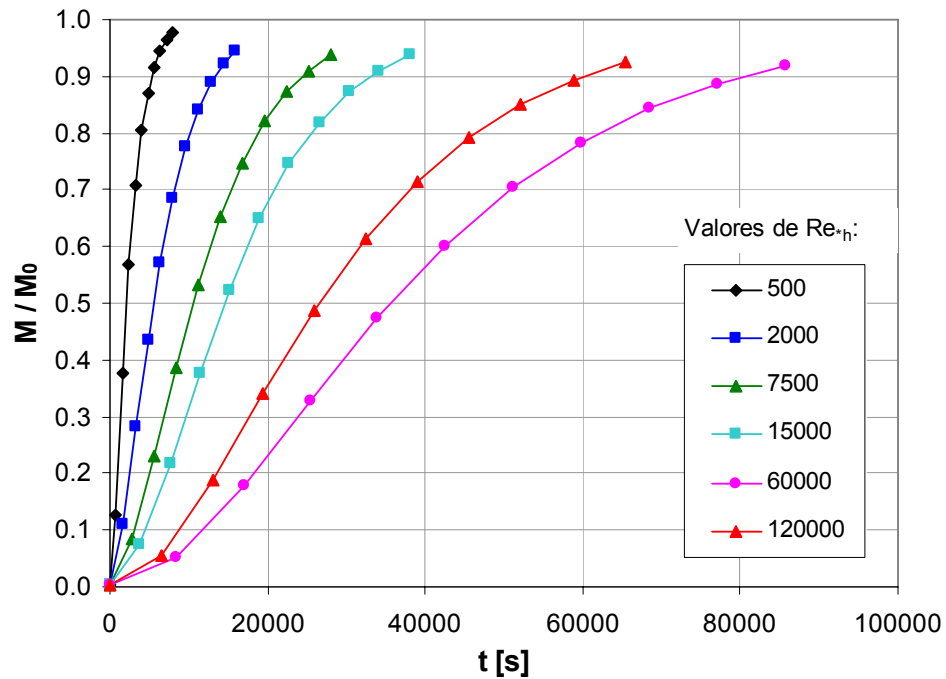
**Figura A.8** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, sin estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.1$ .



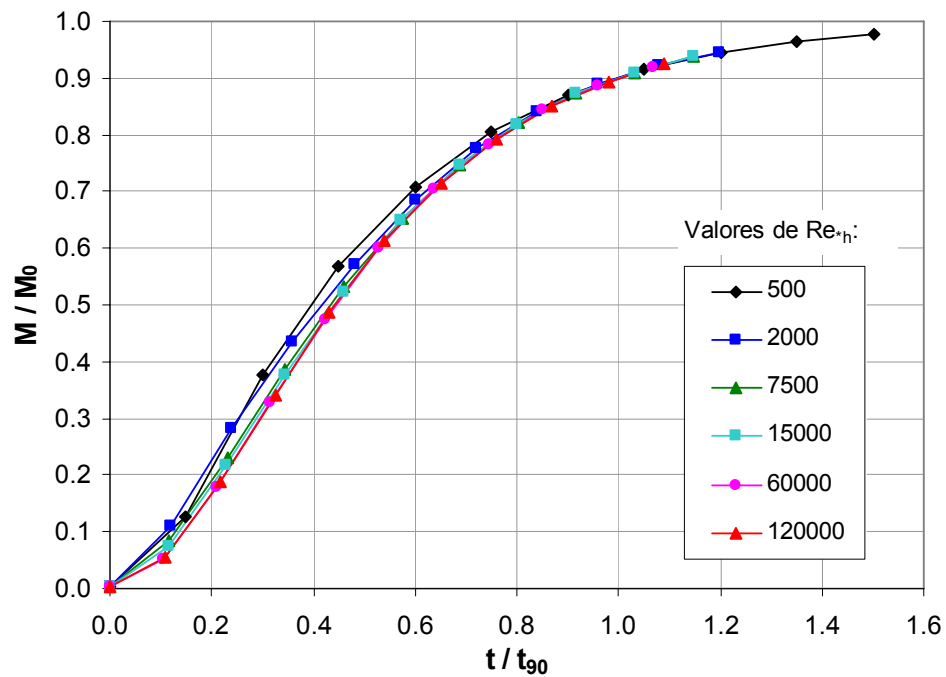
**Figura A.9** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, sin estratificación, para un valor de  $Fr_*=0.01$ .



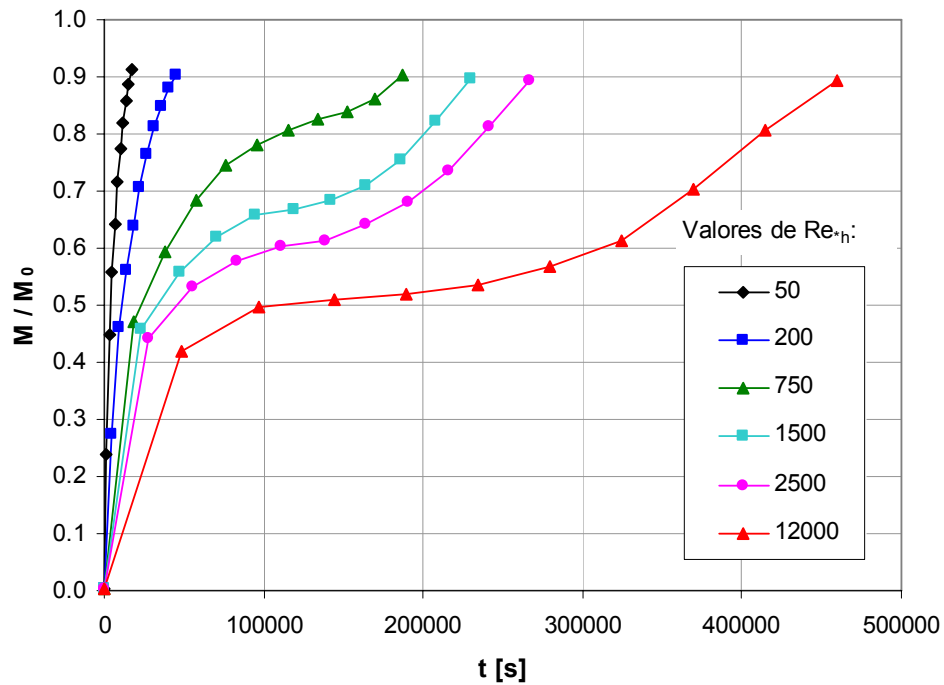
**Figura A.10** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, sin estratificación, para un valor de  $Fr_*=0.01$ .



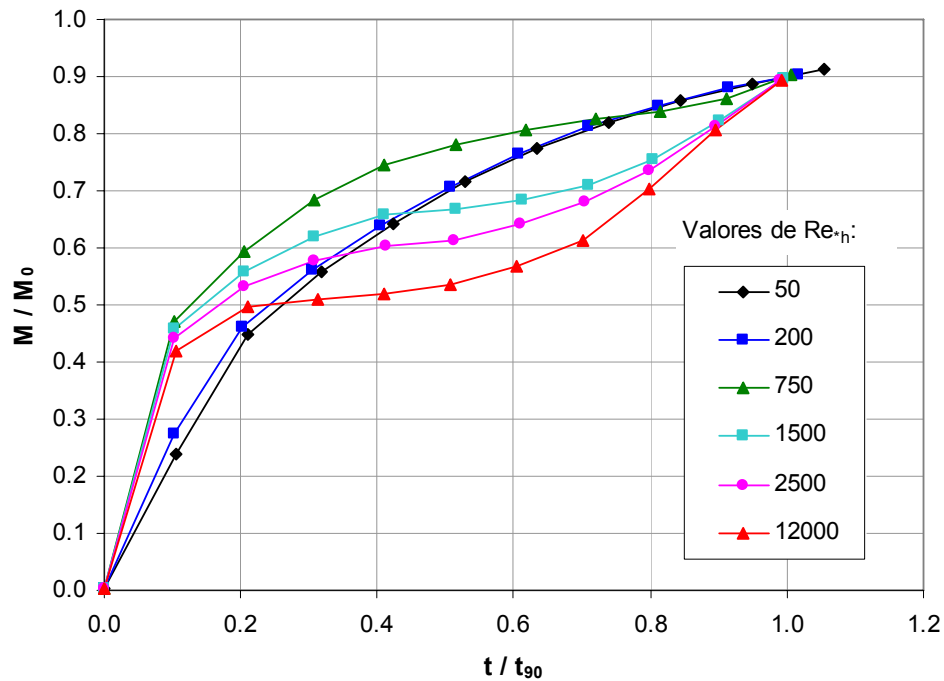
**Figura A.11** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, sin estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.001$ .



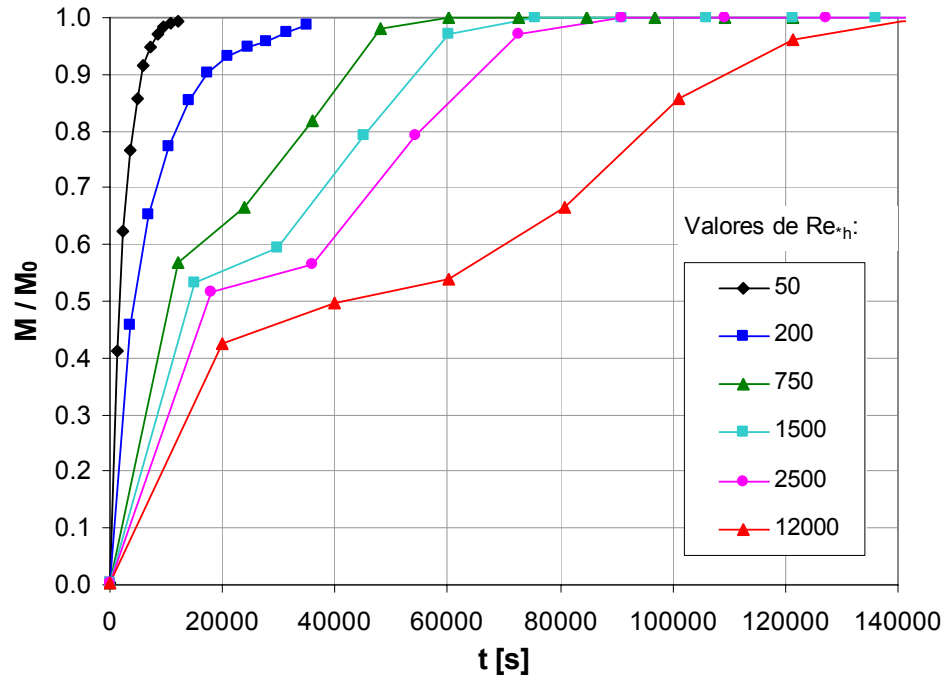
**Figura A.12** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, sin estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.001$ .



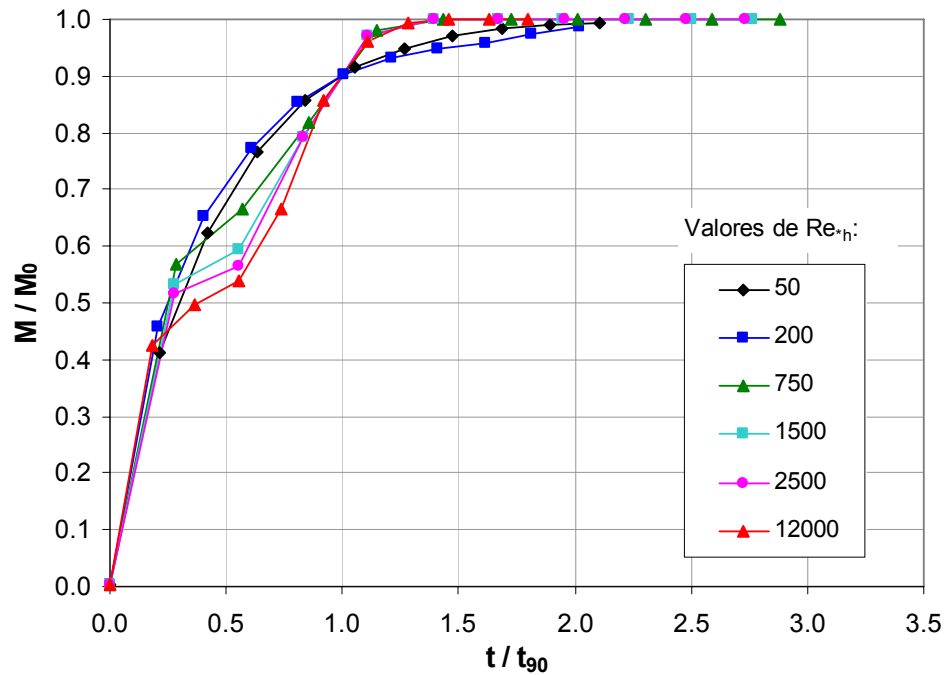
**Figura A.13** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.001$  ( $Ri_0=155$ ).



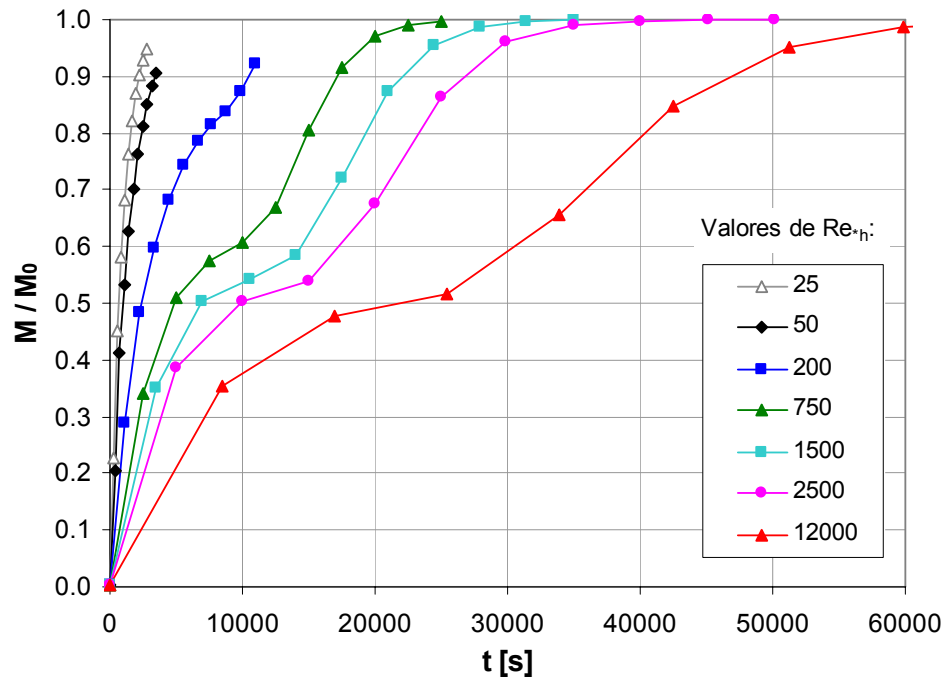
**Figura A.14** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.001$  ( $Ri_0=155$ ).



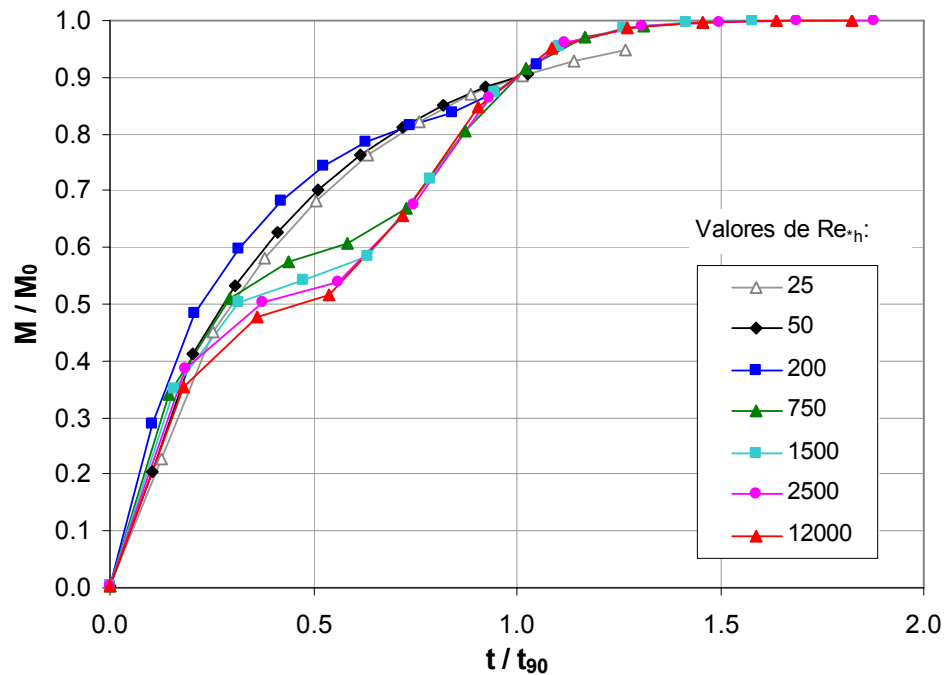
**Figura A.15** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.002$  ( $Ri_{+0}=77$ ).



