



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO COMBINADO DEL VIENTO Y LAS OLAS
EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO A UN CUERPO DE AGUA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL,
MENCIÓN HIDRÁULICA-SANITARIA-AMBIENTAL**

NATALIA MARTÍNEZ BARRIOS

**PROFESOR GUÍA:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSÉ VARGAS BAECHELER
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER**

**SANTIAGO DE CHILE
2015**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TITULO DE: Ingeniera Civil y grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico.

POR: Natalia Martínez Barrios

FECHA: Septiembre 2014

PROFESOR GUÍA: Aldo Tamburrino Tavantzis

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO COMBINADO DEL VIENTO Y LAS OLAS EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO A UN CUERPO DE AGUA

El flujo de gases existente entre el agua y el aire puede llegar a tener una gran importancia en la regulación de ciertos componentes claves en la calidad del agua, o cobrar importancia en ciclos de compuestos biogeoquímicos. La tesis se enfoca en la cuantificación de la transferencia de oxígeno entre el aire y el agua cuando la superficie de ésta se encuentra bajo la presencia de oleaje, limitando así el estudio a gases de baja solubilidad en primera instancia. Esto concentra la investigación en la capa líquida del agua, dado que es donde está el control de la transferencia.

Para esto se realiza un estudio experimental perturbando la zona líquida de dos formas: viento sobre la superficie y olas progresivas generadas mecánicamente en un estanque de agua. El objetivo es determinar la variable característica que permita describir el estado de perturbación de la superficie libre y cuantificar la tasa de transferencia de oxígeno asociada.

Las experiencias contemplan la medición de los niveles de oxígeno en un estanque de agua, ubicado en un túnel de viento, combinando los forzantes del agua. Se imponen vientos medios entre 0 y 15 m/s mientras que las ondas mecánicamente generadas varían tanto su altura (entre 1 y 4 cm) como su frecuencia (entre 1 y 3 Hz). Para cada una de las experiencias se mide una serie de tiempo de la elevación del agua, la pendiente instantánea y el perfil de viento en 4 puntos del estanque. Para completar el perfil del viento se mide la velocidad superficial del agua grabando trazadores sobre la superficie con una cámara de alta velocidad. La tasa de transferencia de oxígeno al agua se determina considerando mezcla completa en el estanque. La cantidad de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua se reduce al comienzo de las experiencias agregando sulfito de sodio.

La recopilación de datos muestra que efectivamente se ha simulado un fetch mayor al real con la inclusión de ondas mecánicamente generadas. Uno de los resultados del efecto combinado de los forzantes de la superficie libre en su perturbación es el logro de una mayor uniformidad en los distintos parámetros medidos. Además, en función de la frecuencia y altura de las ondas mecánicas, el fetch puede correlacionarse con una frecuencia adimensional, usualmente utilizada en mediciones mar adentro.

La tasa de transferencia de oxígeno a través de la interfaz aire-agua se estudia tanto para el caso de ondas mecánicamente generadas como para cuando se tiene el efecto combinado de éstas con el viento. En ambos casos se adimensionaliza dicha tasa con un valor proporcional a la celeridad de las ondas. Para el primer caso, se encuentran relaciones similares a las obtenidas en otros estudios, siendo la pendiente media de la superficie libre el factor determinante de la tasa de transferencia de oxígeno.

Finalmente, para el segundo caso, se construye otros parámetros adimensionales que describan la tasa de transferencia apropiadamente. Estos son el número de Reynolds con la velocidad superficial como escala de velocidad y la elevación media cuadrática como escala de longitud; y una razón de aspecto de la elevación y la longitud de onda la que puede interpretarse como la pendiente media de la onda.



Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS	2
2. ANTECEDENTES	4
2.1. CARACTERÍSTICAS DE UN OLEAJE.....	4
2.2. DINÁMICA DEL VIENTO SOBRE LA INTERFAZ.....	5
2.3. TRANSFERENCIA DE OXÍGENO	7
2.3.1. INFLUENCIA DEL OLEAJE EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO	8
2.3.2. INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA TRANSFERENCIA DE OXÍGENO.....	9
2.3.3. OTROS FACTORES.....	12
3. INSTALACIÓN Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	14
3.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	14
3.2. METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN	16
3.2.1. VELOCIDAD SUPERFICIAL	16
3.2.2. PERFIL DE VELOCIDADES	16
3.2.3. CABLES CAPACITORES	19
3.2.4. TRANSFERENCIA DE OXÍGENO	20
3.3. CONSIDERACIONES DEL ESTUDIO	21
3.4. COMENTARIOS	22
4. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	25
4.1. VIENTO.....	25
4.1.1. VELOCIDAD SUPERFICIAL	25
4.1.2. PERFIL DE VELOCIDADES	28
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE LIBRE	31
4.2.1. ELEVACIÓN	31
4.2.2. PENDIENTE.....	35
4.3. OXÍGENO.....	37
4.4. PROPAGACIÓN DE ERRORES	39
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
5.1. TRANSFERENCIA DE OXÍGENO	41
5.2. VELOCIDAD SUPERFICIAL	52
5.3. INDEPENDENCIA DEL <i>FETCH</i>	54
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	65

1. Introducción

La transferencia de gases a través de la superficie en grandes cuerpos de agua como zonas costeras, estuarios y/o lagos, ha sido un tema de interés científico desde hace mucho tiempo. La interacción entre el agua y el aire puede llegar a ser importante dentro de los ciclos de compuestos biogeoquímicos que afectan al clima, el tiempo e inclusive la salud (Wanninkhof *et al.*, 2009). Ejemplos de esto son el oxígeno disuelto que se incorpora al mar, necesario para organismos acuáticos e indicativo de la calidad del agua, o bien el intercambio de gases invernaderos o de importancia climatológica, que se produce al existir un flujo invasivo o evasivo en la interfaz aire-mar en distintos lugares y épocas del año (Frew *et al.*, 2004).

El estudio de los ciclos globales de gases como el dióxido de carbono ha encauzado las investigaciones al pragmatismo de asociar las tasas de transferencias a variables meteorológicas de gran escala, tanto temporales como espaciales (Bock, *et al.*, 1999). Comúnmente la transferencia se relaciona con alguna velocidad arbitraria del viento sobre el agua. Si bien las relaciones aplicadas se ajustan a datos reales regionales y contienen una justificación teórica, pues el esfuerzo tangencial sobre la superficie libre está relacionado con la turbulencia de la superficie, ellas carecen de modelos físicos que permitan extrapolarlas a otros lugares regionales (Wanninkhof *et al.*, 2009). Este vacío se debe a que existen muchos factores que pueden cobrar importancia en la transferencia según el lugar, separando el problema en muchos sub-problemas con distintas variables de importancia, complicando así los estudios a escala global de los ciclos de estos gases.

De hecho, recientemente, Torres *et al.* (2011) han estudiado el flujo de dióxido de carbono a lo largo de la costa de Chile (entre las latitudes 23°S y 56°S), un gran sistema que comprende distintas características de temperatura, salinidad, vientos, afluentes y topografía. El estudio, estima los flujos de CO₂ con una sencilla relación planteada por Wanninkhof (1992). El estudio contiene datos oceánicos extraídos por todo el globo terráqueo para plantear finalmente una relación dependiente únicamente de la velocidad a 10 metros de la superficie y la temperatura del agua. Sin embargo, un mismo viento puede modificar de distinta manera la superficie libre en el océano o en un fiordo. Por otro lado, luego de expediciones mundiales se han modificado las relaciones predictivas (Wanninkhof & McGillis, 1999), pero se sigue utilizando la metodología anterior, probablemente para poder comparar resultados. Esto remarca más la necesidad de encontrar relaciones que ligen de mejor manera lo que sucede en la interfaz con la transferencia, para que luego, en los puntos en que se quiera medir, se realicen estudios específicos que ligen alguna variable sencilla de obtener con dichas características hidrodinámicas.

Para gases de baja solubilidad, como lo son el CO₂, O₂, CH₄, N₂O, CO, etc., el flujo en la interfaz aire-agua está controlado por una subcapa difusiva acuosa, cobrando poca importancia la subcapa gaseosa. Siendo este mundo tan dinámico, las condiciones de esta capa superficial del agua pueden ser muy distintas debido a diversos factores, teniendo que considerarse distintas parametrizaciones para la transferencia de los gases (Upstill-Goddard, 2006). Enfocando el estudio al oxígeno en particular, que es naturalmente fácil de trabajar, es posible distinguir muchos procesos en un solo viaje a la playa: las olas que revientan en una playa entregan una gran cantidad de energía cinética y burbujas que amplían la superficie de la interfaz aire-agua; la lluvia penetrando en el mar entrega energía y permite el paso de algunas burbujas; el viento perturba la superficie; el encuentro entre un río y el mar combina distintos parámetros termodinámicos, etc.

Es interesante entonces buscar relaciones funcionales entre las características de la superficie libre y distintos parámetros controlados que la estén perturbando. Dado que la variable que explica la mayor parte de la transferencia a causa del viento, alguna velocidad característica, es también la variable que mayor dispersión puede tener, es necesario estudiar su real aporte a caracterizar la superficie libre. La mayor varianza de estimar la transferencia con una velocidad a una altura se debe al terreno en específico en el que se trabaja y al recorrido de dicho viento en la superficie del agua. Para evitar esto se han buscado relaciones con la velocidad de corte que representa mejor la rugosidad del cuerpo de agua. Pero esto no ha sido suficiente para una buena descripción, puesto que el viento viene a entregar la energía pero no es el mecanismo directo en la transferencia. Investigaciones previas manifiestan relaciones más fuertes con el espectro de olas generadas por éste (Jähne *et al.*, 1985). También se ha relacionado la transferencia con la pendiente media cuadrática de las olas generadas por el viento (Rayo, 2010) para un oleaje en desarrollo. Por otro lado, se ha visto que la presencia de ondas gravitacionales en ausencia de viento también induce una mayor transferencia de oxígeno, siendo importantes tanto la altura como la frecuencia de las olas (Daniil & Gulliver, 1991).

Este trabajo pretende realizar un aporte en el análisis de la interacción del viento con olas ya desarrolladas, y en la manera como se liga esto con una tasa de transferencia de oxígeno. Para realizar esto se propone un estudio experimental donde se podrán generar olas de forma mecánica y adicionalmente forzarlas con viento en la interfaz con el aire.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de la presente tesis es el estudio experimental del efecto combinado de ondas gravitacionales y viento en la transferencia de oxígeno del aire a un cuerpo de agua. Para lograr esto se proponen distintos objetivos específicos:

- (1) Caracterizar las distintas variables de las experiencias a realizar tanto en el flujo de viento como en la superficie libre del agua. Esto significa implementar distintas metodologías para la medición de series de tiempo de la elevación y pendiente de la superficie libre en distintos puntos, la velocidad superficial del agua y los parámetros que determinan la dinámica del viento.
- (2) Determinar la tasa de transferencia de oxígeno bajo distintas condiciones de viento y olas.
- (3) Plantear relaciones entre la transferencia de oxígeno y las características del oleaje en base a un análisis dimensional del problema.

1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este informe se desglosa en siete capítulos principales descritos a continuación:

- (1) Introducción: Se presenta la motivación de un estudio de transferencia de gases en la interfaz agua–aire. Se definen los alcances del trabajo en cuanto al estudio experimental de la transferencia de oxígeno en un estanque con olas y viento. Finalmente se plantean los objetivos de la tesis.

- (2) Antecedentes: Aquí se encuentran las nociones conceptuales del problema en cuanto a las variables involucradas del problema y sus comportamientos. Además se incluye una revisión bibliográfica de estudios previos en torno a los factores que influyen en la transferencia de oxígeno en la interfaz aire-agua, en particular las características de la superficie libre.
- (3) Instalación y metodología experimental: En este capítulo se detalla la instalación experimental a utilizar; además se presenta la metodología experimental, considerando la definición de los experimentos a desarrollar.
- (4) Procesamiento de datos: Se especifican los distintos procedimientos para la extracción de información de los datos adquiridos en los experimentos.
- (5) Análisis y resultados: Se realiza el desarrollo de un análisis dimensional para relacionar las distintas variables del problema. Se presentan las relaciones finales obtenidas para determinar la transferencia de oxígeno en la interfaz aire-agua. Se analizan, asimismo, otros fenómenos como la relación entre la velocidad superficial y la velocidad de corte del viento, y la uniformidad alcanzada de las variables en el estanque al incluir ondas mecánicas.
- (6) Discusión y conclusiones: Se presentan las conclusiones del estudio desarrollado.
- (7) Anexos: En tres anexos se reúne la mayor parte de la información. Todas las variables medidas características para cada punto medido (A); los perfiles de viento graficados para todos los casos (B); y la evolución del déficit de oxígeno para cada caso medido y su ajuste logrado (C).

2. Antecedentes

En el presente capítulo se presentan nociones teóricas para los posteriores análisis teóricos, además de escalar las distintas variables controladas para los experimentos.

2.1. CARACTERÍSTICAS DE UN OLEAJE

Suponiendo que el flujo es irrotacional, la ecuación gobernante del problema es sencillamente la ecuación de Laplace, $\nabla^2\Phi = 0$, donde Φ es el potencial de velocidad (cumple que $\nabla\Phi = \vec{u}$). Considerando condiciones de borde, de periodicidad, Bernoulli constante en la superficie libre, y aproximación lineal expandiendo en series de Taylor de primer orden y descartando términos de orden superior, entonces se puede encontrar un potencial de velocidad de la forma (Dean & Dalrymple, 2000):

$$\Phi = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh(k\{h + z\})}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

Donde entran varios parámetros importantes esquematizados también en la Figura 2.1: $H/2$, la amplitud; g , la aceleración de gravedad; h , la profundidad del cuerpo de agua; k , el número de onda, estrechamente relacionado con la longitud de onda, λ , puesto que $k = 2\pi/\lambda$; y ω , la frecuencia angular de la onda relacionada a su vez con el periodo, T , como $\omega = 2\pi/T$. Por otro lado, se encuentra la variable temporal, t , y las variables espaciales x , en el sentido de la propagación de la onda, y z , en un eje vertical. En la práctica, al generar las ondas desde un extremo con una condición de borde móvil, la onda progresiva viene acompañada de una onda estacionaria generada en dicha placa generadora que decae exponencialmente su amplitud a lo largo del cuerpo de agua.

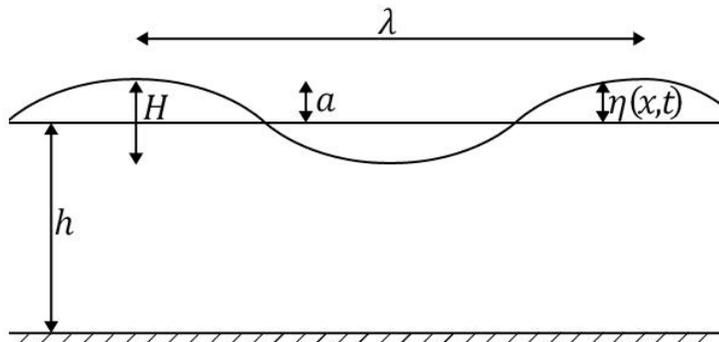


Figura 2.1. Esquema de la superficie libre.

De este potencial se puede extraer la forma de la superficie libre:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

además de la velocidad u en el sentido de propagación de la onda y w en el eje vertical:

$$u(x, z, t) = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\cosh(k\{h + z\})}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.3)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(k\{h + z\})}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.4)$$

En el desarrollo teórico general para encontrar la función potencial del campo de velocidad aparece la relación de dispersión que liga el número de onda con la frecuencia y es igual a:

$$\omega^2 = gk \left(1 + \frac{\sigma}{\rho_\omega g} k^2 \right) \tanh(kh) \quad (2.5)$$

Donde σ es la tensión superficial del agua y ρ_ω la densidad del agua. Además se puede definir la celeridad de las ondas como $c = \omega/k$. Para despreciar el término de la tensión superficial hay que trabajar con números de onda suficientemente pequeños. Para longitudes de onda alrededor de 5 cm, el aporte por tensión superficial a la relación de dispersión es un 10% del aporte gravitacional, esto a su vez se obtendría con unas frecuencias mayores a 5.5 [Hz]. Por otro lado, según el valor de kh se pueden hacer ciertas aproximaciones a la tangente hiperbólica entre olas de aguas bajas, intermedias o profundas. Estas últimas son las de interés a estudiar y se obtienen si la razón entre la profundidad y la longitud de onda es mayor a 0.5. En este caso, se puede hacer la aproximación $\tanh(kh) \rightarrow 1$. En el presente estudio la profundidad es de 50 cm aproximadamente para todos los casos, por lo que la longitud de onda limitante corresponde 1 m. En estos casos la relación de dispersión se reduce a:

$$\omega^2 = gk \quad (2.6)$$

2.2. DINÁMICA DEL VIENTO SOBRE LA INTERFAZ

Se ha verificado que el perfil del viento en la interfaz con el agua sigue un perfil logarítmico del tipo:

$$\frac{u(z) - u_s}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.7)$$

Donde u_* es la velocidad de corte por el lado del aire, u_s es la velocidad superficial de la interfaz, $u(z)$ es la velocidad en una posición z , κ es la constante de Von Kármán, z es la distancia a la superficie libre (positivo hacia arriba) y z_0 es la rugosidad equivalente. Si bien no existe un gran consenso en torno a esta rugosidad, sí es la más utilizada de esta forma en los estudios aire-mar.

Los estudios experimentales también indican que la velocidad superficial del agua es proporcional a la velocidad de corte (Wu, 1975; Nezu y Nakayama, 1999) acorde a la razón:

$$\frac{u_s}{u_*} = 0.55 \quad (2.8)$$

Sin embargo, otras investigaciones indicaban proporciones más altas en función de la velocidad de corte en el lado del agua, w_* ,

$$u_s \sim 24w_* \sim 24u_* \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \sim 0.759u_* \quad (2.9)$$

Indicando además que las observaciones estiman un rango $u_s \sim (0.379 - 0.759)u_*$ cuando las corrientes son pequeñas (Bye, 1988). Si bien la expresión de Wu(1975) es la más replicada por su sencillez, investigaciones posteriores a Wu, que trabajan en distintos rangos, indicarían que no es una razón constante. Algunos están muy por sobre la razón siempre, otros bastante por debajo (ver Figura 2.2) y el mismo trabajo de Wu abarca un rango de la razón entre 0.4 y 0.8. Ese trabajo fue realizado con discos quizá muy invasivos, lo que invita a indagar más el área con una mayor tecnología.

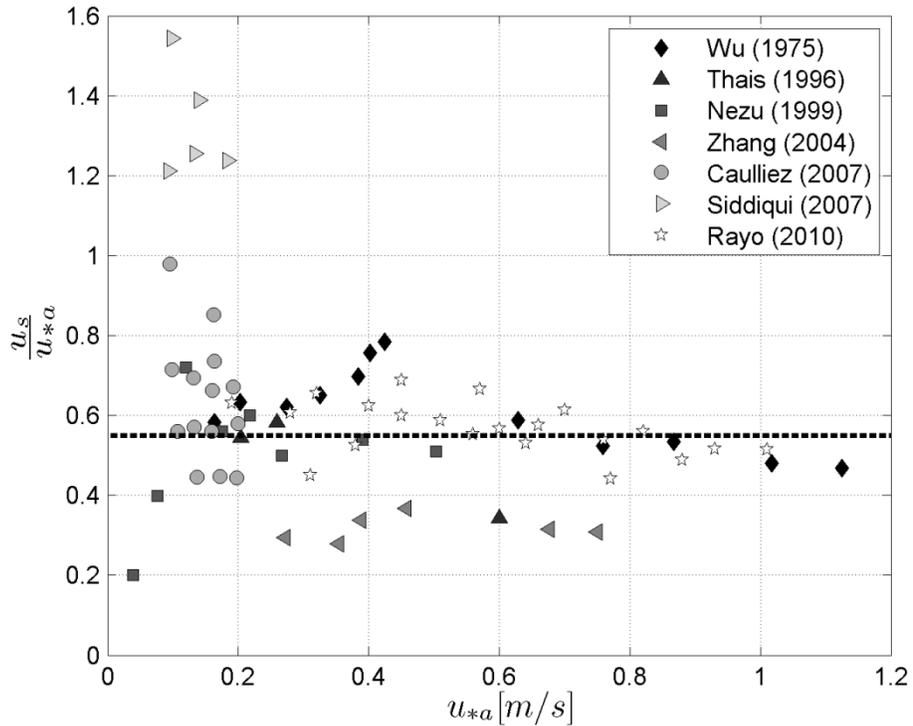


Figura 2.2. Razón u_s/u_* en función de la velocidad de corte del viento u_*

La rugosidad, z_0 , también es un parámetro cuyo comportamiento no es tan claro, Charnock (1955) introduce una relación adimensional encontrando una constante (ecuación (2.10)); sin embargo, se ha encontrado que varía principalmente en vientos ligeros (Ueno y Deushi (2003); Taylor y Yelland (2000)).

$$\alpha_C = \frac{z_0 g}{u_*^2} = 0.0185 \quad (2.10)$$

Toba y Koga (1986) también proponen una relación constante en la que entra en juego la frecuencia angular *peak*, ω_p , que se extrae del espectro de energía de $\eta(t)$. Ésta indicaría un estado etario de la onda al ser dividido por la velocidad de corte del viento (ecuación (2.11)), pero esta relación tampoco se ha hallado que sea constante en todas las situaciones.

$$\gamma_T = \frac{\omega_p z_0}{u_*} = 0.025 \quad (2.11)$$

2.3. TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Como ya se ha mencionado antes, el oxígeno es un gas de baja solubilidad, por lo que su flujo en la interfaz aire-agua viene controlado por la fase líquida. Bajo estas circunstancias, el flujo, F está dado por una relación que es proporcional a una tasa de transferencia, $k_L [LT^{-1}]$, donde están involucradas las forzantes del problema y un gradiente de concentración en la subcapa difusiva acuosa, como se presenta en la ecuación (2.12).

$$F = k_L(\alpha C_a - C_w) \quad (2.12)$$

El gradiente de concentración queda descrito por el valor en la superficie equivalente al valor de la concentración de oxígeno en el aire, C_a , por su coeficiente de solubilidad de Ostwald, α , y el valor de la concentración en la masa bajo la subcapa C_w . Un esquema se muestra en la Figura 2.3.

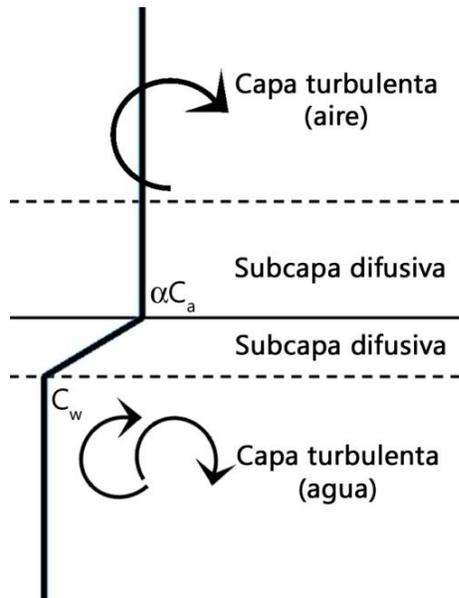


Figura 2.3. Esquema simple de la interfaz para un gas poco soluble. (Adaptado de Wanninkhof *et al.* (2009)).

Existen diversos modelos conceptuales para la tasa k_L , desde un espesor único de esta subcapa hasta modelos dinámicos que aceptan una variación de dicho espesor por vórtices de la capa turbulenta o divergencias del flujo. El modelo mayormente utilizado para la determinación de la tasa de transferencia es el de renovación de la superficie presentado por Danckwerts (1951) en el campo de la química. En este modelo, la capa difusiva que presenta la resistencia al cambio de gas es periódicamente reemplazada por una masa de agua de la capa inferior debido a la turbulencia superficial.

Danckwerts plantea que la tasa de transferencia tiene integrada la difusión molecular a través del coeficiente de difusión molecular $D [L^2T^{-1}]$, y la turbulenta, por medio de $r [T^{-1}]$, la tasa de renovación de la superficie, de la forma indicada en la ecuación (2.13).

$$k_L \sim \sqrt{Dr} \quad (2.13)$$

Luego, las características hidrodinámicas de la capa superficial del agua deben quedar representadas en r . En general se busca un ajuste del tipo,

$$St = Sc^n f(u, l, \nu \dots) \quad (2.14)$$

Donde $St = k_L/u$ es el número de Stanton que escala la tasa de transferencia del gas con alguna escala de velocidad característica del cuerpo de agua o de la acción del viento; $Sc = \nu/D$ es el número de Schmidt que enfrenta la difusión molecular con los efectos viscosos representados por la viscosidad cinemática de medio, ν . Este número tiene vital importancia a la hora de traspasar las relaciones encontradas con otros medios (agua salada o agua dulce por ejemplo) y otros gases. El exponente n varía entre $-1/2$ y $-2/3$, según el modelo que se ocupe, desde la teoría de renovación de la superficie para una superficie libre ($n = -1/2$) hasta considerar una superficie rígida ($n = -2/3$), como lo analizó teóricamente Coantich (1986), o como lo observaron McKenna y McGillis (2004) cuando la superficie no está limpia. Algunas investigaciones plantean una transición para el exponente de acuerdo al estado de la superficie (Richter y Jähne (2011) asocian por ejemplo, n con la pendiente cuadrática media del oleaje para incluir el hecho de que la superficie pasa de un estado liso para vientos bajos hasta uno rugoso para vientos mayores).

McKenna y McGillis (2004), que definen n como el inverso aditivo al definido acá, proponen un exponente variable que varía entre $2/3$ y $1/2$ de forma exponencial,

$$n = \frac{2}{3} - \frac{1}{6} e^{-\frac{Mg}{2}} \quad (2.15)$$

donde Mg es una expresión del número de Marangoni que sopesa las fuerzas de tensión superficial con las viscosas de la forma $Mg = \frac{Re^{\frac{1}{2}}}{We}$, donde, a su vez, el número de Reynolds (Re) y el número de Weber (We) se determinan con escalas características de la velocidad y longitud de la turbulencia superficial demás de la presión superficial.

Por otro lado, la función $f(u, l)$ describe la turbulencia en términos de una escala de longitud, l , velocidad, u , entre otros. Por ejemplo, si se plantea un esquema de que los grandes vórtices manejan la turbulencia ($r \sim u/l$) se puede llegar a relaciones del tipo $St = Sc^n Re^{-\frac{1}{2}} \psi$, con ψ una relación funcional de otras variables no representadas en el número de Reynolds $Re = ul/\nu$ que contiene una escala de velocidad y longitud de los grandes vórtices. De forma análoga, en una escala de pequeños vórtices en la superficie ($r \sim \left(\frac{\nu}{u^3/l}\right)^{1/2}$) se encuentran relaciones del tipo $St = Sc^n Re^{-\frac{1}{4}} \psi$, donde el número de Reynolds debe estar escalando las pequeñas longitudes.

2.3.1. Influencia del oleaje en la transferencia de oxígeno

Ante la presencia de ondas gravitacionales sin un aporte externo adicional, como el viento, se ha observado un incremento en la tasa de transferencia de oxígeno (Daniil & Gulliver, 1991). Esto se justifica en el movimiento orbital que tienen los elementos de agua en el curso de las olas. En dicho artículo los autores proponen una tasa de renovación de la forma:

$$r \sim \frac{V_{max}}{H} G_r \quad (2.16)$$

Donde V_{max} es la máxima velocidad vertical que para olas de pequeña amplitud, teóricamente es equivalente a $\pi H f$, con H la amplitud de la ola y f la frecuencia. Además, G_r es un adimensional que integra parámetros que afectan el transporte. Este estudio plantea tres diferentes definiciones para G_r : $Re_w = \frac{V_{max} H}{\nu}$, $Re_w S^2$, S^2 . Donde S^2 , la pendiente cuadrática media calculada a partir de la teoría lineal (deducible de la expresión (2.2)), entra en consideración luego de que Jähne *et al.* (1987) observaron que tenía una estrecha relación con el valor del número de Stanton. La mejor relación que determinaron corresponde a la primera proposición de G_r :

$$kSc^{\frac{1}{2}} = 0.0159Hf \quad (2.17)$$

2.3.2. Influencia del viento en la transferencia de oxígeno

La cuantificación de la tasa de transferencia en función de alguna velocidad de corte o en alguna posición fija es lo que se realiza mayormente, tanto en experiencias de laboratorio (Peirson *et al.*, 2007; Tamburrino y Rayo, 2010) como en estudios de campo (Bock *et al.*, 1999; Frew *et al.*, 2004). Las formulaciones varían desde análisis teóricos para ciertas condiciones particulares (Coantic, 1986) hasta funciones pragmáticas para aplicar en grandes cuerpos de agua (Wanninkhof, 1992; Crusius y Wanninkhof, 2003) que finalmente son las más utilizadas.

Wanninkhof *et al.* (2009) realizan una revisión de distintas relaciones desarrolladas para k_L en función de U_{10} para estudios de campo encontrando relaciones lineales, cuadráticas y cúbicas. Diferentes tasas que distinguen la zona de procedencia de la medición se aprecian en la Figura 2.4. De forma similar se tienen las relaciones de k_{660} (k_L estandarizado a $Sc = 660$) con la velocidad de corte esta vez en la Figura 2.5, donde existe una gran dispersión igual, aunque si se observan individualmente las experiencias plasmadas en el gráfico se observa una mejor tendencia.

Existen pocos estudios que intentan encontrar otras variables independientes con las cuales determinar la tasa de transferencia. Komori *et al.* (1993) intentan encontrar la tasa de renovación de la superficie de forma experimental para ajustar directamente la ecuación (2.13). Sus resultados, expuestos en la Figura 2.6, muestran una clara tendencia, aunque carecen de otros estudios para comparar o revisar su dispersión.

Sin embargo, con el transcurrir del tiempo se empezó a abandonar la parametrización netamente con la velocidad del viento y se estudió la influencia del viento en la turbulencia de la superficie; luego se liga ésta a la transferencia. Es decir, aceptar que no es el mecanismo directo y buscar otras caracterizaciones del fenómeno. Peirson *et al.* (2007) resumen su experiencia con otras investigaciones en la Figura 2.7, donde distingue distintos estados de las olas dentro observando que la tasa de transferencia, además de ser proporcional al esfuerzo del viento, aumenta paulatinamente entre ondas sin quiebre, con microquiebres incipientes y con microquiebres continuos. Este estudio es posterior al de Peirson y Banner (2003), en donde estiman la tasa de transferencia a suponiendo un flujo primordial por la zona de microquiebres asociando así la tasa con una probabilidad de microquiebre además de la frecuencia característica de las ondas.

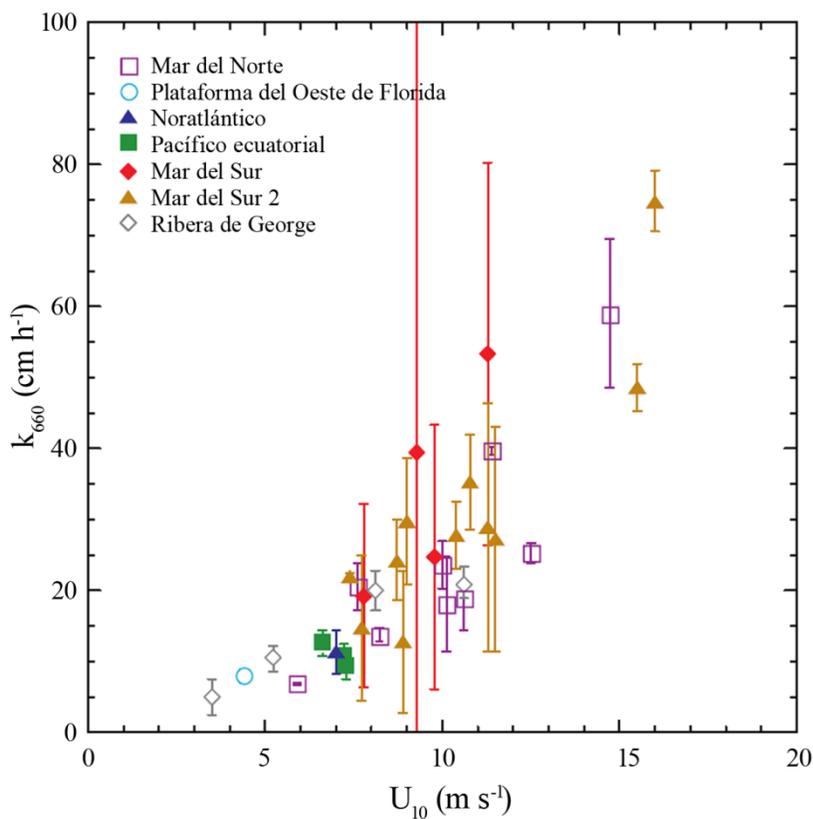


Figura 2.4. Tasa de transferencia en función de la velocidad a 10 m para zonas costeras de los océanos (símbolos sin rellenos) y mar adentro (símbolos rellenos) de distintos estudios. Traducido de Wanninkhof *et al.* (2009).