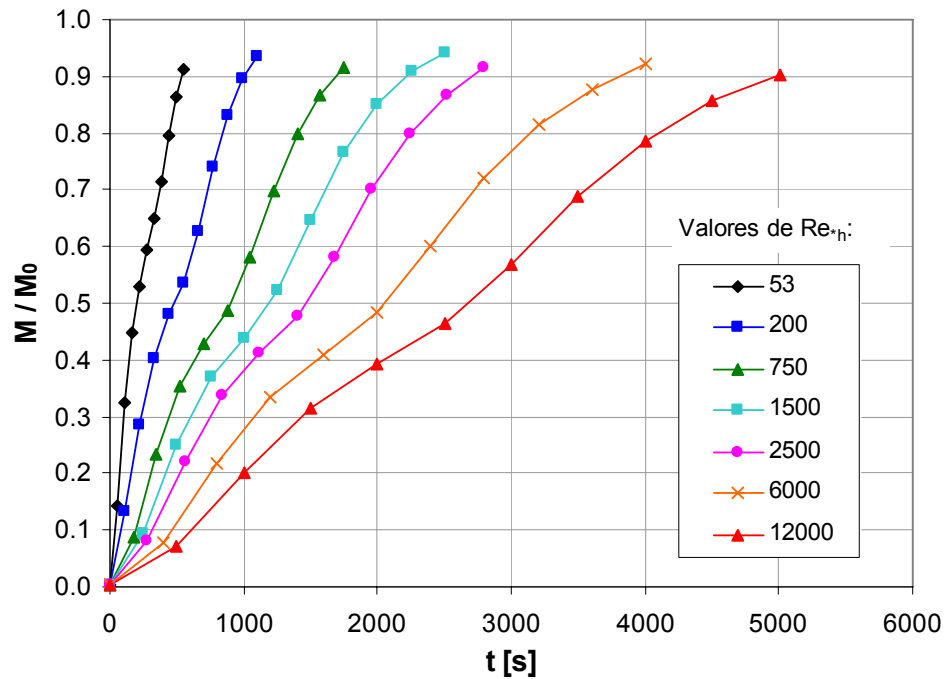
**Figura A.16** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.002$  ( $Ri_{+0}=77$ ).



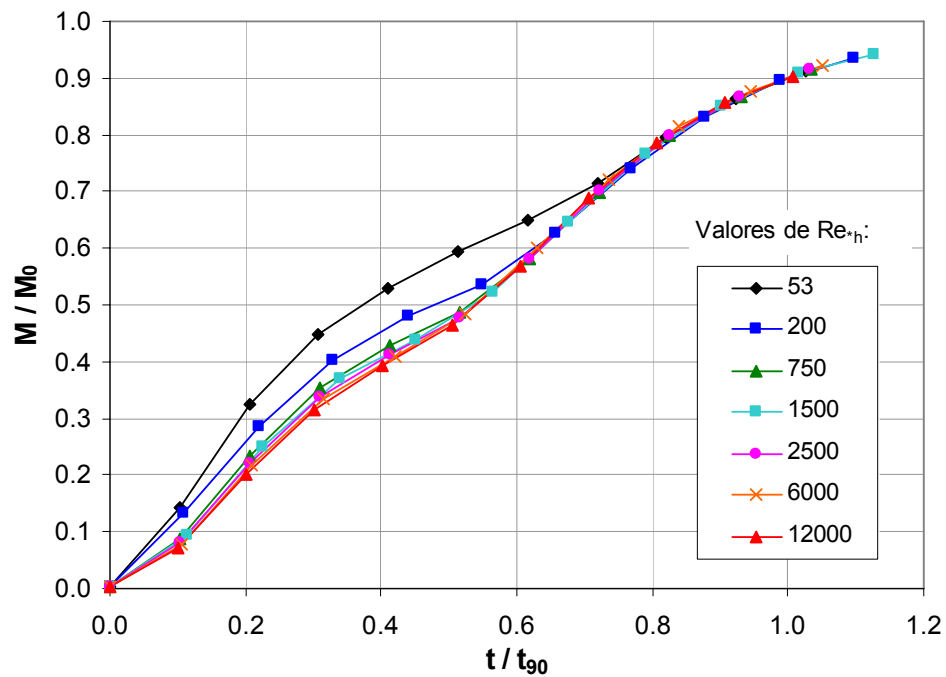
**Figura A.17** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.003$  ( $Ri_0=52$ ).



**Figura A.18** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.003$  ( $Ri_0=52$ ).

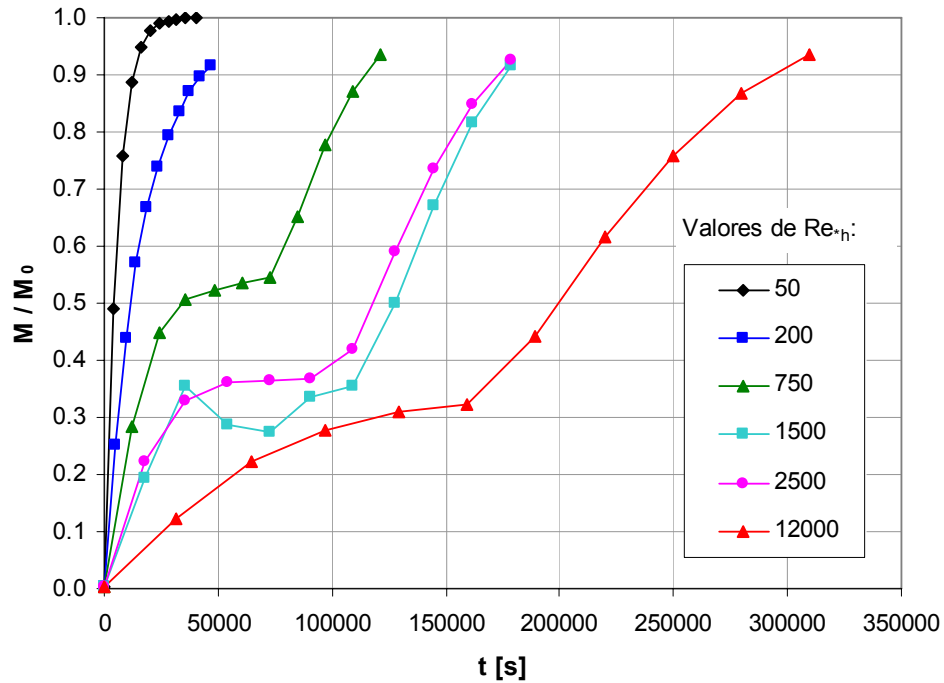


**Figura A.19** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.01$  ( $Ri_0=15$ ).

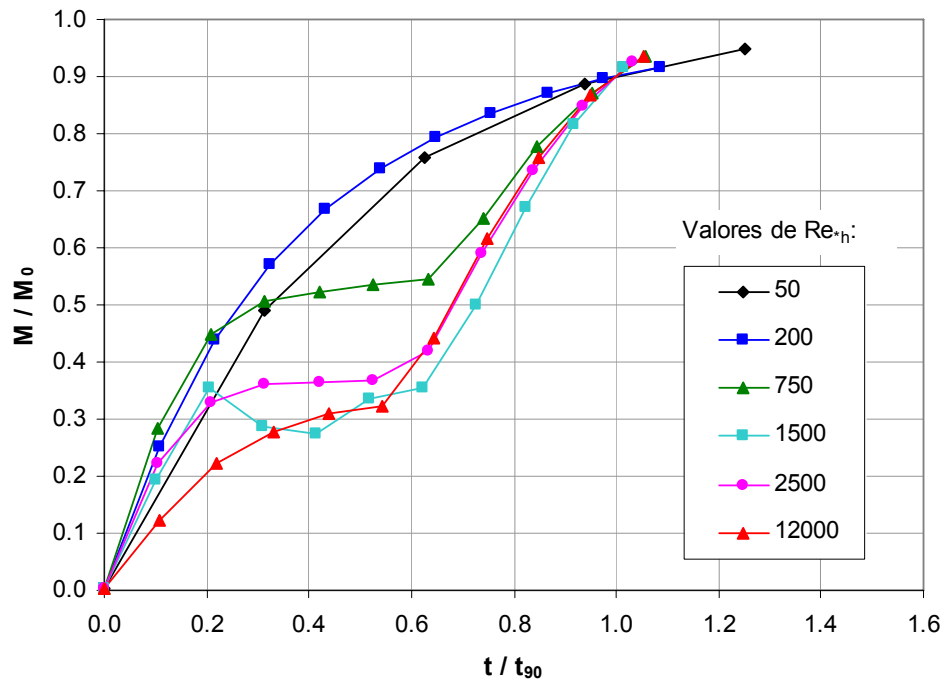


**Figura A.20** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por gravedad, con estratificación, para un valor de  $Fr^*=0.01$  ( $Ri_0=15$ ).

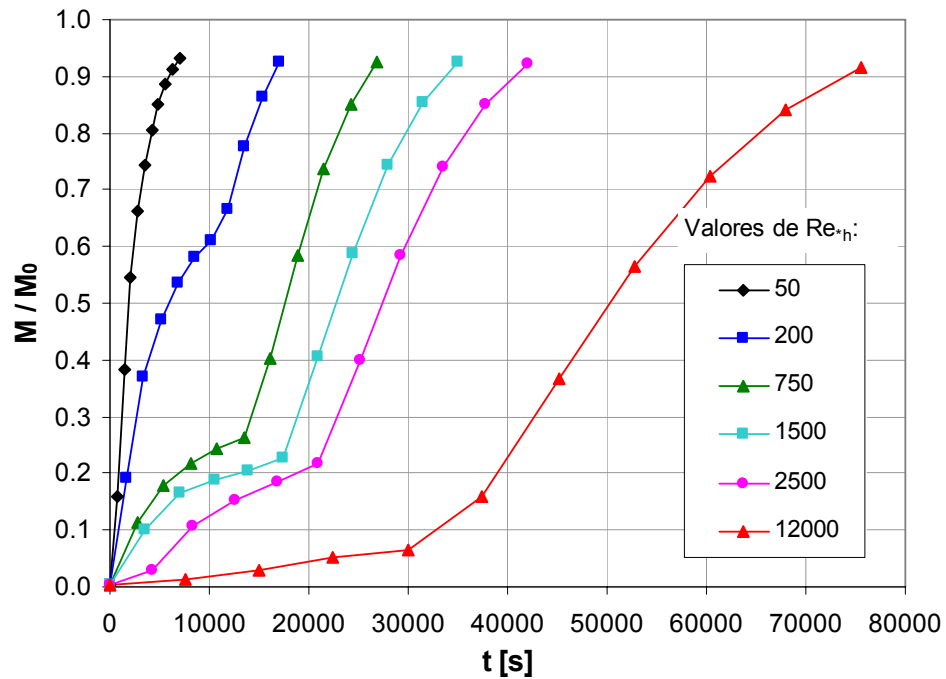




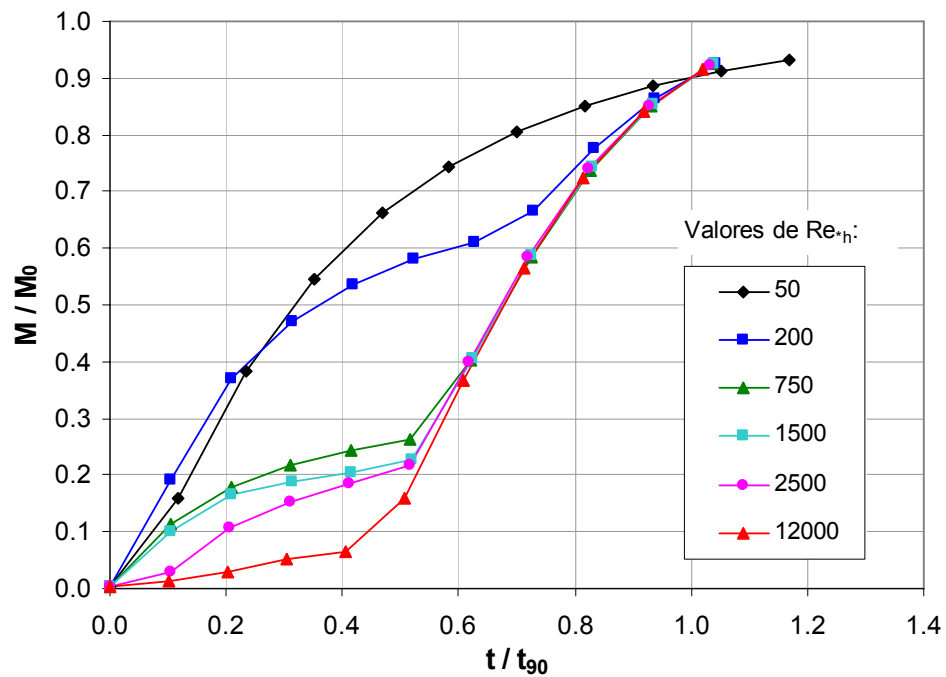
**Figura A.21** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.001$  ( $Ri_0=155$ ).



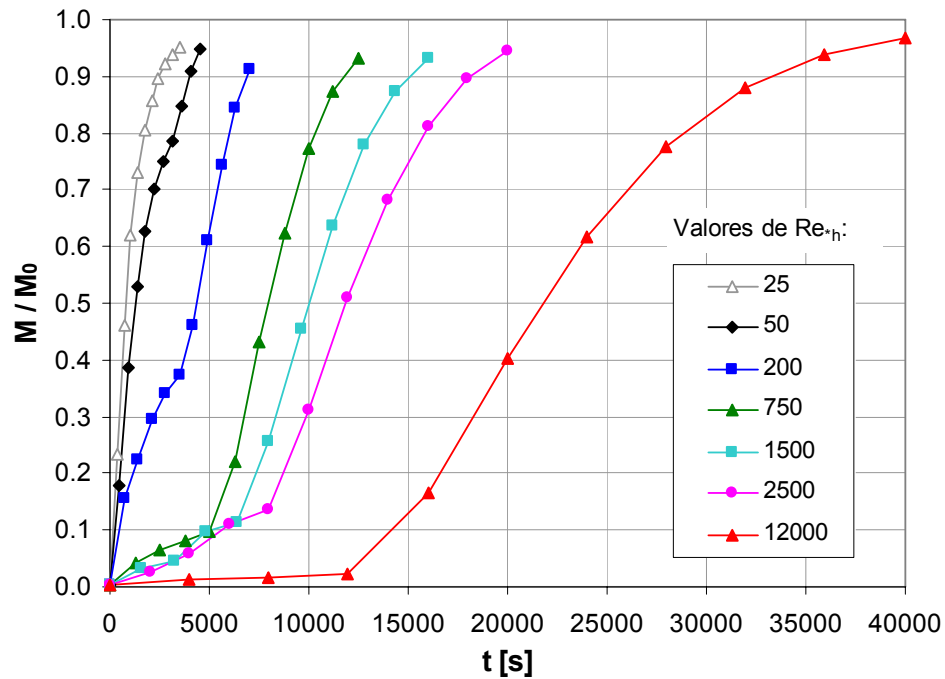
**Figura A.22** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.001$  ( $Ri_0=155$ ).



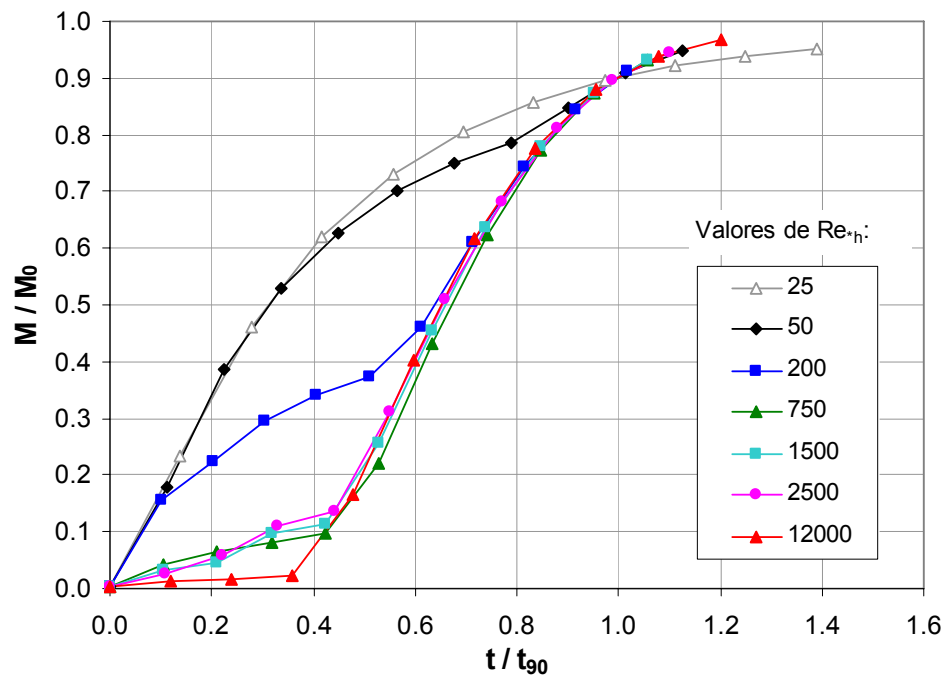
**Figura A.23** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.002$  ( $Ri_0=77$ ).



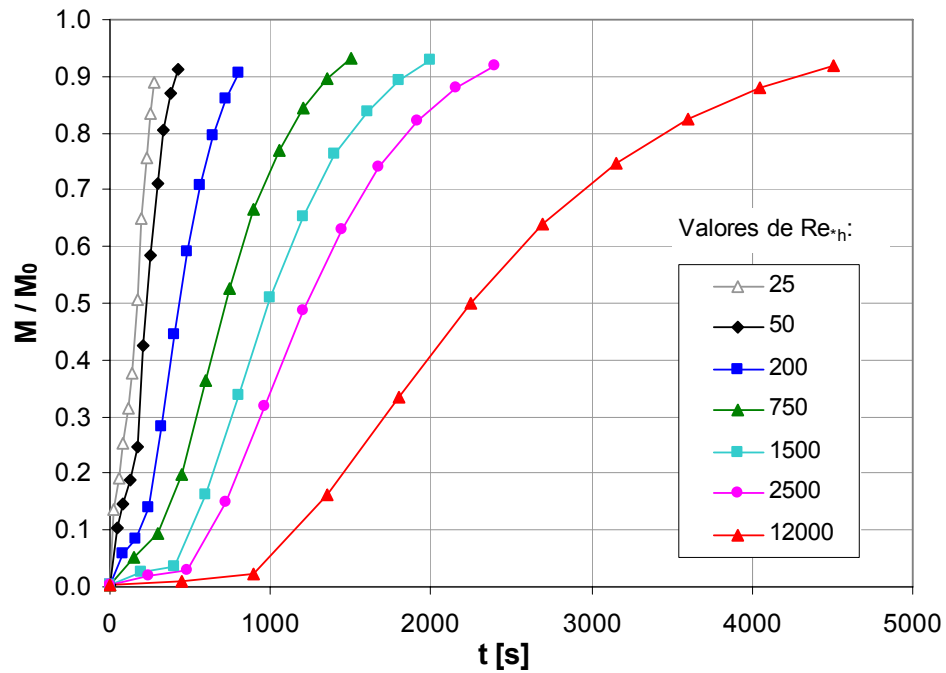
**Figura A.24** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.002$  ( $Ri_0=77$ ).



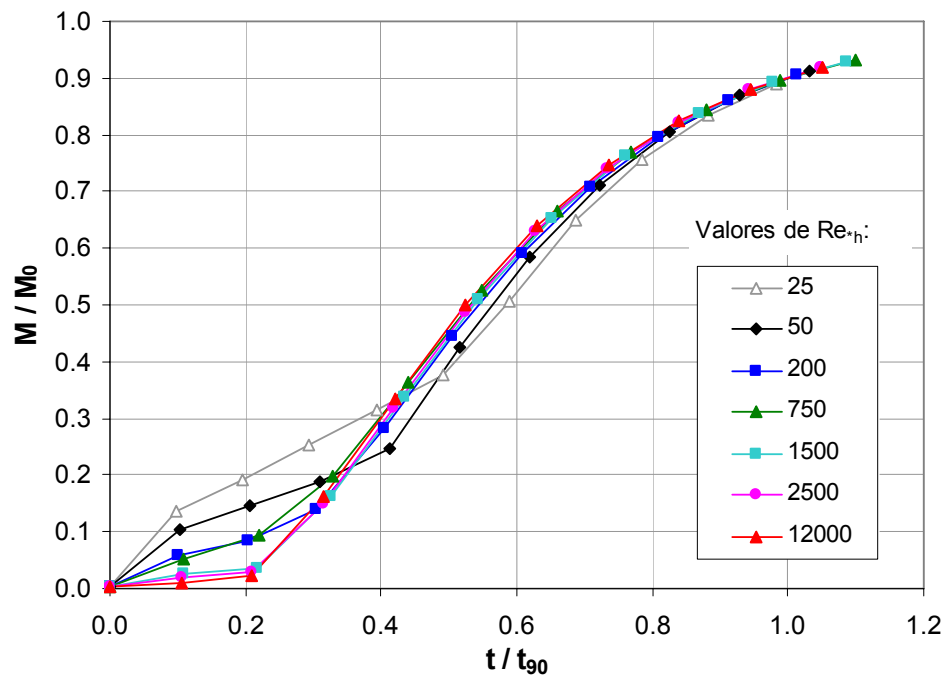
**Figura A.25** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.003$  ( $Ri_0=52$ ).



**Figura A.26** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.003$  ( $Ri_0=52$ ).



**Figura A.27** Evolución de la mezcla en función del tiempo ( $t$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.01$  ( $Ri_0=15$ ).



**Figura A.28** Evolución de la mezcla en función del tiempo adimensionalizado ( $t/t_{90}$ ), flujo inducido por viento, con estratificación, para un valor de  $Fr=0.01$  ( $Ri_0=15$ ).

## Anexo B.

### **Puesta en marcha de la instalación experimental en dependencias del Laboratorio de Hidráulica F. J. Domínguez.**

La instalación experimental empleada en esta investigación fue originalmente instalada en un recinto de propiedad de la Universidad de Chile, en el cual se recibió temporalmente oficinas e instalaciones correspondientes a la división de Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil. Por ello, algunos aspectos de la instalación no fueron controlados en su totalidad, en particular el tema de las vibraciones de los motores, que se transmitían a la columna experimental y producían cierta distorsión a las medidas, especialmente al fijar los motores en altas velocidades.

Por ello, se requirió que, al momento de trasladar esta instalación a su destino final en el Laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, se hiciesen medidas de prueba para garantizar al menos cuatro aspectos del funcionamiento de la instalación:

**Variaciones del nivel de agua:** Fue necesario mejorar el sistema de sellos de la instalación, particularmente en el sellado con silicona de las paredes de acrílico de la columna de agua, y el sello de goma (o-ring) en la ubicación de los vástagos que mueven las grillas de oscilación.

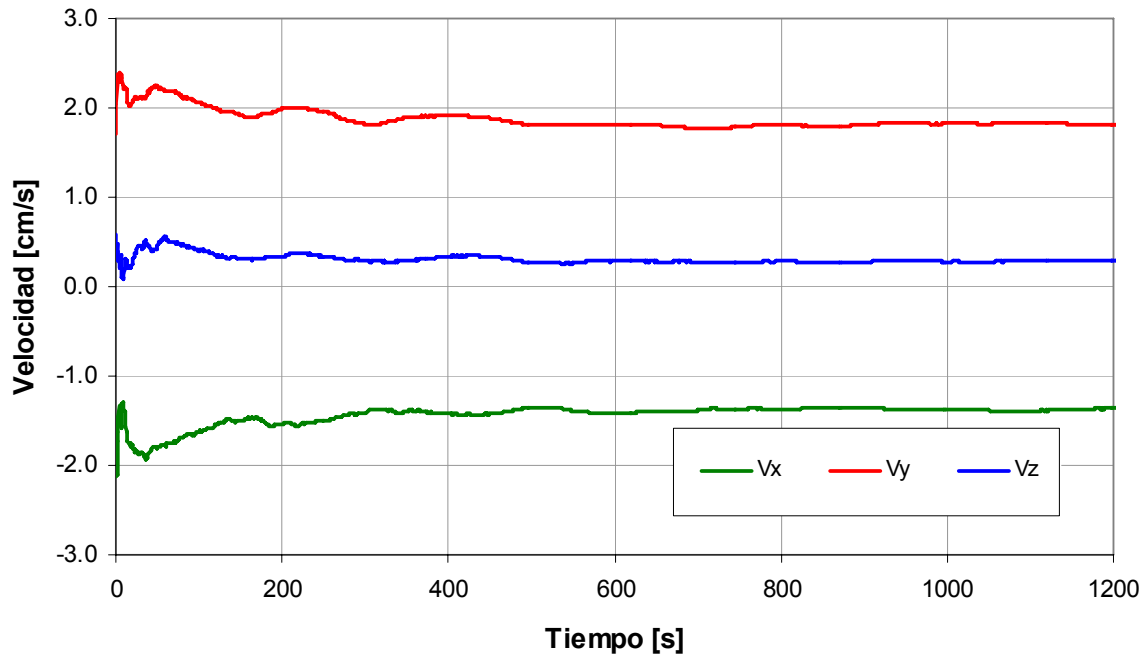
**Vibraciones transmitidas desde el sistema de motores a la columna de agua:** Fue necesario realizar un nuevo anclaje y nivelación de las estructuras soportantes de ambas componentes de la instalación experimental (motores y columna de agua).

**Tiempo de convergencia de las mediciones:** originado en los factores anteriores y en la falta de partículas en suspensión suficientes en la columna de agua, las mediciones podían tardar mucho en alcanzar valores estables de velocidades medias y velocidades RMS. Por lo tanto, las correcciones empleadas para subsanar los puntos previos ayudaron también con este tema, así como aportó el uso de una solución de seeding, neutral para las medidas de conductividad pero conteniendo partículas suspendidas que mejoraban los índices de correlación y el factor SNR. Las Figuras B.1 a B.16 muestran los resultados obtenidos en las experiencias de prueba, una vez aplicadas las medidas correctivas anteriormente descritas, obteniéndose en particular una convergencia de las mediciones de velocidades RMS dentro de los primeros 5 a 10

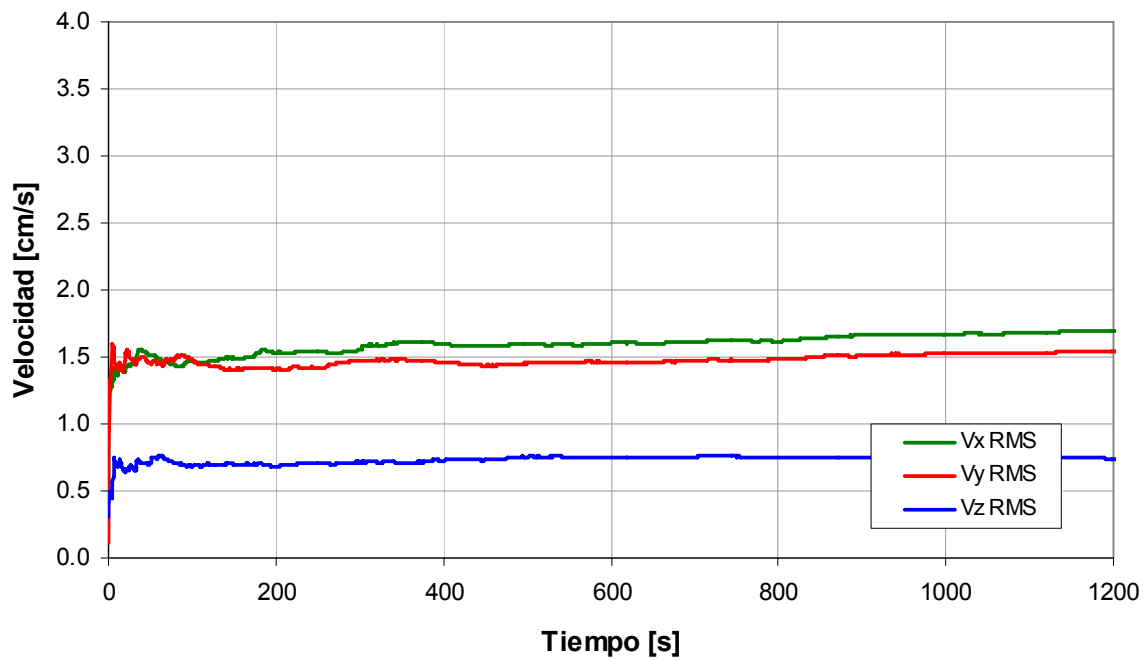
minutos, en tanto que las velocidades medias convergieron en tiempos de hasta 20 minutos. Es importante destacar que las velocidades RMS son empleadas para el cálculo de la energía cinética turbulenta, por lo que en lo que concierne a mediciones de perfiles de turbulencia, el tiempo de convergencia es particularmente favorable.

**Isotropía y homogeneidad de la turbulencia:** Ante las nuevas condiciones de instalación, fue preciso revisar la distribución espacial de la energía cinética turbulenta, de manera de garantizar que aún se conserva el propósito fundamental del montaje: proveer una distribución vertical de turbulencia homogénea e isotrópica, sin que la distribución de la energía cinética turbulenta sufra variaciones importantes en el plano  $x$ - $y$ . La Figura B.17 muestra como la energía cinética turbulenta no presenta significativas variaciones al ser medida en diferentes puntos de un mismo plano, a diferentes alturas medidas desde el lecho, en tanto que la Figura B.18 muestra perfiles verticales medidos en diferentes posiciones  $(x,y)$  fijas, resultando en perfiles similares, en magnitudes y distribución vertical (considerando que existen variaciones verticales adicionales asociadas a la forma de la grilla sobre la estructura de la turbulencia).

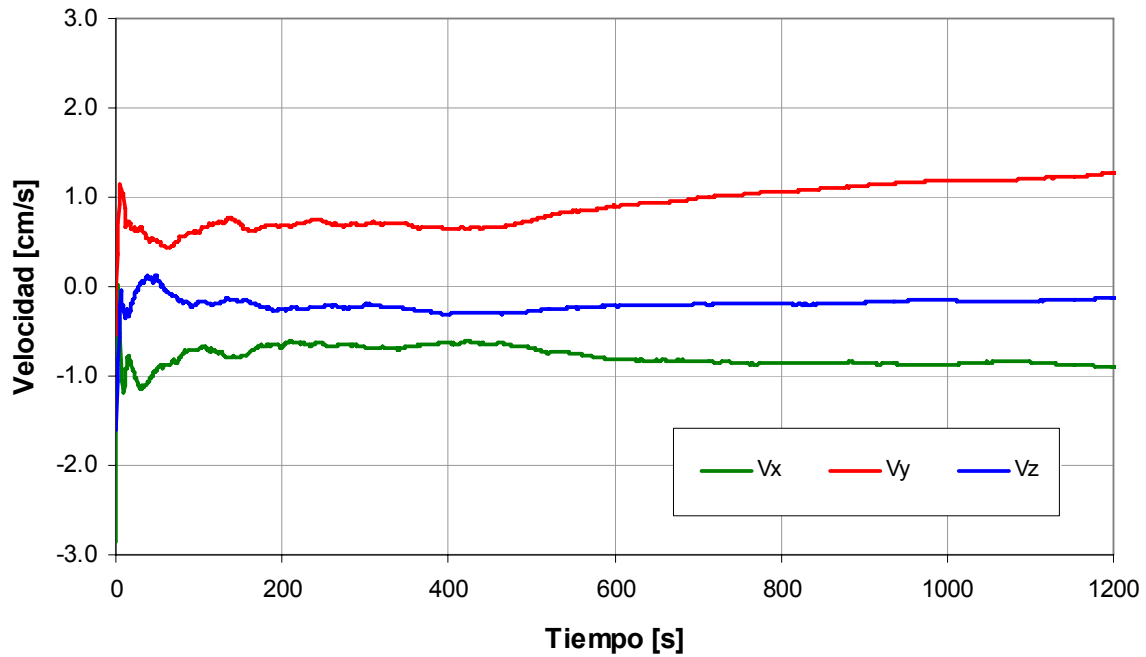
Las mediciones de prueba mostradas a continuación verifican que se cumple la distribución vertical de la turbulencia homogénea e isotrópica en la medición de varios planos  $x$ - $y$ , con tiempos de convergencia de los indicadores de velocidad que rondan los 20 minutos, y observándose un crecimiento desde el fondo de la energía cinética turbulenta, conforme a lo que se espera para la conformación del campo de velocidades para instalaciones agitadas por grillas.



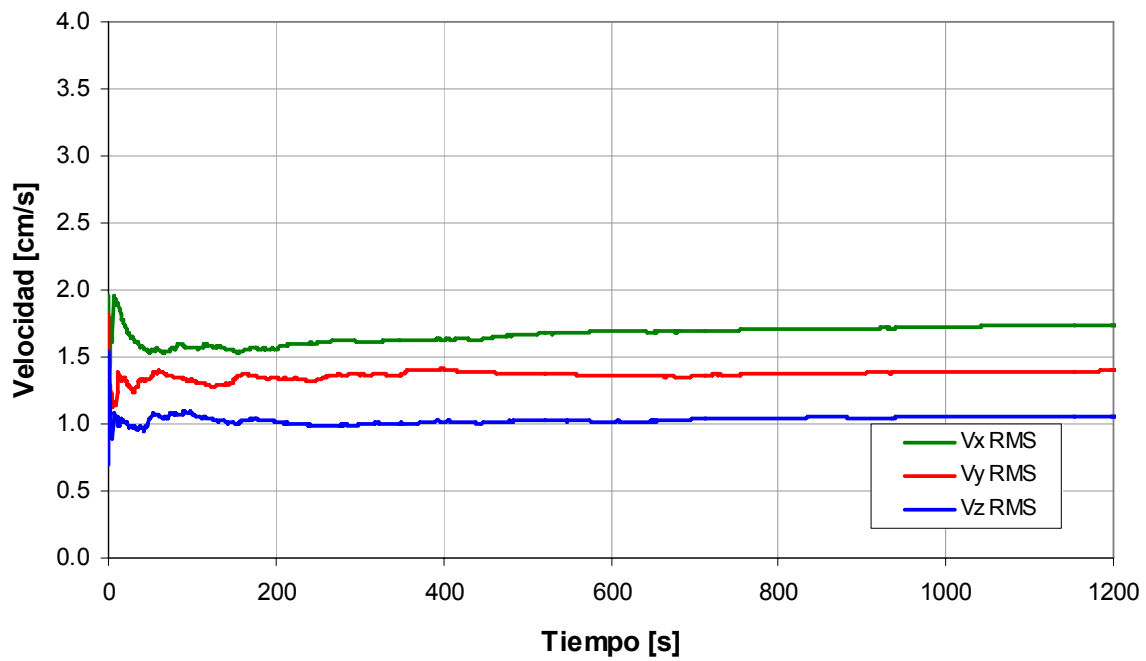
**Figura B.1** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 3$  [Hz].