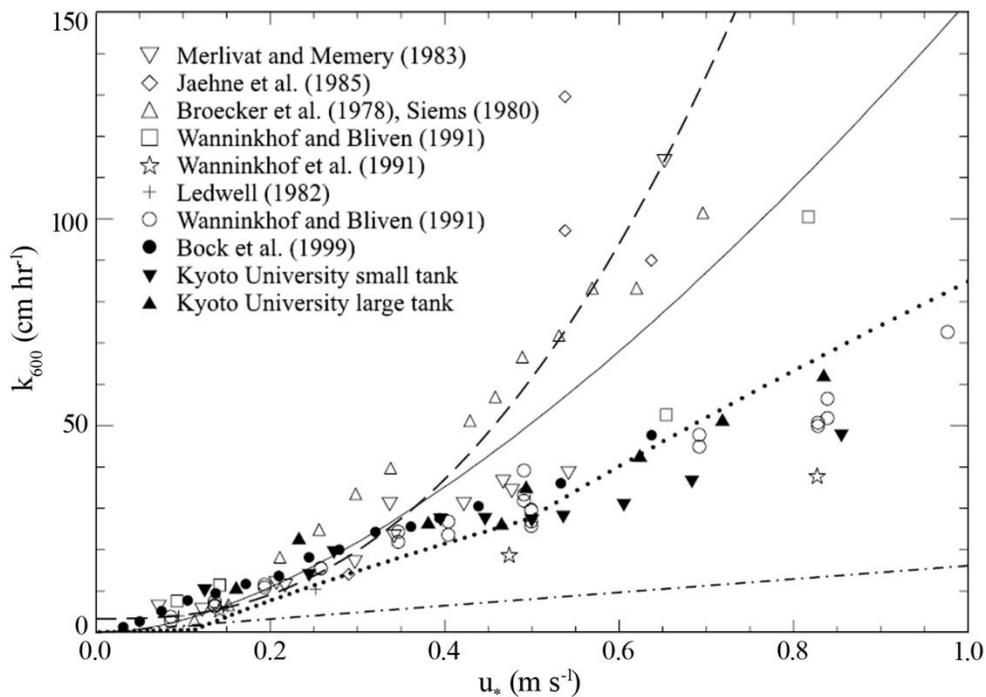


Figura 2.5. Comparación de tasas de transferencia en función de la velocidad de corte de estudios de terreno y de laboratorio, además de ciertos modelos propuestos en McGillis *et al.* (2007).

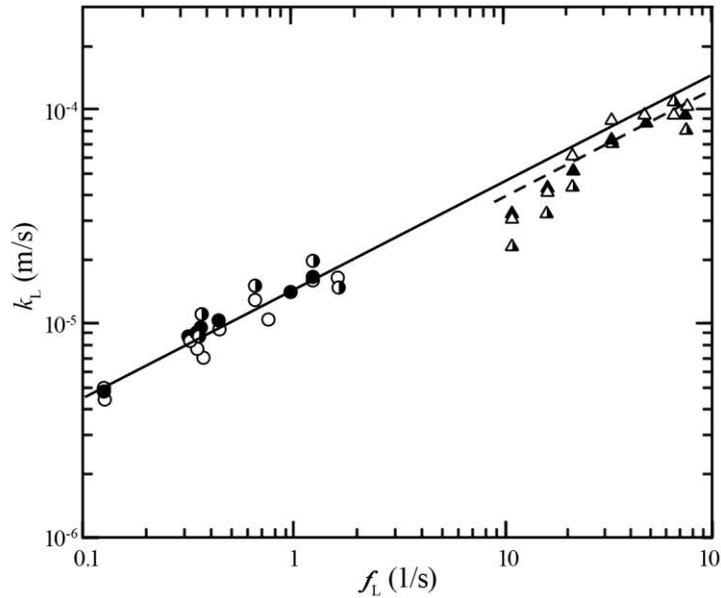


Figura 2.6. Tasa de transferencia en función de la frecuencia del movimiento organizado (más o menos proporcional a la frecuencia de la onda). Los triángulos blancos son mediciones en un estanque con interfaz forzada mientras que los círculos blancos son mediciones en un estanque abierto. Las figuras negras y parcialmente negras son predicciones de acuerdo a dos modelos de renovación de la superficie libre. La línea continua es $k_L = 0.34(Df_L)^{\frac{1}{2}}$, mientras que la línea de guiones es $k_L = 0.29(Df_L)^{\frac{1}{2}}$. Komori *et al.* (1993)

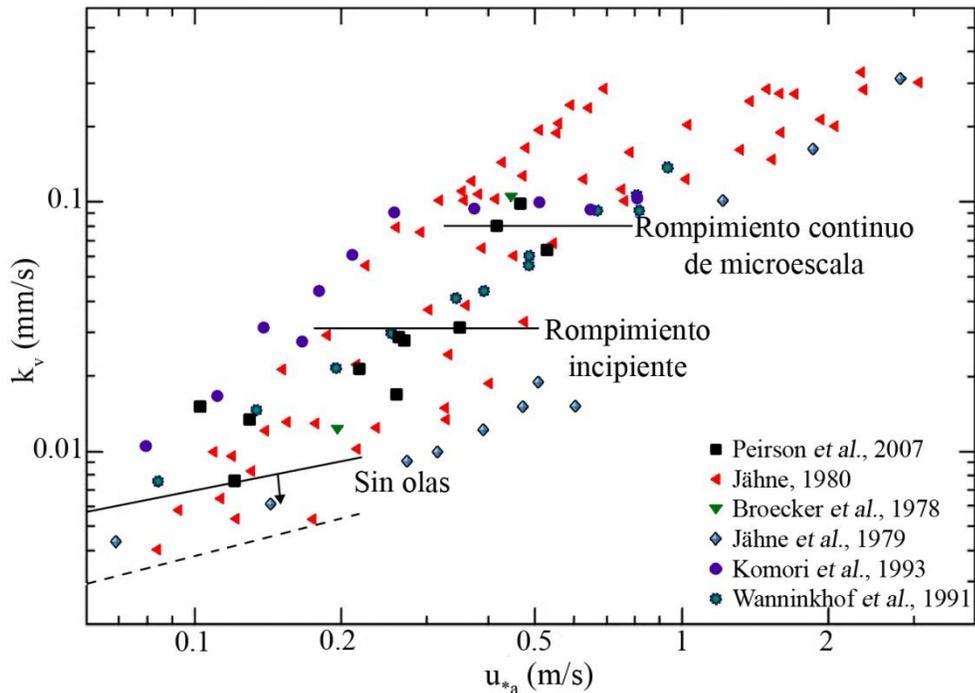


Figura 2.7. Tasa de transferencia en función de la velocidad de corte del viento. (Traducido de Peirson *et al.*, 2007). Se observa una tendencia gruesa entre estas variables pero con mucha dispersión, lo que indica que no está bien caracterizado el fenómeno.

2.3.3. Otros factores

Si bien estas estructuras de las olas están relacionadas con la velocidad de corte del viento, no tienen por qué ser ésta una única relación puesto que la transferencia dependerá del *fetch*, distancia que ha recorrido el viento sobre el agua, como también de la cantidad de impurezas que existan en la superficie libre, por ejemplo. Muchas impurezas producirán que la tensión superficial sea muy alta lo que no permitiría oscilaciones; la aparición de ondas capilares, por su parte, será retrasada y luego su desarrollo será más lento y restringido a un rango de número de onda menor (Coantic, 1986).

Read *et al.* (2012) estudiaron el control de la transferencia de gases en 40 lagos en función de la forzante del viento y la convección térmica que se generaba en el cuerpo de agua variando la relación entre ellos a lo largo del año. En los lagos de menor tamaño se tenía que la convección aportaba mayor turbulencia en el lago que el viento, cobrando mayor importancia en la transferencia de los gases. Se observa una tendencia entre un aporte de un 80% a la tasa de transferencia por parte de la convección para lagos de superficie $10^3 m^2$, disminuyendo exponencialmente hasta un 20% para lagos de $10^6 m^2$, para luego variar mínimamente el aporte en cuerpos mayores.

Existen muchos otros procesos que influyen en la transferencia de gases del aire al agua. Las revisiones de Upstill–Goddard (2006) y Wanninkhof *et al.* (2009) exploran las distintas variables que controlan el proceso total. A continuación se presentan brevemente las más relevantes.

- (1) El rompimiento de las olas es el proceso más evidente. Esto conlleva tanto la incorporación de burbujas en el cuerpo de agua como el aumento en la turbulencia de la superficie. La cuantificación de esto se suele llevar a cabo mediante una relación con la cobertura blanca que se forma sobre la superficie con la velocidad del viento que genera el rompimiento.
- (2) El *microbreaking*, rompimiento de pequeña escala de las olas que no alcanza a incorporar aire a la masa de agua pero que sí aporta turbulencia a la capa superior es un complejo fenómeno en estudio. La utilización de herramientas actuales, como lo son las imágenes infrarrojas, permiten el estudio de este rompimiento de microescala que induce efectivamente la renovación de la superficie libre más allá de parámetros que están relacionados como la pendiente de las ondas.
- (3) La temperatura y la salinidad del agua afectan similarmente el proceso al variar los valores de la solubilidad y el coeficiente de difusión molecular del gas y la viscosidad cinemática del medio. Si bien las relaciones han sido cuantificadas, la dificultad más grande radica en que en estudios de campo pueden existir marcados gradientes verticales, horizontales y temporales de salinidad y temperatura. Cuando existen gradientes horizontales complica el cálculo del flujo de gases en grandes áreas. Los gradientes verticales son generados por la radiación solar con una componente diaria y estacional para el caso de la temperatura, y por la precipitación/evaporación y la conexión con ríos en zonas estuarinas con componente estacional y de marea, para el caso de la salinidad. Éstos dificultan el estudio, en primer lugar, porque las características de la capa superficial son distintas al punto donde se estén realizando las mediciones en general. El espesor de la subcapa difusiva es muy pequeño y las mediciones de terreno suelen realizarse a varios decímetros de profundidad. Por otro lado, presentan un conflicto al cambiar las condiciones de mezcla en el cuerpo si es que éste presenta una brusca estratificación. La profundidad del cuerpo de agua que no tenía influencia pasa a ser importante cuando se forma una capa superficial que

debe interactuar de otras formas con una capa inferior. Estudios han mostrado que ignorar este fenómeno puede provocar errores en torno al 30% en la cuantificación de los flujos para vientos pequeños.

- (4) Las precipitaciones aumentan el flujo de gas del aire al agua significativamente. Tal como el rompimiento de las olas, las gotas de lluvia aumentan la turbulencia de la superficie e incorporan burbujas al cuerpo de agua. El flujo de gas está relacionado con la intensidad de la lluvia y el tamaño de las gotas, pero de todas formas el aumento de la turbulencia es lo que más acrecienta el flujo de los gases. Pero la lluvia afecta también al disminuir la salinidad de la superficie, variar la temperatura y amortiguar las ondas gravitacionales. La lluvia puede cobrar importancia en escala regional en zonas de alta tasa de precipitaciones, pero, por ejemplo, a escala global representa menos de un 5% del flujo de CO_2 .
- (5) Los productos químicos que actúan como surfactantes modifican la tensión superficial del líquido, lo que puede ser importante en ondas capilares (que de todas formas existen cuando hay una perturbación pequeña de la superficie libre para vientos muy bajos). Éstos provienen de forma natural, en los océanos, de los polisacáridos del fitoplancton principalmente. La cuantificación es un problema no resuelto aún, pues varía de lugar a lugar, pero se ha visto que la relación entre la clorofila A y la transferencia es, al menos, una cota superior.
- (6) El esfuerzo de fondo en una corriente también puede llegar a tener un importante rol en la turbulencia de la superficie. En el caso de corrientes de río, Rayo (2009) estudió la energía cinética que se genera en la superficie al tener un fondo agitado encontrando relaciones entre esta energía y la tasa de transferencia. Por otro lado, para zonas costeras se ha visto que en ciertas épocas del año la corriente que desemboca en el mar puede llegar a alterar hasta en un 20% la tasa de transferencia de gases.
- (7) En cuerpos de agua naturales existe una delgada capa rica en bacterias ubicada en el primer milímetro de la superficie libre. Esta capa micrométrica es tanto química como microbiológicamente distinta al resto de la subcapa difusiva. Suele ser llamada “bacterioneuston”. Su relación con los gases es variada según sea el gas, se ha visto que consume CO , produce CO_2 , metabolizan CH_4 , etc. Teniendo esto en consideración se han medido variaciones de un 10% de lo que se debería medir en esos lugares en función de otras variables como el viento.

3. Instalación y metodología experimental

3.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Esta instalación, ubicada en el Laboratorio Francisco J. Domínguez, consta de un túnel de viento de 10 metros de largo que en su tramo final contiene un estanque de agua de 4 metros de largo, extendido de un estanque de agua de 2 metros utilizado en estudios previos (Rayo, 2009; Rayo, 2010). En la Figura 3.1 se muestra un esquema de la instalación y sus distintas partes.

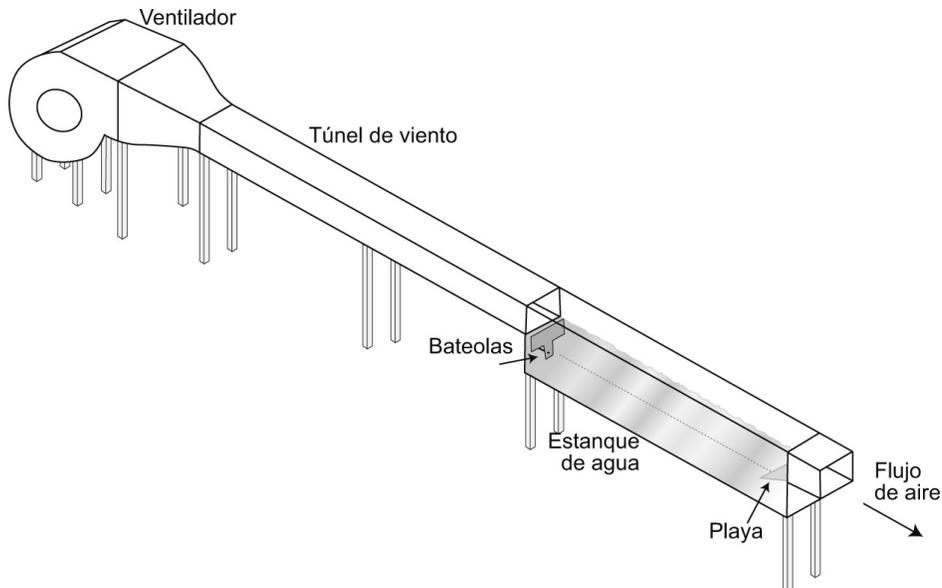


Figura 3.1. Esquema de la instalación experimental adaptada a partir del estudio de Rayo (2009).

El flujo de aire es generado desde la zona de transición mediante un ventilador centrífugo Airolite modelo VCL 085 con un motor de 3HP de potencia instalada y 1420 rpm de frecuencia máxima. Para esta instalación el ventilador entrega flujos de aire con velocidades medias entre 1 a 15 m/s. Dado que el ventilador entrega un flujo helicoidal de aire, se cuenta con una estructura de panal de abeja que elimina dicho patrón, quedando líneas de flujo más rectas.

La sección transversal del ventilador es de $1.0 \times 0.8 \text{ m}^2$, por lo que se conecta con el túnel de viento mediante una transición suave que pretende no alterar mayormente las líneas de flujo del viento. Esta zona tiene 1 metro de longitud y la sección de salida es de $0.5 \times 0.4 \text{ m}^2$. Esta zona de transición tiene una separación de 7 cm del resto del túnel agua abajo para evitar que se propague la vibración que se genera por el funcionamiento del ventilador hacia el túnel y el estanque. La separación está cubierta con una protección de tela para evitar la filtración de aire.

La siguiente sección del túnel comprende 5.5 m aproximadamente de una zona donde se desarrolla la capa límite del flujo. El material es de madera melamina de 1 cm de espesor y el fondo está tapizado con papel lija de rugosidad equivalente de 0.2 mm, excepto el último tramo de 30 cm, aproximadamente, que tiene arena para no estropear la lija para los casos en que el agua se adentra un poco al túnel de viento. En el comienzo del túnel existen tres listones de madera con el objeto de acelerar el desarrollo de la capa límite.

El estanque de agua ha sido confeccionado completamente de acrílico para permitir la visibilidad de la superficie libre desde los lados. Tiene una sección cuadrada de 50 cm de lado y un largo de 4 m, de modo que tiene una capacidad de 1 m^3 . El llenado se debe realizar externamente con una manguera, mientras que para el vaciado existe una válvula en un extremo inferior de éste.

Aguas arriba pero dentro del estanque se encuentra un generador mecánico de olas que permite la perturbación del agua con ondas superficiales. En la Figura 3.2 se muestran las partes del sistema. La frecuencia del oleaje se regula con el motor, mientras que la altura de la ola se puede modificar variando la carrera del eje o el tamaño de la paleta. Dado que el agua se impulsa antes y después de la paleta, existe una barrera de 3 cm en la parte superior de la paleta y una esponja pegada al estanque bajo esta barrera que dificulta el paso del agua. Adicionalmente hay una malla pegada en la parte superior de la paleta que también dificulta la pasada del agua.

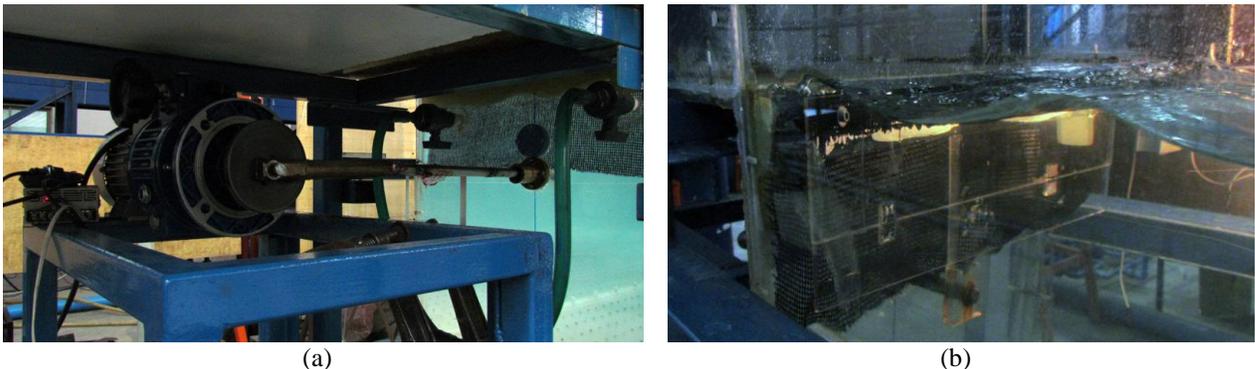


Figura 3.2. Instalación de la paleta generadora de olas. (a) El motorreductor que impulsa la paleta tiene instalado además un variador de frecuencia para regular la frecuencia del oleaje. El recorrido de la paleta es regulable cambiando la posición del extremo del eje. (b) La paleta es removible de modo que se pueden instalar paletas de distintas dimensiones.

Para evitar la reflexión de las ondas es necesario amortiguarlas al final del estanque con una playa de acrílico perforado inclinado. Esta playa evita además el quiebre de las ondas al final del estanque que en otras experiencias generaba mucha turbulencia y salpicaba agua fuera del estanque. Con esta playa la entrada de aire por quiebre se ve reducida pero no anulada, como es posible apreciar en la Figura 3.3.

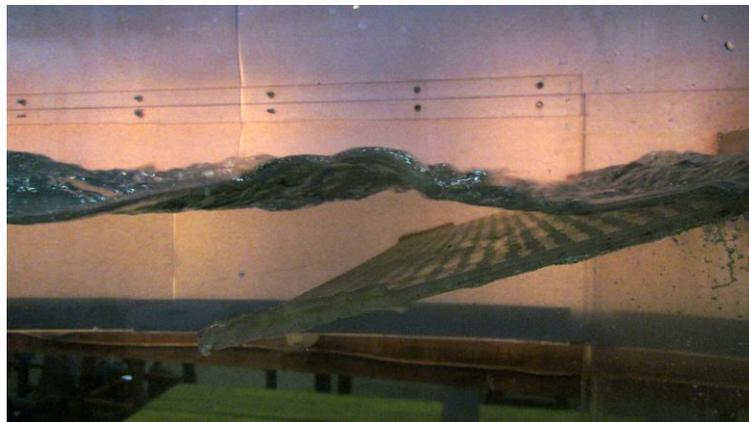


Figura 3.3. Playa amortiguadora de ondas la final del estanque.

Una ventaja de las olas mecánicas en un laboratorio es la independización del *fetch*, puesto que cuando se genera un campo de velocidades únicamente por el esfuerzo del viento, no se alcanza a desarrollar en general en las instalaciones experimentales. De este modo, la generación mecánica de olas aumenta artificialmente el *fetch* y, por tanto, la energía de la onda para un viento dado (Thais & Magnaudet, 1996).

3.2. METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN

3.2.1. Velocidad superficial

Otro parámetro característico del perfil es la velocidad superficial de la interfaz que, por condición de no resbalamiento, es la condición de borde para el perfil de velocidades del aire también. Para determinar esta velocidad se utilizará una cámara de alta velocidad rastreando la trayectoria de semillas de lechuga como trazador. La cámara con la que se cuenta es modelo VFC-300 marca FOR-A (Figura 3.4) con un lente macro marca Kowa, modelo LMZ503M. La cámara cuenta con una memoria interna; para cada medición a realizar se debe escoger una combinación entre la resolución y los cuadros por segundo a registrar, pues esto tendrá un tiempo total de grabación acotado.

La resolución de todas las imágenes a registrar es de 512x512 píxeles y según la velocidad del viento se ocupan tasas de 30 a 90 cuadros por segundo. Al comienzo de cada experiencia se debe grabar adicionalmente la escala pixel/centímetro, posicionando una regla graduada en la superficie libre del agua.

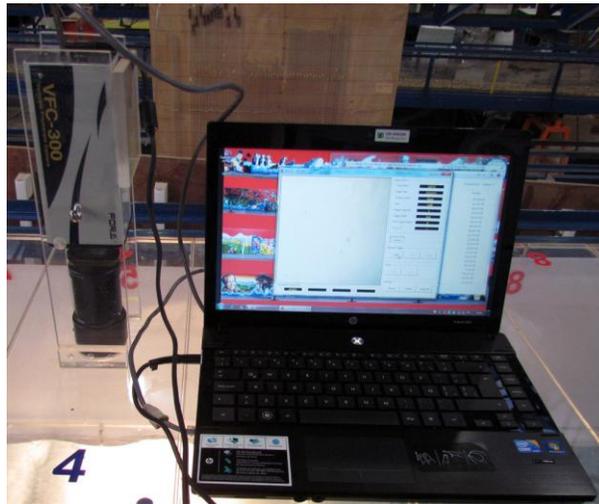


Figura 3.4. Cámara de alta velocidad instalada para la medición de la velocidad superficial.

3.2.2. Perfil de velocidades

La determinación de los parámetros del flujo de aire sobre la superficie libre se realiza midiendo los perfiles de velocidad, los cuales se caracterizarán luego por la velocidad friccional, u_* , la rugosidad, z_0 , y la velocidad superficial, u_s . Para esto se cuenta con un anemómetro de hilo caliente marca Extech modelo 407123 (Figura 3.5), que mide la velocidad del aire en la dirección principal del flujo.



Figura 3.5. Anemómetro de hilo caliente.

El funcionamiento de este anemómetro consiste en la medición de disipación de calor de un conductor metálico fino expuesto al viento. El conductor es parte de un circuito eléctrico que al enfrentarse al viento se adecúa para mantener la temperatura constante del conductor, de modo que la corriente eléctrica necesaria para lograr esto viene asociada a una velocidad de viento.

Tiene un rango de funcionamiento entre 0.2 y 20 m/s con una frecuencia de 1 Hz. La lectura que entrega tiene tan solo un decimal, mientras que su precisión es de un 3% del valor entregado. El aparato tiene la posibilidad de ser conectado a un computador para registrar inmediatamente la velocidad y temperatura; sin embargo, la mayor frecuencia de registro por medio de esta interfaz es de 0.5 Hz.

La medición se realizará en el eje del estanque en cuatro posiciones distintas esquematizadas en la Figura 3.6. En cada posición se harán mediciones a 36 puntos aproximadamente, dependiendo de las condiciones de la superficie libre; su distribución espacial en la vertical se concentra mayormente cerca de los bordes (Figura 3.7).

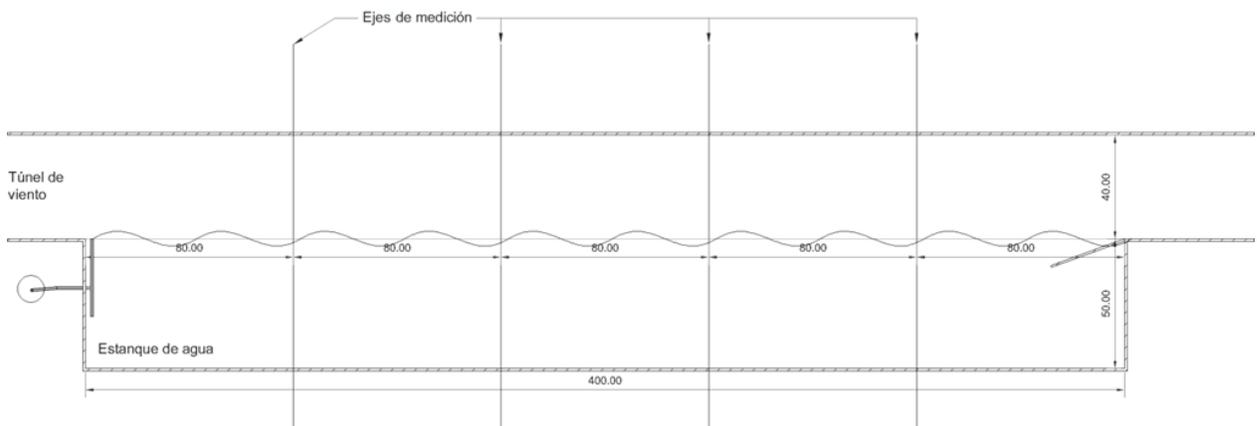


Figura 3.6. Posición de los ejes donde se realizan las medidas de viento, velocidad superficial y elevación.

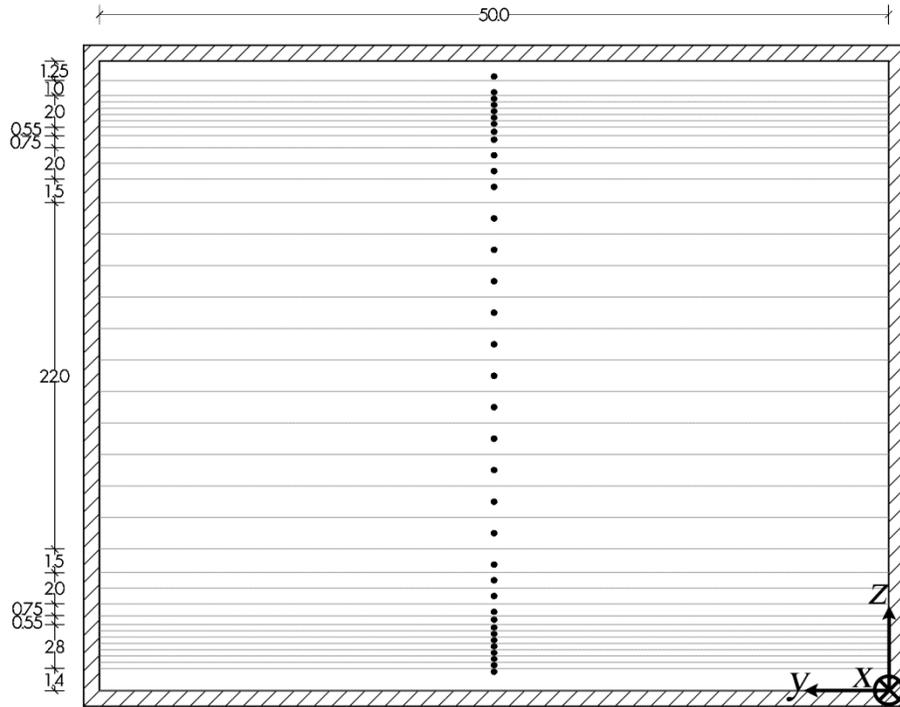


Figura 3.7. Distribución de los puntos de medición de viento. Las unidades están en centímetros.

El promedio acumulado de las mediciones de viento se estabiliza en torno al decimoquinto dato como se puede observar en la Figura 3.8(a). Con esta cantidad de datos por punto se obtiene un perfil como el que se presenta en la Figura 3.8(b).

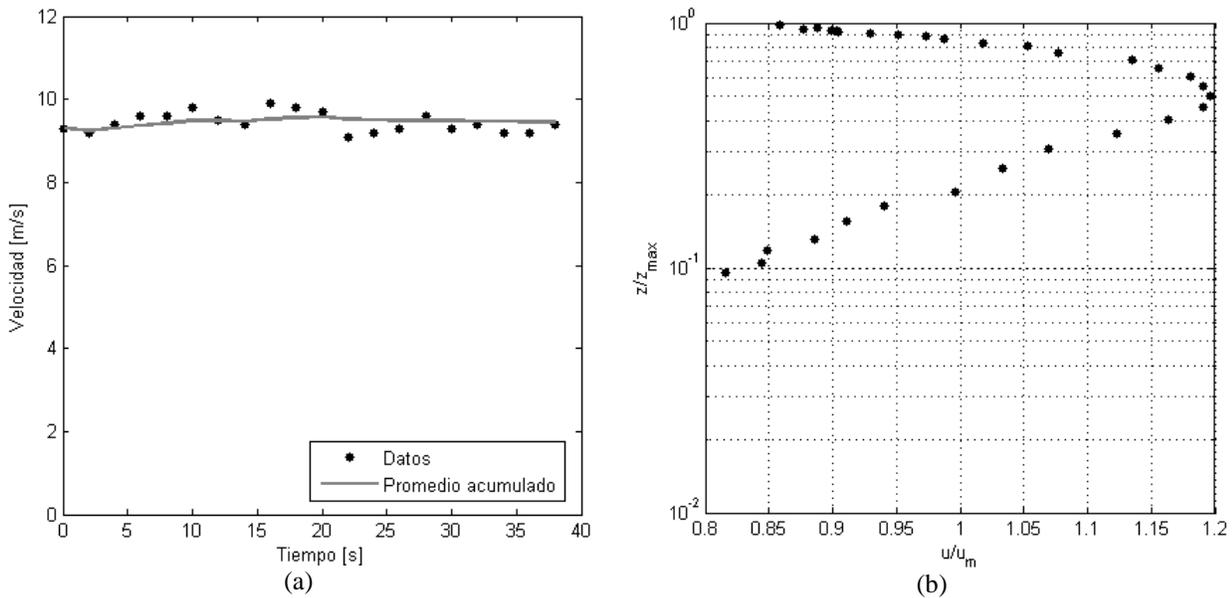


Figura 3.8. (a) Promedio ponderado de la velocidad en un punto con las condiciones $z = 4.2 \text{ cm}$, $x = 3.2 \text{ m}$, $f_m = 3 \text{ Hz}$, $H = 2 \text{ cm}$, $u_m = 7.9 \text{ m/s}$. (b) Perfil de velocidad para las mismas condiciones de (a).

3.2.3. Cables capacitores

Para la medición de la elevación de la superficie libre se cuenta con un instrumento de cables capacitores que permite registrar una serie de tiempo de la elevación en dos puntos separados en 6 mm, la menor distancia posible, de modo que las señales no se interfieran mutuamente y que la pendiente determinada no esté lejos de la instantánea real (Rayo, 2010). Esta herramienta es muy utilizada en la medición de la elevación de las ondas superficiales en laboratorios (Peirson *et al.*, 2007; Caulliez *et al.*, 2008). En este caso se cuenta con dos modelos Wave Height Gauge WG-50 marca RBR (Figura 3.9).