**Figura B.2** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 3$  [Hz].

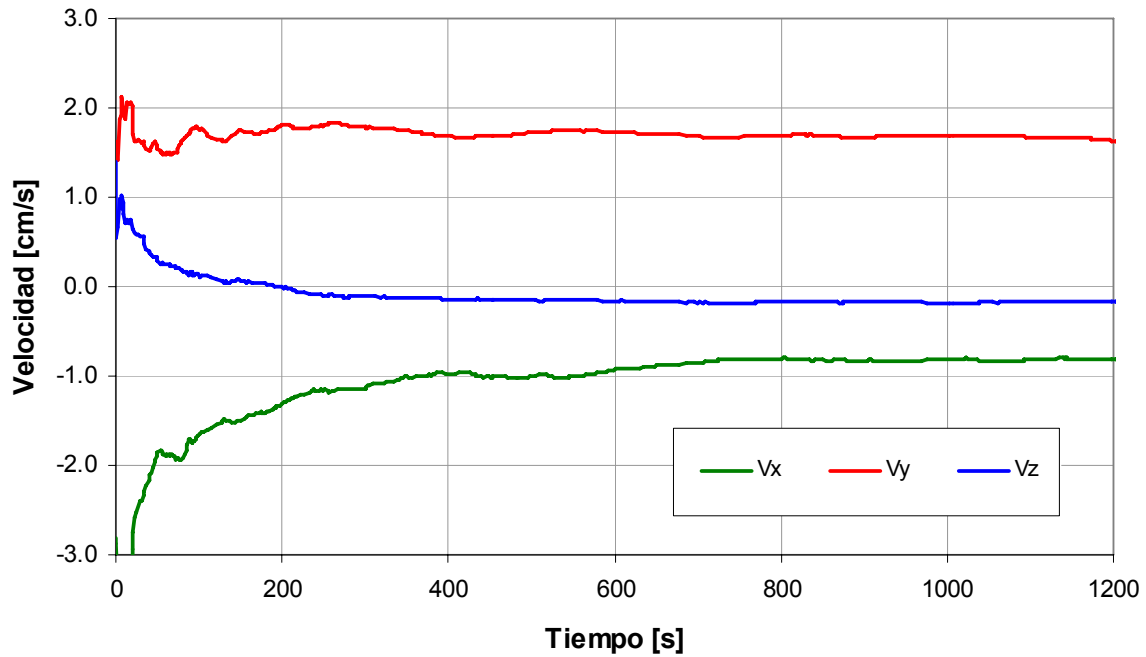


**Figura B.3** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 4$  [Hz].

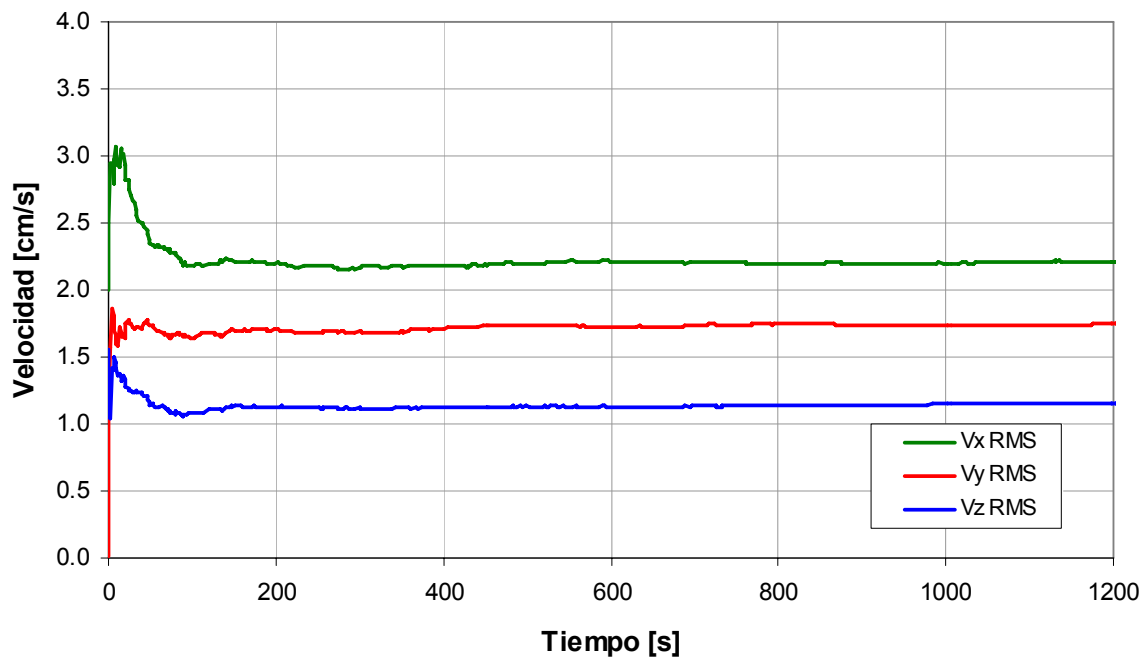


**Figura B.4** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 4$  [Hz].

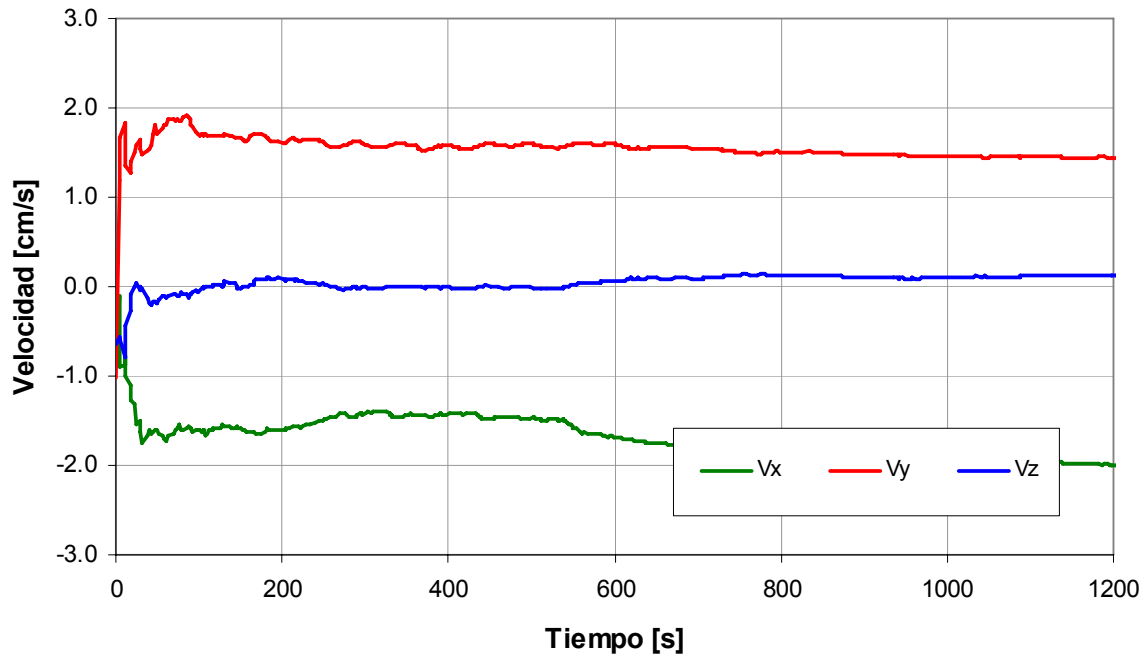




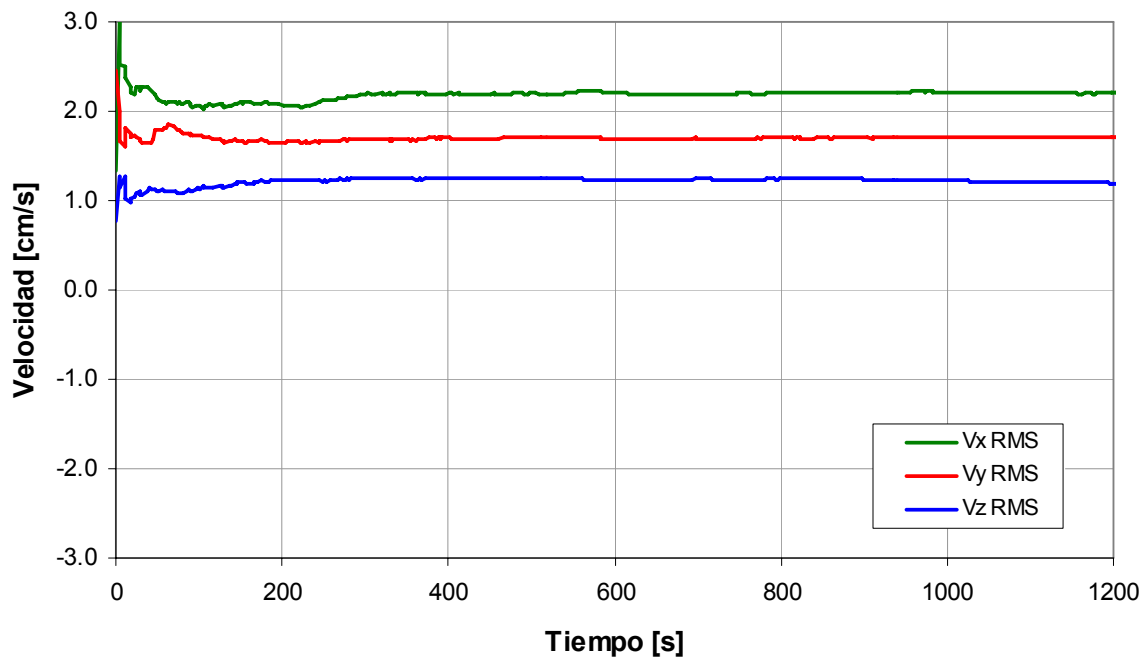
**Figura B.5** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 5$  [Hz].



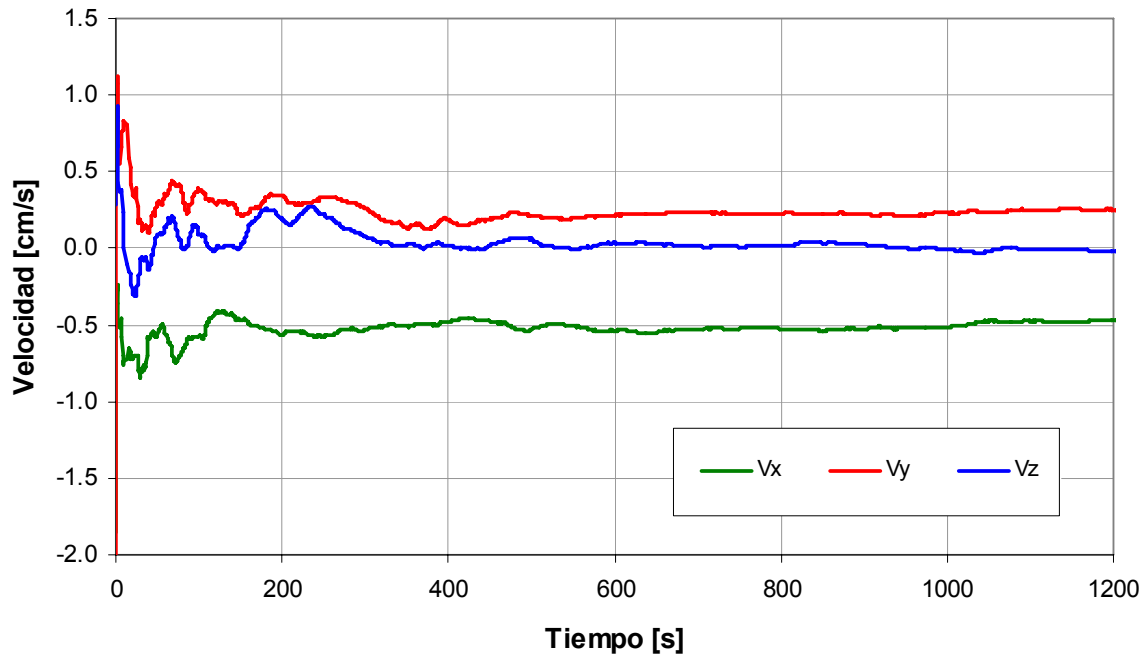
**Figura B.6** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 5$  [Hz].



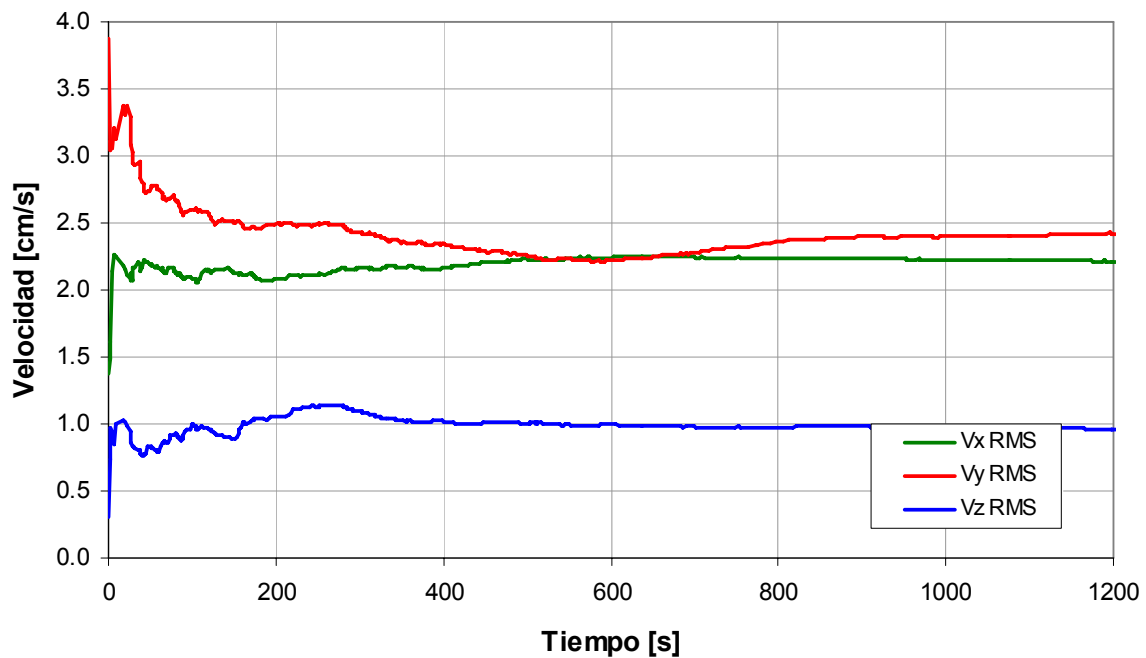
**Figura B.7** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 6$  [Hz].



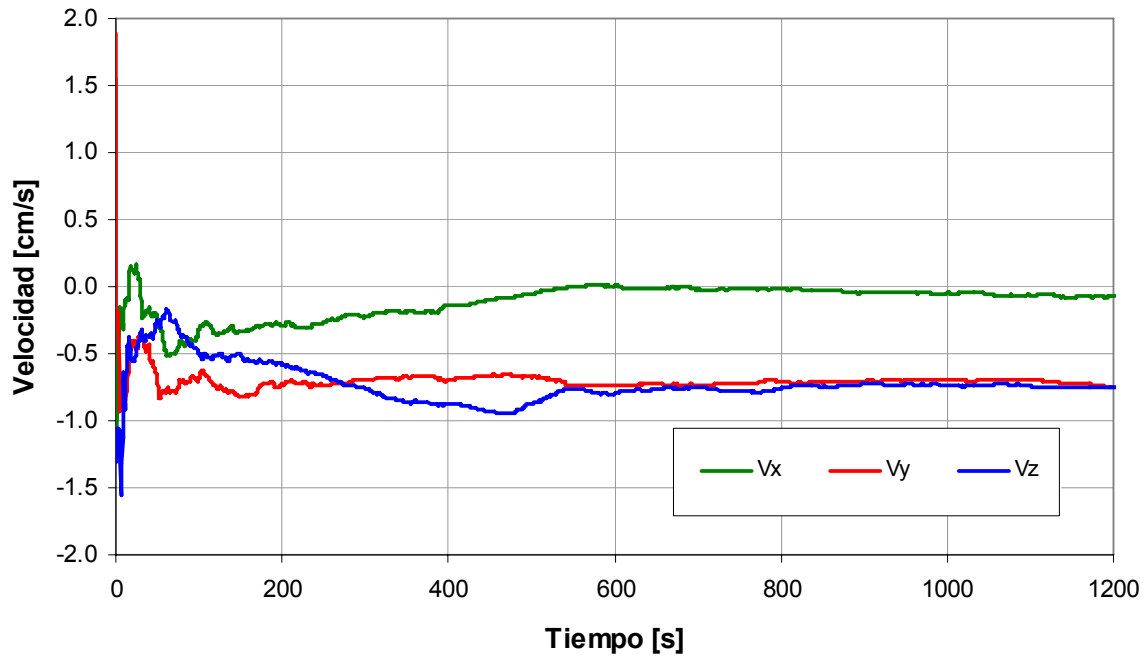
**Figura B.8** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 0.76$  [cm];  $f = 6$  [Hz].



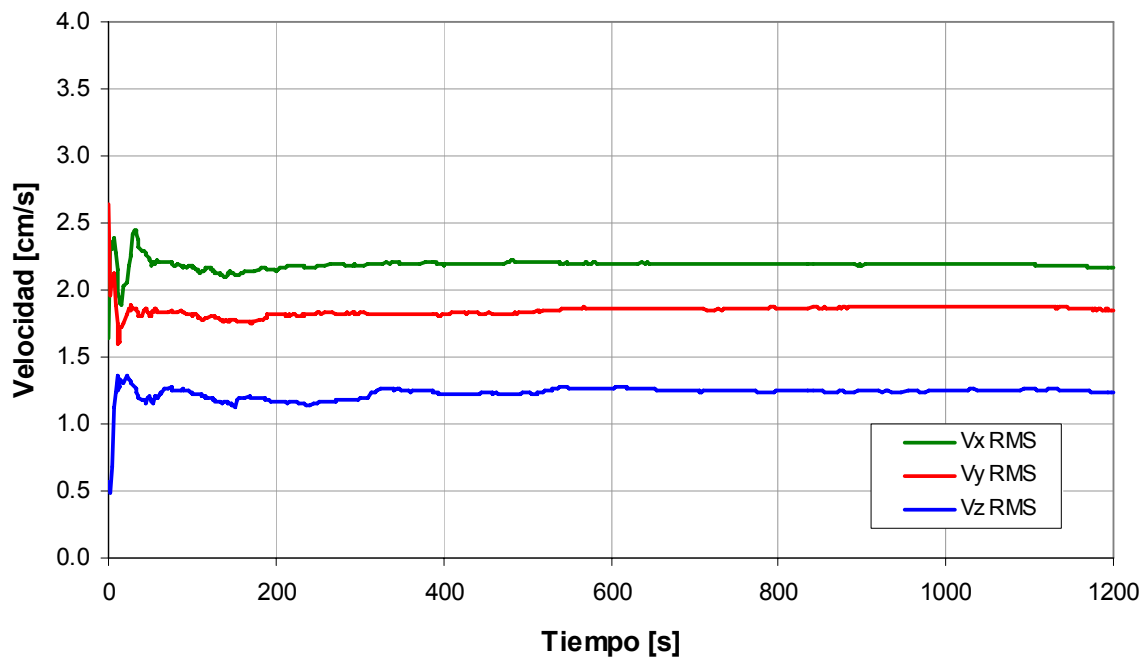
**Figura B.9** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 3$  [Hz].



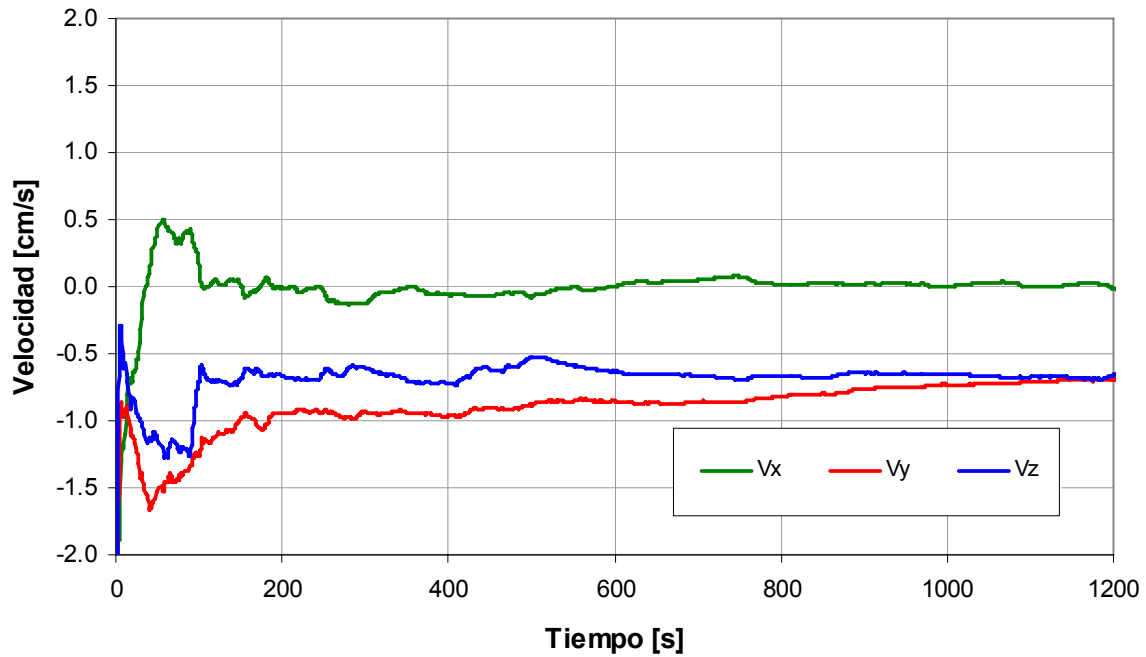
**Figura B.10** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 3$  [Hz].



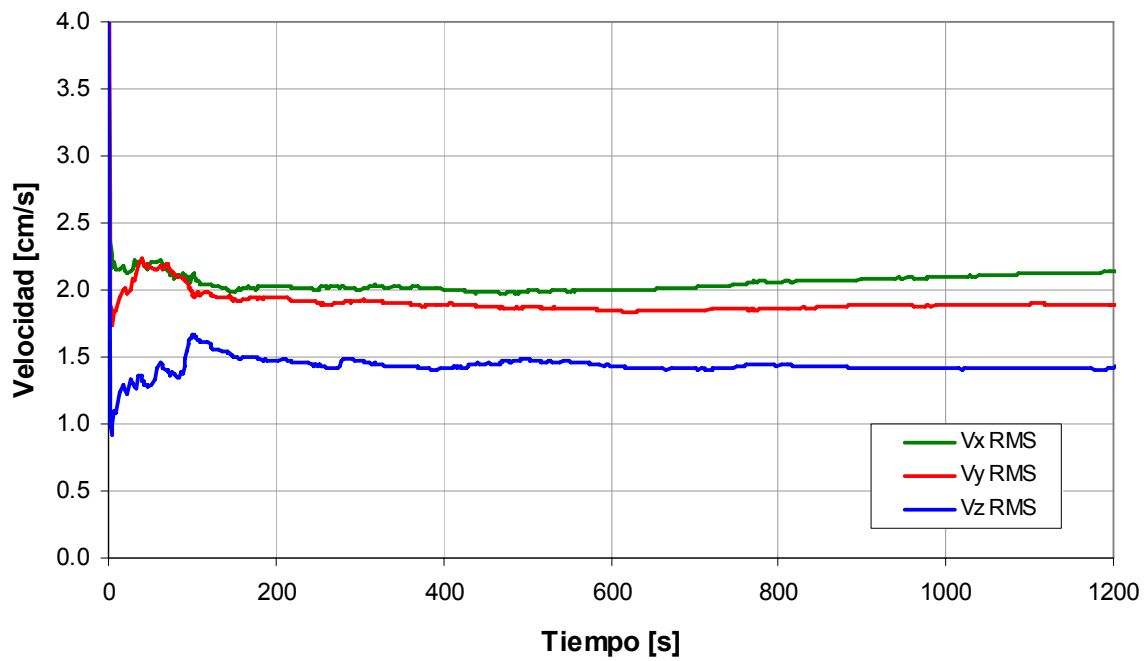
**Figura B.11** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 4$  [Hz].



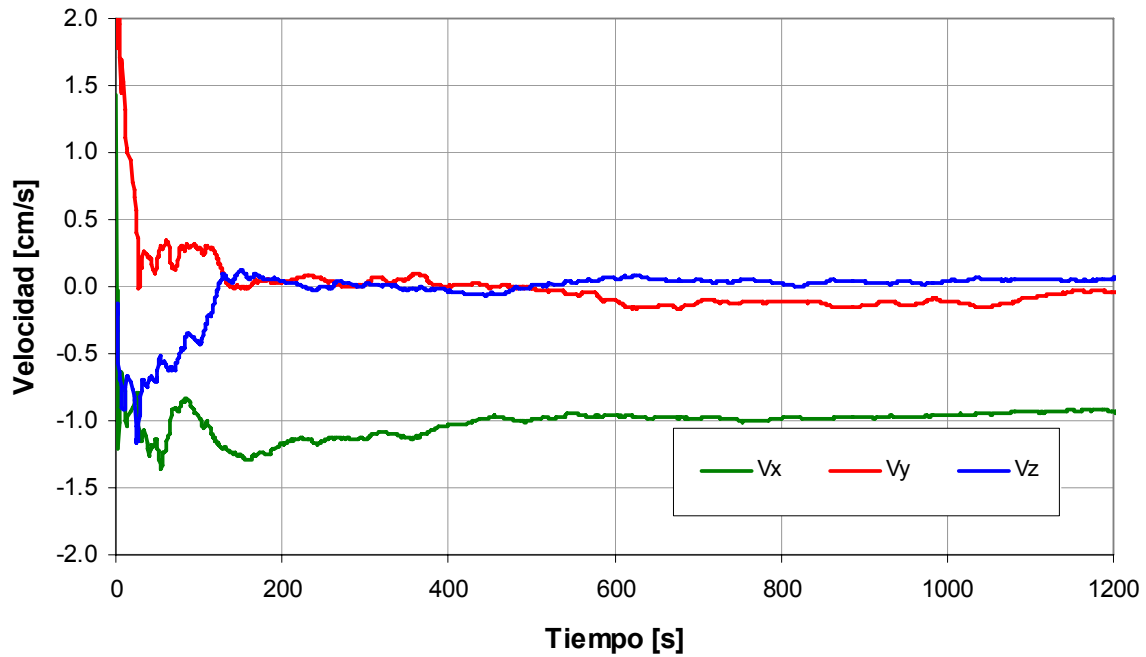
**Figura B.12** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 4$  [Hz].



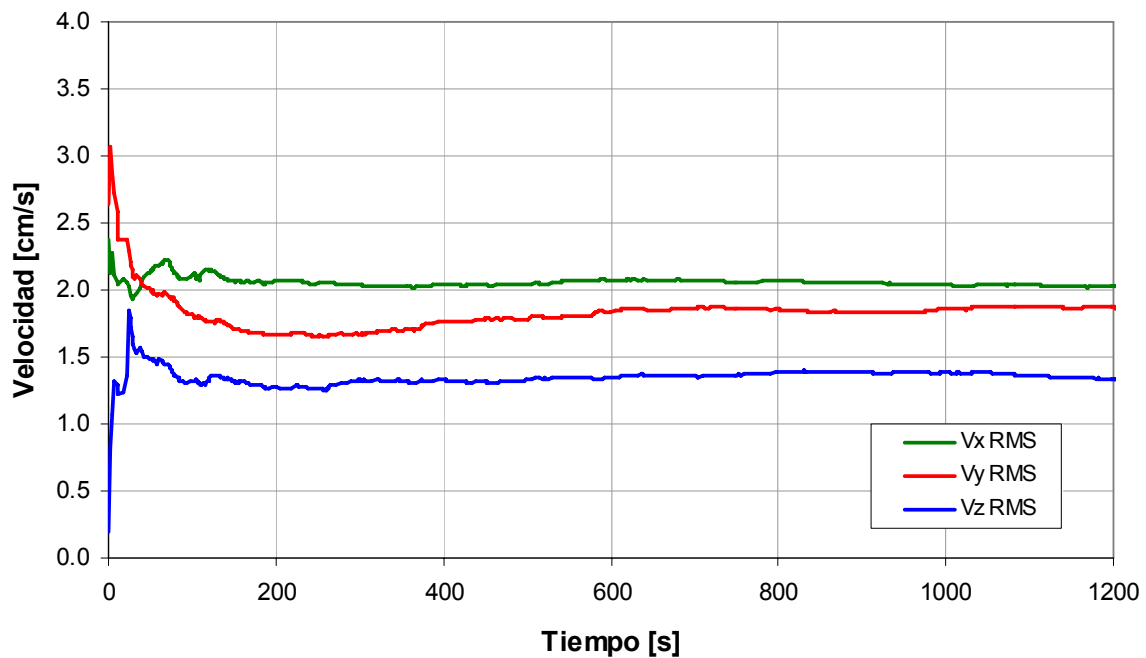
**Figura B.13** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 5$  [Hz].



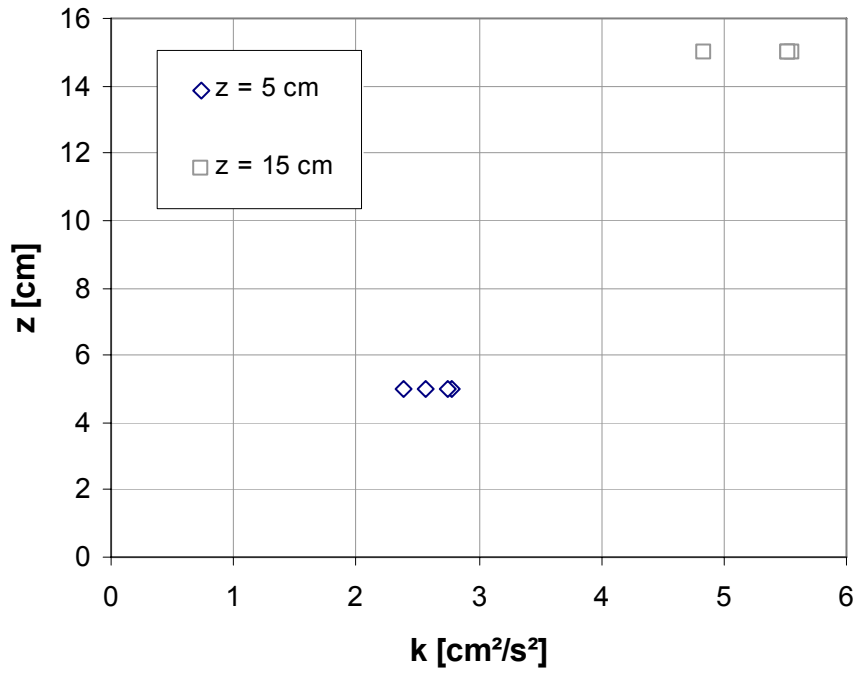
**Figura B.14** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 5$  [Hz].



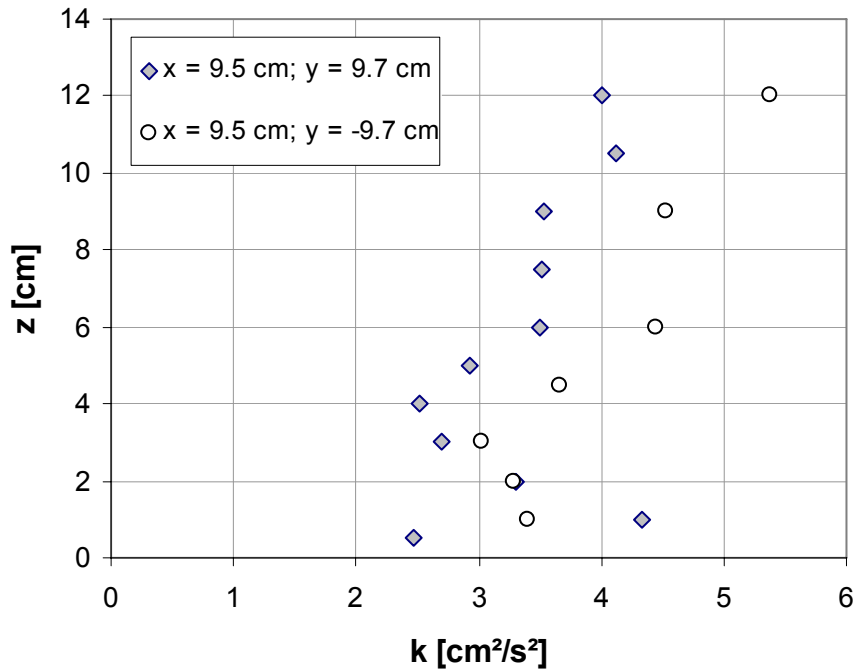
**Figura B.15** Convergencia de la tres componentes de la velocidad promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 6$  [Hz].