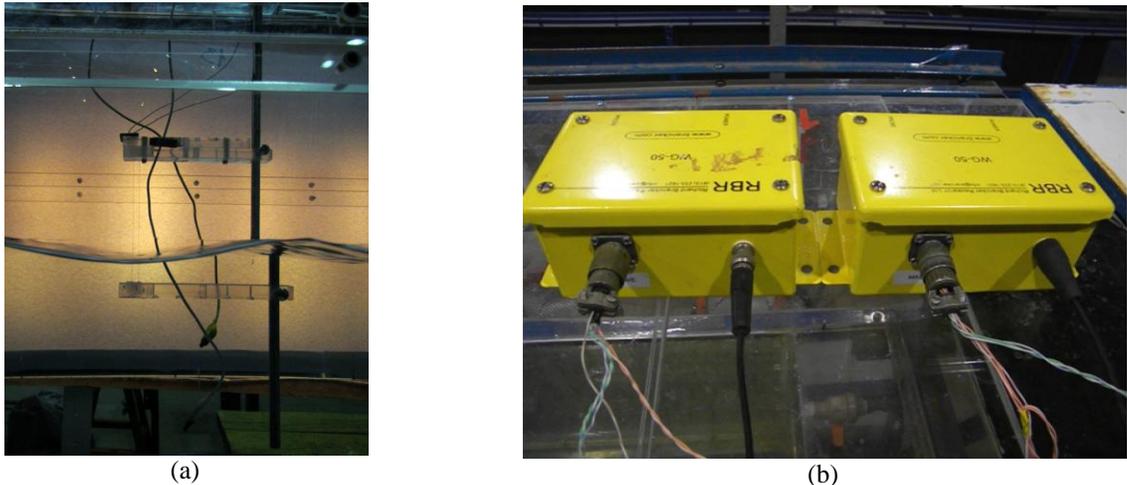


Figura 3.9. Cables capacitores. (a) Probeta donde están tensos los cables aislados eléctricamente. Cuelgan además libremente un par de cables comunes sumergidos en el agua. (b) Sensores que permiten medir en dos puntos. Reciben la energía, generan la diferencia de potencial y transforman esa capacitancia generada en voltaje.

Este instrumento se compone de un cable conectado eléctricamente en el agua, el cable capacitor que es un cable delgado aislado eléctricamente, que se posiciona semisumergido en el agua y el volumen de agua mismo. Esto forma un condensador donde los conductores son el primer cable y el cuerpo de agua, mientras que el cable delgado es el dieléctrico o aislante. La capacitancia del cable capacitor depende de las características físicas del sistema. Es por esto que con un sistema fijo, en donde el cable común genera una diferencia de potencial con el agua, la variación en la capacitancia es proporcional al área en contacto del cable delgado con el agua. Luego, un sistema eléctrico transforma esta capacitancia en un cambio de voltaje que se digitaliza con una tarjeta de adquisición de datos. Un mayor detalle del funcionamiento se puede ver en Rayo (2010).

Como la variación de la capacitancia está relacionada con el manto del cilindro del aislante del cable, la sensibilidad de la medición está estrechamente ligada con el diámetro del cable. Para estas experiencias se cuenta con un cable de cobre cuya aislación contempla un diámetro interior de $138 \mu\text{m}$ y un diámetro exterior de $140 \mu\text{m}$.

La información del fabricante es que los sensores WG-50 tienen una frecuencia de muestreo de 500 Hz con una precisión de 0.4% del voltaje indicado. Por otro lado, la tarjeta de adquisición de datos puede ser configurada con distintas tasas de muestreo distintas a 500 Hz, siendo la menor 100 Hz.

Para las experiencias se calibra la escala voltaje/cm antes y después de cada medición en cada posición longitudinal. La calibración consta de la medición durante 20 segundos aproximadamente de la superficie

libre sin perturbar en distintas posiciones verticales de los cables. La experiencia en sí se registra dos veces durante cinco minutos aproximadamente cada vez.

3.2.4. Transferencia de oxígeno

Para la medición del oxígeno disuelto en el cuerpo de agua se cuenta con un sensor Oxygen Sensor TriOximatic 300 que se ilustra en la Figura 3.10.

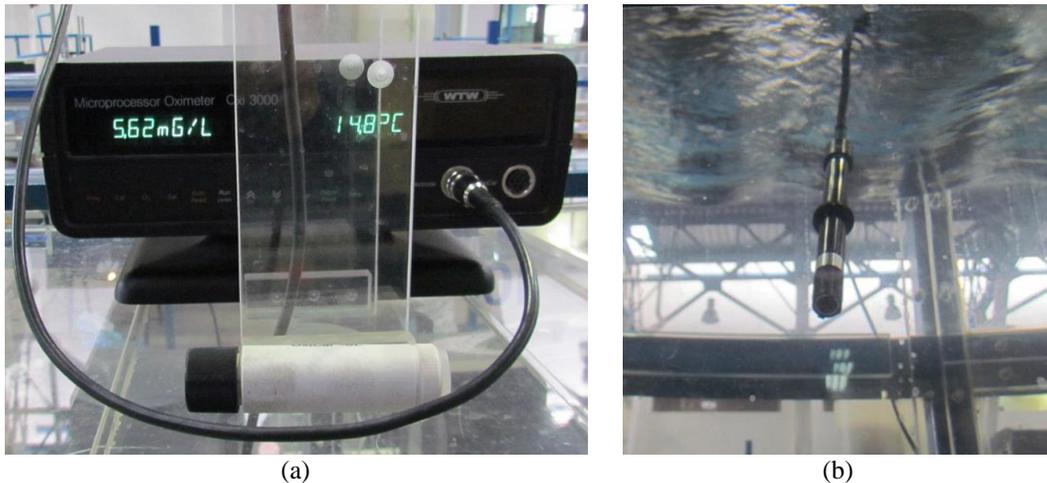


Figura 3.10. Sensor de oxígeno disuelto. (a) Procesador de medición. (b) Probeta.

Este instrumento mide mediante reacciones electroquímicas al aplicar un voltaje entre un cátodo de oro y un ánodo de plata. Con un aumento de la concentración de oxígeno también se tendrá un aumento en la corriente entre el ánodo y el cátodo. Esta corriente se mide con el sensor y se asocia a una concentración de oxígeno.

La toma de datos se puede realizar con una frecuencia máxima de 1 Hz y con una precisión de 0.5% del valor medido. Adicionalmente, el instrumento mide la temperatura del agua con una precisión de 0.1 °C y la misma frecuencia que de la concentración de oxígeno.

Para determinar la tasa de transferencia del oxígeno se considera la baja solubilidad del oxígeno y su importante presencia en el aire para así modificar la ecuación (2.12) a un gradiente de concentración igual a $(C_s - C(t))$, donde C_s es la concentración de saturación del oxígeno en el agua y $C(t)$ la concentración de oxígeno en el cuerpo de agua, aceptando que se tiene mezcla completa en el cuerpo de agua (Rayo, 2009). La determinación de la tasa se realiza entonces como propone Deacon (1977), de modo que se cumple que:

$$\forall_c \frac{\partial C}{\partial t} = k_L A (C_s - C(t)) \quad (3.1)$$

Donde \forall_c es el volumen del cuerpo de agua, A es el área superficial por donde atraviesa el flujo de oxígeno.

Dependiendo de las condiciones experimentales que se tenga, se define la duración de la toma de datos de oxígeno. Para condiciones de baja entrada de energía el tiempo de medición puede alcanzar hasta ocho horas para tener una variación significativa de los niveles de oxígeno; al contrario, cuando las condiciones experimentales entregan una gran energía al volumen de agua, se puede alcanzar la saturación del sistema en menos de dos horas.

Para realizar esta etapa es necesario desoxigenar el agua inicialmente, puesto que el agua potable viene con una concentración cercana a la de saturación. Esto se logra agregando sulfito de sodio, el que reacciona con el oxígeno disuelto en el agua para formar sulfato de sodio mediante la siguiente reacción.



Si bien la cantidad necesaria para desoxigenar el estanque depende de la concentración inicial, la de saturación y la presión atmosférica, una cantidad de 90 g aproximadamente baja los niveles de oxígeno hasta 1 mg/l aproximadamente en casi todos los casos. Sin embargo, en muchas situaciones se llevaron a cabo dos experimentos en el mismo día, de modo que la concentración inicial del segundo experimento era mucho menor a la de saturación, a veces disminuyendo la cantidad de sulfito de sodio necesaria para llegar a bajos niveles de oxígeno.

3.3. CONSIDERACIONES DEL ESTUDIO

Dados los conceptos recién revisados se estudiará la transferencia de oxígeno bajo las siguientes consideraciones de las variables en juego:

Las ondas mecánicas permiten principalmente simular un *fetch* más grande para el viento; sin embargo también se estudiará cómo afectan sus características en el proceso de transferencia de oxígeno al tener la premisa de que no es el viento en sí el motor del proceso. Para caracterizar una onda existen cuatro parámetros (H , ω , k y h), tres de ellos independientes por la existencia de la relación de dispersión. Trabajando además con ondas de aguas profundas, h deja de ser una variable de importancia. Quedan entonces dos parámetros a variar, siendo escogidas la altura (H) y la frecuencia (ω).

Las magnitudes del viento con las que se trabajará serán tales que, sin ondas mecánicas no existirá un quiebre de las ondas que introduzca burbujas al sistema, puesto que aquél no es el fenómeno que se quiere estudiar. Las variaciones de la velocidad media dentro del túnel de viento serán entre 3.5 y 11.5 m/s, que en revoluciones del ventilador equivalen de 250 hasta 800 rpm.

Para las ondas mecánicas se realizan distintas alturas para cuatro frecuencias de ondas (1, 1.5, 2 y 3 Hz). La frecuencia de ondas totalmente desarrolladas son bastante bajas, pero por la limitación de ondas profundas no se debiese superar la frecuencia de 1.25 Hz por lo que se toma como cota inferior 1 Hz que se corregirá por altura posteriormente. Por otro lado, la altura no era una variable totalmente controlable, se distinguieron cuatro rangos de alturas: H1, para ondas con amplitud menor a 1.5 cm; H2, para ondas entre 1.5 y 2 cm; H3, para ondas entre 2 y 2.5 cm; y H4, para ondas mayores a 2.5 cm. Las distintas combinaciones de estos dos parámetros se resumen en la Tabla 3.1 junto a un número de Froude asociado en donde se relaciona la velocidad orbital, $\sim fH_s$, con su altura significativa, H_s .

Tabla 3.1. Froude para distintas condiciones de ondas mecánicamente generadas.

Condición experimental	$\frac{f^2 H_s}{g} \times 100$
F0H0	–
F1H1	0.12
F1.5H3	0.58
F1.5H4	0.65
F2H1	0.65
F3H1	1.07
F3H2	1.46
F3H3	1.58

Tabla 3.2. Resumen de las experiencias realizadas (indicadas con una X).

	V0	V1	V2	V3	V4	V5
F0H0	–	X	X	X	X	X
F1H1	X	X	X	X	X	X
F1.5H3	X	X	–	X	–	X
F1.5H4	X	X	–	X	–	X
F2H1	X	X	X	X	X	X
F3H1	X	X	X	X	X	X
F3H2	X	X	–	X	–	X
F3H3	X	X	–	X	–	X

3.4. COMENTARIOS

Una vez implementada la instalación experimental y examinada en sus rangos de operación es posible detallar ciertos alcances generales de su funcionamiento. En términos de perturbar la superficie libre uniformemente, se puede decir que está bien logrado, mientras que el movimiento orbital planteado al comienzo del capítulo de antecedentes se ve muy perturbado por las condiciones de borde del estanque.

Después de un metro de estar generada la onda, no se perciben problemas y es posible decir que el generador funciona perfectamente para todas las condiciones. Sin embargo, hay ciertos problemas en el primer metro del estanque como lo es el agua salpicada detrás de la placa generadora de ondas debido a que no hay suficiente espacio para amortiguar el agua de esa zona. Es necesario balancear el espacio desde el cual se mueve la placa; es decir, podría darse más espacio aguas atrás del generador para tener menos salpicaduras, pero esto implica perder estanque con las ondas formales que se quiere estudiar. Para disminuir esto se localizan distintos obstáculos permeables e impermeables en la zona cercana a la superficie de forma que amortigüen el problema, pero para ciertas experiencias (en particular las de grandes alturas) hay que aceptar cierta perturbación de la superficie libre. Otro problema identificado es la generación de un vórtice de 1 metro de escala de longitud característica, que resulta en un flujo hacia aguas arriba en la superficie y aguas abajo en el fondo. Consecuentemente, se genera un vórtice mucho más débil en el sentido contrario en el resto del estanque, lo cual siempre se observa en estanques finitos. Las implicancias de esto son, por un lado, la validez de la mezcla completa en el estanque, pero, por otro lado, un fenómeno que no era buscado. Pensando que la influencia de la transferencia está en las pequeñas

longitudes, este efecto negativo no debiese tener mayor importancia. A pesar de esto, en ciertos casos se puede observar cómo la velocidad superficial es negativa en el primer punto de medición para algunas frecuencias y alturas mecánicas.

La playa tuvo un mayor beneficio dado el espacio físico que ocupa. Normalmente las playas tienen bajas pendientes, de extensión hasta el fondo del estanque y de material permeable. Pero como el estanque en cuestión sólo tiene 4 metros, se optó por una playa que no llegara más allá de los 15 cm de profundidad, ocupando menos de 30 cm longitudinalmente. Además, está hecha de acrílico perforado. Existe un juego entre ninguna perforación y perforaciones muy grandes en que la onda logre rebotar. Las perforación de 0.6 cm de diámetro aproximadamente, distanciadas en 2 cm aproximadamente, logró buenos resultados. Las ondas se extinguen en la playa, incorporando pocas burbujas en el proceso. Si bien en los últimos 5 cm se generaban burbujas al existir un espacio de aire bajo la playa, éstos se considerarán despreciables en el proceso de transferencia de oxígeno, aunque puedan aumentar levemente la tasa.

El mayor de los problemas es la pérdida de volumen líquido del estanque, en casos de alta turbulencia, que afecta considerablemente a la rugosidad equivalente, z_0 , que se determina en el perfil de velocidad. Se podría dejar corriendo el estanque hasta que no pueda perder más agua antes de comenzar las experiencias, aunque esto implicaría variar la profundidad de las aguas, que es una variable no considerada en el estudio. Así, cada experiencia parte en 50 cm de profundidad. En estricto rigor, el constante vaciamiento genera que el datum de donde se debiese estar midiendo el perfil varíe en el tiempo y cada medición esté asociada a distintos orígenes. La construcción de cada perfil se logra en media hora, mientras que las experiencias son bastante más largas, por lo que es posible que el vaciamiento no sea tan grande para que la velocidad de corte no se vea afectada; sin embargo, no es posible detener las experiencias para ver en dónde estaba el cero cada media hora. Se estima el punto $z = 0$, considerando el estanque lleno en un comienzo y con un vaciamiento lineal a lo largo de la experiencia. Sin embargo, los errores pueden ser del orden de los 5 mm cuando la rugosidad equivalente puede ser un orden de magnitud menor. Teniendo esto en consideración, podría no ser posible estudiar el número de Charnock y Toba-Koga en esta tesis.

La instrumentación y metodología utilizada para caracterizar el viento es finalmente útil únicamente cuando la información que se busca es la velocidad de corte. Esto, porque, independientemente del efecto de vaciamiento, la rugosidad equivalente está afectada por que el instrumento no se puede mojar, de modo que las mediciones se ven limitadas en altura, quizá lo suficiente como para aportar mucha incertidumbre a la rugosidad determinada. En particular, aceptando que el sector cercano de la interfaz es la de mayor importancia, se requieren mediciones mejor acabadas. Por ejemplo, Shaikh y Siddiqui (2011a) y (2011b) sembraron el aire con partículas de aceite de oliva, con lo cual pudieron identificar la estructura del perfil en términos de velocidad media, fluctuaciones para la velocidad longitudinal y vertical. Junto a esto, la determinación de la vorticidad in situ; además, poder medir casi inmediato al agua y tener un registro en función de la fase de la onda que existe como condición de borde. Observaron una gran influencia por parte de la fase de la onda, y aunque trabajaron con vientos más bien suaves dentro del rango de esta tesis, queda como una interrogante qué es lo que sucede con vientos mayores. De todas formas, ya existen los medios y la tecnología como para que se pueda caracterizar de una mejor forma la zona gaseosa de la interfaz, de modo en que en próximos estudios se debería actualizar estos aspectos.

Por otra parte, la tecnología implementada para la medición de la elevación de la superficie libre es de alta precisión para las condiciones experimentales realizadas, quizá con la excepción de las ondas más altas, que a veces excedían los límites de los voltajes medidos por la caja de los cables. Se apoyan estas mediciones con videos filmados en la pared. Sin embargo, en términos de pendiente es posible que se pierda información significativa según las magnitudes, y que resulten ser de importancia. Se requiere un espaciamiento entre los cables que implicaría ignorar las pendientes de las ondas más pequeñas, en particular de las ondas capilares que, según se ha propuesto en estudios previos, tendrían relación con el quiebre de la subcapa viscosa que permite el ingreso del oxígeno. En este caso también existen alternativas actuales de tecnología de mayor precisión como lo es la grabación por medio de proyecciones de láser. Así lo hicieron por ejemplo Richter y Jähne (2011), quienes utilizan una medición de pendiente por imagen de colores (CIGS por sus siglas en inglés).

4. Procesamiento de datos

En el presente capítulo se presentan todas las consideraciones y operaciones realizadas para obtener las variables de interés final: u_s , u_* , z_0 , η , f_p , s^2 , k_{20} . Se presentan, para cada una de ellas, el resumen de sus valores promediados en cada experiencia. Los datos de cada una de ellas en todos los puntos de medición se encuentran detallados en el Anexo A.

4.1. VIENTO

4.1.1. Velocidad superficial

La identificación de partículas se consigue binarizando una imagen por un rango de intensidades de color en Matlab. De estos elementos identificados se discrimina nuevamente, esta vez por área, con lo cual se logran detectar las partículas y su posición. Según la iluminación y pendiente de la superficie libre serán más o menos evidentes los límites a considerar. En la Figura 4.1 se aprecia una experiencia de prueba para una velocidad media de 8 m/s.

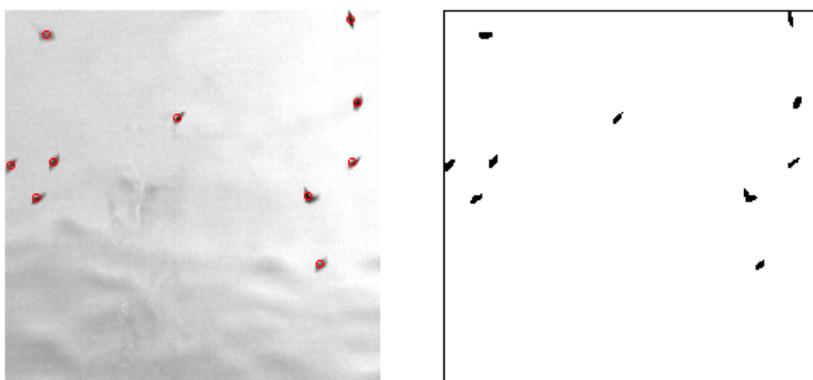


Figura 4.1. Identificación de partículas.

Luego, la generación de trayectorias se realiza analizando una serie de imágenes donde están identificadas previamente las partículas. Una trayectoria se construye examinando una zona circular de radio ϵ de una partícula en la imagen i e identificando alguna partícula de la imagen $i + 1$ en esta zona. Al guardar la información de las posiciones de las partículas de las imágenes, es posible generar variadas trayectorias para una grabación, como se muestra en la Figura 4.2. Para que se considere una trayectoria como tal además es posible dar una cantidad mínima de imágenes donde se identifique la partícula y aceptar que ésta pudo no identificarse en alguna imagen por estar fuera del rango de área e iluminación; en este caso se buscaría en un radio 2ϵ de la imagen subsiguiente. De todas formas, también hay que realizar evaluaciones visuales, porque es posible que se identifiquen trayectorias falsas que deben ser eliminadas producto de la iluminación y pendiente de las olas.

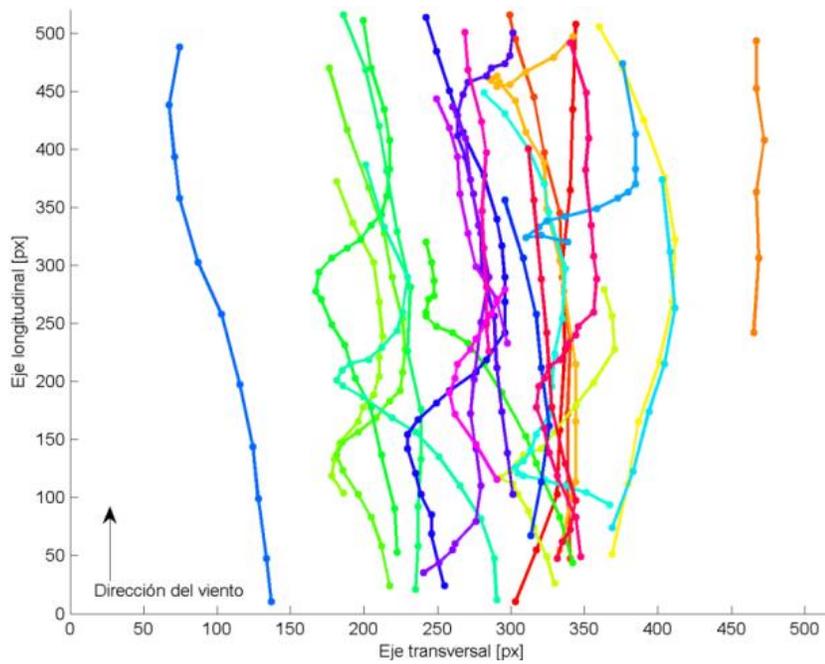


Figura 4.2. Generación de trayectorias.

La velocidad superficial se obtiene únicamente de los desplazamientos longitudinales de las partículas. Luego, las velocidades de cada trayectoria se promedian ponderadas por el largo de éstas para obtener la velocidad u_s media en el tiempo que represente esa posición longitudinal. Dicho largo es la cantidad de puntos que tiene la trayectoria y no la distancia recorrida, pues esto sólo beneficiaría a las velocidades más altas para la ponderación. Las distintas velocidades determinadas a lo largo del estanque se presentan en la Figura 4.3, mientras que la velocidad representativa de la experiencia –vale decir, ponderadas en el espacio– se encuentran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resumen de las velocidades superficiales determinadas para las distintas experiencias en cm/s.

	V0	V1	V2	V3	V4	V5
F0H0	–	9.64	14.45	18.83	27.60	36.39
F1H1	0.07	7.68	15.86	17.85	20.82	31.73
F1.5H3	0.59	5.76	–	16.85	–	37.10
F1.5H4	1.08	7.21	–	14.69	–	27.04
F2H1	0.64	6.60	12.26	18.83	20.83	34.21
F3H1	2.47	6.14	12.96	16.65	27.28	25.96
F3H2	1.35	6.64	–	23.73	–	27.07
F3H3	4.95	7.70	–	20.38	–	22.85

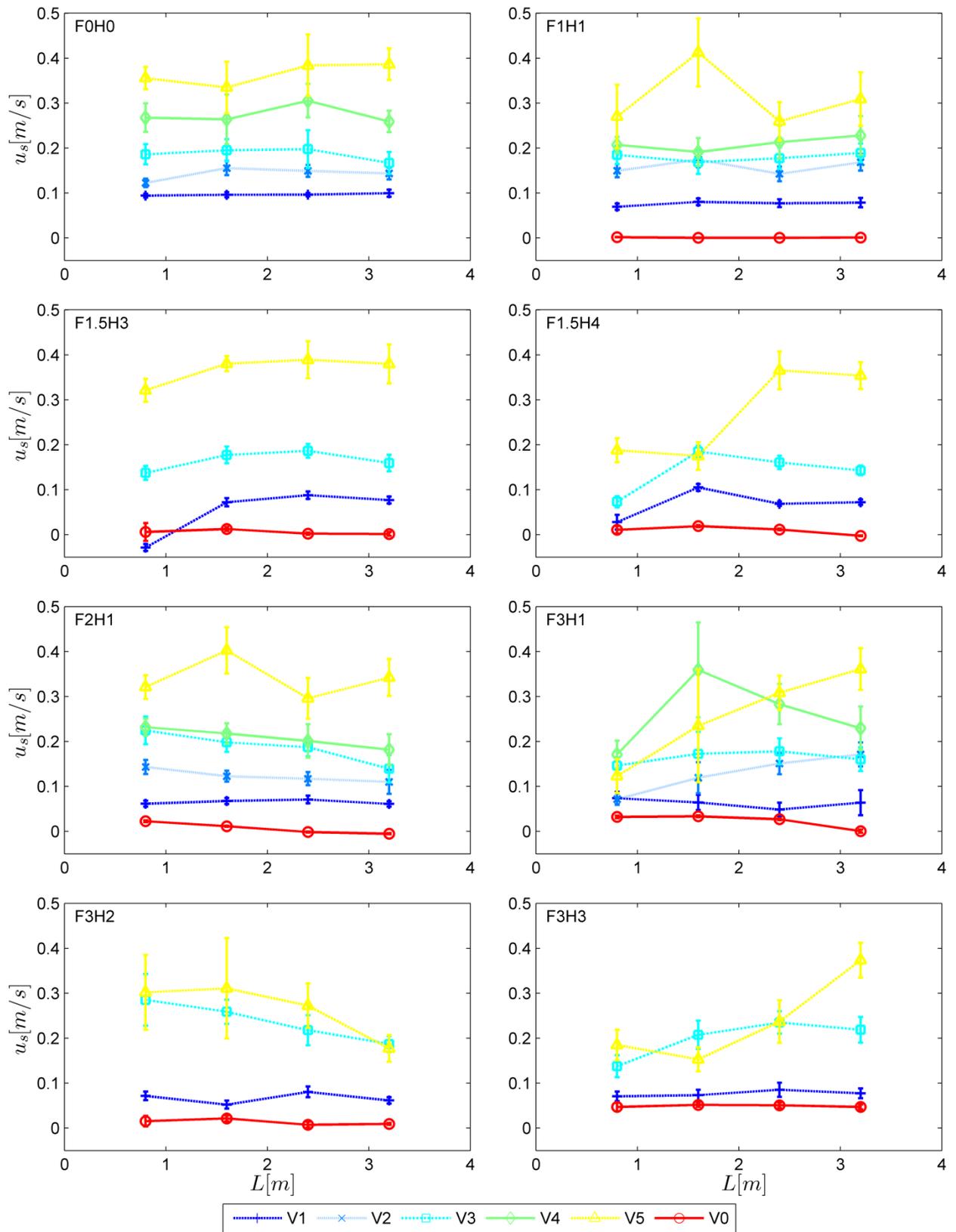


Figura 4.3. Velocidades superficiales a lo largo del estanque para los distintos casos.

4.1.2. Perfil de velocidades

Debido al vaciamiento del estanque en algunas experiencias, debido principalmente a las grandes velocidades y ondas mecánicas de gran altura, cada perfil tiene el origen de coordenada vertical desplazado, pues se necesita el origen en la superficie libre no perturbada para determinar la rugosidad.

La construcción del perfil requiere de la velocidad superficial como condición de borde para la determinación de la rugosidad, aunque es innecesaria para la velocidad de corte. La cantidad de puntos utilizados para cada perfil varía según el caso.

Los perfiles para varias velocidades a lo largo del estanque, para el caso sin ondas mecánicas, se muestran en la Figura 4.4. En esta composición de perfiles se aprecia un aumento en el esfuerzo de corte al aumentar la rotación del ventilador y pareciera mantenerse constante en las posiciones longitudinales; sin embargo, aumenta levemente aunque esto no se aprecie gráficamente. La totalidad de estos perfiles se encuentran en el Anexo B. En las Figura 4.5 y Figura 4.6 se presentan gráficamente los valores de la velocidad de corte, u_* , y rugosidad, z_0 , a lo largo del estanque separados según su condición de onda mecánica. En el caso de la Figura 4.6 no se presentan los errores debido a que llegan a ser en ciertos casos mayores a la rugosidad misma, lo que produce que falle el código de generación del gráfico. Finalmente, el resumen de las variables promediadas en el espacio para cada experiencia se presenta en la Tabla 4.2.

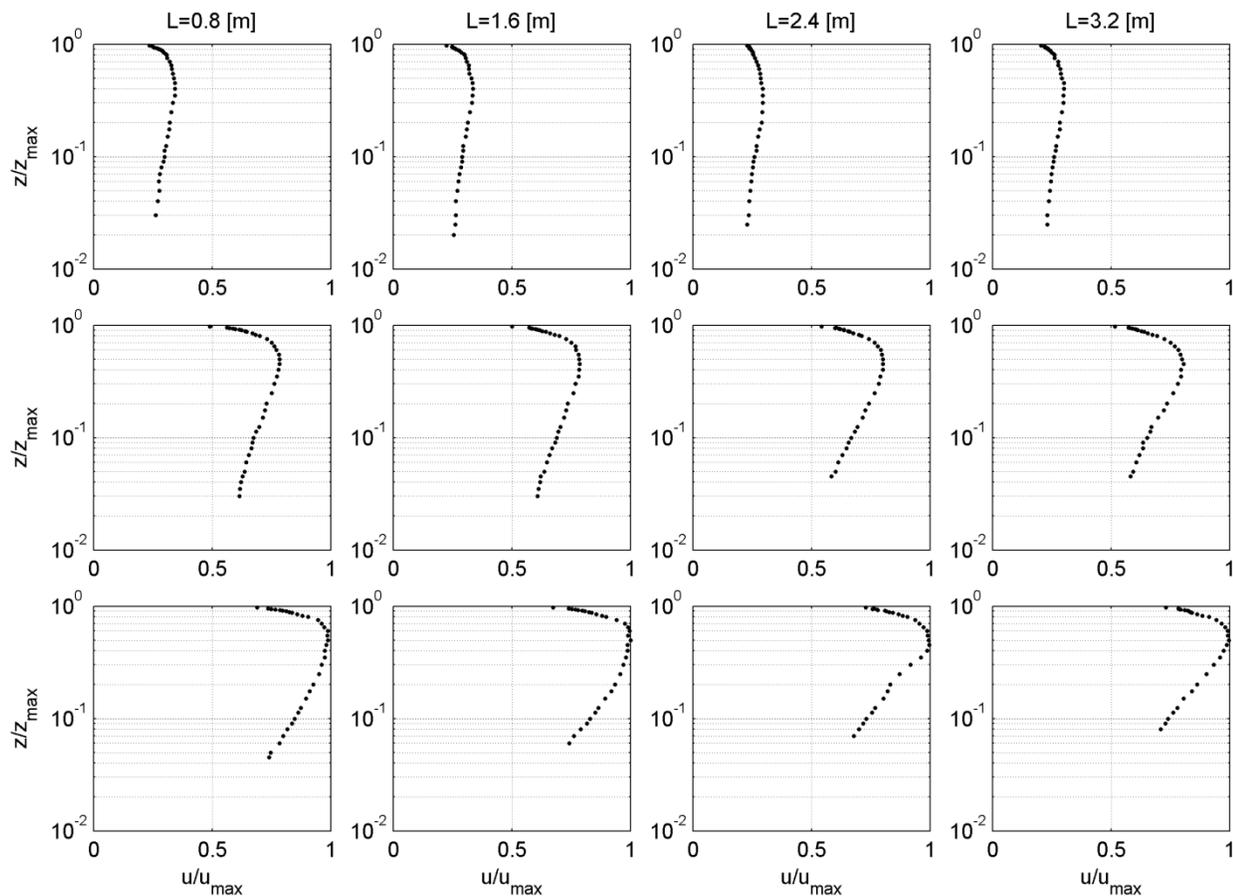


Figura 4.4. Perfiles de velocidad medida para las distintas posiciones longitudinales y magnitudes de viento cuando no hay ondas mecánicas. La elevación y la velocidad están adimensionalizadas por el valor máximo de todas las experiencias presentadas, en el caso de la velocidad, el valor máximo se da en la experiencia de máxima velocidad y a 3.2 m del comienzo del estanque, V5F0H0L17.