**Figura B.16** Convergencia de la tres componentes de la velocidad RMS promedio,  $z = 2.06$  [cm];  $f = 6$  [Hz].



**Figura B.17** Energía cinética turbulenta medida en diferentes puntos de dos diferentes planos x-y, a  $z = 5$  cm y  $z = 15$  cm del fondo.



**Figura B.18** Energía cinética turbulenta medida a lo largo de dos perfiles verticales, ubicados a  $x = 9.5$  cm de la grilla. Perfil 1:  $y = 9.7$  cm; Perfil 2:  $y = -9.7$  cm.

## ANEXO C.

### Diseño de inyección del soluto por el fondo de la columna Modificación a la instalación base, Saraiva (2003).

El esquema de la Figura C.1 muestra las posiciones de las mangueras por las cuales se inyecta la solución salina por el fondo de la instalación experimental. A las dos aberturas existentes, se le agregan ocho nuevas, totalizando diez perforaciones en el fondo de la estructura de acrílico. Todas ellas se encuentran en el espacio que queda disponible en el marco soportante, hecho de perfiles de acero, dejando dos rectángulos de 10 x 13.5 cm, sobre el total de 42 x 20 cm, que son las dimensiones del fondo completo de la instalación. Las tablas C.1 y C.2 indican las posiciones exactas del centro de las perforaciones de inyección, para las aberturas existentes y las nuevas, respectivamente.

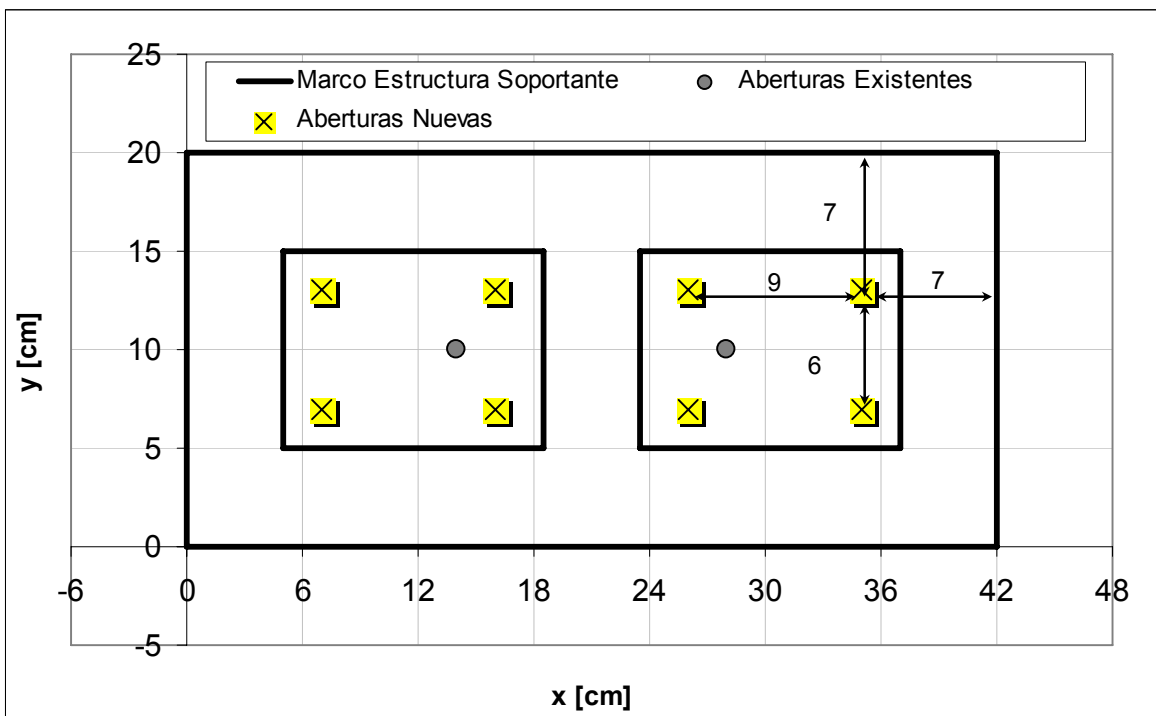


Figura C.1. Posiciones de los puntos de inyección de soluciones por el fondo de la instalación experimental.



**Tabla C.1. Posiciones de puntos de inyección existentes en el fondo de la instalación experimental (referencia a Figura B.1)**

<b>x</b>	<b>y</b>
<b>[cm]</b>	<b>[cm]</b>
14	10
28	10

**Tabla C.2. Posiciones de puntos de inyección nuevos en el fondo de la instalación experimental (referencia a Figura B.1)**

<b>x</b>	<b>y</b>
<b>[cm]</b>	<b>[cm]</b>
7	7
16	7
7	13
16	13
26	7
35	7
26	13
35	13

## ANEXO D.

### Datos medidos de conductividad en los experimentos finales.

Se presenta la síntesis de datos medidos mediante conductivímetro en las experiencias definitivas.

Todas las mediciones de conductividad se presentan en  $\mu\text{S/cm}$  (el instrumento usado permitía medir hasta  $12880 \mu\text{S/cm}$ ).

La primera tabla presenta un detalle a modo de ejemplo, para entender la clave de presentación de los resultados, señalando las ubicaciones dentro de la tabla base de las medidas principales, el registro del tiempo relativo dentro de cada set de datos experimentales, las condiciones de experimentación, y otros comentarios surgidos al momento de realizar el trabajo de laboratorio.

Se detallan 12 conjuntos de mediciones, bajo diferentes condiciones experimentales:

- 2 grillas funcionando (Nº 4 y Nº 5), con velocidades de motores de 150, 200, 240 y 300 RPM.
- 1 grilla funcionando (Nº 4), con velocidades de motores de 150, 200, 250 y 300 RPM.
- 1 grilla funcionando (Nº 5), con velocidades de motores de 150, 200, 250 y 300 RPM.

Descripción general de la experiencia: grillas funcionando y frecuencia de oscilación

Estado de los motores durante la experiencia

Vínculo con mediciones de ADV, fechas de mediciones de muestras de agua, comentarios

Descripción: 2 grillas (4-5) funcionando a  $f=2.5\text{Hz}$

Motor	Velocidad
	[RPM] (aprox.)
1	
2	
3	
4	150
5	150

Registro ADV:	
ID Archivos:	
0107VXPX	
h = 41 cm	
Mediciones: 29/06 (B, C, G)	
30/06 (D, E, F)	

Tiempo relativo al inicio de la experiencia, serie identificadora de los frascos de muestreos, hora local

Tiempo	0	min
--------	---	-----

Tiempo	5	min
--------	---	-----

Tiempo	10	min
--------	----	-----

Serie	B	12:52:30
-------	---	----------

Serie	C	12:57:30
-------	---	----------

Serie	D	13:02:30
-------	---	----------

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	653	797
6	655	796
7	651	796
8	654	798
9	1378	1691
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	688	833
6	688	831
7	687	834
8	689	834
9	722	879
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	700	844
6	702	852
7	708	858
8	708	856
9	716	863
0		

Mediciones con el conductímetro seteado en  $\beta = 0$  (sin corrección por temperatura)

Identificador del punto de muestreo: 5 (a 36 cm del fondo), 6 (a 26 cm), 7 (a 15 cm), 8 (a 5 cm) y 9 (a 0.5 cm)

Mediciones con el conductímetro seteado en  $\beta = 2\%$  (corregido por temperatura)

**Descripción: 2 grillas (4-5) funcionando a f=2.5Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	150	
5	150	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
0107VXPX  
h = 41 cm  
Mediciones: 29/06 (B, C, G)  
30/06 (D, E, F)

Tiempo 0 min

Tiempo 5 min

Tiempo 10 min

Serie B 12:52:30

Serie C 12:57:30

Serie D 13:02:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	653	797
6	655	796
7	651	796
8	654	798
9	1378	1691
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	688	833
6	688	831
7	687	834
8	689	834
9	722	879
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	700	844
6	702	852
7	708	858
8	708	856
9	716	863
0		

Tiempo 15 min

Tiempo 20 min

Tiempo 25 min

Serie E 13:07:30

Serie F 13:12:30

Serie G 13:17:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	716	864
6	716	863
7	712	864
8	710	863
9	724	876
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	724	873
6	726	874
7	723	874
8	729	877
9	731	882
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	728	884
6	730	889
7	729	887
8	727	886
9	741	895
0		

Tiempo min

Tiempo min

Tiempo min

Serie

Serie

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 2 grillas (4-5) funcionando a f=3.3Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	200	
5	200	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
1207VXPX  
h = 42  
(oscil. de 5 cms, resonancia?)  
Mediciones: 13/07

Tiempo 0 min

Serie A 18:12

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	676	849
6	672	849
7	672	846
8	669	844
9	1101	1380
0		

Tiempo 4 min

Serie B 18:16

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	711	885
6	723	900
7	725	902
8	722	901
9	724	898
0		

Tiempo 14 min

Serie D 18:26

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	739	916
6	739	915
7	742	920
8	745	924
9	740	916
0		

Tiempo 1 min

Serie A 18:13

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	698	868
6	710	886
7	728	909
8	745	931
9	766	950
0		

Tiempo 7 min

Serie C 18:19

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	729	901
6	731	905
7	724	904
8	728	905
9	731	904
0		

Tiempo 18 min

Serie D 18:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	745	922
6	748	925
7	742	920
8	748	929
9	748	924
0		

Tiempo 2.5 min

Serie B 18:14:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	717	891
6	711	884
7	718	898
8	722	904
9	721	901
0		

Tiempo 10 min

Serie C 18:22

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	733	906
6	740	919
7	737	914
8	736	914
9	742	916
0		

Tiempo min

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 2 grillas (4-5) funcionando a f=4Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	240	
5	240	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
0207VXPX  
  
Mediciones: 02/07 (A, B, E)  
04/07 (C, D)

Tiempo 0 min

Tiempo 4 min

Tiempo 7 min

Serie A 12:39

Serie B 12:43

Serie C 12:46

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	569	708
6	571	709
7	571	709
8	571	705
9	808	998
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	602	745
6	602	745
7	600	747
8	604	752
9	610	756
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	620	759
6	623	760
7	616	762
8	621	764
9	622	768
0		

Tiempo 10 min

Tiempo 13 min

Tiempo 16 min

Serie C 12:49

Serie D 12:52

Serie D 12:55

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	633	770
6	632	770
7	627	771
8	625	772
9	634	773
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	636	781
6	636	782
7	643	787
8	637	784
9	647	789
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	650	791
6	651	793
7	651	794
8	656	798
9	655	798
0		

Tiempo 19 min

Tiempo min

Tiempo min

Serie E 12:58

Serie

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	639	805
6	642	807
7	637	806
8	643	810
9	647	807
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 2 grillas (4-5) funcionando a f=5Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	298	
5	298	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
0907VXPX  
  
Mediciones: 09/07

Tiempo 0 min

Tiempo 1 min

Tiempo 2.5 min

Serie D 17:52

Serie D 17:53

Serie E 17:54:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	686	847
6	680	841
7	670	837
8	972	839
9	1297	1615
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	735	898
6	742	913
7	749	925
8	771	950
9	887	1093
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	797	963
6	805	978
7	793	974
8	817	999
9	807	993
0		

Tiempo 4.5 min

Tiempo 7 min

Tiempo 10 min

Serie E 17:56:30

Serie F 17:59

Serie F 18:02

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	822	1001
6	824	1006
7	836	1014
8	842	1020
9	848	1030
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	868	1048
6	867	1059
7	866	1057
8	868	1061
9	877	1062
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	898	1093
6	913	1101
7	914	1099
8	919	1109
9	916	1110
0		

Tiempo 13 min

Tiempo 16 min

Tiempo min

Serie G 18:05

Serie G 18:08

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	928	1132
6	938	1135
7	928	1138
8	933	1140
9	927	1138
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	963	1173
6	962	1170
7	962	1173
8	966	1172
9	967	1177
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (4) funcionando a f=2.5Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	150	
5	0	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
0407VXPX  
  
Mediciones: 04/07

Tiempo 0 min

Tiempo 2 min

Tiempo 5 min

Serie A 11:51:30

Serie A 11:53:30

Serie B 11:56:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	577	709
6	592	725
7	580	712
8	576	709
9	1122	1376
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	592	727
6	592	727
7	588	721
8	600	735
9	1214	1489
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	611	745
6	614	747
7	607	745
8	606	744
9	909	1115
0		

Tiempo 8 min

Tiempo 11 min

Tiempo 14 min

Serie B 11:59:30

Serie C 12:02:30

Serie C 12:05:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	612	751
6	615	753
7	611	750
8	614	756
9	686	841
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	614	757
6	613	757
7	634	785
8	612	759
9	639	793
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	617	761
6	617	761
7	619	762
8	617	762
9	629	775
0		

Tiempo 19 min

Tiempo 24 min

Tiempo min

Serie D 12:10:30

Serie D 12:15:30

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	618	761
6	616	762
7	611	760
8	616	764
9	634	784
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	617	763
6	619	768
7	615	764
8	620	766
9	627	780
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		



**Descripción: 1 grillas (4) funcionando a f=3.3Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	200	
5	0	

Registro ADV:
ID Archivos:
1807VXPX
Mediciones: 18/07

Tiempo 0 min

Tiempo 1 min

Tiempo 3 min

Serie A 11:25

Serie A 11:26

Serie B 11:28

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	820	1052
6	818	1052
7	815	1052
8	814	1052
9	1076	1383
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	832	1069
6	830	1067
7	826	1065
8	839	1083
9	878	1131
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	844	1087
6	840	1086
7	834	1086
8	844	1088
9	848	1099
0		

Tiempo 5 min

Tiempo 7.5 min

Tiempo 10.33 min

Serie B 11:30

Serie C 11:32:30

Serie C 11:35:20

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	840	1086
6	838	1086
7	836	1084
8	841	1088
9	853	1098
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	845	1091
6	846	1090
7	837	1086
8	840	1087
9	841	1090
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	838	1088
6	840	1089
7	842	1087
8	846	1090
9	851	1096
0		

Tiempo 12.5 min

Tiempo 14.5 min

Tiempo min

Serie D 11:37:30

Serie D 11:39:30

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	847	1091
6	849	1091
7	844	1090
8	844	1090
9	834	1095
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	847	1090
6	849	1095
7	845	1091
8	845	1091
9	849	1091
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (4) funcionando a f=4.2Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	250	
5	0	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
1607VXPX  
  
Mediciones: 15/07 (D)  
16/07 (E, F, G)

Tiempo 0 min

Serie D 12:58

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	819	1030
6	819	1027
7	818	1033
8	823	1034
9	1626	2070
0		

Tiempo 4 min

Serie E 13:02

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	890	1122
6	883	1115
7	880	1114
8	880	1116
9	894	1135
0		

Tiempo 11 min

Serie G 13:09

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	893	1126
6	885	1122
7	880	1123
8	878	1122
9	894	1136
0		

Tiempo 0.75 min

Serie D 12:58:45

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	881	1111
6	883	1108
7	888	1113
8	893	1117
9	1476	1844
0		

Tiempo 6 min

Serie F 13:04

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	889	1121
6	884	1119
7	894	1119
8	889	1120
9	903	1138
0		

Tiempo 15 min

Serie G 13:13

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	891	1122
6	890	1126
7	899	1133
8	902	1132
9	901	1136
0		

Tiempo 2.5 min

Serie E 13:00:30

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	878	1117
6	885	1118
7	879	1117
8	881	1115
9	950	1198
0		

Tiempo 8 min

Serie F 13:06

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	893	1122
6	891	1124
7	887	1122
8	889	1119
9	899	1135
0		

Tiempo min

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (4) funcionando a f=5Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	301	
5	0	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
2307VXPX  
  
Mediciones: 23/07 (A, B)  
25/07 (C, D)

Tiempo 0 min

Serie A

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	809	1064
6	823	1076
7	810	1064
8	813	1067
9	984	1294
0		

Tiempo 3.25 min

Serie B

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	858	1119
6	860	1120
7	856	1115
8	856	1118
9	860	1124
0		

Tiempo 8.25 min

Serie D

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	859	1113
6	863	1115
7	861	1119
8	860	1114
9	861	1124
0		

Tiempo 0.5 min

Serie A

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	838	1096
6	840	1103
7	853	1118
8	852	1121
9	849	1111
0		

Tiempo 5 min

Serie C

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	854	1119
6	854	1118
7	854	1121
8	852	1118
9	854	1120
0		

Tiempo 10.5 min

Serie D

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	858	1118
6	861	1120
7	862	1120
8	858	1116
9	861	1117
0		

Tiempo 1.75 min

Serie B

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	858	1119
6	859	1121
7	851	1115
8	854	1115
9	856	1113
0		

Tiempo 6.50 min

Serie C

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	854	1117
6	854	1118
7	854	1119
8	857	1122
9	853	1118
0		

Tiempo min

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (5) funcionando a f=2.5Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	0	
5	150	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
2607VXPX  
  
Mediciones: 26/07

Tiempo 0 min

Tiempo 0.5 min

Tiempo 2 min

Serie E

Serie E

Serie F

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	889	1153
6	889	1155
7	879	1145
8	881	1148
9	928	1205
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	888	1151
6	889	1156
7	937	1214
8	916	1188
9	994	1285
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	920	1186
6	923	1188
7	930	1201
8	934	1204
9	948	1224
0		

Tiempo 3.5 min

Tiempo 5.33 min

Tiempo 8.33 min

Serie F

Serie G

Serie G

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	935	1203
6	932	1203
7	933	1203
8	936	1208
9	948	1217
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	940	1212
6	937	1211
7	933	1211
8	936	1213
9	939	1218
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	940	1212
6	942	1215
7	946	1220
8	947	1222
9	950	1225
0		

Tiempo 11.25 min

Tiempo 15 min

Tiempo min

Serie H

Serie H

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	936	1222
6	940	1226
7	934	1222
8	931	1220
9	936	1224
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	944	1229
6	944	1229
7	941	1226
8	940	1224
9	943	1230
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (5) funcionando a f=3.3Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	0	
5	200	

Registro ADV:  
ID Archivos:  
3007VXPX  
  
Mediciones: 30/07 (A, C)  
01/08 (B, D)

Tiempo 0 min

Serie A

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	952	1176
6	963	1177
7	961	1175
8	956	1174
9	1971	2400
0		

Tiempo 3.25 min

Serie C

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1109	1362
6	1116	1371
7	1116	1372
8	1117	1380
9	1096	1350
0		

Tiempo 8.75 min

Serie D

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1107	1386
6	1114	1391
7	1115	1391
8	1117	1391
9	1112	1380
0		

Tiempo 0.5 min

Serie A

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	995	1218
6	1075	1326
7	1170	1433
8	1278	1561
9	1249	1526
0		

Tiempo 4.75 min

Serie B

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1094	1364
6	1099	1368
7	1100	1373
8	1109	1380
9	1090	1362
0		

Tiempo 11.75 min

Serie D

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1114	1394
6	1115	1402
7	1118	1400
8	1123	1403
9	1117	1394
0		

Tiempo 1.75 min

Serie C

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1100	1352
6	1123	1375
7	1136	1387
8	1155	1407
9	1097	1347
0		

Tiempo 6.25 min

Serie B

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1103	1377
6	1109	1382
7	1107	1375
8	1111	1387
9	1092	1358
0		

Tiempo min

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (5) funcionando a f=4.2Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	0	
5	250	

Registro ADV:
ID Archivos:
2807VXPX
Mediciones: 01/08

Tiempo	0	min
--------	---	-----

Tiempo	0.33	min
--------	------	-----

Tiempo	1.33	min
--------	------	-----

Serie	E
-------	---

Serie	E
-------	---

Serie	F
-------	---

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	932	1164
6	931	1164
7	927	1160
8	930	1165
9	1926	2420
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	935	1168
6	1116	1266
7	1109	1385
8	1149	1435
9	1396	1745
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1087	1354
6	1126	1404
7	1137	1420
8	1136	1417
9	1091	1362
0		

Tiempo	2.75	min
--------	------	-----

Tiempo	4.33	min
--------	------	-----

Tiempo	5.75	min
--------	------	-----

Serie	F
-------	---

Serie	G
-------	---

Serie	G
-------	---

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1118	1390
6	1128	1401
7	1135	1408
8	1134	1406
9	1102	1366
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1143	1414
6	1154	1428
7	1155	1432
8	1162	1440
9	1124	1396
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1160	1435
6	1172	1441
7	1171	1441
8	1171	1443
9	1146	1412
0		

Tiempo	8	min
--------	---	-----

Tiempo	10.25	min
--------	-------	-----

Tiempo		min
--------	--	-----

Serie	H
-------	---

Serie	H
-------	---

Serie	
-------	--

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1183	1462
6	1181	1465
7	1186	1468
8	1190	1473
9	1174	1450
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1196	1482
6	1199	1490
7	1203	1492
8	1203	1488
9	1188	1471
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

**Descripción: 1 grillas (5) funcionando a f=5Hz**

Motor	Velocidad	
	[RPM] (aprox.)	
1		
2		
3		
4	0	
5	300	

Registro ADV:
ID Archivos:
2707VXPX
Mediciones: 02/08

Tiempo 0 min

Tiempo 0.25 min

Tiempo 1.42 min

Serie I

Serie I

Serie J

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	938	1160
6	949	1165
7	936	1162
8	940	1167
9	2420	3060
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	944	1161
6	1025	1267
7	1110	1372
8	1122	1387
9	1602	1973
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1098	1368
6	1115	1378
7	1123	1393
8	1127	1392
9	1190	1469
0		

Tiempo 2.75 min

Tiempo 4.17 min

Tiempo 5.75 min

Serie J

Serie K

Serie K

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1161	1433
6	1157	1431
7	1154	1436
8	1157	1440
9	1177	1469
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1199	1474
6	1210	1482
7	1207	1481
8	1209	1482
9	1234	1509
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1219	1508
6	1225	1510
7	1232	1511
8	1232	1514
9	1253	1535
0		

Tiempo 7.5 min

Tiempo 9.75 min

Tiempo min

Serie L

Serie L

Serie

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1248	1542
6	1257	1550
7	1258	1547
8	1257	1553
9	1266	1560
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5	1268	1568
6	1277	1577
7	1275	1572
8	1282	1574
9	1290	1585
0		

Muestra	Conductividad	
	$\beta = 0$	$\beta = 2\%$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
0		

## ANEXO E.

### Discretización de ecuaciones de transporte de masa en agua y sedimento para su solución numérica mediante un esquema de diferencias finitas.

Ecuaciones fundamentales:

$$\text{Transporte difusivo en la columna de agua: } \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (D_w + D_t) \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad (1)$$

$$\text{Transporte difusivo en el sedimento: } \frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\mu \cdot C}{K_{O_2} + C} + P \quad (2)$$

Adimensionalizadas:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left\{ \left( \frac{1}{Sc} + v_t^* \right) \frac{\partial C^*}{\partial z^*} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{1}{2 Sc} \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} - \frac{\mu^* \cdot C^*}{K_{O_2}^* + C^*} + P^* \quad (4)$$

donde:

$$C^* = \frac{C}{C_b}; \quad t^* = \frac{t v}{L^2}; \quad z^* = \frac{z}{L}; \quad K_{O_2}^* = \frac{K_{O_2}}{C_b}; \quad \mu^* = \frac{\mu L^2}{v C_b}; \quad v_t^* = \frac{v_t}{v}; \quad P^* = \frac{P L^2}{C_b v}$$



### Discretización de (3):

$$\begin{aligned}
\frac{C_i^{*n+1} - C_i^{*n}}{\Delta t^*} &= \frac{\partial}{\partial z^*} \left\{ \left( \frac{1}{Sc} + v_t^* \right) \left( \frac{C_{i+1/2}^* - C_{i-1/2}^*}{\Delta z^*} \right) \right\} \\
&= \frac{\partial}{\partial z^*} \left\{ \left( \frac{1}{Sc} + v_t^* \right) \frac{C_{i+1/2}^*}{\Delta z^*} \right\} - \frac{\partial}{\partial z^*} \left\{ \left( \frac{1}{Sc} + v_t^* \right) \frac{C_{i-1/2}^*}{\Delta z^*} \right\} \\
&= \frac{\partial}{\partial z^*} \left( \frac{1}{Sc} \frac{C_{i+1/2}^*}{\Delta z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left( v_t^* \frac{C_{i+1/2}^*}{\Delta z^*} \right) - \frac{\partial}{\partial z^*} \left( \frac{1}{Sc} \frac{C_{i-1/2}^*}{\Delta z^*} \right) - \frac{\partial}{\partial z^*} \left( v_t^* \frac{C_{i-1/2}^*}{\Delta z^*} \right) \\
&= \frac{1}{\Delta z^{*2}} \left\{ \frac{C_{i+1}^*}{Sc} - \frac{C_i^*}{Sc} + v_{ti+1/2}^* C_{i+1}^* - v_{ti-1/2}^* C_i^* \right\} \\
&\quad - \frac{1}{\Delta z^{*2}} \left\{ \frac{C_i^*}{Sc} - \frac{C_{i-1}^*}{Sc} + v_{ti+1/2}^* C_i^* - v_{ti-1/2}^* C_{i-1}^* \right\}
\end{aligned}$$

Tomando una ponderación del término derecho entre el tiempo  $n$  y  $n+1$ , tomando un ponderador  $\theta$  para el tiempo  $n$  y  $1-\theta$  para  $n+1$ :

$$\begin{aligned}
\frac{C_i^{*n+1} - C_i^{*n}}{\Delta t^*} &= \frac{1}{\Delta y^{*2}} \left\{ C_{i+1}^* \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) - C_i^* \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) + C_{i-1}^* \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right) \right\} \\
&= \frac{(1-\theta)}{\Delta z^{*2}} \left\{ C_{i+1}^{*n+1} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) - C_i^{*n+1} \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) + C_{i-1}^{*n+1} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right) \right\} \\
&\quad + \frac{\theta}{\Delta z^{*2}} \left\{ C_{i+1}^{*n} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) - C_i^{*n} \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) + C_{i-1}^{*n} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_i^{*n+1} - C_i^{*n} &= \frac{(1-\theta)\Delta t^*}{\Delta z^{*2}} \left\{ C_{i+1}^{*n+1} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) - C_i^{*n+1} \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) + C_{i-1}^{*n+1} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right) \right\} \\
&\quad + \frac{\theta \Delta t^*}{\Delta z^{*2}} \left\{ C_{i+1}^{*n} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) - C_i^{*n} \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) + C_{i-1}^{*n} \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right) \right\}
\end{aligned}$$

Definiendo  $\alpha$  como:

$$\alpha = \frac{\Delta t^*}{\Delta z^{*2}}$$

Finalmente se obtiene:

$$\begin{aligned}
& C_{i+1}^{*n+1} (1-\theta) \alpha \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) - C_i^{*n+1} \left[ (1-\theta) \alpha \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) + 1 \right] + \\
& + C_{i-1}^{*n+1} (1-\theta) \alpha \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right) = - C_{i+1}^{*n} \theta \alpha \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti+1/2}^* \right) + \\
& + C_i^{*n} \left[ \theta \alpha \left( \frac{2}{Sc} + v_{ti-1/2}^* + v_{ti+1/2}^* \right) - 1 \right] - C_{i-1}^{*n} \theta \alpha \left( \frac{1}{Sc} + v_{ti-1/2}^* \right)
\end{aligned}$$

**Discretización de (4):**

$$\begin{aligned}
\frac{C_i^{*n+1} - C_i^{*n}}{\Delta t^*} &= \frac{1}{2 Sc} \left( \frac{C_{i+1}^* - 2C_i^* + C_{i-1}^*}{\Delta z^{*2}} \right) - \frac{\mu^* \cdot C_i^*}{K_{O_2}^* + C_i^*} + P^* \\
C_i^{*n+1} - C_i^{*n} &= \frac{\Delta t^*}{2 \Delta z^{*2} Sc} (C_{i+1}^* - 2C_i^* + C_{i-1}^*) - \frac{\Delta t^* \mu^* \cdot C_i^*}{K_{O_2}^* + C_i^*} + P^* \Delta t^* \\
&= \frac{\alpha}{2 Sc} (C_{i+1}^* - 2C_i^* + C_{i-1}^*) - \frac{\Delta t^* \mu^* \cdot C_i^*}{K_{O_2}^* + C_i^*} + P^* \Delta t^*
\end{aligned}$$

Nuevamente tomando ponderaciones entre el término para los tiempos  $n$  y  $n+1$ :

$$\begin{aligned}
C_i^{*n+1} - C_i^{*n} &= \frac{(1-\theta)\alpha}{2 Sc} (C_{i+1}^{*n+1} - 2C_i^{*n+1} + C_{i-1}^{*n+1}) - \frac{(1-\theta)\Delta t^* \mu^* \cdot C_i^{*n+1}}{K_{O_2}^* + C_i^{*n+1}} \\
&+ \frac{\theta \alpha}{2 Sc} (C_{i+1}^{*n} - 2C_i^{*n} + C_{i-1}^{*n}) - \frac{\theta \Delta t^* \mu^* \cdot C_i^{*n}}{K_{O_2}^* + C_i^{*n}} + P^* \Delta t^*
\end{aligned}$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned}
& - C_{i+1}^{*n+1} \frac{(1-\theta)\alpha}{2 Sc} + C_i^{*n+1} \left[ \frac{(1-\theta)\alpha}{Sc} + \frac{(1-\theta)\Delta t^* \mu^*}{K_{O_2}^* + \underbrace{C_i^{*n+1}}_{\substack{\text{introduce} \\ \text{no-linealidad}}}} + 1 \right] - C_{i-1}^{*n+1} \frac{(1-\theta)\alpha}{2 Sc} = \\
& C_{i+1}^{*n} \frac{\theta \alpha}{2 Sc} + C_i^{*n} \left[ 1 - \frac{\theta \alpha}{Sc} - \frac{\theta \Delta t^* \mu^* \cdot C_i^{*n}}{K_{O_2}^* + C_i^{*n}} \right] + C_{i-1}^{*n} \frac{\theta \alpha}{2 Sc} + P^* \Delta t^*
\end{aligned}$$

Para linealizar la discretización, se considera que el término  $C^{*n+1}$  que aparece señalado es conocido ( $C^{*n}$ ), quedando:

$$\begin{aligned}
& -C_{i+1}^{*n+1} \frac{(1-\theta)\alpha}{2Sc} + C_i^{*n+1} \left[ \frac{(1-\theta)\alpha}{Sc} + \frac{(1-\theta)\Delta t^* \mu^*}{K_{O_2}^* + \underbrace{C_i^{*n}}_{\text{aproximación}}} + 1 \right] - C_{i-1}^{*n+1} \frac{(1-\theta)\alpha}{2Sc} = \\
& C_{i+1}^{*n} \frac{\theta\alpha}{2Sc} + C_i^{*n} \left[ 1 - \frac{\theta\alpha}{Sc} - \frac{\theta\Delta t^* \mu^* \cdot C_i^{*n}}{K_{O_2}^* + C_i^{*n}} \right] + C_{i-1}^{*n} \frac{\theta\alpha}{2Sc} + P^* \Delta t^*
\end{aligned}$$

## ANEXO F.

### Síntesis de resultados de modelación numérica de transferencia de masa desde los sedimentos, aplicada a condiciones experimentales.

**Tabla F.1.** Concentración promedio en la columna de agua,  $C_w$ , adimensionalizada con la concentración de referencia en los sedimentos  $C_b$ . Modelación numérica de casos con distribución de turbulencia tipo canal abierto.

f [RPM]	150	200	250	300
$u^*$ [cm/s]	0.371	0.466	0.505	0.758
Tiempo [s]	$C_w / C_b$			
20	0.00006	0.00095	0.00099	0.00148
200	0.00014	0.00105	0.00108	0.00159
400	0.00022	0.00113	0.00117	0.00168
600	0.00030	0.00121	0.00124	0.00175
800	0.00036	0.00127	0.00131	0.00182
1000	0.00042	0.00133	0.00137	0.00188
1200	0.00048	0.00139	0.00143	0.00194
1400	0.00053	0.00144	0.00148	0.00199
1600	0.00058	0.00149	0.00153	0.00204
1800	0.00062	0.00154	0.00157	0.00209
2000	0.00066	0.00158	0.00162	0.00213
2200	0.00071	0.00162	0.00166	0.00218
2400	0.00075	0.00166	0.00170	0.00222

**Tabla F.2.** Variación temporal de la masa transferida desde los sedimentos a la columna de agua,  $dM/dt$ . Modelación numérica de casos con distribución de turbulencia tipo canal abierto.

f [RPM]	150	200	250	300
$u^*$ [cm/s]	0.371	0.466	0.505	0.758
Tiempo [s]	$dM / dt$ [Kg/s]			
200	0.021	0.023	0.023	0.026
400	0.019	0.019	0.020	0.021
600	0.016	0.017	0.017	0.017
800	0.015	0.015	0.015	0.015
1000	0.013	0.014	0.014	0.014
1200	0.012	0.012	0.012	0.013
1400	0.011	0.012	0.012	0.012
1600	0.011	0.011	0.011	0.011
1800	0.010	0.010	0.010	0.010
2000	0.010	0.010	0.010	0.010
2200	0.009	0.009	0.009	0.010
2400	0.009	0.009	0.009	0.009

**Tabla F.3.** Coeficiente de transferencia de masa en la interfaz agua-sedimentos,  $K_L$ . Modelación numérica de casos con distribución de turbulencia tipo canal abierto.

f [RPM]	150	200	250	300
$u^*$ [cm/s]	0.371	0.466	0.505	0.758
Tiempo [s]	$K_L$ [cm/s]			
200	0.01428	0.01468	0.01612	0.02537
400	0.01402	0.01756	0.01900	0.02842
600	0.01399	0.01753	0.01902	0.02849
800	0.01401	0.01751	0.01903	0.02846
1000	0.01392	0.01765	0.01906	0.02870
1200	0.01410	0.01765	0.01907	0.02864
1400	0.01394	0.01766	0.01908	0.02851
1600	0.01412	0.01759	0.01901	0.02874
1800	0.01404	0.01750	0.01912	0.02868
2000	0.01398	0.01782	0.01927	0.02865
2200	0.01414	0.01745	0.01910	0.02873
2400	0.01390	0.01778	0.01901	0.02863