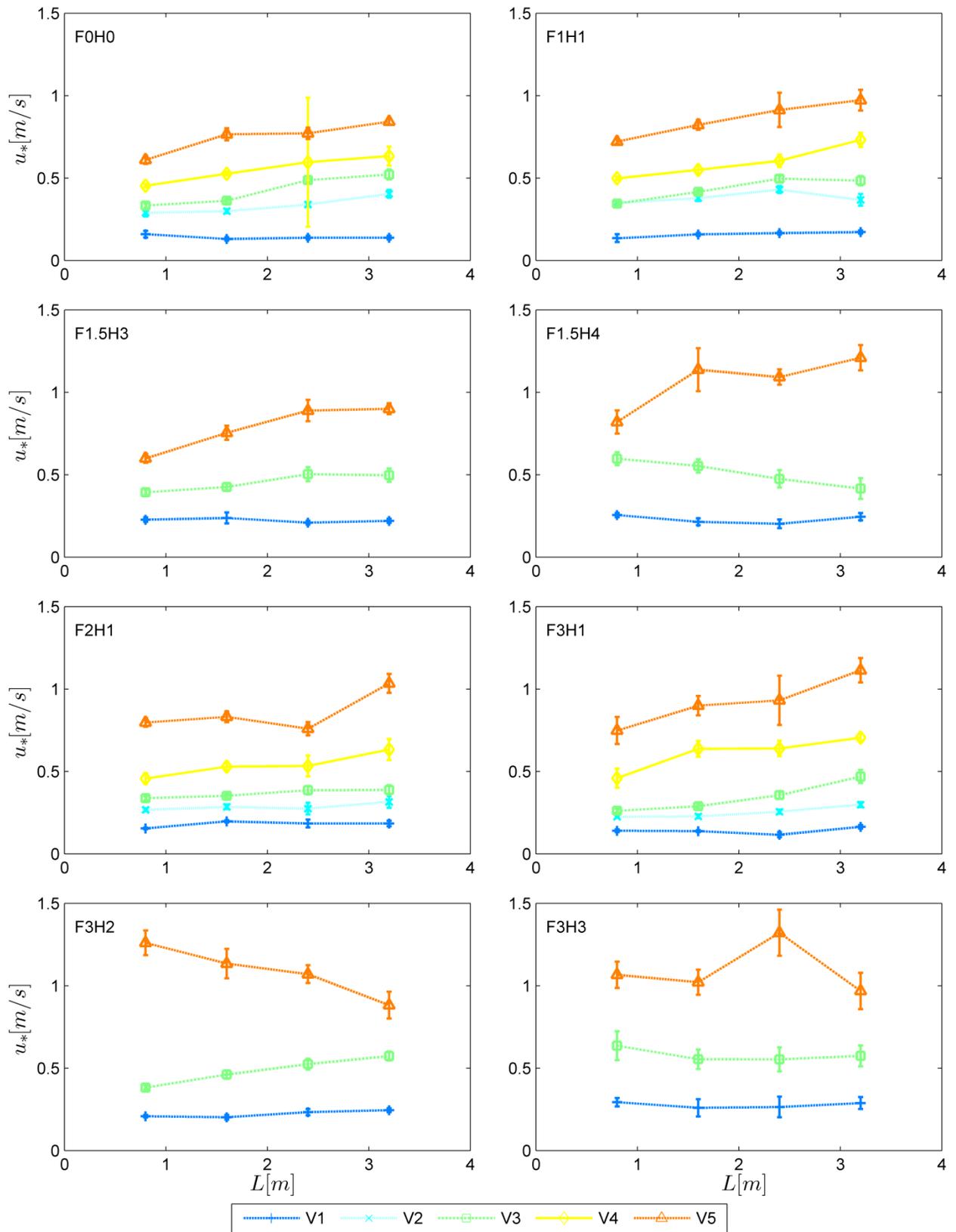


Figura 4.5. Velocidades de corte a lo largo del estanque para los distintos casos.

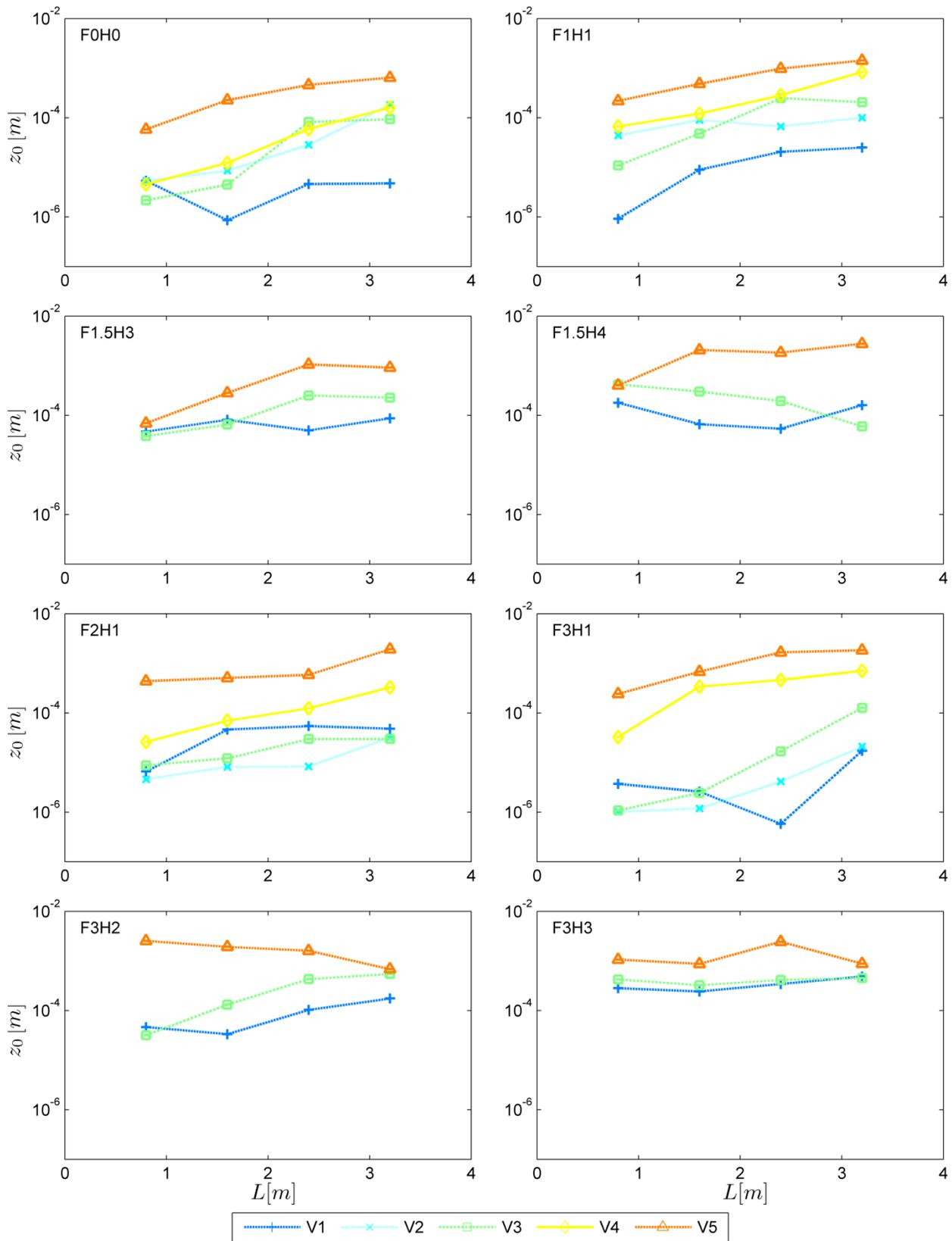


Figura 4.6. Rugosidades z_0 a lo largo del estanque para los distintos casos. El eje z , de la rugosidad, se encuentra en escala logarítmica para una mejor visualización de los valores de bajas velocidades.

Tabla 4.2. Resumen de los parámetros u_* y z_0 determinados para las distintas experiencias.

	V1		V2		V3		V4		V5	
	$u_*[m/s]$	$z_0[\eta m]$								
F0H0	0.14	3.7	0.33	48.3	0.43	45.0	0.55	54.2	0.75	345.1
F1H1	0.16	14.0	0.39	75.6	0.44	132.2	0.59	300.2	0.86	767.3
F1.5H3	0.22	66.0			0.46	147.8			0.79	599.7
F1.5H4	0.22	103.7			0.51	243.9			1.07	1808.5
F2H1	0.18	41.1	0.28	12.3	0.37	20.2	0.54	128.5	0.84	798.9
F3H1	0.14	5.1	0.25	6.0	0.34	31.3	0.62	387.2	0.92	1116.6
F3H2	0.27	328.4			0.57	395.5			1.11	1383.6
F3H3	0.22	85.1			0.49	283.9			1.09	1699.8

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE LIBRE

4.2.1. Elevación

Las series de tiempo registradas con ambos instrumentos se encuentran en términos de voltaje y con un desfase, de modo que lo primero que se hace es llevarlas a cero restando la media temporal, así la elevación sólo queda con un componente de fluctuación. Seguido a esto, se ajustan nuevamente para que ambas series tengan el mismo valor de elevación media cuadrática. De estas series se extrae la elevación media cuadrática como $\eta_{rms} = (\overline{\eta'^2})^{1/2}$ (η en adelante por simplicidad) para cada posición; éstas se resumen en la Figura 4.8.

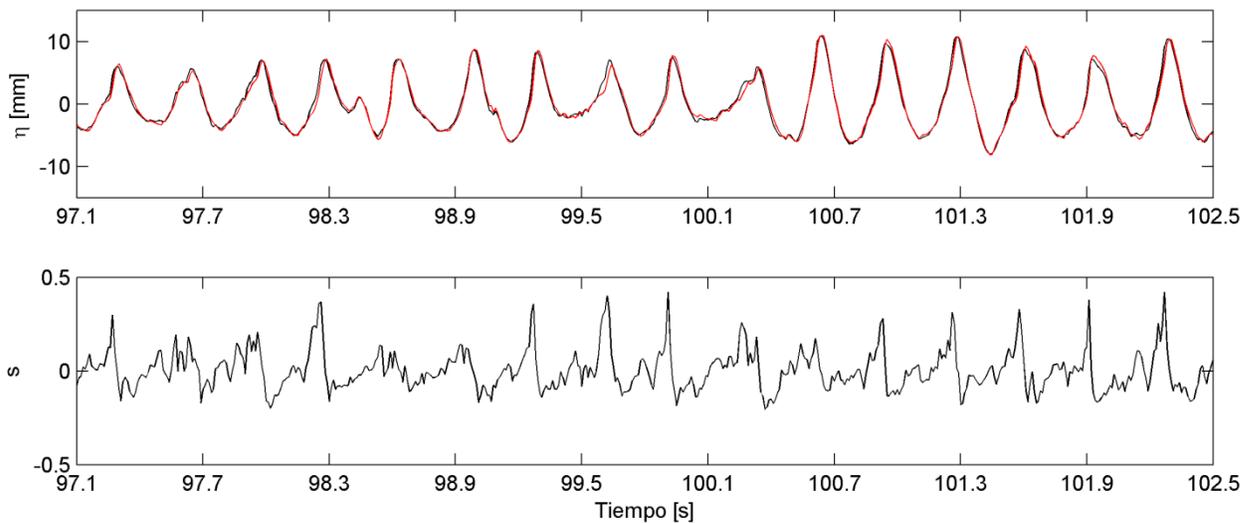


Figura 4.7. Extracto temporal de las fluctuaciones de ambos cables y su pendiente instantánea para el caso V3F3H1 que se caracteriza por $\eta = 8.0 [mm]$, $f_p = 2.99 [Hz]$ y $u_* = 0.34 [m/s]$.

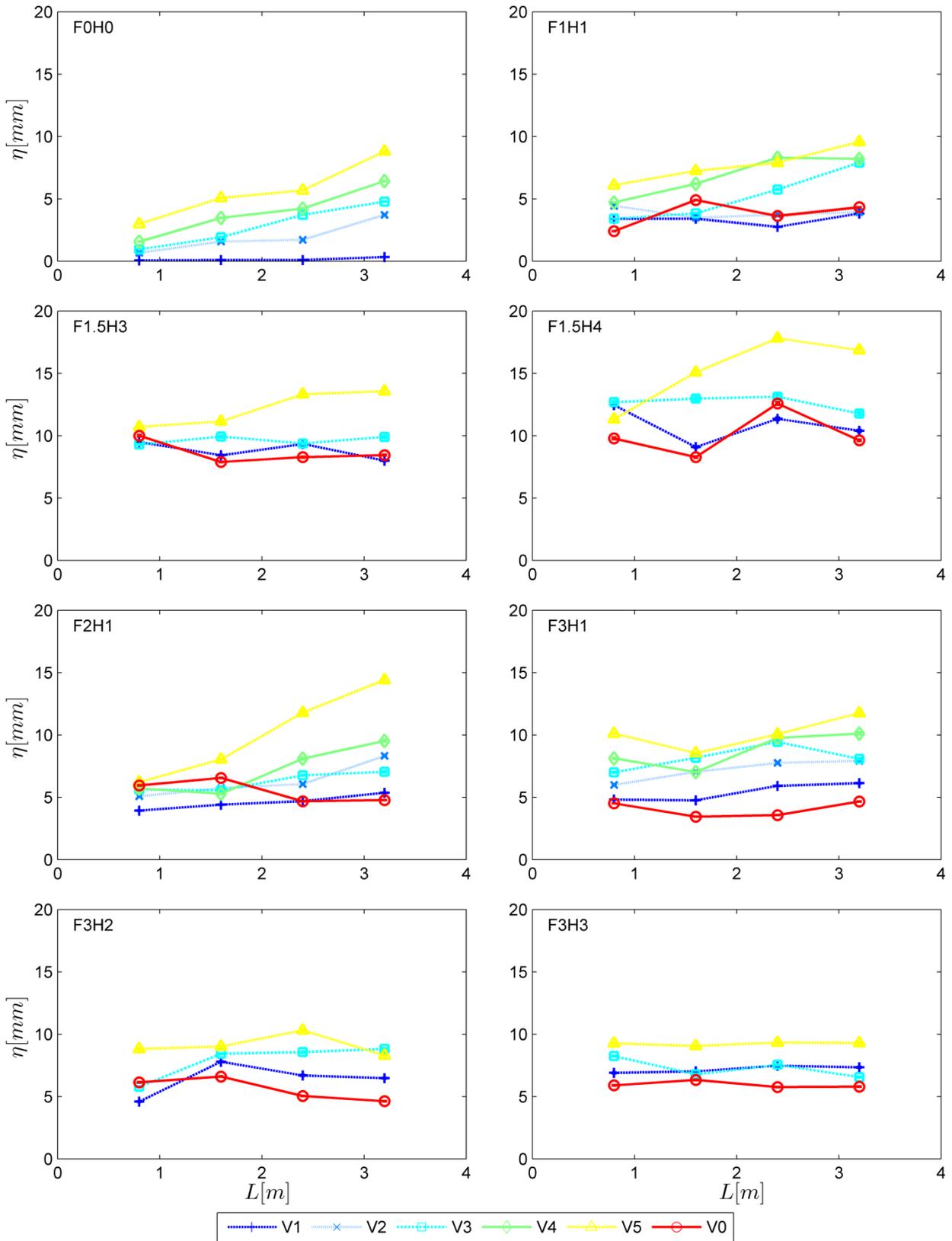


Figura 4.8. Elevación representativa para las distintas posiciones longitudinales y distintas magnitudes de viento.

Para determinar la frecuencia *peak* representativa se realiza un análisis espectral de la elevación de la superficie libre, de forma similar a lo hecho por Longo (2012), mediante un método de periodograma Welch modificado promediado que estima un PSD (Power Spectral Density) para un proceso estacionario. Para esto se utilizó una ventana Gaussiana con un *overlap* de un 50%. En la Figura 4.9 hay dos espectros para un caso con viento únicamente y para un caso de efectos mezclados; en ellos se puede notar una diferencia en la forma del *peak* por el origen de la energía tal como lo obtiene Rhee *et al.* (2007). En la Figura 4.10 por otra parte muestra el espectro de ambos efectos combinados donde adicionalmente está marcado la frecuencia del *seiche* de oscilación propia del estanque equivalente a $f_s = \frac{\sqrt{gh}}{2L} = 0.27$ [Hz].

Si bien en la mayor parte de las experiencias de efecto combinado la frecuencia *peak*, f_p , se mantiene relativamente constante a lo largo del estanque, existen condiciones en las cuales la energía de las ondas mecánicas es del orden de la energía entregada por el viento, de manera tal que la frecuencia *peak* se alterna a lo largo del estanque entre la generada por el viento y la generada por las ondas artificiales. Un ejemplo de esto es el caso de las experiencias F5H1 (ver Figura 4.10), donde la energía del viento en la misma posición pero sin ondas está del orden de los 5 [Hz]; en este caso se superpone a un múltiplo de la frecuencia mecánica, potenciándose.

Es por esto que, para el caso de la frecuencia, el valor representativo del estanque, además de ser ponderado por el área de influencia, considerará la densidad de energía en los puntos de medición para determinar qué frecuencia tiene mayor “peso”. De esta forma, puede que existan modos marcados en 1 y 3 [Hz] según la procedencia del *peak*, pero el que tenga el *peak* mayor en el PSD tendrá mayor peso. Esto en general beneficia la importancia de la frecuencia *peak* del punto de medición más lejano al origen de las ondas y de la entrada del viento. Para una mayor claridad está la ecuación (4.1), donde el índice i representa los cuatro puntos de medición, A_i el área o equivalentemente longitud del estanque que representa, e_i la densidad de energía del espectro para la frecuencia *peak*, f_{pi} , del punto de medición.

$$f_p = \frac{\sum_{i=1}^4 f_{pi} e_i A_i}{\sum_{i=1}^4 e_i A_i} \quad (4.1)$$

Por otro lado, para tener una medición de la altura de las ondas se seccionaron las series de tiempo en intervalos de tiempo $t_p = 1/f_p$, sobre lo cual se almacenó el máximo y el mínimo de la altura, de modo de poder generar una serie de máximos, mínimos o alturas de la ola en los periodos de la onda *peak*. La altura H_s representativa de la ola será el promedio de esta serie de alturas. En la Tabla 4.3 se encuentran resumidas η y f_p ya promediados en el espacio –además del valor del espectro de densidad de energía para f_p – para todas las experiencias.

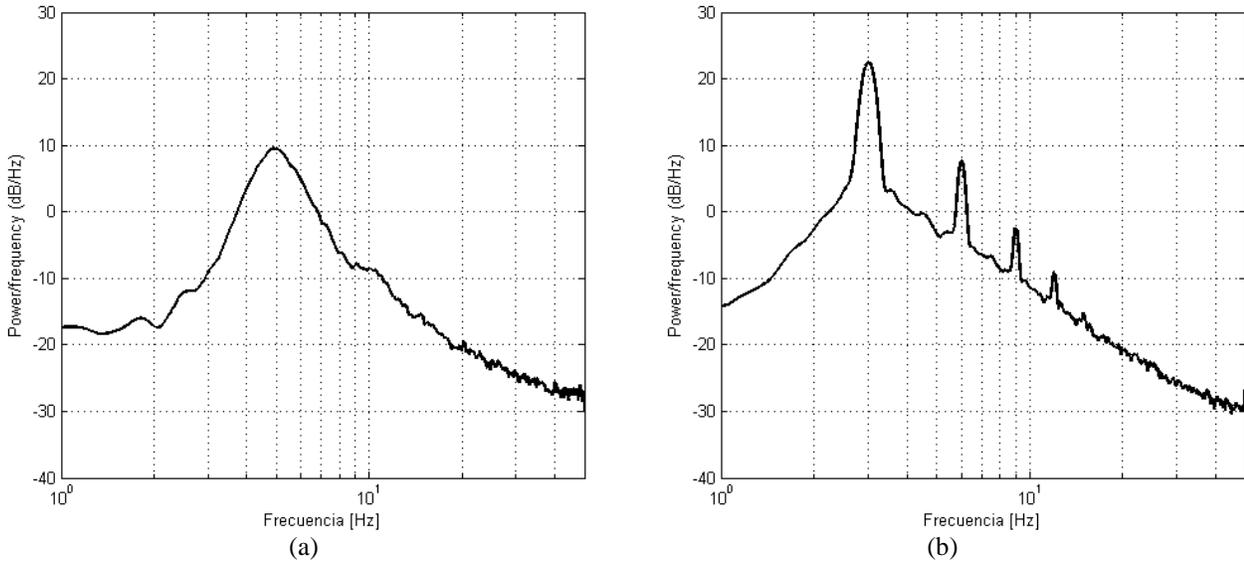


Figura 4.9. Espectros de densidad del poder para (a) solo viento con $u_{*a} = 0.43$ [m/s] a 2.4 [m] desde el comienzo del estanque (V3F0H0L13). En este caso se puede apreciar una zona *peak* y (b) viento de $u_{*a} = 0.34$ [m/s] junto a ondas generadas mecánicamente de frecuencia $f_m = 3$ [Hz] y altura característica sin viento de $\eta = 4.2$ [mm], en la misma posición (V3F3H1L13). Donde la frecuencia mecánica está claramente marcada como la frecuencia *peak* y sus múltiplos. Aquí, el efecto de las ondas generadas mecánicamente impera sobre las generadas por el viento, sin mostrar su máximo en el espectro.

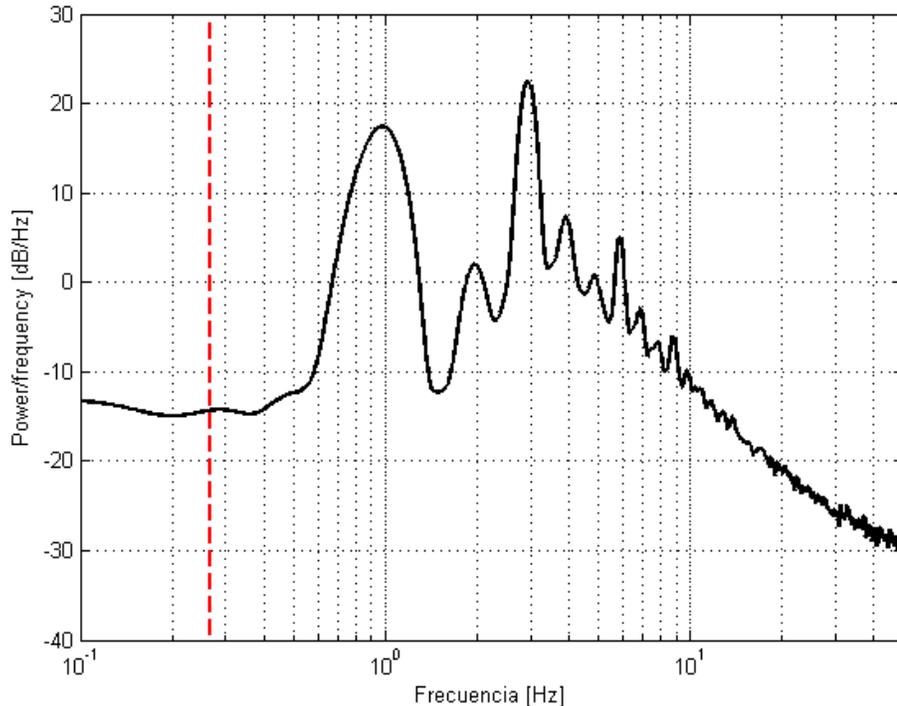


Figura 4.10. Espectro de densidad del poder para la experiencia V3F1H1L13 consistente en ondas mecánicamente generadas de $f_m = 1$ [Hz] con altura de $\eta = 3.7$ [mm] combinadas con un viento intermedio caracterizado por $u_{*a} = 0.44$ [m/s]. En rojo se indica la frecuencia del *seiche* de oscilación libre del estanque.

Tabla 4.3. Resumen de los parámetros η , en milímetros y f_p , en Hertz, determinados para las distintas experiencias.

	V0		V1		V2		V3		V4		V5	
	η [mm]	f_p [Hz]										
FOH0	–	–	0.2	8.39	2.0	5.43	2.8	4.66	3.9	4.16	5.7	3.53
F1H1	3.7	0.99	3.4	0.98	3.9	2.18	5.3	2.72	6.8	2.98	7.7	2.58
F1.5H3	8.8	1.49	8.8	1.50	–	–	9.6	1.49	–	–	12.2	1.49
F1.5H4	10.0	1.50	10.9	1.50	–	–	12.6	1.49	–	–	15.0	1.50
F2H1	5.5	2.00	4.6	2.00	6.4	2.00	6.3	2.00	7.2	2.00	10.2	1.99
F3H1	4.2	3.00	5.4	3.01	7.1	3.00	8.0	2.99	8.8	3.00	10.3	3.00
F3H2	5.9	2.99	7.2	2.99	–	–	7.3	3.00	–	–	9.2	3.00
F3H3	5.6	3.00	6.2	3.00	–	–	7.8	2.99	–	–	9.0	2.99

4.2.2. Pendiente

La aproximación de la pendiente se calcula como una aproximación de diferencias finitas de la expresión $s = \partial\eta/\partial x$. Tal como las variables anteriores, se presentan gráficamente las pendientes cuadráticas medias, s^2 en adelante, a lo largo del estanque para las distintas condiciones en la Figura 4.11, además del resumen de la pendiente promediada en el espacio en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resumen de los parámetros s^2 ($\times 10^3$) determinados para las distintas experiencias.

	V0	V1	V2	V3	V4	V5
FOH0	–	0.9	27.1	26.8	35.8	44.3
F1H1	1.6	8.4	14.5	18.6	28.9	28.1
F1.5H3	5.5	9.7		21.9		31.0
F1.5H4	5.4	5.3		12.6		25.5
F2H1	8.7	11.6	19.1	16.8	24.4	28.2
F3H1	7.4	15.8	28.8	33.4	32.9	38.0
F3H2	18.7	22.8		18.1		35.0
F3H3	13.9	17.8		17.6		35.0

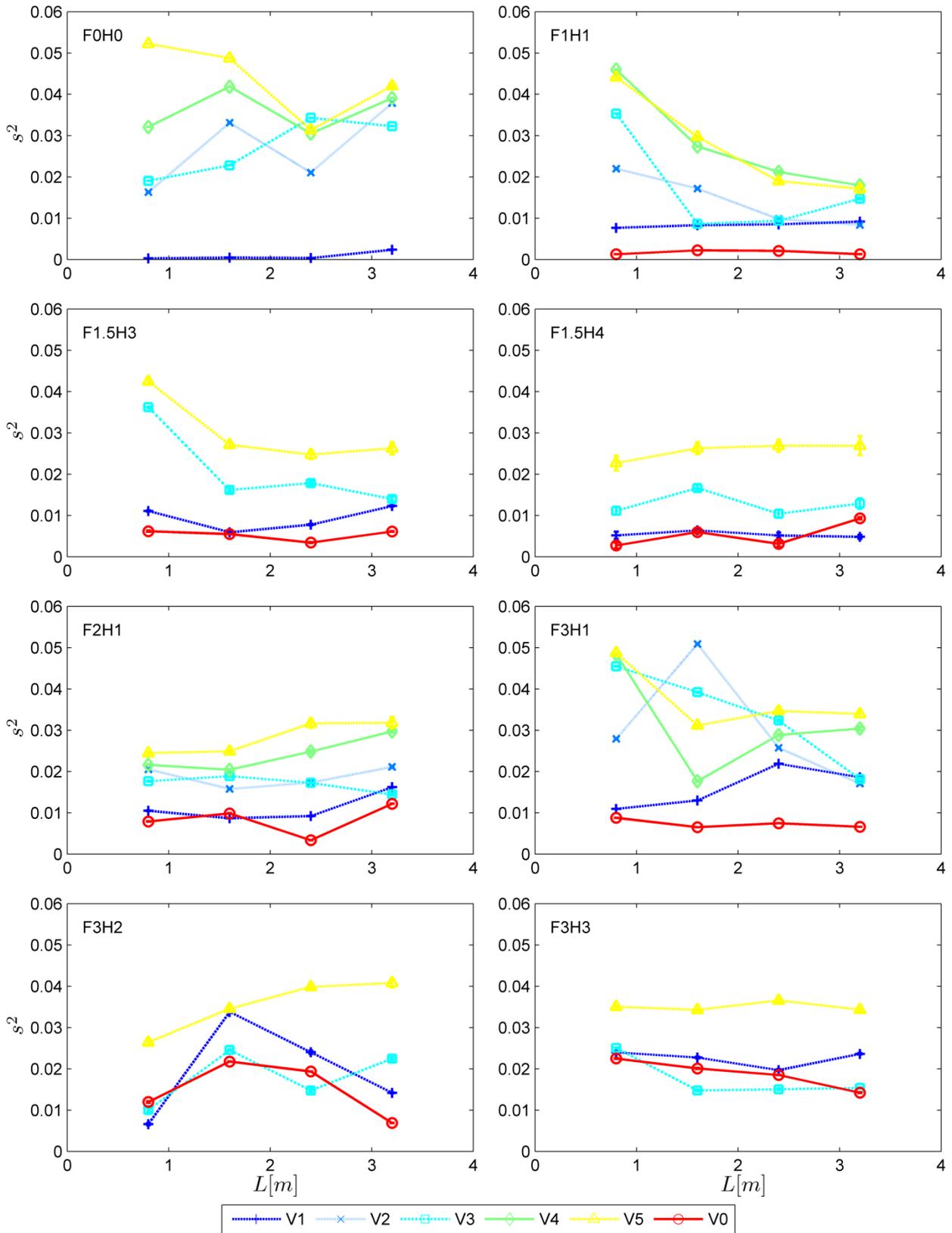


Figura 4.11. Pendientes cuadráticas medias para las distintas posiciones longitudinales y distintas magnitudes de viento.

4.3. OXÍGENO

La tasa de transferencia de oxígeno se determina a partir de la expresión (3.1) ya presentada en el capítulo anterior. La inclusión del sulfito de sodio puede generar un aumento en la temperatura del agua durante la reacción de desoxigenación, y el viento aplicado puede tener el efecto contrario según sea la temperatura del agua y el ambiente. Para enfrentar esta situación, lo más conveniente es realizar un cambio a las mediciones para una temperatura fija mediante la ley de Arrhenius.

$$k_{20} = k_T \theta^{T-20^\circ C} \quad (4.2)$$

En dicha ley expuesta en la relación (4.2), en particular para una normalización de k_L a $20^\circ C$, relaciona los coeficientes de transferencia mediante un coeficiente θ según sea el compuesto transferido. Para el oxígeno se tiene que $\theta = 1.024$.

Si bien la temperatura se mantiene relativamente constante, la corrección por temperatura para el coeficiente de transferencia se realiza en el ajuste de los datos. Haciendo el ejercicio de integración e inclusión de la fórmula (4.2), se tiene que el déficit de oxígeno, $C_s - C$ es el siguiente:

$$C_s - C(t) = (C_s - C)|_{t=0} e^{-\frac{k_{20}\theta^{20-T}}{h}t} \quad (4.3)$$

Donde h es la profundidad media del cuerpo de agua. La concentración de saturación se estimó en función de la temperatura y la presión, con la ecuación ajustada de datos entre 5 y $21^\circ C$ de concentración de saturación a 1 atm y salinidad 0 ppt (EIFAC, 1986).

$$C_s(T, p) = (14.5733 - 0.40143T + 8.0362 \times 10^{-3}T^2 - 8.5075 \times 10^{-5}T^3) \frac{p}{P_{atm}} \quad (4.4)$$

Siendo T la temperatura en grados Celsius, $P_{atm} = 1013.25 \text{ hPa}$ la presión a una atmósfera y p la presión atmosférica del lugar. Si bien no se realizaron mediciones instantáneas de la presión en el laboratorio, existen registros de la presión atmosférica en el exterior del edificio que, habiendo realizado mediciones de la presión dentro del laboratorio en días y horas aleatorios, es bastante similar a la presión en el estanque, siendo las diferencias menores al 0.2%. Los registros de presión vienen en intervalos cada 15 minutos generalmente; sin embargo, se considera una presión media a lo largo del tiempo de realización de la experiencia, puesto que varía poco a lo largo del día (~0.5% en la duración de las experiencias).

A partir de esto se generan dos variables auxiliares para ajustar, Y , el déficit de oxígeno, y X , la resistividad en el tiempo a la transferencia de oxígeno para incluir la variación de temperatura y el paso del tiempo en una sola variable independiente.

$$Y = C_s(t) - C(t)$$

$$X = \frac{\theta^{20-T}}{h}t \quad (4.5)$$

Se realiza entonces un ajuste $Y = DO_1 e^{-k_{20}X}$, donde las constantes a determinar son la tasa de transferencia de oxígeno y el déficit inicial de oxígeno, DO_1 , que mejor ajusta los datos. Esto se realiza con el método *NonLinearLeastSquares* de algoritmo *Trust-Region* entregado por defecto por la

herramienta *cftool* de Matlab para el ajuste exponencial. Un ejemplo de este ajuste se encuentra en la Figura 4.12, en donde además se aprecia la banda de predicción asociada a un nivel de confianza de un 95% de las constantes determinadas.