**Tabla F.4.** Concentración promedio en la columna de agua,  $C_w$ , adimensionalizada con la concentración de referencia en los sedimentos  $C_B$ . Modelación numérica de casos con distribución de turbulencia homogénea en la vertical (similar a perfil de turbulencia en columna agitada por viento).

f [RPM]	150	200	250	300
$u^*$ [cm/s]	0.371	0.466	0.505	0.758
Tiempo [s]	$C_w / C_b$			
20	0.00069	0.00042	0.00024	0.00061
200	0.00077	0.00051	0.00032	0.00071
400	0.00085	0.00060	0.00041	0.00080
600	0.00092	0.00067	0.00048	0.00087
800	0.00099	0.00074	0.00055	0.00094
1000	0.00104	0.00080	0.00061	0.00100
1200	0.00110	0.00085	0.00066	0.00106
1400	0.00115	0.00091	0.00072	0.00111
1600	0.00120	0.00095	0.00076	0.00116
1800	0.00124	0.00100	0.00081	0.00121
2000	0.00128	0.00104	0.00085	0.00125
2200	0.00133	0.00109	0.00090	0.00129
2400	0.00137	0.00113	0.00094	0.00133

**Tabla F.5.** Variación temporal de la masa transferida desde los sedimentos a la columna de agua,  $dM/dt$ . Modelación numérica de casos con distribución de turbulencia homogénea en la vertical (similar a perfil de turbulencia en columna agitada por viento).

f [RPM]	150	200	250	300
$u^*$ [cm/s]	0.371	0.466	0.505	0.758
Tiempo [s]	$dM / dt$ [Kg/s]			
200	0.021	0.022	0.022	0.024
400	0.018	0.019	0.019	0.020
600	0.016	0.017	0.017	0.017
800	0.014	0.015	0.015	0.015
1000	0.013	0.013	0.013	0.014
1200	0.012	0.012	0.012	0.013
1400	0.011	0.012	0.012	0.012
1600	0.011	0.011	0.011	0.011
1800	0.010	0.010	0.010	0.010
2000	0.010	0.010	0.010	0.010
2200	0.009	0.009	0.009	0.009
2400	0.009	0.009	0.009	0.009

**Tabla F.6.** Coeficiente de transferencia de masa en la interfaz agua-sedimentos,  $K_L$ . Modelación numérica de casos con distribución de turbulencia homogénea en la vertical (similar a perfil de turbulencia en columna agitada por viento).

f [RPM]	150	200	250	300
$u^*$ [cm/s]	0.371	0.466	0.505	0.758
Tiempo [s]	$K_L$ [cm/s]			
200	0.00984	0.01514	0.01705	0.02315
400	0.01144	0.01631	0.01756	0.02444
600	0.01144	0.01633	0.01744	0.02447
800	0.01144	0.01637	0.01745	0.02459
1000	0.01148	0.01634	0.01754	0.02451
1200	0.01147	0.01632	0.01751	0.02458
1400	0.01151	0.01630	0.01765	0.02463
1600	0.01152	0.01638	0.01740	0.02457
1800	0.01154	0.01646	0.01765	0.02449
2000	0.01147	0.01624	0.01741	0.02470
2200	0.01145	0.01643	0.01761	0.02448
2400	0.01151	0.01635	0.01753	0.02466

## ANEXO G.

### Código fuente de programa de cálculo de transferencia de oxígeno en la interfaz agua – sedimento.

Se presenta a continuación el código fuente base, a partir del cual se modelan los perfiles verticales de oxígeno disuelto, en la columna de agua y sedimentos. El lenguaje utilizado es Fortran 90.

```
program ModelOD

  implicit none

  real*8 :: T_AD, TMAX1, TMAX2, TMAX_AD1, TMAX_AD2, UMBRAL_CONT, YPLUS
  integer :: i, j, NPROF1, NPROF2
  integer :: NSED, NWAT
  real*8 :: DY_AD, DT_AD, R, THETA, FLUXC, POROS, PRODT, PROD, PROF_PROD
  real*8 :: SC, SCT, CB, MU, MU_AD, KO2, KO2_AD, VCORTE, VISCMOL, LSCALE
  real*8 :: SUMCOL, SUMSED

  real*8 , dimension (:), allocatable :: INF, DIAG, SUP, F, G, ALFA, BETA
  real*8 , dimension (:), allocatable :: C, CN, CP, Y_AD, VISC, PROD_AD,
  T_RES1, T_RES2
  real*8, allocatable :: RES1 (:,:)
  real*8, allocatable :: RES2 (:,:)

  !***** Seccion de edicion de datos *****

  DY_AD = 0.001
  DT_AD = 0.0001

  THETA = 0.5          ! Define el esquema a usar; 1:explicito, 0,implicito

  VCORTE = 0.0002      ! Velocidad de corte (m/s)
  VISCMOL = 0.000001   ! Viscosidad cinemática molecular (m2/s)

  SC = 500.0           ! Número de Schmidt
  SCT = 0.63           ! Número de Schmidt Turbulento
  POROS = 0.5          ! Porosidad de los sedimentos
  CB = 10.64           ! C = Cbulk, condicion de borde de aguas arriba (mg/l)
  MU = 9200            ! Tasa de oxidacion (mg/l/dia)
  KO2 = 0.2            ! Constante de semisaturacion (mg/l)
  PRODT = 0.0226       ! Tasa de productividad de fitobentos (mg/l/s)
  PROF_PROD = 0.002    ! Profundidad involucrada en la productividad (m)

  NPROF1 = 6          ! No. de perf. en sol. para regimen de equilibrio
  NPROF2 = 6          ! No. de perf. en sol. reg. impermanente con fotosintesis

  allocate (T_RES1(1:NPROF1), T_RES2(1:NPROF2))
  ! Especifica cuales perfiles extrae
  T_RES1(1) = 1000.0
  T_RES1(2) = 6000.0
  T_RES1(3) = 12000.0
```



```

T_RES1(4) = 24000.0
T_RES1(5) = 48000.0
T_RES1(6) = 72000.0

T_RES2(1) = 0.0
T_RES2(2) = 360.0
T_RES2(3) = 720.0
T_RES2(4) = 1080.0
T_RES2(5) = 1440.0
T_RES2(6) = 1800.0

TMAX1 = 72010.0    ! T max. (seg) para reg. de equilibrio
TMAX2 = 1810.0    ! T max. (seg) para reg. impermanente con fotosintesis

!*****

LSCALE = 100*VISCMOL/VCORTE    ! Escala de longitud (m)

!NSED = 20                ! Celdas en el sedimento
!NWAT = 10                ! Celdas en el agua

! Calculo de NWAT para que el dominio 'agua' tenga 30 mm de espesor
NWAT = MAX(2, IIDNNT(0.03/LSCALE/DY_AD))
TMAX_AD1 = TMAX1*VISCMOL/(LSCALE**2)    ! Tiempo maximo adimensional
TMAX_AD2 = TMAX2*VISCMOL/(LSCALE**2)    ! Tiempo maximo adimensional

R = DT_AD / (DY_AD**2)
MU_AD = MU*(LSCALE**2)/(VISCMOL*CB*86400)    ! Tasa de oxidacion adim.
KO2_AD = KO2/CB    ! Constante de semisaturacion adimensional

allocate (INF(-NSED:NWAT),DIAG(-NSED:NWAT),SUP(-NSED:NWAT))
allocate (F(-NSED:NWAT),G(-NSED:NWAT))
allocate (ALFA(-NSED:NWAT),BETA(-NSED:NWAT),VISC(1:NWAT),PROD_AD(-NSED:-1))
    allocate (C(-NSED:NWAT),CN(-NSED:NWAT),CP(-NSED:NWAT))
allocate (Y_AD(-NSED:NWAT), RES1(1:NPROF1,-NSED:NWAT), RES2(1:NPROF2,-
NSED:NWAT))

do i = -NSED, NWAT
    Y_AD(i) = i*DY_AD
end do

do i = 1, NWAT
    ! Calculo de visc turbulenta ADIMENSIONAL mediante O'Connor (1995)
    YPLUS = (VCORTE*LSCALE*(Y_AD(i-1)+Y_AD(i))/2)/VISCMOL
    VISC(i) = (0.4 * YPLUS**3)/(7.4**3 + YPLUS**2)/SCT
    ! Subindice de viscosidad molecular está desplazado en 0.5
    ! P.ej., V(1) corresponde a V(0.5)
end do

PROD = PRODT * 0.015 / PROF_PROD    ! Produccion concentrada en espesor
asignado prof_prod
do i = -NSED, -1
    ! Produccion (adimensionalizada) de oxigeno por microfitobentos
    if (i>(-PROF_PROD/DY_AD/LSCALE)) then
        PROD_AD(i) = PROD * (LSCALE**2) / (CB * VISCMOL)
    else
        PROD_AD(i) = 0.0 * (LSCALE**2) / (CB * VISCMOL)
    end if
end do

```

```

open (1, file = 'od-eq.txt')
open (2, file = 'od-prod.txt')

print *, 'Difusion de OD en la interfaz agua-sedimento'
call SolucionEq
call SolucionProd

open (4, file = 'od-conc.txt')
50 FORMAT (22F14.5)
do j=1, NPROF2
  SUMCOL = 0.0
  SUMSED = 0.0
  do i= 1, NWAT
    SUMCOL = SUMCOL + RES2(j,i)
  end do
  do i= -NSED, 1
    SUMSED = SUMSED + RES2(j,i)
  end do
  write (4,50) T_RES2(j), SUMCOL/NWAT*CB, SUMSED/NSED*CB
end do
close (4)

close (1)
close (2)

```

contains

```

! Subrutina CondicionInicialEq, define la condicion inicial
! para el vector CP, o sea C(t=0)

```

```

subroutine CondicionInicialEq

```

```

!Constante en la columna de agua, nulo en los sedimentos
do i = -NSED, NWAT
  if (i<0) then
    CP(i) = 0
  else if (i>0) then
    CP(i) = 1
  end if
end do
CP(0) = 0.5 * (CP(-1) + CP(1))

```

```

end subroutine CondicionInicialEq

```

```

! Subrutina ThomasInv, realiza el algoritmo de Thomas pero al revés,
! haciendo que la matriz tridiagonal se transforme en triangular inferior.

```

```

subroutine ThomasInv

```

```

ALFA(NWAT) = DIAG(NWAT)
BETA(NWAT) = INF(NWAT) / DIAG(NWAT)
G(NWAT) = F(NWAT) / DIAG(NWAT)

do i= NWAT-1, -NSED, -1
  ALFA(i) = DIAG(i) - SUP(i) * BETA(i+1)
  BETA(i) = INF(i) / ALFA(i)
  G(i) = (F(i) - SUP(i) * G(i+1)) / ALFA(i)

```

```

end do

CN(-NSED) = G(-NSED)
do i=-NSED+1, NWAT
  CN(i) = G(i) - BETA(i) * CN(i-1)
end do
!print *, CN(10)

end subroutine ThomasInv

subroutine SolucionEq

  T_AD = 0.0
  UMBRAL_CONT = 0.0
  call CondicionInicialEq
  C = CP

do

  if ( T_AD>UMBRAL_CONT ) then
    print *, IIDNNT(T_AD/TMAX_AD1*100), '%'
    UMBRAL_CONT = UMBRAL_CONT + TMAX_AD1/20
  end if

do j=1, NPROF1
  if ( ABS(T_AD - T_RES1(j)*VISCMOL/(LSCALE**2)) < DT_AD) then
    do i=-NSED, NWAT
      RES1(j,i) = C(i)
    end do
  end if
end do

  T_AD = T_AD + DT_AD
  if (T_AD > TMAX_AD1) exit
  call ValoresMatrizEq
  call ThomasInv
  C = CN
  CP = CN

  40 FORMAT (22F14.5)

end do
print *, T_AD*(LSCALE**2)/VISCMOL

! write (1,*) 'Difusion de OD en la interfaz agua-sedimento'
write (1,40) REAL(NPROF1),(T_RES1(i), i=1,NPROF1)

do j=-NSED, NWAT
  write (1, 40) Y_AD(j)*LSCALE, (RES1(i,j), i=1, NPROF1)
end do

write (1, *) ' ' !espacio final

end subroutine SolucionEq

subroutine SolucionProd

  T_AD = 0.0
  UMBRAL_CONT = 0.0

```

```

do

  if ( T_AD>UMBRAL_CONT ) then
    print *, IIDNNT(T_AD/TMAX_AD2*100), '%'
    UMBRAL_CONT = UMBRAL_CONT + TMAX_AD2/20
  end if

  do j=1, NPROF2
    if ( ABS(T_AD - T_RES2(j)*VISC MOL/(LSCALE**2)) < DT_AD) then
      do i=-NSED, NWAT
        RES2(j,i) = C(i)
      end do
    end if
  end do

  T_AD = T_AD + DT_AD
  if (T_AD > TMAX_AD2) exit
  call ValoresMatrizProd
  call ThomasInv
  C = CN
  CP = CN

  40 FORMAT (22F14.5)
  !write (3,40) T_AD*LSCALE**2/VISC MOL, SODT, SOD1, SOD2
  !write (3,40) T_AD*LSCALE**2/VISC MOL, SODT

end do
print *, T_AD*(LSCALE**2)/VISC MOL

! write (2,*) 'Difusion de OD en la interfaz agua-sedimento'
write (2,40) REAL(NPROF2),(T_RES2(i), i=1,NPROF2)

do j=-NSED, NWAT
  write (2, 40) Y_AD(j)*LSCALE, (RES2(i,j), i=1, NPROF2)
end do

write (2, *) ' ' !espacio final

end subroutine SolucionProd

subroutine ValoresMatrizEq

! Condicion de borde abajo (sedimento)
DIAG(-NSED) = 1
SUP(-NSED) = 0
INF(-NSED) = 0
F(-NSED) = 0

do i=-NSED+1, -1
  INF(i) = R * (1-THETA) / (2 * SC)
  DIAG(i) = - (1 + R*(1-THETA)/SC + (1-THETA)*DT_AD*MU_AD/(KO2_AD+CP(i)))
  SUP(i) = R * (1-THETA) / (2 * SC)
  F(i) = CP(i+1)*(-R*THETA/(2*SC)) - CP(i)*(1-R*THETA/SC -
  THETA*DT_AD*MU_AD/(KO2_AD+CP(i))) + CP(i-1)*(-R*THETA/(2*SC))
end do

DIAG(0) = 1
INF(0) = -0.5

```

```

SUP(0) = -0.5
F(0) = 0

do i= 1, NWAT-1
  INF(i) = R * (1-THETA) * ( 1/SC + VISC(i) )
  DIAG(i) = - 1 - R * (1-THETA) * ( 2/SC + (VISC(i+1) + VISC(i)) )
  SUP(i) = R * (1-THETA) * ( 1/SC + VISC(i+1) )
  F(i) = - CP(i+1)*(R*THETA*(1/SC+VISC(i+1))) - CP(i)*(1-
R*THETA*(2/SC+(VISC(i+1)+VISC(i)))) - CP(i-1)*(R*THETA*(1/SC+VISC(i)))
end do

! Condicion de borde arriba (agua)
! Condicion de valor
DIAG(NWAT) = 1
INF(NWAT) = 0
SUP(NWAT) = 0
F(NWAT) = 1

end subroutine ValoresMatrizEq

subroutine ValoresMatrizProd

! Condicion de borde abajo (sedimento)
DIAG(-NSED) = 1
SUP(-NSED) = 0
INF(-NSED) = 0
F(-NSED) = 0

do i=-NSED+1, -1
  INF(i) = R * (1-THETA) / (2 * SC)
  DIAG(i) = - (1 + R*(1-THETA)/SC + (1-THETA)*DT_AD*MU_AD/(KO2_AD+CP(i)))
  SUP(i) = R * (1-THETA) / (2 * SC)
  F(i) = CP(i+1)*(-R*THETA/(2*SC)) - CP(i)*(1-R*THETA/SC -
THETA*DT_AD*MU_AD/(KO2_AD+CP(i))) + CP(i-1)*(-R*THETA/(2*SC)) -
PROD_AD(i)*DT_AD
end do

DIAG(0) = 1
INF(0) = -0.5
SUP(0) = -0.5
F(0) = 0

do i= 1, NWAT-1
  INF(i) = R * (1-THETA) * ( 1/SC + VISC(i) )
  DIAG(i) = - 1 - R * (1-THETA) * ( 2/SC + (VISC(i+1) + VISC(i)) )
  SUP(i) = R * (1-THETA) * ( 1/SC + VISC(i+1) )
  F(i) = - CP(i+1)*(R*THETA*(1/SC+VISC(i+1))) - CP(i)*(1-
R*THETA*(2/SC+(VISC(i+1)+VISC(i)))) - CP(i-1)*(R*THETA*(1/SC+VISC(i)))
end do

! Condicion de flujo
DIAG(NWAT) = 1
INF(NWAT) = -1
SUP(NWAT) = 0
FLUXC = 0.0
F(NWAT) = FLUXC * DY_AD

end subroutine ValoresMatrizProd

```

```
! Fin de subrutinas  
end program ModelOD
```