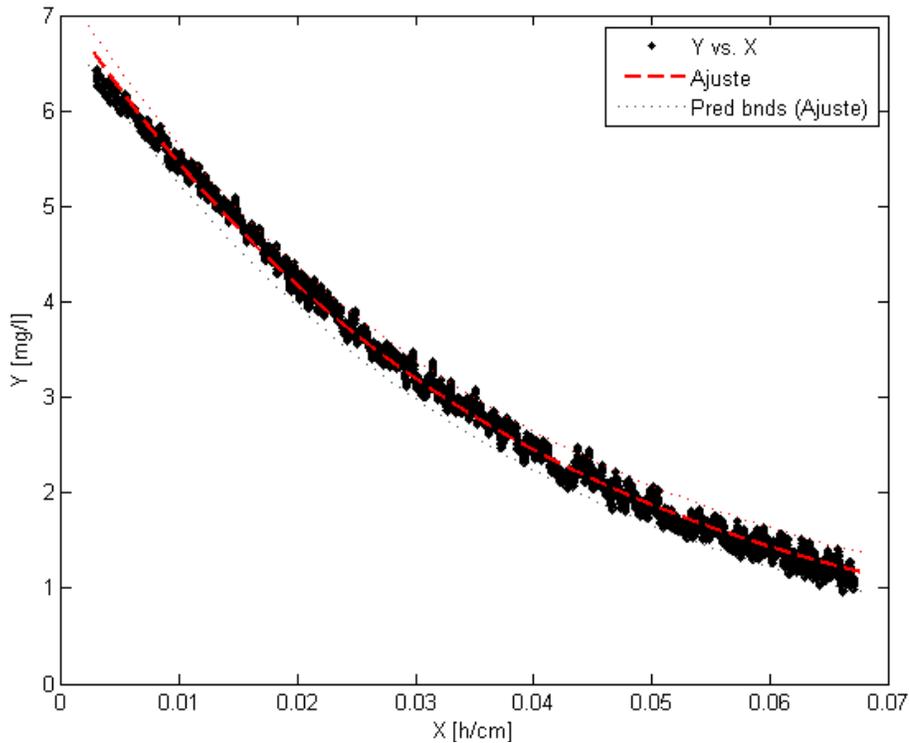


Figura 4.12. Ajuste de la expresión $Y = DO_1 e^{-k_{20}X}$ para el caso V3F3H2.

El ajuste que se realiza con la fórmula de Deacon (1977) tiene un buen ajuste y en ese sentido se tendría una buena suposición de mezcla completa en el cuerpo de agua. Las características del estanque y la generación de las ondas mecánicas permiten aceptar fácilmente este supuesto. Los grandes vórtices que podrían estar afectando la superficie libre ayuda a la integración del oxígeno en el cuerpo de agua.

Los ajustes para todas las condiciones se pueden encontrar en el Anexo C; el resumen de las tasas de transferencia determinadas se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resumen de las tasas de transferencia determinadas para las distintas experiencias.

	V0	V1	V2	V3	V4	V5
	[cm/hr]	[cm/hr]	[cm/hr]	[cm/hr]	[cm/hr]	[cm/hr]
F0H0	–	0.8	7.7	9.5	11.7	21.7
F1H1	1.7	5.2	18.8	27.2	37.7	55.4
F1.5H3	5.1	10.2		27.5		51.5
F1.5H4	12.0	16.3		33.4		56.6
F2H1	2.2	6.2	17.7	18.9	35.9	62.6
F3H1	1.3	4.0	7.9	19.7	23.3	35.5
F3H2	13.4	29.1		43.0		64.7
F3H3	13.4	8.7		26.7		55.0

A modo de resumen general la Tabla 4.6 contiene los valores representativos de las experiencias incluidos otros parámetros de importancia que son el coeficiente de difusión molecular, D , calculado en función de la temperatura media del agua en grados Kelvin y la viscosidad del agua cinemática del agua, ν_ω , también en función de la temperatura en grados Kelvin. Para la viscosidad cinemática se utiliza con las aproximaciones recomendadas por White (1998) para agua entre 0 y 100 °C en función de la temperatura en grados Kelvin para la viscosidad dinámica y la densidad (expresiones (4.6) y (4.7)):

$$\mu_\omega = 1.788x10^{-3} e^{-1.704-5.306\left(\frac{273}{T}\right)+7.003\left(\frac{273}{T}\right)^2} \left[\frac{Kg}{ms} \right] \quad (4.6)$$

$$\rho_\omega = 1000 - 0.0178|T - 277|^{1.7} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (4.7)$$

Para el coeficiente de difusión molecular para el oxígeno en el agua se utiliza la expresión (4.8) desarrollada por Wilke y Chang (1955), donde T es la temperatura del agua en °K, Ψ_{H_2O} un parámetro de asociación igual a 2.26 para el agua, M_{H_2O} el peso molecular del agua en g/mol igual a 18, μ_{H_2O} está en centipoises y V_{O_2} el volumen molar del oxígeno en $cm^3/g - mol$ considerado como 25.6.

$$D = 7.4x10^{-12} \frac{T(\Psi_{H_2O}M_{H_2O})^{\frac{1}{2}}}{\mu_\omega V_{O_2}^{0.6}} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (4.8)$$

4.4. PROPAGACIÓN DE ERRORES

Para casi todo lo que se tenía fórmula (η , s^2 , u_s , etc) se propagó acorde a:

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (4.9)$$

Para u_* y z_0 se utilizó el 95% de confianza del ajuste hecho con *fit* en Matlab. Para el oxígeno, 95% de confianza entregado por *cftool* del mismo programa.

Para la frecuencia *peak* se calculó la banda que representa como $B_0 = \frac{(\xi f_p)^{4/5}}{T^{1/5}}$, donde ξ es el radio de decaimiento y T es el tiempo total de la muestra. Se determinó el radio de decaimiento para una experiencia revisando visualmente, para un caso, la banda asociada a la frecuencia *peak* para un espectro de densidad de energía de lo que resultó $\xi = 0.0011$. Con este valor se determinaron las bandas de cada espectro sin tener que realizar una inspección visual. Luego, f_p queda con un “error” asociado $\frac{B_0}{2}$.

Tabla 4.6. Resumen de las variables determinadas además de otros valores relevantes como la temperatura del agua y la profundidad media de las experiencias.

<i>V</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	k_{20} [cm/hr]	<i>T</i> [°C]	<i>h</i> [m]	η_{rms} [mm]	s_{rms}^2 –	f_p [Hz]	H_s [m]	u_* [m/s]	z_0 [mm]	u_s [m/s]	$Dx10^9$ [m ² /s]	$vx10^6$ [m ² /s]
1	0	0	0.776	13.3	0.500	0.15	0.001	8.39	0.040	0.140	0.004	0.096	1.61	1.20
2	0	0	7.676	14.3	0.498	1.96	0.027	5.43	0.568	0.330	0.048	0.145	1.65	1.17
3	0	0	9.523	13.1	0.500	2.84	0.027	4.66	0.820	0.426	0.045	0.188	1.60	1.21
4	0	0	11.689	9.3	0.498	3.93	0.036	4.16	1.143	0.554	0.054	0.276	1.42	1.34
5	0	0	21.738	11.2	0.490	5.69	0.044	3.53	1.708	0.751	0.345	0.364	1.50	1.28
0	5	1	1.696	10.6	0.494	3.72	0.002	0.99	1.171	0.000	0.000	0.001	1.48	1.30
0	6	3	5.092	14.2	0.494	8.76	0.005	1.49	2.559	0.000	0.000	0.006	1.65	1.18
0	6	4	12.006	16.5	0.493	10.00	0.005	1.50	2.836	0.000	0.000	0.011	1.77	1.11
0	4	1	2.221	12.3	0.494	5.46	0.009	2.00	1.590	0.000	0.000	0.006	1.56	1.24
0	3	1	1.329	11.7	0.500	4.16	0.007	3.00	1.166	0.000	0.000	0.025	1.53	1.26
0	3	3	13.431	16.6	0.496	5.92	0.019	2.99	1.724	0.000	0.000	0.049	1.77	1.10
0	3	2	13.437	14.8	0.495	5.55	0.014	3.00	1.597	0.000	0.000	0.014	1.68	1.16
1	5	1	5.247	9.9	0.499	3.39	0.008	0.98	1.261	0.158	0.014	0.077	1.44	1.32
2	5	1	18.805	10.4	0.496	3.95	0.014	2.18	1.235	0.386	0.076	0.159	1.47	1.30
3	5	1	27.246	10.8	0.494	5.30	0.019	2.72	1.586	0.440	0.132	0.179	1.49	1.29
4	5	1	37.725	11.4	0.498	6.77	0.029	2.98	1.987	0.592	0.300	0.208	1.51	1.27
5	5	1	55.351	12.0	0.487	7.72	0.028	2.58	2.402	0.859	0.767	0.317	1.54	1.25
1	6	3	10.236	14.3	0.496	8.80	0.010	1.50	2.660	0.223	0.066	0.058	1.65	1.17
3	6	3	27.510	14.3	0.496	9.62	0.022	1.49	3.019	0.457	0.148	0.168	1.65	1.17
5	6	3	51.547	14.2	0.493	12.18	0.031	1.49	3.912	0.793	0.600	0.371	1.65	1.18
1	6	4	16.311	15.6	0.492	10.94	0.005	1.50	3.203	0.225	0.104	0.072	1.72	1.13
3	6	4	33.409	15.4	0.494	12.56	0.013	1.49	3.811	0.511	0.244	0.147	1.71	1.14
5	6	4	56.568	15.8	0.482	15.03	0.025	1.50	4.653	1.075	1.808	0.270	1.73	1.13
1	4	1	6.225	12.8	0.494	4.61	0.012	2.00	1.524	0.182	0.041	0.066	1.58	1.22
2	4	1	17.661	12.9	0.497	6.38	0.019	2.00	2.041	0.284	0.012	0.123	1.58	1.22
3	4	1	18.943	12.7	0.494	6.26	0.017	2.00	2.026	0.367	0.020	0.188	1.57	1.23
4	4	1	35.938	11.3	0.496	7.24	0.024	2.00	2.350	0.537	0.128	0.208	1.51	1.27
5	4	1	62.627	12.3	0.482	10.15	0.028	1.99	3.242	0.843	0.799	0.342	1.56	1.24
1	3	1	3.981	9.7	0.498	5.41	0.016	3.01	1.530	0.137	0.005	0.061	1.44	1.33
2	3	1	7.878	9.9	0.498	7.13	0.029	3.00	2.070	0.249	0.006	0.130	1.44	1.32
3	3	1	19.711	10.7	0.498	8.04	0.033	2.99	2.366	0.339	0.031	0.166	1.48	1.29
4	3	1	23.271	9.9	0.498	8.82	0.033	3.00	2.608	0.616	0.387	0.273	1.44	1.32
5	3	1	35.499	11.4	0.492	10.28	0.038	3.00	3.088	0.921	1.117	0.260	1.51	1.27
1	3	3	29.050	15.8	0.495	7.17	0.023	2.99	2.113	0.273	0.328	0.077	1.73	1.13
3	3	3	43.006	15.3	0.493	7.30	0.018	3.00	2.108	0.574	0.396	0.204	1.70	1.14
5	3	3	64.675	14.2	0.497	9.24	0.035	3.00	2.691	1.110	1.384	0.228	1.65	1.18
1	3	2	8.722	14.9	0.497	6.21	0.018	3.00	1.833	0.221	0.085	0.066	1.68	1.16
3	3	2	26.666	14.7	0.499	7.77	0.018	2.99	2.277	0.487	0.284	0.237	1.67	1.16
5	3	2	55.009	14.0	0.497	8.99	0.035	2.99	2.684	1.090	1.700	0.271	1.64	1.18

5. Análisis de resultados

En el presente capítulo se determinan las relaciones funcionales que ligan las características medidas junto con la transferencia de oxígeno, además de realizarse una revisión sobre la velocidad superficial de las ondas y la variación de las características a lo largo del estanque.

Las variables a considerar son todas las que se calcularon u_s , u_* , z_0 , η , f_p , s^2 , H_s , k_{20} , además de propiedades del fluido y sistema como: D , ν , g . Los primeros adimensionales en surgir son la pendiente, que ya es adimensional, y el número de Schmidt mencionado en capítulos anteriores.

Para todos los ajustes y análisis que se realicen a continuación, la condición experimental V1FOH0 queda siempre excluida, pues sus parámetros η , f_p , s^2 , H_s no se logran medir con claridad suficiente.

5.1. TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

Ondas mecánicas

Antes de definir nuevos adimensionales es útil revisar qué pasa con los valores del estudio en tendencias previamente propuestas. En la Figura 5.1(a) se comparan los resultados de las ondas mecánicas de este estudio con los resultados de Daniil y Gulliver (1991) que presentan el ajuste de la ecuación (5.1), donde H es la raíz media cuadrática de la altura de la ola de cresta a valle y f la frecuencia que caracteriza el oleaje.

$$kSc^{1/2} = 0.0159Hf \quad (5.1)$$

En esta figura se aprecia que los resultados de esta tesis, si bien no abarcan el mismo rango y parecen estar mostrando una tendencia mayor, están dentro del rango de dispersión de estos otros resultados. Por otro lado, incluyendo los datos de ondas mecánicas con un leve viento, éstos también se encuentran dentro del mismo rango hasta que, para el oleaje mayor, se comienzan a alejar. Por otro lado, incluyendo los datos de viento únicamente se podría decir que están dentro del rango, pero claramente presentan una tendencia de mayor incremento. En la Figura 5.1(b) se incluyen todos los datos del efecto combinado. En esta situación la tendencia ya no cobra mucho sentido, sino que los datos principalmente mecánicos parecen sólo ser dispersión dentro de una tendencia mucho mayor.

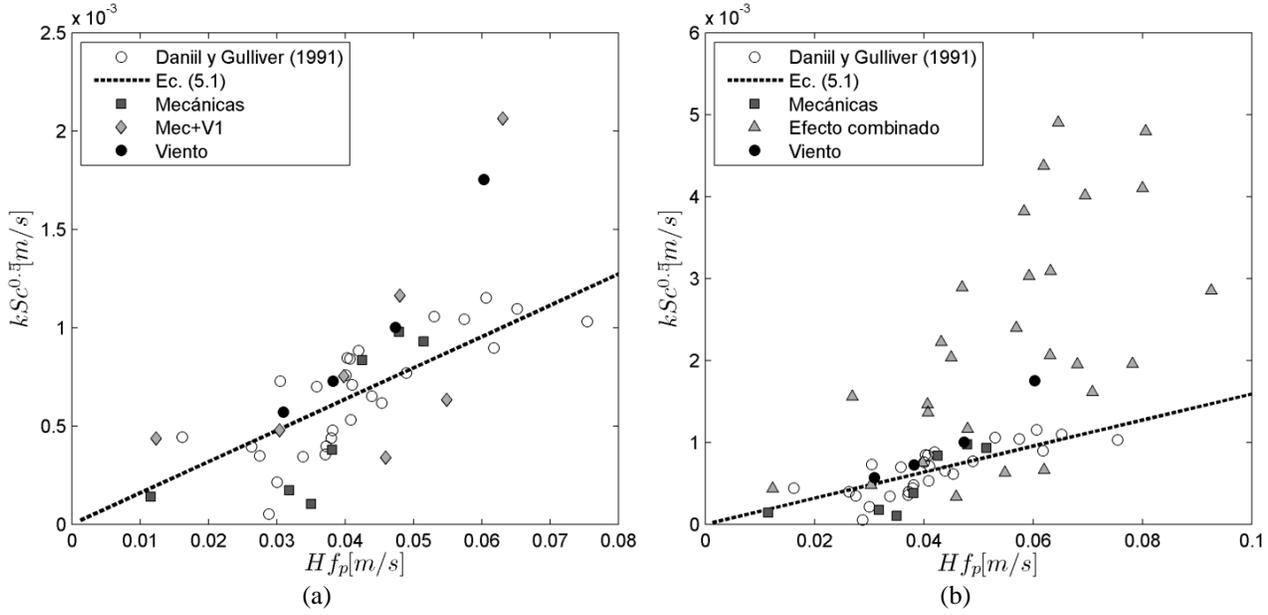


Figura 5.1. Relación entre la transferencia de oxígeno con el oleaje caracterizado por $H_s f_p$.

Al hacer nuevamente el ejercicio de encontrar el escalamiento de la tasa de renovación de la superficie libre, se presentan nuevas formas para los números adimensionales. Daniil y Gulliver (1991) escalan la tasa de renovación de la superficie libre con la frecuencia de la onda y prueban varios números adimensionales que la puedan describir. Proponen algo similar a $r \sim f Re_{max}^\alpha s^\beta$ con tres combinaciones (α, β) . En esta tesis se plantea un número de Reynolds en primera instancia como,

$$Re = \frac{\sqrt{H_s \lambda} f_p \lambda}{\nu_\omega} \quad (5.2)$$

Donde la longitud característica se encuentra entre la altura de la onda y su longitud de onda, y el escalamiento de velocidad va con la celeridad de las ondas. Por otro lado, Daniil y Gulliver (1991) definen la pendiente a partir de la teoría lineal de las ondas, quedando el otro adimensional como la razón $S \sim \frac{H_s}{\lambda}$. Entonces, la relación queda:

$$kSc^{1/2} = C \sqrt{\nu_\omega f_p \left(\frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\nu_\omega} \right)^\alpha \left(\frac{H_s}{\lambda_p} \right)^\beta} = C \sqrt{\nu_\omega f_p \left(\frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\nu_\omega} \right)^\alpha \left(\frac{H_s}{\lambda_p} \right)^\beta \frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}} \quad (5.3)$$

$$= C \sqrt{\left(\frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\nu_\omega} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{H_s}{\lambda_p} \right)^\beta \sqrt{H_s \lambda_p} f_p^2 \lambda_p \frac{\sqrt{\lambda_p}}{\sqrt{\lambda_p}}} = C \sqrt{\left(\frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\nu_\omega} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{H_s}{\lambda_p} \right)^{\beta+0.5} f_p^2 \lambda_p^2} \quad (5.4)$$

$$\frac{k}{f_p \lambda_p} Sc^{1/2} = C \left(\frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\nu_\omega} \right)^{\alpha_0} \left(\frac{H_s}{\lambda_p} \right)^{\beta_0} \quad (5.5)$$

Donde C , α_0 , β_0 son constantes por ajustar con los datos experimentales. Para el ajuste se utiliza la función *nlinfit* de Matlab, que ajusta modelos no lineales usando el algoritmo de Gauss-Newton con

modificaciones de Levenberg–Marquardt para una convergencia global. Para recobrar el resultado de Daniil y Gulliver, el ajuste debería arrojar $\alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 1$ y $C = 0.0159$. En la Figura 5.2 (a) se presentan los datos ajustados con los datos de Daniil y Gulliver, además de las ondas mecánicas de esta tesis. Se obtiene un resultado cercano al de ellos con $\alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 1.5$ y $C = 0.0622$. En (b) se incluyen los valores de los efectos combinados, que nuevamente indican una tendencia mayor. Reajustando los términos queda como:

$$\frac{k}{f_p H_s} S c^{1/2} = 0.0622 \sqrt{S} \quad (5.6)$$

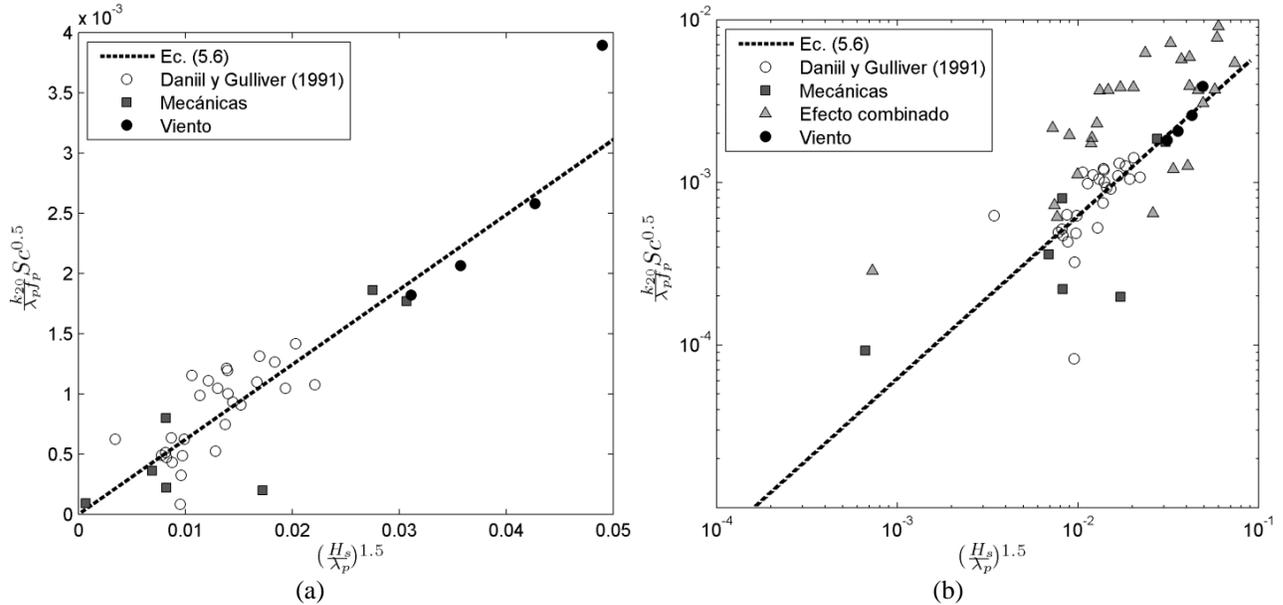


Figura 5.2. Relación entre la transferencia de oxígeno con el oleaje caracterizado por (5.5) con los parámetros con $\alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 1.5$ y $C = 0.0622$. En (a) no se presentan los datos de este estudio para los efectos combinados como sí se hace en (b), que además se encuentra en escala logarítmica.

Se realiza una nueva calibración con todos los datos válidos de esta tesis, además de los de Daniil y Gulliver. Haciendo este ejercicio (Figura 5.3) se obtiene $\alpha_0 = 1/3$, $\beta_0 = 5/3$ y $C = 0.0043$. Es de notar que la mayoría de las ondas mecánicas o con el viento más suave siguen la tendencia por debajo de la curva. Mientras que en los casos en que el viento es mayor, combinado con ondas mecánicas o no, los puntos se encuentran por sobre la tendencia, pero siguiéndola al fin y al cabo. Además de esto, se observa que el efecto del viento no necesariamente genera los adimensionales mayores, que aumenten la transferencia, si no que, para las mismas características del oleaje, los casos en que hay un flujo de aire sobre la superficie libre entregando turbulencia tiene una mayor tasa de transferencia de oxígeno.

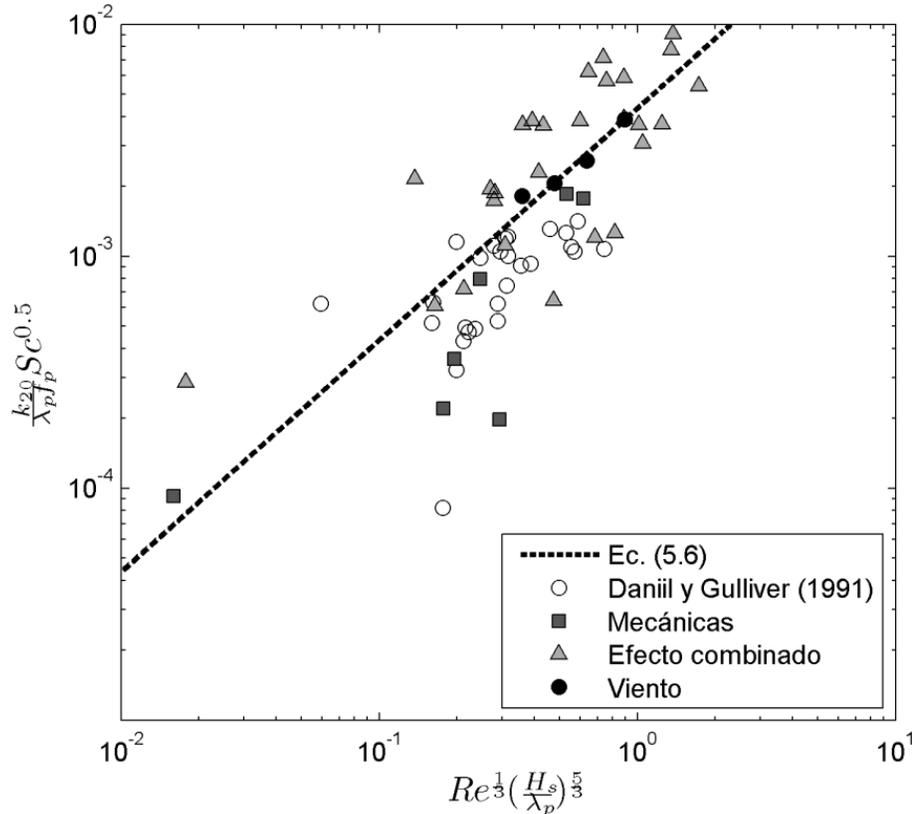


Figura 5.3. Relación entre la transferencia de oxígeno con el oleaje caracterizado por (5.5) con $\alpha_0 = 1/3$, $\beta_0 = 5/3$ y $C = 0.0043$.

Efecto combinado

Normalmente se grafica la relación dimensional k_{600} vs. u_* , donde k_{600} se determina como:

$$k_{600} = k_x \left(\frac{600}{Sc_x} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

Con los datos de las experiencias con viento de este estudio se obtiene la Figura 5.4. Se aprecia efectivamente una relación, pero es obvio que no es exclusiva de la velocidad de corte y es necesario incorporar algo que dé cuenta acerca de las características de la superficie del agua. De hecho, si revisamos las distintas combinaciones mecánicas generadas, se pueden apreciar distintas tendencias y no atribuir la dispersión de los datos a errores de medición. En la figura se ilustran distintos tipos de ajuste, tendencia lineal con todos los datos (guiones negros) y sólo con los datos de viento (línea de puntos y guión gris) y una potencia para el caso de viento (línea continua gris) que adopta un exponente de 1.5.

Por otro lado, si a esto agregamos las ondas mecánicas ($u_* = 0$), permitiendo que la relación no cruce por el origen, las relaciones potenciales aumentan su exponente (Figura 5.5). Para la condición de viento nulo, en ambos casos de ajuste el valor es similar. Si nos enfocamos sólo en los casos exclusivos de viento, se aprecia que la potencia de u_* es mayor a la tendencia lograda con todos los datos, pero claramente no se ajustará al resto de las experiencias, pues discrepan en frecuencia, elevación y pendientes características.

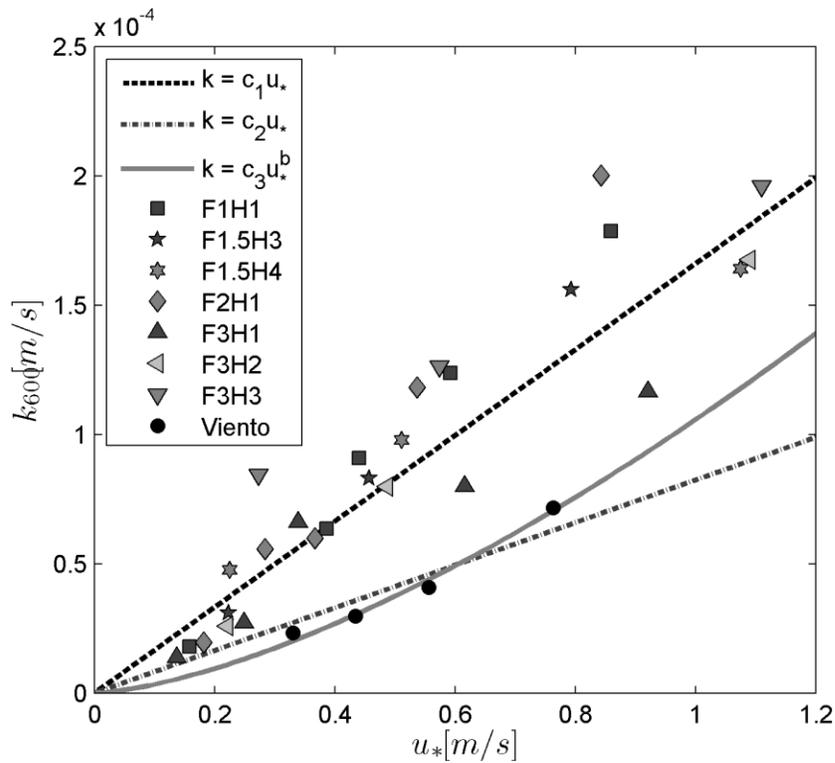


Figura 5.4. Tasa de transferencia de oxígeno normalizada para $Sc = 600$ en función de la velocidad de corte del aire. En la tendencia $k = cu_*$ la constante vale $c_1 = 1.66 \times 10^{-4}$, ajustando todos los datos, y $c_2 = 8.24 \times 10^{-5}$ cuando se ajustan los cuatro puntos de sólo viento. Si se acepta un exponente distinto de 1 para la velocidad de corte, al ajustar todos los datos se tiende a la linealidad mientras que el ajuste con los cuatro puntos de viento se ajusta con $b = 1.5$ y $c_3 = 1.06 \times 10^{-4}$.

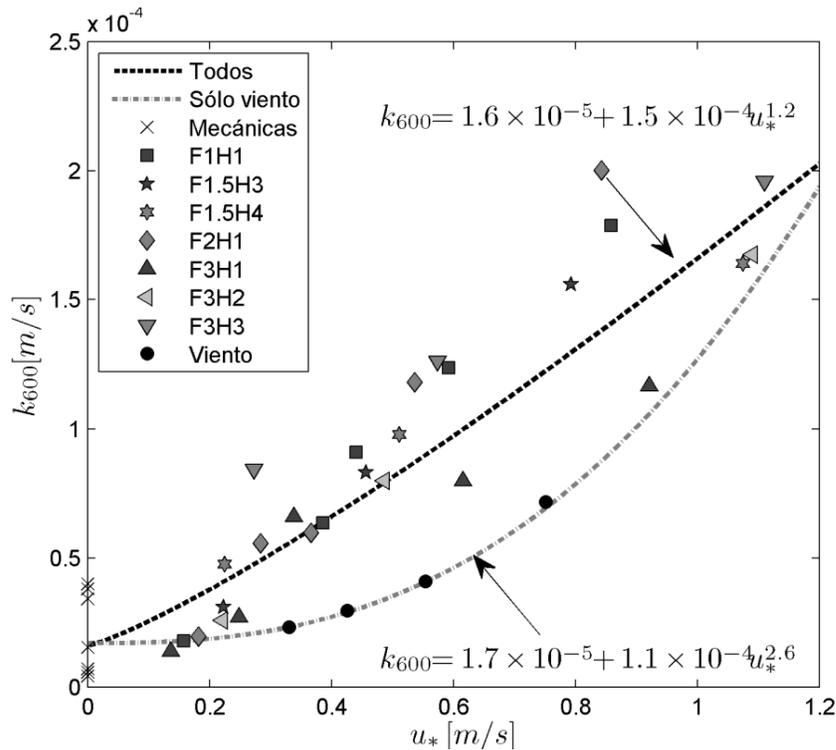


Figura 5.5. Tasa de transferencia de oxígeno normalizada para $Sc = 600$ en función de la velocidad de corte del aire, considerando una relación potencia que no pasa por el origen para todos los datos y para los datos sólo con viento.

Utilizando la expresión definida en (5.5) para ser calibrada con los 38 puntos considerados válidos del estudio, se obtiene $\alpha_0 = 0.5$, $\beta_0 = 1.5$ y $C = 5.92 \times 10^{-4}$ (ver Figura 5.6). Sin embargo, al incluir la medición efectuada de la pendiente (ecuación (5.8)), los datos colapsan de forma similar (ver Figura 5.7).

$$\frac{k}{f_p \lambda_p} S C^{1/2} = C \left(\frac{\sqrt{H_s \lambda_p} f_p \lambda_p}{\nu_\omega} \right)^\alpha S^\gamma \quad (5.8)$$

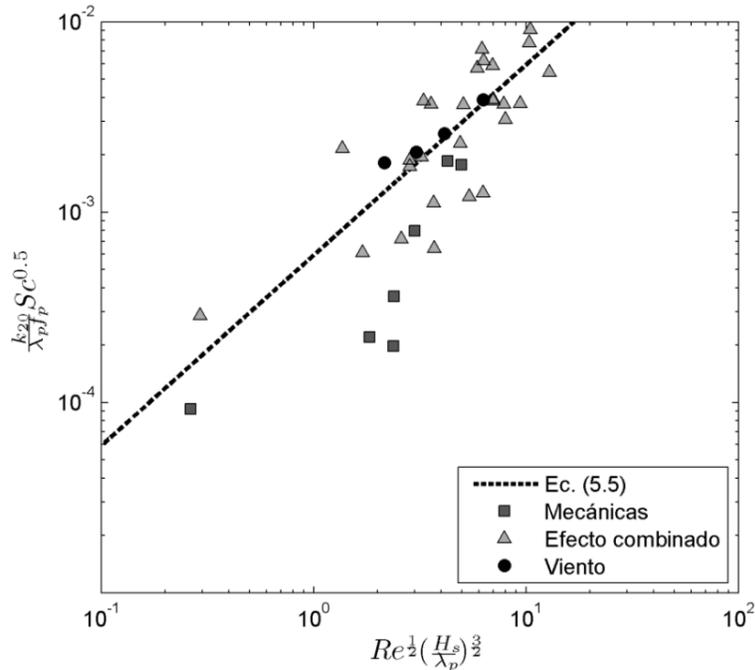


Figura 5.6. Relación entre la transferencia de oxígeno con el oleaje caracterizado por (5.5) con $\alpha_0 = 0.5$, $\beta_0 = 1.5$ y $C = 5.93 \times 10^{-4}$.

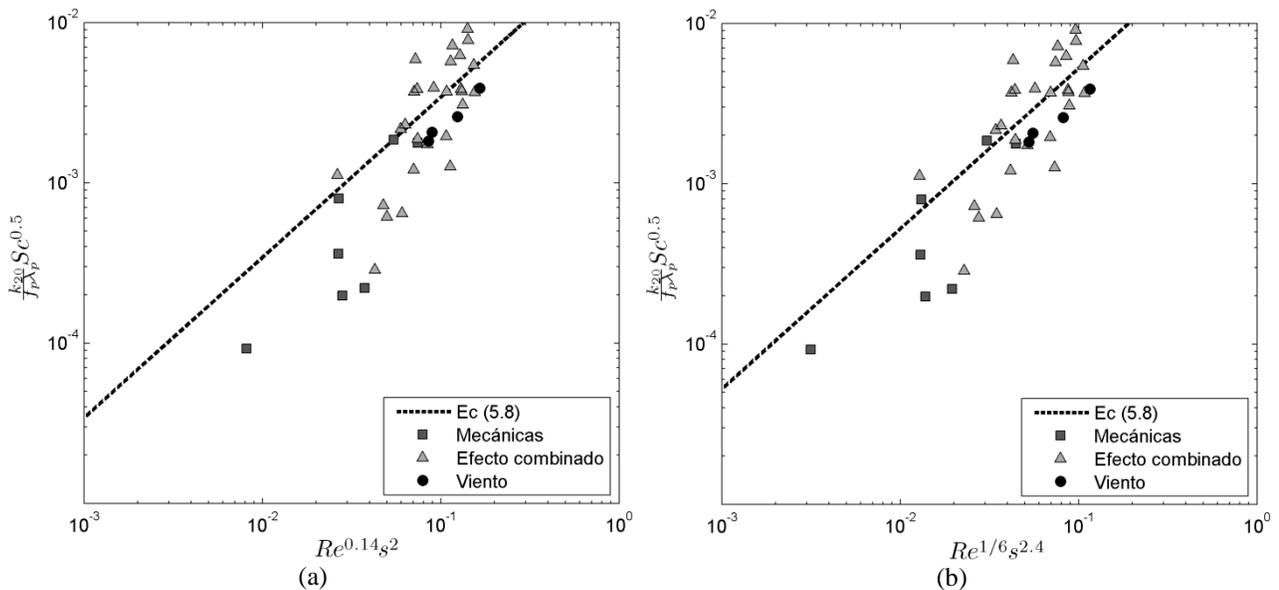


Figura 5.7. Relación entre la transferencia de oxígeno con el oleaje caracterizado por (5.8) con: (a) $\gamma = 2$ fijo resultando $\alpha = 0.14$, y $C = 3.26 \times 10^{-2}$. (b) γ libre resultando $\gamma = 2.4$, $\alpha = 1/6$ y $C = 5.05 \times 10^{-2}$. Al estar fijo s^2 en la primera figura, el número de Reynolds no logra “estirar” bien los datos, consiguiendo que la constante se acerque donde está la mayoría de los puntos.

Pero este estudio cuenta con más mediciones, por lo que se plantean nuevas variables de importancia para realizar un análisis dimensional: la pendiente media cuadrática, s^2 ; η en sustitución de H_s , principalmente porque es una variable mayormente utilizada; λ_p como otra componente de longitud que podría importar; c_p , la celeridad de la onda proporcional a f_p/k_p , de modo que no se incluye la frecuencia si es que ya incluimos la longitud de onda, además, la ventaja de la celeridad frente a $\lambda_p f_p$ que adimensionalizaba antes es que viene incluido el efecto de la profundidad del estanque que afecta levemente en una condición experimental (FIH1); la viscosidad del agua, ν_ω ; la velocidad superficial del agua, u_s ; y, por supuesto, la tasa de renovación de la superficie libre, r . Se plantea entonces la relación:

$$\frac{r\eta}{c_p} = \Phi \left(\frac{\eta u_s}{\nu_\omega}, \frac{\eta}{\lambda_p}, \frac{u_s}{c_p}, s^2 \right) \quad (5.9)$$

En el lado derecho de esta relación se encuentra primero el número de Reynolds de la superficie libre, una razón de longitudes, proporcional a la pendiente media, $\frac{H_s}{\lambda_p}$, que podrá equilibrar con el número de Reynolds si es que la escala de longitud característica está mejor relacionada con λ_p o $\sqrt{\eta\lambda_p}$. Análogamente hay una razón entre la celeridad de las ondas y la velocidad superficial del agua. Finalmente, está la pendiente cuadrática media que ya es adimensional, dependiendo de las fluctuaciones de la pendiente, este valor podría estar relacionado con la pendiente media. Estos adimensionales también se encuentran de forma similar en los análisis de Longo *et al.* (2012) que tienen el mismo número de Reynolds, un número de Froude (que con un ejercicio algebraico se puede encontrar en la relación $\frac{u_s}{c_p}$ en este caso) y un número de Weber no considerado en este caso, despreciando así la tensión superficial. La tasa de transferencia será entonces:

$$k_{20} = C \sqrt{D \frac{c_p}{\eta} \left(\frac{\eta u_s}{\nu_\omega} \right)^{\alpha_0} \left(\frac{\eta}{\lambda_p} \right)^{\beta_0} \left(\frac{u_s}{c_p} \right)^{\gamma_0} s^{2\delta_0}} \quad (5.10)$$

$$k_{20} = C \sqrt{\frac{D}{\nu_\omega} c_p^2 \left(\frac{\eta u_s}{\nu_\omega} \right)^{\alpha_0-1} \left(\frac{\eta}{\lambda_p} \right)^{\beta_0} \left(\frac{u_s}{c_p} \right)^{\gamma_0+1} s^{2\delta_0}} \quad (5.11)$$

$$k_{ad} = \frac{k_{20} S c^{\frac{1}{2}}}{c_p} = C \left(\frac{\eta u_s}{\nu_\omega} \right)^\alpha \left(\frac{\eta}{\lambda_p} \right)^\beta \left(\frac{u_s}{c_p} \right)^\gamma s^{2\delta} \quad (5.12)$$

Donde k_{ad} es la tasa de transferencia de oxígeno adimensional. Al ajustar esta expresión con las 38 experiencias válidas (Figura 5.8), los exponentes resultan ser: $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.6$, $\gamma = 0$ y $\delta = 0$. De esto se puede concluir que, al ser β positivo, la escala de longitud en el número de Reynolds está bien considerada, mientras que al ser γ nulo, indica que la velocidad superficial escala bien en el número de Reynolds y que la celeridad es apropiada para la adimensionalización de la tasa de transferencia.

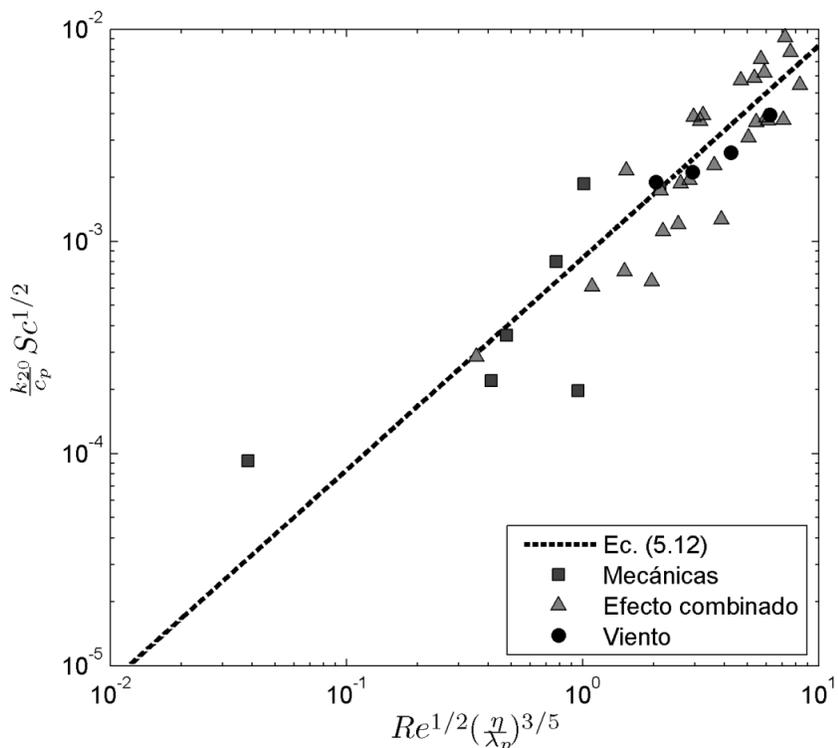


Figura 5.8. Relación (5.12) con $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.6$, $\gamma = 0$, $\delta = 0$ y $C = 8.34 \times 10^{-4}$.

Un resultado interesante es el hecho de que la pendiente cuadrática no tiene peso en la fórmula, siendo uno de los temas principales de investigación. Sin embargo, si únicamente ajustamos la tasa de transferencia de oxígeno adimensional a la pendiente, encontramos dos relaciones: en el caso de ajustar una relación potencial a todos los datos se obtiene la línea de guiones negros de la Figura 5.9 que ajusta $k_{ad} \sim s^2$, mientras que ajustando los datos a los cuatro puntos de viento lo que se obtiene es una potencia mayor (línea gris de puntos y guiones) del orden $k_{ad} \sim s^{2.75}$.

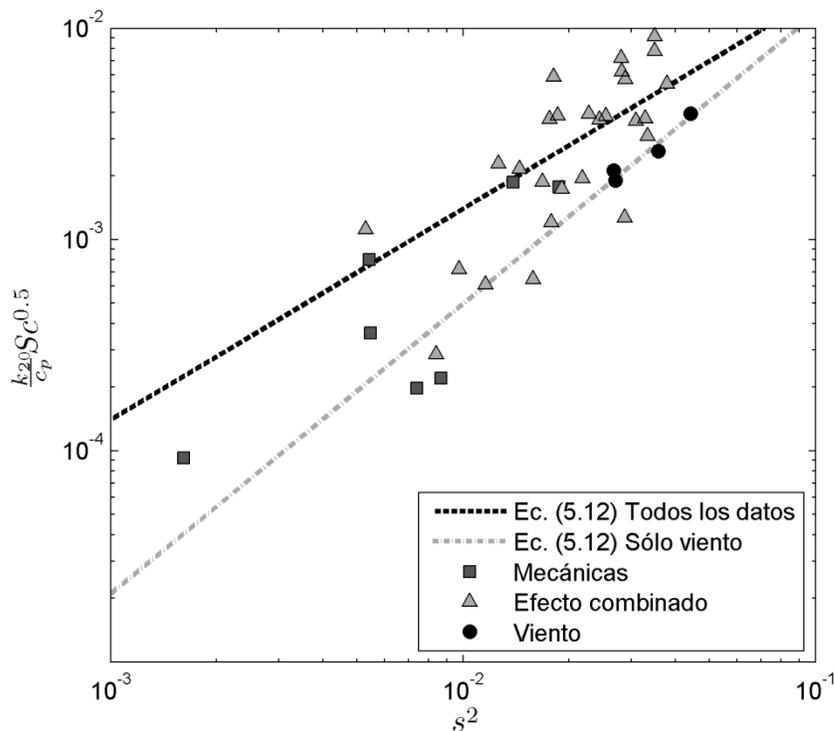


Figura 5.9. Tasa de transferencia sólo dependiendo de la pendiente. Ajustando todos los datos el exponente es $\delta = 1$ y $C = 1.4 \times 10^{-2}$, mientras que cuando se ajustan sólo los datos de viento se obtiene $\delta = 1.375$ y $C = 2.78 \times 10^{-1}$.

Esto se puede deber al hecho de que una onda mecánica le entrega simetría a la onda, disminuyendo los frentes empinados que se logran cuando la onda es originada puramente por el viento. De este modo, alcanzan un valor límite inclusive menor al de las pendientes sólo de viento que, sin embargo, tienen menor elevación y menor transferencia de oxígeno. Es decir, la pendiente cuadrática media no vendría a ser un buen valor parametrizador cuando las ondas generadas se están sobreponiendo a ondas mecánicas sinusoidales de alto valor energético. Se comporta bien en especial cuando no existen otros factores, afectando la superficie del agua. En este caso es la superposición de ondas mecánicamente generadas; en otro caso son los surfactantes en la superficie del agua para bajas velocidades. En las Figuras Figura 5.10 y Figura 5.11 está graficada la pendiente cuadrática media en relación a la razón η/λ_p , si bien la relación no se ajusta a la teoría, es posible ver una relación para los distintos casos experimentales. Esto sustenta la idea de que s^2 ya se encuentre representado en la elevación cuadrática media para estas condiciones experimentales.

Coincidiendo en la conclusión de Richter y Jähne(2011) o de Hara *et al.* (1995), ni la pendiente cuadrática media ni la velocidad de corte parametrizan correctamente, por sí solos, la tasa de transferencia de los gases. Aunque la debilidad en ambas investigaciones es el no adimensionalizar la tasa de transferencia de oxígeno de ninguna forma, sin integrar así por ejemplo, el tamaño de los estanques utilizados. De hecho Hara *et al.* (1995) experimentan en dos estanques observando que la pendiente cuadrática media puede caracterizar la transferencia, pero en relaciones separadas, lo que lleva a pensar que faltaron variables por considerar. Otro ejemplo de esto es el trabajo de McKenna & McGillis (2004); ellos, inspirados por la literatura, presentan la tasa de transferencia en función de la pendiente y la divergencia de la superficie, pero finalmente la dejan fuera de las expresiones finales, donde el fenómeno es caracterizado escalando el campo de velocidad de la superficie libre en el plano $x - y$.

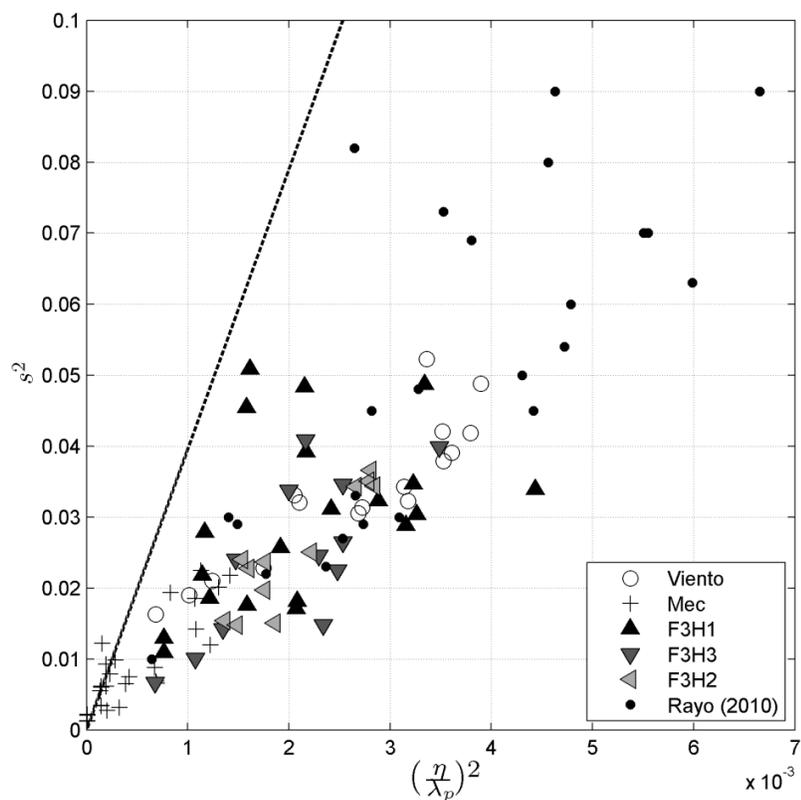


Figura 5.10. Pendiente cuadrática media experimental en función de la razón $\frac{\eta}{\lambda_p}$ para las ondas de mayor frecuencia mecánica asociada. La línea punteada es la relación teórica entre dichas variables.

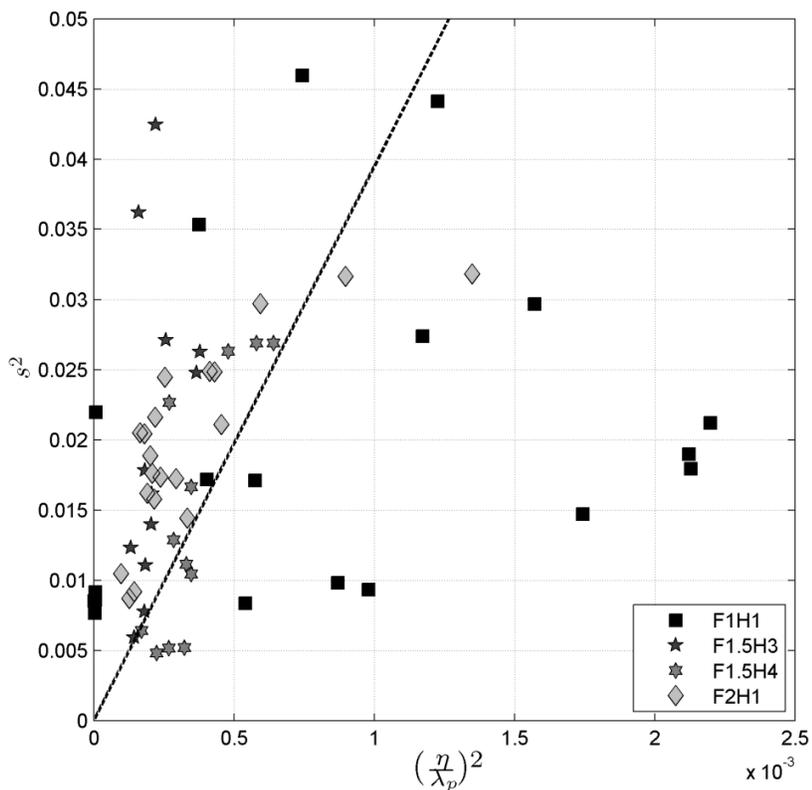


Figura 5.11. Pendiente cuadrática media experimental en función de la razón $\frac{\eta}{\lambda_p}$ para las ondas de menor frecuencia mecánica asociada. La línea punteada es la relación teórica entre dichas variables.

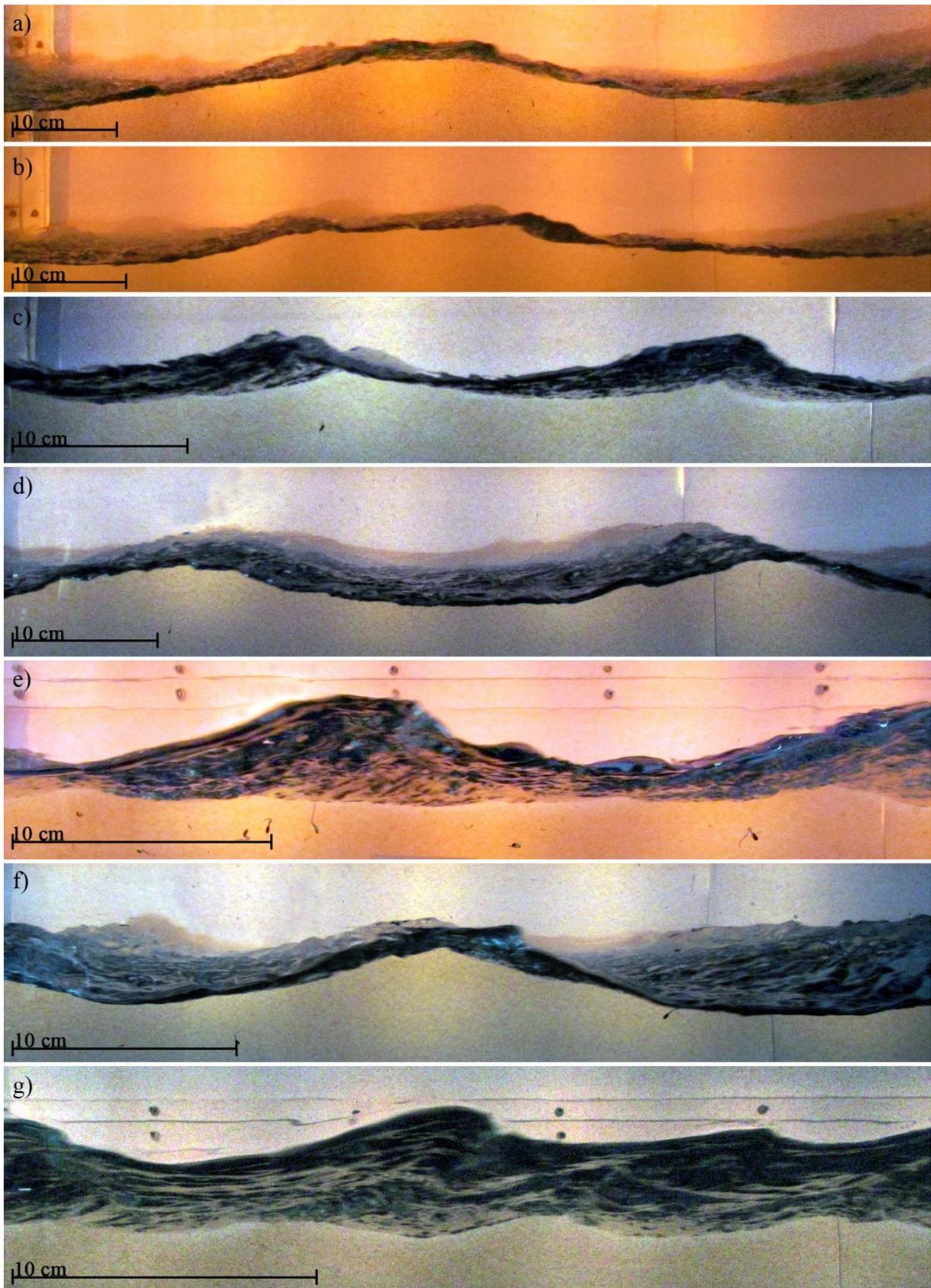


Figura 5.12. Imágenes de las ondas generadas con el viento máximo para las condiciones de onda mecánica: (a) F6H4, (b) F6H3, (c) F5H1, (d) F4H1, (e) F3H2, (f) F3H1, (g) F0H0.

5.2. VELOCIDAD SUPERFICIAL

La razón u_s/u_* considerada como constante por el estudio de Wu(1975) se presenta en función de: algún adimensional como el número de Reynolds del viento (xu_*/ν_a) (Figura 5.13); la velocidad de corte (Figura 5.14) como lo presentan la mayor parte de los estudios; y la relación dimensional $u_s v/s u_*$ (Figura 5.15). Queda expuesto, así, que para estas experiencias la razón no se mantiene constante; de hecho, abarca un rango más similar a lo expuesto por Bye (1988) –que comenta que en la práctica se observa $u_s \sim (0.38 - 0.759)u_*$ –, de modo que es posible aventurarse a decir que la razón no es constante siempre.

Los rangos de trabajo de distintas experiencias se resumen en la Tabla 5.1. Nótese que en la Figura 5.14 los valores de Nezu y Nakayama (1999) son del orden de los valores a 1.6 m del inicio del estanque de este estudio que, junto a los valores de 2.4 m, podría decirse están exentos de problemas de borde (inicio del movimiento y playa que amortigua los movimientos). Las experiencias de Caulliez(2007) se dan en la zona laminar del agua y, junto a las de Siddiqui(2007), están en otro rango de velocidades, lo que podría aportar mayor rango a la razón u_s/u_* ; sin embargo, varía entre 0.4 y 1.6 aproximadamente.

Tabla 5.1. Rango de trabajo de experimentos donde se ha medido la velocidad superficial del agua.

	$x [m]$	$u_* [m/s]$
Wu (1975)	9.8	0.15 – 1
Thais (1996)	26	0.2 – 0.6
Nezu y Nakayama (1999)	9	0.15 – 0.9
Zhang (2004)	~15 – 19	0.25–0.7
Caulliez (2007)	0.1 – 1.1	0.09 – 0.2
Siddiqui (2007)	5.5	0.09 – 0.2
Rayo (2010)	0.6 – 1.8	0.2 – 1
Esta tesis	0.8 – 3.2	0.13 – 0.85

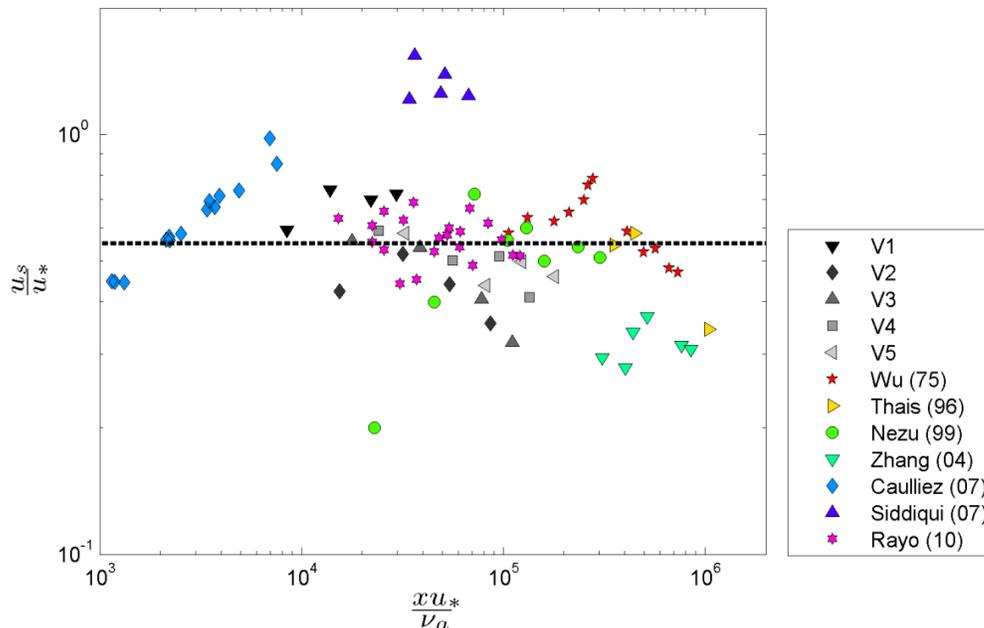


Figura 5.13. Variación de la razón u_s/u_* a lo largo del número de Reynolds de la posición en el estanque. La línea punteada es la razón de 0.55 propuesta por Wu (1975).

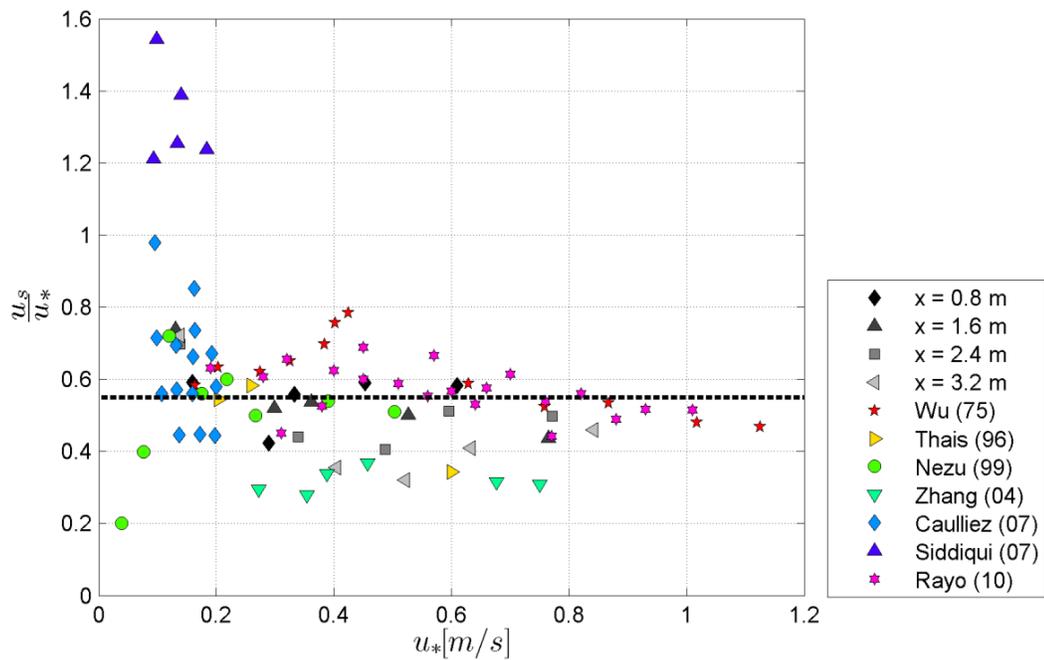


Figura 5.14. Variación de la razón u_s/u_* en función de la velocidad de corte. La línea punteada es la razón de 0.55 propuesta por Wu (1975).

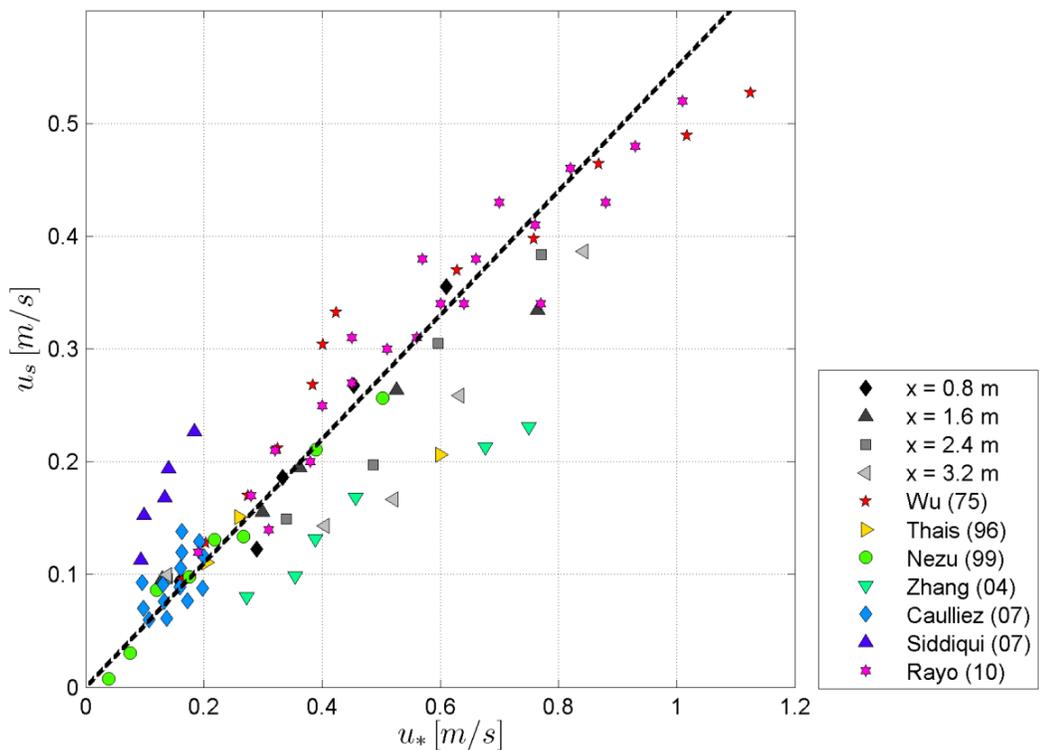


Figura 5.15. Velocidad superficial u_s en función de la velocidad de corte u_* . La tendencia que se presenta es la propuesta por Wu, $u_s = 0.55u_*$. Con todos estos datos la tendencia sería $u_s = 0.46u_*(\pm 0.027)$; y si fuese potencial sería $u_s = 0.41u_*^{0.72}$.

Es notable el hecho de que los estudios más recientes, por lo tanto con aplicación de mejor tecnología, son los más dispares. Zhang y Harrison (2004), de los valores más bajos, determina la velocidad superficial utilizando técnicas de imágenes infrarrojas siguiendo parcelas de fluidos de distintas temperaturas (bajo el

supuesto de que en pequeños pasos de tiempo la temperatura no cambia mucho); además, las grabaciones se efectuaron moviendo la cámara a una velocidad similar a la celeridad de la onda para que la velocidad superficial fuese más notoria. Esta técnica puede subestimar un poco la velocidad superficial para velocidades altas en que el quiebre dificulta las identificaciones de movimiento. Sin embargo, no es una técnica invasiva, como en cambio sí lo es adicionar trazadores a la superficie.

Las distintas variables que pueden estar afectando esta razón pueden ser: u_* , c_p , η , ω_p , v_a , x . La variable adimensional que modulará esta razón debe tener un valor fijo, esperándose que sea 0.55, y comenzar desde cero. Se ajusta entonces una tendencia del tipo:

$$\frac{u_s}{u_*} = a(1 - e^{-bX}) \quad (5.13)$$

Donde a y b son constantes por ajustar y X la variable adimensional que modula la razón.

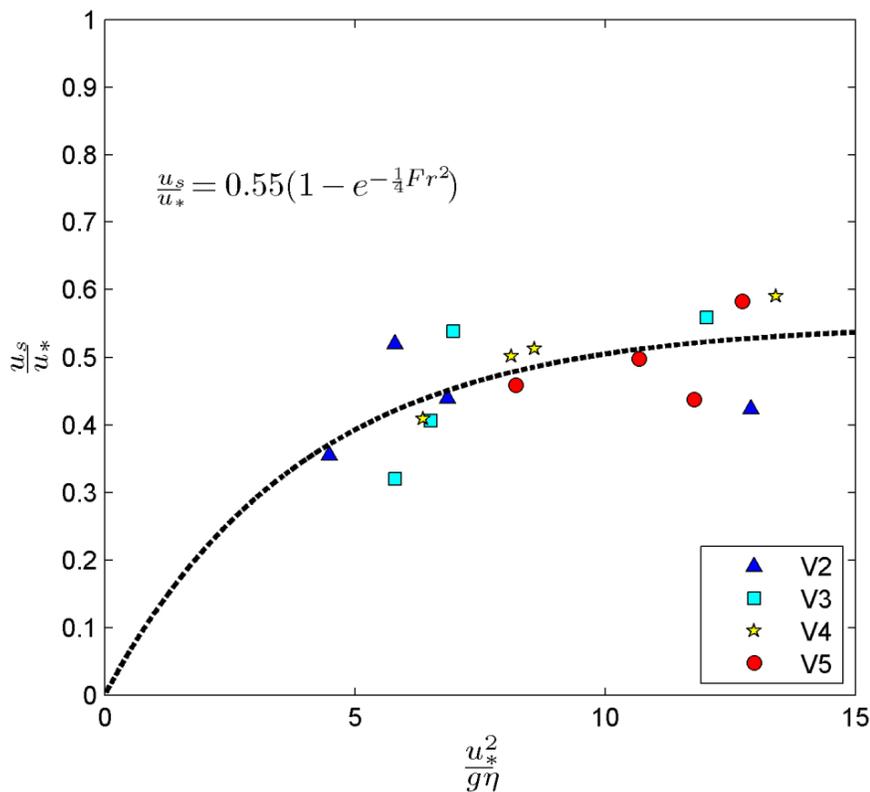


Figura 5.16. Variación de la razón $\frac{u_s}{u_*}$ ajustada con $X = Fr^2 = \frac{u_*^2}{g\eta}$.

5.3. INDEPENDENCIA DEL *FETCH*

Se mencionó hacia el inicio de este documento que la incorporación de ondas mecánicas al problema de transferencia de oxígeno incrementado por el viento, ayuda a independizarse del pequeño tamaño del estanque, que no permite ondas muy grandes debido exclusivamente al viento, como que éstas tampoco estén bien desarrolladas. Entonces lo que se requiere comprobar es si las características son uniformes (es decir, que no varíen en el eje longitudinal).

En la Figura 5.17 se compara la elevación adimensionalizada $\eta^+ = \frac{\eta_{rms}}{\eta_{rms,0}}$ con la posición longitudinal para tres casos. Cuando la frecuencia mecánica y la altura impuesta son altas, η^+ se encuentra estabilizado en un rango, siendo posible considerarlo constante cuando se lo compara con el caso en que sólo existe viento como forzante del cuerpo de agua. Por otro lado, para la menor frecuencia y menor altura impuesta η^+ se mantiene en torno a una constante para las dos velocidades menores.

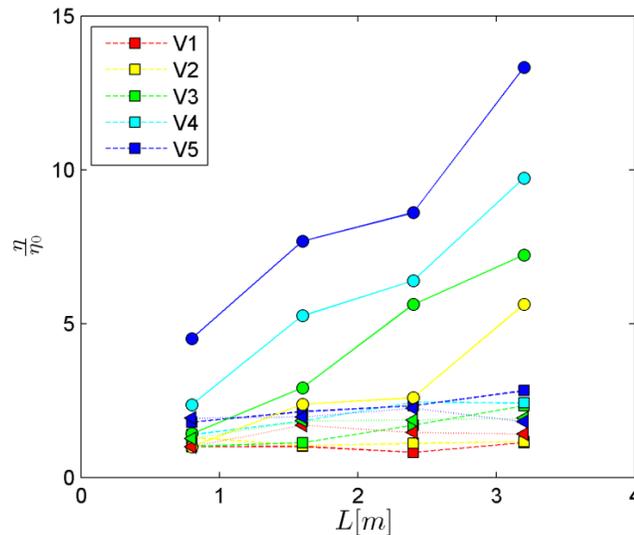


Figura 5.17. Variación de la elevación a lo largo del estanque para los casos de sólo viento (○), viento combinado con ondas mecánicas de: las experiencias F5H1 (□) y F3H2 (△). Los colores en la leyenda indican la magnitud del viento del túnel.

Un tercer adimensional para la inclusión de la celeridad c_p , característicamente decreciente en el *fetch*, es un número de Reynolds de la superficie definido como $Re = \frac{c_p \eta}{\nu \omega}$. Similar a la Figura 5.17 es la Figura 5.18, que muestra el número de Reynolds para dos casos de ondas mecánicamente generadas.

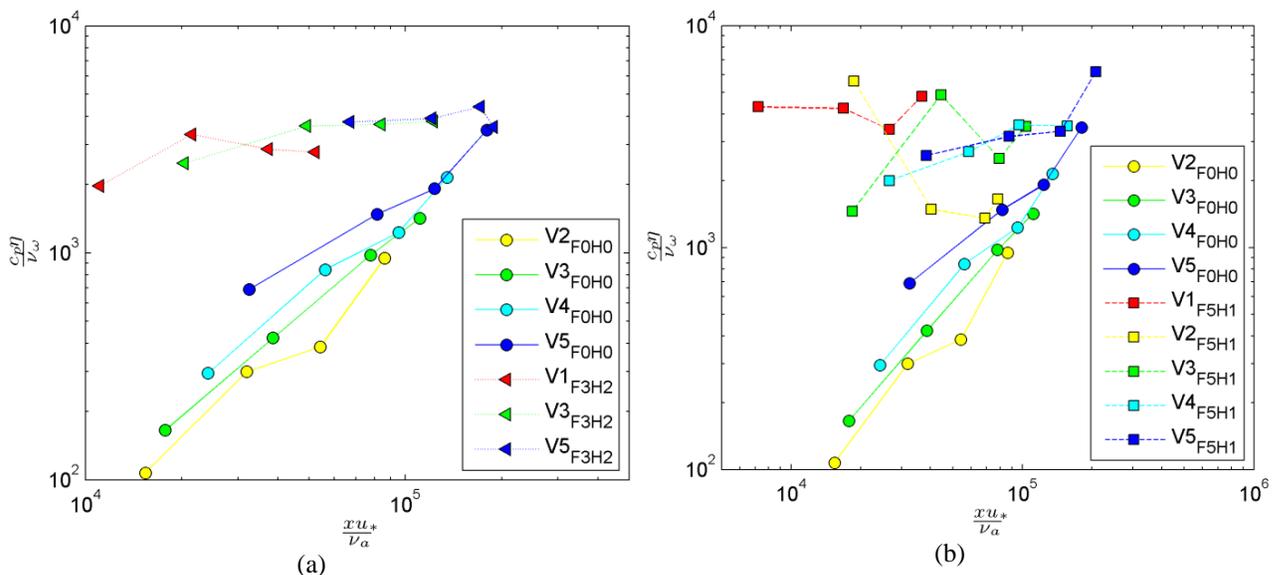


Figura 5.18. Variación del número de Reynolds superficial a lo largo del número de Reynolds del aire de la posición del estanque para la condición de sólo viento (F0H0) y: (a) la condición experimental F3H2; (b) la condición experimental F5H1.

Para posicionar su trabajo de *fetch* limitado, Rayo (2010) compara sus datos por medio de los parámetros adimensionales propuestos por Sverdrup y Munk (1947) y Kitaigorodskii (1970) que son: $\epsilon = \frac{\eta^2 g^2}{u_r^4}$, la energía adimensional; $\nu = \frac{f_p u_r}{g}$ la frecuencia adimensional; y $\chi = \frac{gx}{u_r^2}$, el *fetch* adimensional. u_r es una velocidad referencial, usualmente u_{10} , que, para comparar, se extrapolará a partir de u_* , u_s y z_0 de las experiencias y el perfil logarítmico.

En las Figura 5.19 y Figura 5.20 se muestran relaciones con respecto al *fetch* adimensional. En las respectivas leyendas de las figuras se indican los ajustes de otras investigaciones, donde los largos de cada tendencia son acordes a sus escalas longitudinales trabajadas (desde laboratorios a trabajos de campo) y el color asociado, a las magnitudes de viento. Los símbolos de las figuras hacen referencia a la condición experimental base de las ondas mecánicas. Estos símbolos se indican en la Tabla 5.2, donde además se indican valores numéricos característicos para las ondas mecánicas que tienen un caso base. $\frac{\omega_p H_s}{2}$ hace referencia al movimiento orbital de las ondas (ecuación (2.3)), mientras que $\frac{f_p^2 H_s}{g}$ es un número de Froude.

Tabla 5.2. Simbología figuras 5.18 – 5.20.

Símbolo	Condición experimental	$\frac{\omega_p H_s}{2}$	$\frac{f_p^2 H_s}{g} \times 100$
Círculo ○	F0H0	–	–
Cuadrado □	F1H1	3.637	0.12
Estrella 5 puntas ☆	F1.5H3	11.96	0.58
Estrella 6 puntas ☆	F1.5H4	13.33	0.65
Diamante ◇	F2H1	10.00	0.65
Triángulo hacia arriba △	F3H1	10.98	1.07
Triángulo hacia la izquierda ◁	F3H2	15.03	1.46
Triángulo hacia abajo ▽	F3H3	16.22	1.58

En la Figura 5.19 se presenta la energía en función del *fetch*. Es notable que la tendencia más antigua sea la que pasa correctamente por los datos de viento de la tesis. Hasselmann *et al.* (1973) utiliza para sus ajustes las experiencias de laboratorio de otros autores para extender en las décadas el ajuste. De hecho, sus datos de terreno, obtenidos en el mar norte en el límite entre Alemania y Dinamarca, podrían ajustarse a una tendencia más parecida a los otros estudios expuestos en la figura, puesto que en el rango superior de χ todas las curvas están en el mismo sector. El estudio del Centro de Investigación en Ingeniería Costera de la Armada de Estados Unidos, CERC,(1977) trabaja exclusivamente con datos de terreno, al igual que Dobson *et al.* (1989). El trabajo de Donelan *et al.* (1985) es el único que incorpora algunos datos de laboratorio con distancias de hasta 50 metros.

La investigación de Hasselmann *et al.*(1973) también incluye la velocidad de corte en sus registros. De graficarse estos adimensionales con $u_r = u_*$ también resulta que la tendencia de Hasselmann *et al.* cruza los datos de viento sólo de esta tesis junto con los datos de Rayo (2010). Con esto quedaría claro que la estimación realizada para estos datos para obtener la velocidad equivalente a los 10 metros de altura está en el orden de magnitud correcto y no es esta la razón por la cual las otras tendencias no cruzan los datos, a pesar de tener tendencias similares.

Lo que podría estar sucediendo es que el crecimiento del oleaje no se ajuste a expresiones del tipo $\epsilon \sim a\chi^b$, pues al menos no es consistente en la lejanía. Eventualmente se debe tener un sistema uniforme, es decir, $\chi \rightarrow \infty \Rightarrow \epsilon \rightarrow cte$. Es aceptable entonces para *fetchs* más cortos que el crecimiento sea más notable y a medida que crece χ vaya aminorando el aumento de energía. Se puede observar esto de forma análoga en la Figura 5.20, donde la frecuencia adimensional decrece en el *fetch*, y podría considerarse un decaimiento mayor al comienzo para luego estabilizarse en la lejanía.

Por otro lado, las ondas mecánicas y su simulación de *fetch* mayor están dando resultado. Ello se puede notar al considerarlo de esta manera: en la Figura 5.19, por ejemplo, dado un forzante de viento, para que las ondas mecánicas de bajo viento (símbolos rojos) tengan tanta energía siendo formadas sólo por viento –dado u_{10} fijo, se puede traducir en “tanta altura”– tendría que darse en una posición longitudinal unas 100 veces mayor a la que se hizo en realidad (puesto que, con u_{10} fijo, x es lo único variable en χ). Entonces, para las condiciones mecánicas dadas, la medición bajo el soplo de un viento suave se estaría realizando virtualmente en los 200 metros y no en los 2 metros del estanque, aproximadamente.

De forma análoga, para los vientos fuertes podemos notar, esta vez en la Figura 5.20, que para un viento forzante fijo, v será más pequeño –O sea, f_p disminuirá– para una posición unas siete veces más lejos de lo que realmente se midió. Es decir, medir un viento fuerte sobre ondas mecánicas estaría simulando un *fetch* de unos 15 metros.

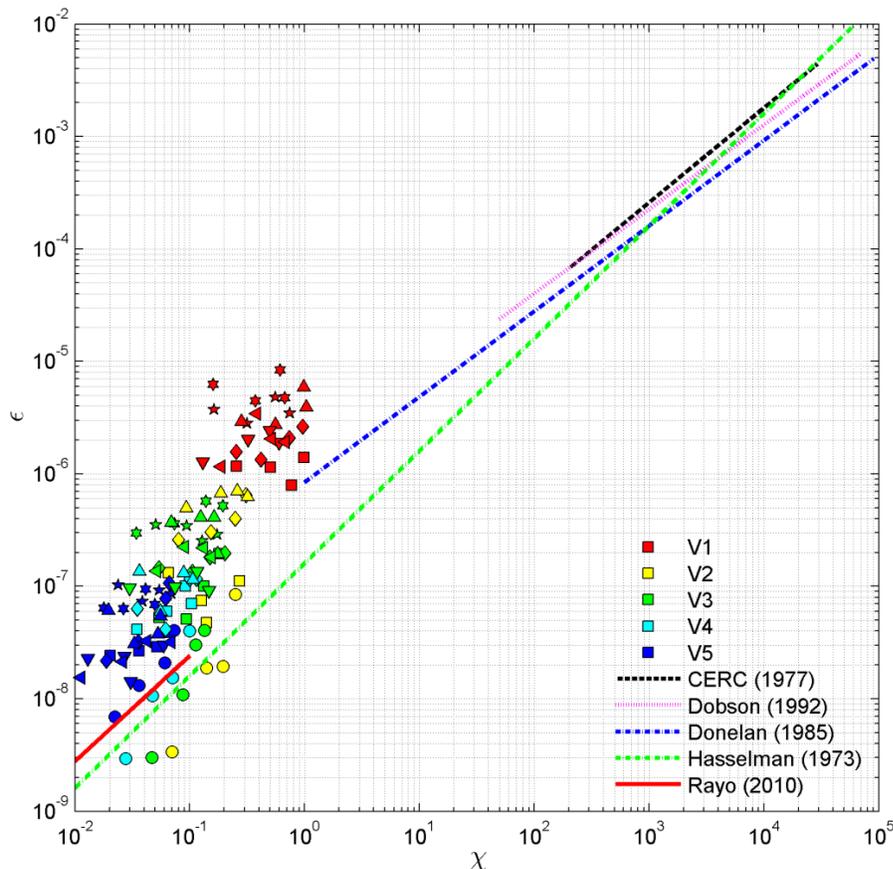


Figura 5.19. Energía adimensional en función del *fetch* adimensional. Las tendencias de los estudios son: CERC tiene un ajuste de $\epsilon = 7.82 \times 10^{-7} \chi^{0.84}$; Dobson, $\epsilon = 12.7 \times 10^{-7} \chi^{0.75}$; Donelan, $\epsilon = 8.42 \times 10^{-7} \chi^{0.76}$; Hasselman, $\epsilon = 1.6 \times 10^{-7} \chi$; y Rayo, $\epsilon = 2.1 \times 10^{-7} \chi^{0.94}$. Ajustando sólo los datos de viento de esta tesis, la tendencia sería similar a la de Hasselman al tener el mismo exponente para χ : $\epsilon = 2.48 \times 10^{-7} \chi$.

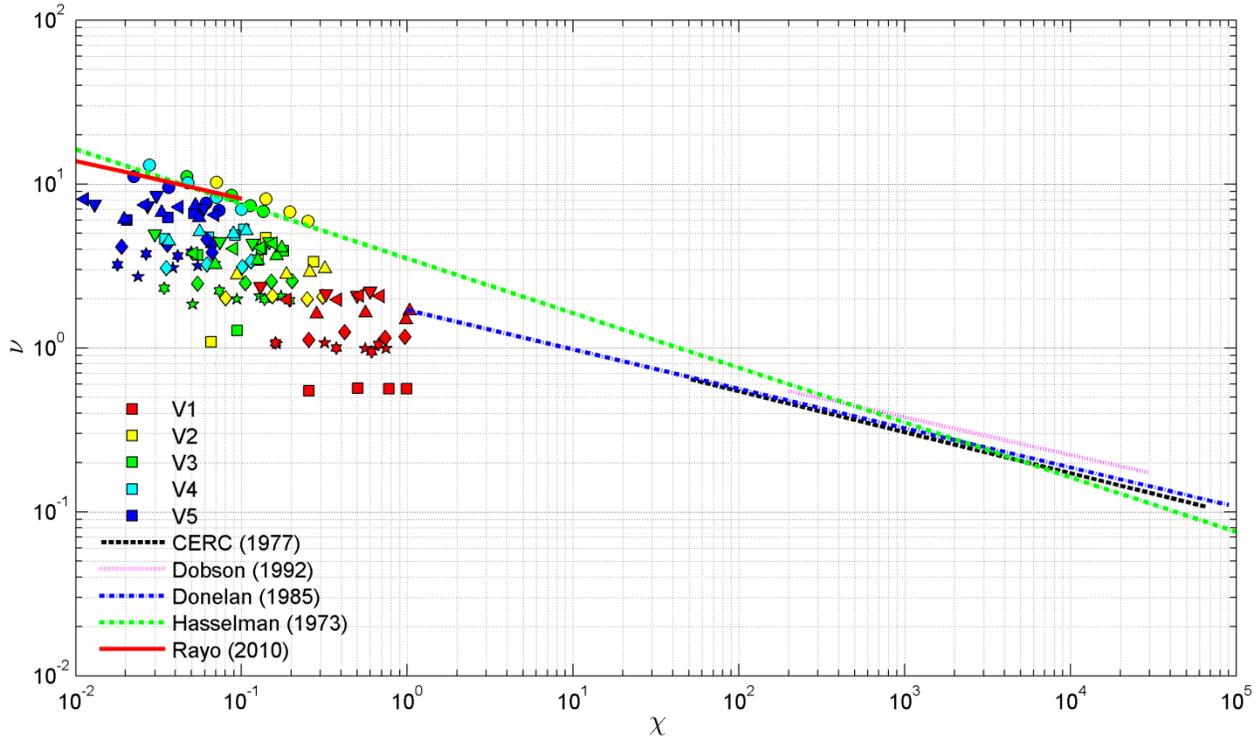


Figura 5.20. Frecuencia adimensional en función del fetch adimensional. Las expresiones de las tendencias son: CERC, $\nu = 1.72\chi^{-0.25}$; Dobson, $\nu = 1.7\chi^{-0.24}$; Donelan, $\nu = 1.85\chi^{-0.23}$; Hasselman, $\nu = 3.5\chi^{-1/3}$; y Rayo, $\nu = 4.8\chi^{-0.23}$. Aquí la tendencia de los datos de viento de este estudio daría $\nu = 4.02\chi^{-0.29}$, también similar al ajuste de Hasselman.

Para ajustar el *fetch* simulado o equivalente se acomodan los puntos a las tendencias de Hasselman *et al.* (1973) para la frecuencia adimensional, que muestra un mejor ajuste de los datos netamente de viento. Se incorporan entonces las definiciones de cada variable, con lo que se deduce el *fetch*,

$$\frac{f_p u_{10}}{g} = 3.5 \left(\frac{gx}{u_{10}^2} \right)^{-1/3} \Rightarrow x_{sim} = \frac{3.5^3 g^2}{f_p^3 u_{10}} \quad (5.14)$$

En la Tabla 5.2 se indicaron dos parámetros, uno adimensional y otro con dimensiones para caracterizar las ondas mecánicamente generadas. Teniendo esto en cuenta, se ajusta el *fetch* simulado adimensional, $\frac{x_{sim}}{\eta}$, en función del adimensional como se expone en la Figura 5.21. Así, el *fetch* simulado se puede calcular del siguiente modo:

$$\frac{fetch}{\eta} = 0.2898 \left(\frac{f_p^2 \eta}{g} \right)^{-1.681} \quad (5.15)$$

Volviendo a reproducir la Figura 5.19 y la Figura 5.20, pero con el *fetch* simulado, se obtienen la Figura 5.22 y la Figura 5.23. La frecuencia adimensional se ajusta de buena forma, lo cual tiene sentido al ser la frecuencia una variable controlada con buena precisión. La energía adimensional queda con gran dispersión principalmente porque existe un factor importante, la velocidad del viento, que entrega información acerca de la energía cinética y que no viene incluida en los parámetros de las ondas mecánicas.

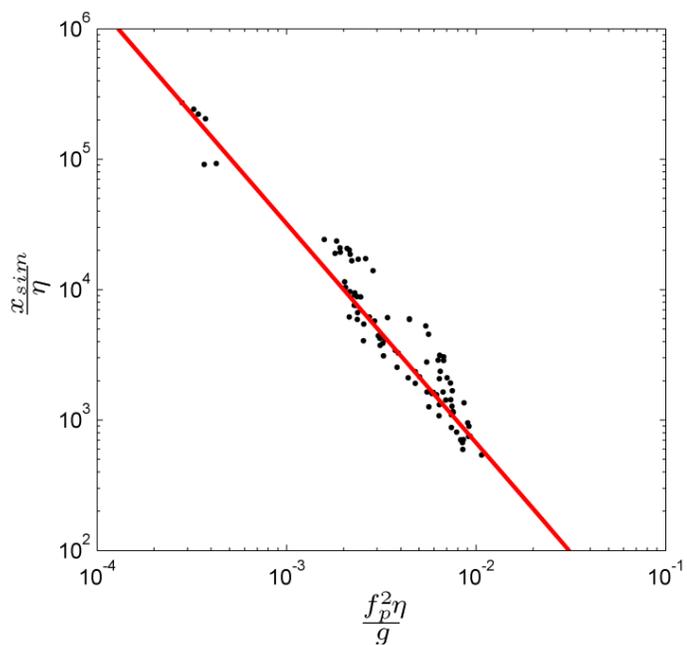


Figura 5.21. *Fetch* simulado adimensional en función de los parámetros de las ondas mecánicas.

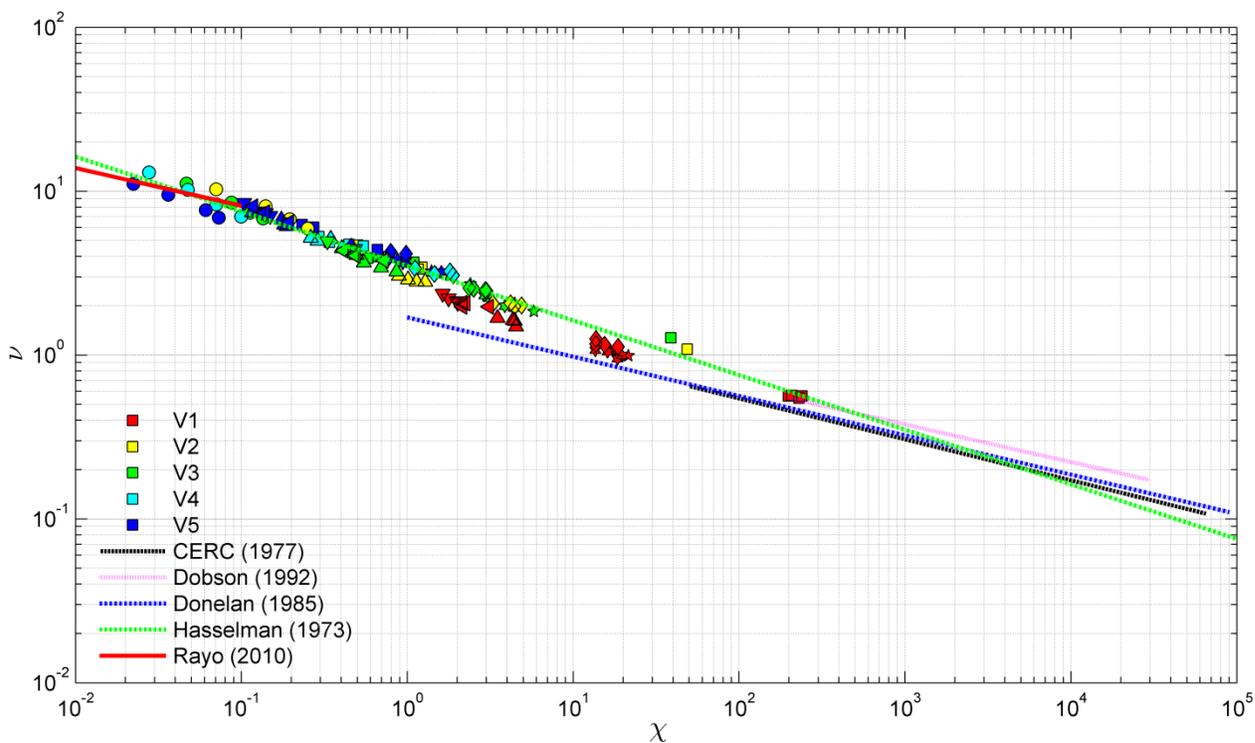


Figura 5.22. Frecuencia adimensional en función del *fetch* adimensional simulado por las ondas mecánicamente generadas.

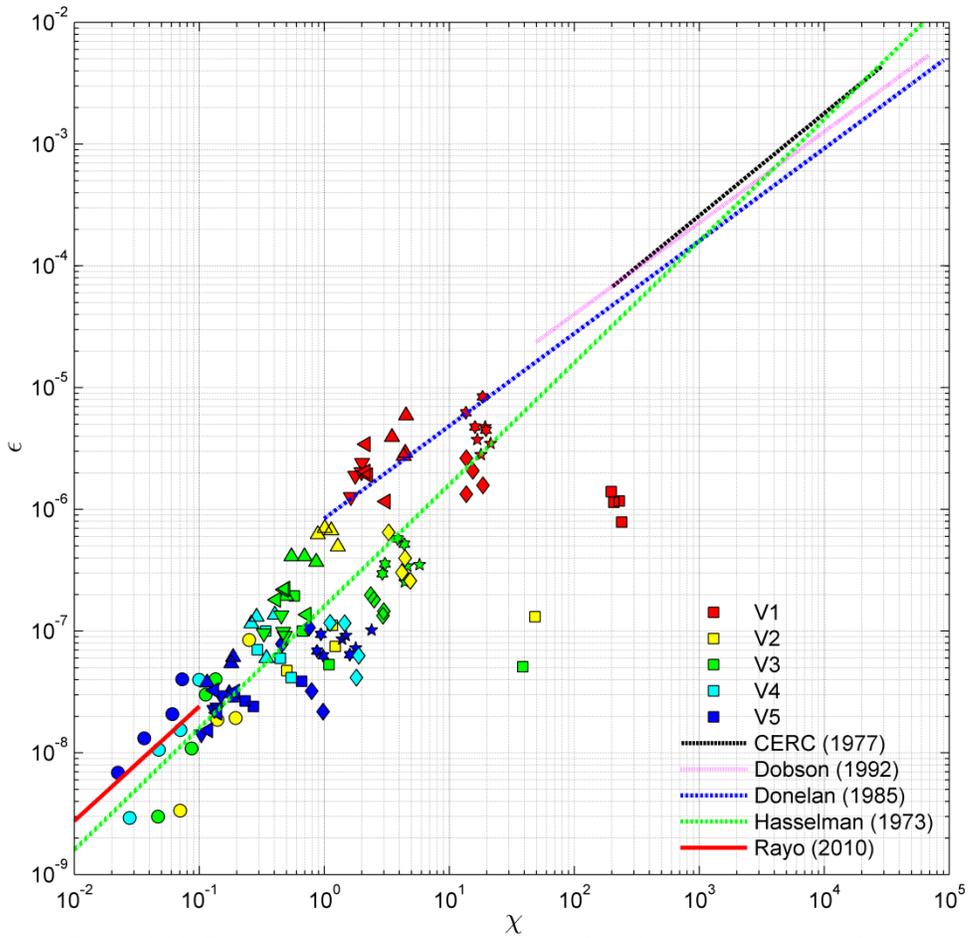


Figura 5.23. Energía adimensional en función del *fetch* adimensional simulado por la generación de ondas mecánicas calculado con la expresión (5.15).

6. Discusión y conclusiones

Se realizó un estudio experimental sobre la influencia de distintas variables que caracterizan la superficie libre o el forzante actuando sobre ésta, en la transferencia de oxígeno desde el aire al cuerpo de agua. Se realizaron experiencias con tres variables independientes: la primera variable es el forzante externo representado por velocidades de corte inducidos por el viento sobre la superficie del agua, que abarcaron un rango de 0.3 a 1 m/s, aproximadamente; las otras dos variables condicionan las ondas mecánicamente generadas, siendo la frecuencia y la altura de la onda.

La superficie libre no sólo fue caracterizada con estas variables independientes, sino que también se realizaron mediciones como la pendiente del oleaje y la velocidad superficial del agua, además de variables derivables como la longitud de onda o la celeridad de la onda.

La primera etapa de la tesis consistió en implementar un generador mecánico de ondas y una playa que evitara el reflejo de éstas y amortiguara el quiebre. Para el generador de ondas se contó con distintas placas rectangulares; los distintos tamaños estaban asociados a la altura de la onda generada, de modo que dependiendo del tamaño de la placa, fuera posible lograr variadas alturas. Esto, sin embargo, no significó una labor rápida ni sencilla. Por otro lado, distintas frecuencias hacen que una misma placa genere distintas alturas, de modo que no se trata de una variable del todo independiente por lo que no se logran predefinir alturas específicas de olas. Para las ondas de menor frecuencia fue necesario utilizar un rectángulo tan largo que invadía el fondo. Como se buscaban ondas de aguas profundas, en las que el fondo no percibiera su existencia, se ubicaron topes en el fondo para que el movimiento fuera angular y no perpendicular a la pared transversal del estanque. En general, tanto las placas como la playa lograron satisfacer las necesidades para las experiencias buscadas. Las limitaciones identificadas fueron descritas en el capítulo referido a metodología e instalación experimental.

Con respecto a las mediciones efectuadas, el estudio de la velocidad superficial en un comienzo no lucía como especial, pero los antecedentes recopilados finalmente revelaron un tópico de interés. Longo *et al.* (2012) manifiesta el amplio rango de Wu (1975) para realizar el ajuste, pero inclusive así no realiza mediciones sino que ocupa la fórmula $u_s = 0.53u_*$ que, como justifica Wu, sería la velocidad sin considerar la velocidad de Stokes proporcional a $\frac{\eta^2\omega^3}{g}$. No obstante, esto significaría que la velocidad de Stokes es proporcional a $0.02u_*$, lo cual no está estudiado en detalle (hay que recordar que Wu midió sólo en un punto del estanque). Su detallado estudio del perfil de velocidad se vería beneficiado si contara con mediciones precisas de u_s . En este estudio se intentó relacionar la razón $\frac{u_s}{u_*}$ con distintos adimensionales que enfrentaran el actuar del viento (u_*) y aquél inducido por el mismo movimiento orbital. En términos generales, existe una relación entre la razón y un número de Froude formado como $\frac{u_*^2}{g\eta}$ tendiendo a los 0.55 de Wu, pero esto no es consistente con los altos valores de la razón de los estudios más recientes (Caulliez, et al., 2007; Siddiqui & Loewen, 2007), porque la relación propuesta no supera los 0.55.

La relación propuesta en esta tesis, $\frac{u_s}{u_*} = 0.55 \left(1 - e^{-\frac{1u_*^2}{4g\eta}} \right)$, se presenta como manifestación de que la razón de velocidades no es constante, pero su lectura nos indica que a mayor altura menor es la razón, si bien, uno esperaría que avance más rápido al ser mayor también la velocidad de Stokes. La razón es

mayor en las menores velocidades no estudiadas en esta instancia, por lo que el aporte de Stokes puede ser más relevante en estos rangos bajos, mientras que la velocidad de corte empieza a primar en velocidades más altas. Debiesen buscarse relaciones tales como la de dispersión, que comprende tanto rangos de importancia de la tensión superficial como de gravedad.

En términos de la transferencia de oxígeno, aunque las experiencias con ondas generadas mecánicamente son muy pocas para llegar a concluir una relación definitiva, pero es posible advertir que hay influencia en la tasa de transferencia de oxígeno. Normalmente, la tasa k_L se adimensionaliza con una velocidad, mas en este caso se consideró un valor proporcional a la celeridad de las ondas, $\lambda_p f_p$. Para el análisis se incorporaron los datos de Daniil y Gulliver (1991) para abarcar un rango más amplio. Debido a la forma trabajada de los parámetros, se mejoró la fórmula propuesta de Daniil y Gulliver, quienes plantean indirectamente un adimensional $\frac{k_L}{fH} Sc^{0.5}$ constante. En este estudio, en cambio, encuentra una relación proporcional a $\sqrt{\frac{H}{\lambda}}$, estrechamente relacionado a la pendiente teórica, lo cual es consistente con las atribuciones a la pendiente cuadrática media de las ondas generadas por el viento en la transferencia del oxígeno (Jähne, et al., 1987; Rayo, 2010).

Otro resultado que llama la atención es el exponente del número de Reynolds generado. Normalmente, el valor del exponente varía entre $-1/2$ y $-1/4$, pero en este caso adquiere un valor nulo a positivo cuando se incorpora el viento en el problema. En efecto, si se adimensionaliza la expresión de Daniil y Gulliver podría quedar como una constante, o la presentada en este estudio para ondas sin viento que tiene una dependencia, pero el exponente de cualquier número de Reynolds es igual a cero. Por otro lado, cuando se quieren integrar todos los tipos de ondas, no existe un viento formal para caracterizar el fenómeno (las ondas mecánicamente generadas no tienen u_* asociado); el número de Reynolds y las relaciones quedan compuestas de distinta forma, siendo aceptable el exponente positivo.

En la instancia de definir variables y exponentes existe una variable a la que se le consideró un exponente constante, el número de Schmidt y su exponente $n = 1/2$, aunque en los antecedentes se encontró que para forzantes bajas tiende a $2/3$. En otros estudios se proponen una transición suave entre $2/3$ y $1/2$ en función de la pendiente cuadrática media u otros números adimensionales (Richter y Jähne (2011); McKenna y McGillis (2004)). El rango de transición de la pendiente en este ajuste es $[5 \times 10^{-3}, 10^{-1}]$, aproximadamente, que contendría las ondas de viento de este estudio y la mayoría de las experiencias con ondas mecánicamente generadas (con y sin viento). Teniendo esto en consideración, las relaciones expuestas en el capítulo 5 podrían verse afectadas al introducir este cambio gradual en el exponente. En particular, cuando las ondas son mecánicamente generadas y sin la existencia de viento, se podría estar dando un comportamiento cercano a una pared rígida no plana, tendiendo a un exponente $2/3$, suele encontrarse también cuando la superficie no es encuentra limpia.

La utilización combinada de viento y ondas generadas mecánicamente en efecto permiten extender en forma artificial el *fetch* un par de órdenes de magnitud. La relación encontrada para saber qué *fetch* se está simulando entrega satisfactorios resultados en los gráficos de adimensionales en función del *fetch*. En particular para la frecuencia adimensional, que es de donde se estimó la tendencia, se obtiene una forma de saber la equivalencia mar o lago adentro, con tan sólo conocer η y f_p que siempre son parámetros que se miden en experiencias de laboratorio, siendo la frecuencia la variable más importante. La energía

adimensional muestra una mayor dispersión, pero aun así sigue la tendencia de Hasselman *et al.*(1973), a pesar de haber deducido el *fetch* equivalente con la frecuencia. Con esto se logra con creces uno de los objetivos principales de la implementación de ondas generadas mecánicamente en un estanque pequeño: extender artificialmente la distancia recorrida por el viento en la perturbación de la superficie libre del cuerpo de agua. También se buscaba uniformidad en la superficie libre en el estanque con las ondas generadas de forma mecánica. Esto se logró parcialmente; si bien existieron cambios de altura más que de frecuencia a lo largo del estanque, estos fueron siempre bajo el 35% (máximo alcanzado en los vientos más fuerte para las ondas de baja altura), al contrario de las características constatadas cuando sólo actuaba el viento que superaban variaciones del 200%.

Considerando entonces lo efectivo de la combinación de los efectos, es necesario recapitular la sección de la transferencia de oxígeno. En la Figura 5.5, dado que las ondas mecánicas están simulando ondas de viento que han recorrido hasta unos 400 metros, las ondas de pequeño *fetch*, es decir solo viento, muestran una buena tendencia, puesto que la influencia de las características de la superficie libre es despreciable, mientras que para ondas más viejas la influencia de dichas características pasa a cobrar importancia, con lo cual el viento no es un buen parámetro medidor de manera exclusiva. Además, el aporte de las ondas mecánicas por sí solas es tan pequeño pero su impacto en las demás variables provoca un gran cambio en la transferencia. Así, el aporte de ambos efectos deben ser combinados y no superpuestos linealmente, es decir, $k_L = \Phi(\text{Viento}, \text{Onda})$ con $\Phi \neq \phi(\text{Viento}) + \psi(\text{Onda})$.

Se puede hacer un análisis análogo en la Figura 5.9 con la pendiente cuadrática media que vendría a caracterizar muy bien la turbulencia en la superficie libre a causa del viento, pero no las características globales de la interfaz; como bien se vio en las ondas sin viento, la pendiente teórica es la relevante. Por otro lado, en ciertos estudios se saca el promedio de la pendiente cuadrática, como el caso actual, y en otros se hace una separación de la pendiente en función de la longitud de onda asociada, siendo las de menor longitud de ondas las que tienen una relación más estrecha con la transferencia (Bock(1999); Frew *et al.*(2004)). Además de esto, puede ser interesante caracterizar las pendientes de estas pequeñas ondas, pero cuando se encuentran en el frente de la onda, que es el lugar donde se pensaría que se genera el primer quiebre de la subcapa difusiva.

En definitiva, la transferencia de oxígeno a un cuerpo de agua, en función de la superficie libre perturbada, no es cuantificable por una única variable. Con todas las variables consideradas, la mejor relación obtenida en esta tesis es:

$$\frac{k_{20}}{c_p} Sc^{1/2} = 8.34 \times 10^{-4} \left(\frac{\eta u_s}{v_\omega} \right)^{1/2} \left(\frac{\eta}{\lambda_p} \right)^{3/5} \quad (6.1)$$

Esto nos indica que, en primer lugar, la pendiente medida no es un buen parámetro, mientras que la relación entre la elevación y la longitud de onda, proporcional a la pendiente teórica del movimiento orbital, sí lo es. Esto podría modificarse en caso de realizarse un trabajo de mayor precisión al medir la pendiente y considerando únicamente las pendientes de las ondas menores pues la mayor parte del valor de s^2 parece estar ligada a la pendiente media como se revisó en las Figuras Figura 5.10 y Figura 5.11. En segundo lugar, la elevación cuadrática media y la velocidad superficial del agua representan las escalas de turbulencia de importancia en la superficie libre de buena forma. Así, caracterizar bien la superficie libre puede entregar mejores resultados en la tasa de transferencia de oxígeno que utilizar relaciones donde la

única variable independiente sea una velocidad característica del viento. La celeridad de las ondas como escala de velocidad que adimensionaliza la tasa de transferencia del oxígeno, es la que mejor se comporta al poder congregarse ondas con distintas magnitudes de viento forzante, elevación y frecuencias.

En esta línea es importante recalcar que, ante la necesidad de cuantificar los flujos de variados gases en grandes extensiones espaciales, es de gran relevancia conocer las limitaciones de ecuaciones que sólo consideran la velocidad como parámetro predictor. Incursionar en balances a lo largo de la costa chilena, por ejemplo, implica cuerpos de agua de distintas características: volumétricas, geográficas, propiedades físicas del agua (las distintas temperaturas y salinidades afectan la viscosidad), etc. Una mejoría en la medición de estos balances se puede lograr realizando campañas de medición tanto de las características de la superficie libre como del forzante de viento en el cuerpo de agua, para luego relacionar los parámetros de importancia $\left(\frac{\eta u_s}{v_\omega}, \frac{\eta}{\lambda_p}\right)$ con la velocidad de corte del viento y/o la velocidad a alguna altura, para luego extender las mediciones con una estación meteorológica representativa que se pueda ligar a las características ya asociadas. Estos balances cuentan con intervalos de confianza demasiado grandes, por lo que impera una mejora en los métodos de cuantificación. Estos esfuerzos en general sobredemandan recursos limitados, pero son en pos de la mejora de la precisión de los balances buscados.

Bibliografía

- Bock, E., Hara, T. & Frew, N., 1999. Relationship between air-sea gas transfer and short wind waves. *Journal of Geophysical Research*, 104(C11), pp. 821-831.
- Bye, J. A. T., 1988. The coupling of wave drift and wind velocity profiles. *Journal of Marine Research*, Volumen 46, pp. 457-472.
- Cauliez, G., Dupont, R. & Shrira, V. I., 2007. Turbulence generation in the wind-driven subsurface water flow. En: C. S. Garbe, R. A. Handler & B. Jähne, edits. *Transport at the Air Sea Interface*. Garbe, Christoph S.; Handler, Robert A.; Jähne, Bernd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 103-117.
- Cauliez, G., Makin, V. & Kudryavtsev, V., 2008. Drag of the water surface at very short fetches: Observations and modeling. *Journal of Physical Oceanography*, Volumen 38, pp. 2038-2055.
- Charnock, H., 1955. Wind stress on a water surface. *Quart. Journal of Royal Meteorology Society*, Volumen 81, pp. 639-640.
- Coantic, M., 1986. A model of gas transfer across air-water interfaces with capillary waves. *Journal of Geophysical Research*, 91(C3), pp. 3925-3943.
- Crusius, J. & Wanninkhof, R., 2003. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Journal of Limnology and Oceanography*, 48(3), pp. 1010-1017.
- Danckwerts, 1951. Significance of liquid film coefficients in gas adsorption. *Ind. Engrg. Chem.*, 46(6), pp. 1460-1467.
- Daniil, E. & Gulliver, J., 1991. Influence of waves on air-water gas transfer. *Journal of Environmental Engineering*, 117(5), pp. 522-540.
- Deacon, E., 1977. Gas transfer to and across an air-water interface. *Tellus*, Volumen 29, pp. 363-374.
- Dean, R. G. & Dalrymple, R. A., 2000. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Octava edición ed. Singapur: World Scientific.
- Dobson, F., Perrie, W. & Toulany, B., 1989. On the deep-water fetch laws for wind-generated surface gravity waves. *Atmosphere-Ocean*, 27(1), pp. 210-236.
- Donelan, M., Hamilton, J. & Hui, W., 1985. Directional spectra of wind-generated waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 315(A), pp. 509-562.
- EIFAC, 1986. *Report of the working group on terminology, format and units of measurement as related to flow-through and recirculation system*, s.l.: s.n.
- Frew, Nelson M.; Bock, Erik J.; Schimpf, Uwe; Hara, Tetsu; Haubecker, Horst; Edson, James B.; McGillis, Wade R.; Nelson, Robert K.; McKenna, Sean P.; Uz, B. Mete; Jähne, B., 2004. Air-sea gas transfer: its dependence on wind stress, small-scale roughness, and surface films. *Journal of Geophysical Research*, 109(C08S17).

- Hara, T., Bock, E. J., Frew, N. M. & McGillis, W. R., 1995. Relationship between air-sea gas transfer velocity and surface roughness. En: B. Jähne & E. Monahan, edits. *Air-Water Gas Transfer*. s.l.:AEON Verlag, pp. 611-616.
- Hasselmann, K.; Barnett, T. P.; Bouws, E.; Carlson, H.; Cartwright, D. E.; Enke, K.; Ewing, J. A.; Gienapp, H.; Hasselmann, D. E.; Kruseman, P.; Meerburg, A.; Müller, P.; Olbers, D. J.; Richter, K.; Sell, W.; Walden, H., 1973. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Hamburgo, Alemania: Deutsches Hydrographisches Institut.
- Jähne, B; Wais, T.; Memery, L.; Caulliez, G.; Merlivat, L.; Münnich, K. O.; Coantic, M., 1985. He and Rn gas exchange experiments in the large wind-wave facility of Imst. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6), pp. 11989-11997.
- Jähne, B. y otros, 1987. On the parameters influencing air-water gas exchange. *Journal of Geophysical Research*, Volumen 92, pp. 1937-1949.
- Kitaigorodskii, S. A., 1970. *The physics of air-sea interaction*, s.l.: P. Greenberg.
- Komori, S., Nagaosa, R. & Murakami, Y., 1993. Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, Volumen 249, pp. 161-183.
- Longo, S., 2012. Wind-generated water waves in a wind tunnel: Free surface statistics, wind friction and mean air flow properties. *Coastal Engineering*, Volumen 61, pp. 27-41.
- Longo, S., Liang, D., Chiapponi, L. & Aguilera Jiménez, L., 2012. Turbulent flow structure in experimental laboratory wind-generated gravity waves. *Coastal Engineering*, Volumen 64, pp. 1-15.
- McGillis, Wade R.; Dacey, John W. H.; Ware, Jonathan D.; Ho, David T.; Bent, Jonathan T.; Asher, William E.; Zappa, Christopher J.; Raymond, Peter A.; Wanninkhof, Rik; Komori, Satoru, 2007. Air-water flux reconciliation between the atmospheric CO₂ profile and mass balance techniques. En: C. S. Garbe, R. A. Handler & B. Jähne, edits. *Transport at the Air-Sea Interface*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 181-192.
- McKenna, S. & McGillis, W., 2004. The role of free-surface turbulence and surfactants in air-water gas transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volumen 47, pp. 539-553.
- Nezu, I. & Nakayama, T., 1999. *Fundamental Study at Air-Water Interface with Wind Shear*. Graz, Austria, XXVIII IAHR Congress.
- Peirson, W., Walker, J., Welch, C. & Banner, M., 2007. Defining the enhancement of air-water interfacial oxygen exchange rate due to wind-forced microscale waves. En: C. S. Garbe, R. A. Handler & B. Jähne, edits. *Transport at the Air Sea Interface*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 119-131.
- Peirson, W. L. & Banner, M. L., 2003. Aqueous surface layer flows induced by microscale breaking wind waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Volumen 479, pp. 1-38.
- Rayo, L., 2010. *Efecto de las ondas superficiales generadas por viento en la transferencia de oxígeno de un cuerpo de agua*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

- Rayo, S., 2009. *Estudio experimental del efecto del viento en la tasa de reaeración en un estanque agitado*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Read, S., Jordan; Hamilton, David P.; Desai, Ankur R.; Rose, Kevin C.; MacIntyre, Sally; Lenters, John D.; Smyth, Robyn L.; Hanson, Paul C.; Cole, Jonathan J.; Staehr, Peter A.; Rusak, James A.; Pierson, Donald C.; Brookes, Justin D.; Laas, Alo; Wu, Chin H, 2012. Lake-size dependency of wind shear and connection as controls on gas exchange. *Geophysical research letters*, 39(L09405).
- Rhee, T. S.; Nightingale, P. D.; Woolf, D. K.; Caulliez, G.; Bowyer, P.; Andreae, M. O., 2007. Influence of energetic wind and waves on gas transfer in a large wind-wave tunnel facility. *Journal of Geophysical Research*, 112(C05027).
- Richter, K. & Jähne, B., 2011. A laboratory study of the Schmidt number dependency of air-water gas transfer. En: S. Komori, W. McGillis & R. Kurose, edits. *6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces*. Kyoto: , pp. 322-332.
- Shaikh, N. & Siddiqui, K., 2011a. Near-surface flow structure over wind-generated water waves, part I: wave-induced flow characteristics. *Ocean Dynamics*, Volumen 61, pp. 127-141.
- Shaikh, N. & Siddiqui, K., 2011b. Near-surface flow structure over wind-generated water waves, part II: characteristics of separated and non-separated flows. *Ocean Dynamics*, Volumen 61, pp. 143-154.
- Siddiqui, M. H. K. & Loewen, M. R., 2007. Characteristics of the wind drift layer and microscale breaking waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Volumen 573, pp. 417-456.
- Sverdrup, H. V. & Munk, W. H., 1947. *Wind, sea and swell: Theory of relation for forecasting*, U.S. Navy (601): Hydrographic Office.
- Tamburrino, A. & Rayo, L., 2010. *Effect of the slope of short fetch wind-driven waves on the oxygen transfer in a water body*. Athens, Greece, Sixth International Symposium on Environmental Hydraulics.
- Taylor, P. & Yelland, M., 2000. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *Physical Oceanography*, Volumen 31, pp. 572-590.
- Thais, L. & Magnaudet, J., 1996. Turbulent structure beneath surface gravity waves sheared by the wind. *Journal of Fluid Mechanics*, Volumen 328, pp. 313-344.
- Toba, Y. & Koga, M., 1986. A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress. En: E. C. Monahan & G. MacNiocaill, edits. *Oceanic Whitecaps*. s.l.:D. Reidel, pp. 37-47.
- Torres, Rodrigo; Pantoja, Silvio; Harada, Naomi; González, Humberto E.; Daneri, Giovanni; Frangopulos, Máximo; Rutilant, José A.; Duarte, Carlos M.; Rúa-Halpern, Sergio; Mayol, Eva; Fukasawa, Masao, 2011. Air-sea CO₂ fluxes along the coast of Chile: From CO₂ outgassing in central northern upwelling waters to CO₂ uptake in southern Patagonian fjords. *Journal of Geophysical Research*, 116(C09006).
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1977. *Shore protection manual. 3 Volumes.*, s.l.: s.n.

- Ueno, K. & Deushi, M., 2003. A new empirical formula for the aerodynamic roughness of water surface waves. *Journal of Oceanography*, Volumen 59, pp. 819-831.
- Upstill-Goddard, R. C., 2006. Air-sea gas exchange in the coastal zone. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Volumen 70, pp. 388-404.
- Wanninkhof, Rik; Asher, William E.; Ho, David T.; Sweeney, Colm; McGillis, Wade R., 2009. Advances in Quantifying Air-Sea Gas Exchange and Environmental Forcing. *Annual Review of Marine Science*, Volumen 1, p. 213:44.
- Wanninkhof, R., 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97(C5), pp. 7373-7382.
- Wanninkhof, R. & McGillis, W. R., 1999. A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophysical Research Letters*, 26(13), pp. 1889-1892.
- White, F. M., 1998. *Fluid mechanics*. 4a ed. s.l.:McGraw-Hill.
- Wilke, C. R. & Chang, P., 1955. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. *AIChE J.*, Volumen 1, pp. 264-270.
- Wu, J., 1975. Wind-induced drift currents. *Journal of Fluid Mechanic*, Volumen 34, pp. 91-111.
- Zhang, X. & Harrison, S., 2004. A laboratory observation of the surface temperature and velocity distributions on a wavy and windy air-water interface. *Physics of fluids*, 16(1), pp. 5-8.

Anexo A

Tabla A.3. Resumen de datos, experiencia F0H0.

<i>V</i>	<i>L</i>	η	s^2	f_p	H_s	u_s	u_*	z_0
		<i>mm</i>		<i>Hz</i>	<i>mm</i>	<i>cm/s</i>	<i>m/s</i>	<i>mm</i>
1	0.8	0.05	0.000	35.93	0.1	9.4	0.159	0.0053
	1.6	0.09	0.000	29.67	0.1	9.6	0.130	0.0009
	2.4	0.09	0.000	28.40	0.2	9.6	0.138	0.0046
	3.2	0.30	0.002	8.31	0.8	10.0	0.138	0.0047
2	0.8	0.68	0.017	9.45	1.9	12.2	0.289	0.0054
	1.6	1.67	0.036	7.26	4.7	15.5	0.299	0.0086
	2.4	1.82	0.023	6.50	5.0	14.9	0.339	0.0284
	3.2	4.03	0.043	5.49	11.1	14.3	0.404	0.1806
3	0.8	1.08	0.032	7.91	2.7	18.6	0.333	0.0022
	1.6	2.39	0.034	6.13	6.7	19.5	0.362	0.0045
	2.4	3.86	0.036	5.18	10.6	19.8	0.517	0.0823
	3.2	4.91	0.033	4.45	13.7	16.7	0.521	0.0921
4	0.8	1.67	0.035	7.12	4.7	26.8	0.361	0.0046
	1.6	3.54	0.042	5.53	9.8	26.4	0.404	0.0121
	2.4	4.30	0.031	4.74	11.9	30.5	0.467	0.0939
	3.2	6.66	0.041	3.88	18.8	25.9	0.496	0.1793
5	0.8	3.07	0.053	6.13	8.5	35.6	0.610	0.0506
	1.6	5.23	0.050	4.44	15.3	33.5	0.803	0.2936
	2.4	5.76	0.031	3.68	17.0	38.4	0.771	0.4208
	3.2	9.18	0.044	3.24	27.1	38.6	0.842	0.6208

Tabla A.4. Resumen de datos, experiencia F1H1.

<i>V</i>	<i>L</i>	η	s^2	f_p	H_s	u_s	u_*	z_0
		<i>mm</i>		<i>Hz</i>	<i>mm</i>	<i>cm/s</i>	<i>m/s</i>	<i>mm</i>
0	0.8	1.86	0.001	1.03	0.0	0.2		
	1.6	4.55	0.001	0.97	0.0	0.0		
	2.4	3.18	0.001	1.00	0.0	0.0		
	3.2	3.62	0.001	0.99	0.0	0.1		
1	0.8	2.78	0.004	0.97	0.0	7.0	0.135	0.0009
	1.6	2.86	0.005	1.00	0.0	8.0	0.158	0.0089
	2.4	2.31	0.005	1.00	0.0	7.7	0.166	0.0206
	3.2	3.22	0.005	1.00	0.0	7.9	0.172	0.0250
2	0.8	3.90	0.012	0.99	0.0	14.9	0.350	0.0370
	1.6	3.13	0.011	3.02	0.0	17.4	0.378	0.0747
	2.4	4.28	0.010	1.00	0.0	14.3	0.414	0.0494
	3.2	4.90	0.010	1.01	0.0	16.8	0.367	0.0830
3	0.8	2.78	0.017	1.01	0.0	18.5	0.345	0.0088
	1.6	5.05	0.012	0.97	0.0	16.9	0.416	0.0407
	2.4	6.95	0.011	0.98	0.0	17.7	0.496	0.2152
	3.2	7.87	0.012	0.96	0.0	18.9	0.484	0.1759
4	0.8	3.65	0.022	3.02	0.0	20.7	0.498	0.0563
	1.6	5.21	0.016	0.99	0.0	19.1	0.550	0.1052
	2.4	7.99	0.016	2.98	0.0	21.3	0.604	0.2466
	3.2	8.65	0.016	3.00	0.0	22.8	0.731	0.7302
5	0.8	5.47	0.028	3.01	0.0	27.0	0.721	0.1888
	1.6	6.74	0.021	2.94	0.0	41.3	0.822	0.3946
	2.4	8.76	0.019	3.03	0.0	25.9	0.913	0.8761
	3.2	12.04	0.022	1.97	0.0	30.9	0.972	1.2519

Tabla A.5. Resumen de datos, experiencia F1.5H3.

<i>V</i>	<i>L</i>	η	s^2	f_p	H_s	u_s	u_*	z_0
		<i>mm</i>		<i>Hz</i>	<i>mm</i>	<i>cm/s</i>	<i>m/s</i>	<i>mm</i>
0	0.8	6.84	0.002	1.49	0.0	0.6		
	1.6	5.77	0.002	1.51	0.0	1.3		
	2.4	6.39	0.002	1.50	0.0	0.2		
	3.2	5.51	0.002	1.49	0.0	0.1		
1	0.8	6.70	0.004	1.50	0.0	-2.9	0.219	0.0351
	1.6	6.43	0.003	1.49	0.0	7.2	0.237	0.0811
	2.4	6.68	0.003	1.50	0.0	8.8	0.209	0.0495
	3.2	5.69	0.005	1.50	0.0	7.7	0.220	0.0871
3	0.8	6.83	0.012	1.46	0.0	13.7	0.393	0.0382
	1.6	8.86	0.010	1.50	0.0	17.7	0.426	0.0653
	2.4	7.67	0.010	1.50	0.0	18.6	0.503	0.2507
	3.2	8.85	0.009	1.50	0.0	15.9	0.497	0.2268
5	0.8	9.09	0.023	1.47	0.0	32.1	0.599	0.0690
	1.6	9.95	0.017	1.50	0.0	38.0	0.754	0.2833
	2.4	11.74	0.016	1.50	0.0	38.9	0.889	1.0585
	3.2	12.34	0.015	1.50	0.0	38.0	0.900	0.9166

Tabla A.6. Resumen de datos, experiencia F1.5H4.

<i>V</i>	<i>L</i>	η	s^2	f_p	H_s	u_s	u_*	z_0
		<i>mm</i>		<i>Hz</i>	<i>mm</i>	<i>cm/s</i>	<i>m/s</i>	<i>mm</i>
0	0.8	11.18	0.003	1.50	0.0	1.1		
	1.6	11.18	0.002	1.50	0.0	1.9		
	2.4	11.19	0.002	1.49	0.0	1.2		
	3.2	11.18	0.002	1.50	0.0	-0.3		
1	0.8	12.04	0.004	1.50	0.0	2.8	0.255	0.1786
	1.6	9.57	0.006	1.50	0.0	10.5	0.214	0.0660
	2.4	11.11	0.004	1.50	0.0	6.9	0.202	0.0536
	3.2	9.65	0.003	1.50	0.0	7.2	0.245	0.1602
3	0.8	12.82	0.009	1.49	0.0	7.3	0.597	0.4394
	1.6	12.83	0.013	1.50	0.0	18.5	0.553	0.3434
	2.4	12.94	0.008	1.49	0.0	16.1	0.475	0.2221
	3.2	11.83	0.011	1.49	0.0	14.3	0.416	0.0682
5	0.8	12.15	0.021	1.51	0.0	18.8	0.820	0.4020
	1.6	13.50	0.016	1.50	0.0	17.5	1.137	2.0677
	2.4	16.10	0.018	1.49	0.0	36.5	1.092	1.8382
	3.2	13.92	0.018	1.50	0.0	35.4	1.210	2.7816

Tabla A.7. Resumen de datos, experiencia F2H1.

<i>V</i>	<i>L</i>	η <i>mm</i>	s^2	f_p <i>Hz</i>	H_s <i>mm</i>	u_s <i>cm/s</i>	u_* <i>m/s</i>	z_0 <i>mm</i>
0	0.8	3.97	0.008	2.02	0.0	2.3		
	1.6	3.85	0.004	2.00	0.0	1.1		
	2.4	3.62	0.001	2.00	0.0	-0.1		
	3.2	3.43	0.002	2.01	0.0	-0.5		
1	0.8	4.25	0.007	1.98	0.0	6.1	0.154	0.0066
	1.6	3.82	0.005	2.00	0.0	6.7	0.197	0.0462
	2.4	3.94	0.005	2.00	0.0	7.1	0.184	0.0545
	3.2	4.06	0.006	2.01	0.0	6.1	0.184	0.0481
2	0.8	5.09	0.011	1.99	0.0	14.3	0.267	0.0046
	1.6	4.64	0.008	2.01	0.0	12.3	0.285	0.0082
	2.4	5.12	0.010	2.00	0.0	11.7	0.274	0.0083
	3.2	6.30	0.010	2.00	0.0	11.0	0.315	0.0320
3	0.8	5.44	0.013	2.01	0.0	22.5	0.338	0.0087
	1.6	5.13	0.013	2.00	0.0	19.8	0.352	0.0122
	2.4	5.74	0.010	1.99	0.0	18.7	0.386	0.0297
	3.2	6.51	0.010	2.01	0.0	13.9	0.387	0.0297
4	0.8	5.35	0.015	2.02	0.0	23.2	0.457	0.0260
	1.6	4.98	0.015	1.99	0.0	21.8	0.529	0.0695
	2.4	6.57	0.012	2.00	0.0	20.1	0.533	0.1236
	3.2	7.37	0.014	2.00	0.0	18.2	0.633	0.3267
5	0.8	6.00	0.019	2.01	0.0	32.1	0.797	0.4361
	1.6	7.41	0.017	1.99	0.0	40.3	0.831	0.5075
	2.4	10.16	0.020	1.99	0.0	29.6	0.759	0.5848
	3.2	12.07	0.018	2.00	0.0	34.2	1.034	1.9172

Tabla A.8. Resumen de datos, experiencia F3H1.

<i>V</i>	<i>L</i>	η <i>mm</i>	s^2	f_p <i>Hz</i>	H_s <i>mm</i>	u_s <i>cm/s</i>	u_* <i>m/s</i>	z_0 <i>mm</i>
0	0.8	3.50	0.001	1.60	0.0	3.2		
	1.6	2.70	0.003	3.00	0.0	3.4		
	2.4	2.00	0.002	3.01	0.0	2.7		
	3.2	3.07	0.002	2.98	0.0	0.1		
1	0.8	3.59	0.004	3.01	0.0	7.4	0.140	0.0037
	1.6	2.78	0.004	3.03	0.0	6.4	0.138	0.0026
	2.4	3.05	0.005	3.00	0.0	4.9	0.116	0.0006
	3.2	3.48	0.005	2.99	0.0	6.4	0.164	0.0166
2	0.8	4.21	0.011	2.99	0.0	7.2	0.225	0.0010
	1.6	4.27	0.013	3.00	0.0	11.9	0.227	0.0012
	2.4	6.10	0.012	2.98	0.0	15.1	0.255	0.0041
	3.2	6.07	0.008	3.01	0.0	17.1	0.298	0.0210
3	0.8	4.56	0.016	2.99	0.0	14.6	0.261	0.0011
	1.6	4.97	0.014	2.99	0.0	17.2	0.289	0.0024
	2.4	6.27	0.012	3.00	0.0	17.8	0.356	0.0169
	3.2	6.53	0.010	2.99	0.0	16.0	0.469	0.1285
4	0.8	5.95	0.021	3.00	0.0	17.1	0.459	0.0327
	1.6	8.11	0.019	2.99	0.0	35.9	0.637	0.3379
	2.4	7.46	0.014	3.01	0.0	28.3	0.639	0.4602
	3.2	7.98	0.015	2.99	0.0	22.9	0.705	0.7060
5	0.8	7.14	0.020	3.00	0.0	12.3	0.748	0.2422
	1.6	8.05	0.022	3.02	0.0	23.5	0.899	0.6792
	2.4	8.77	0.021	2.99	0.0	30.8	0.931	1.6615
	3.2	9.48	0.018	3.01	0.0	36.1	1.114	1.8299

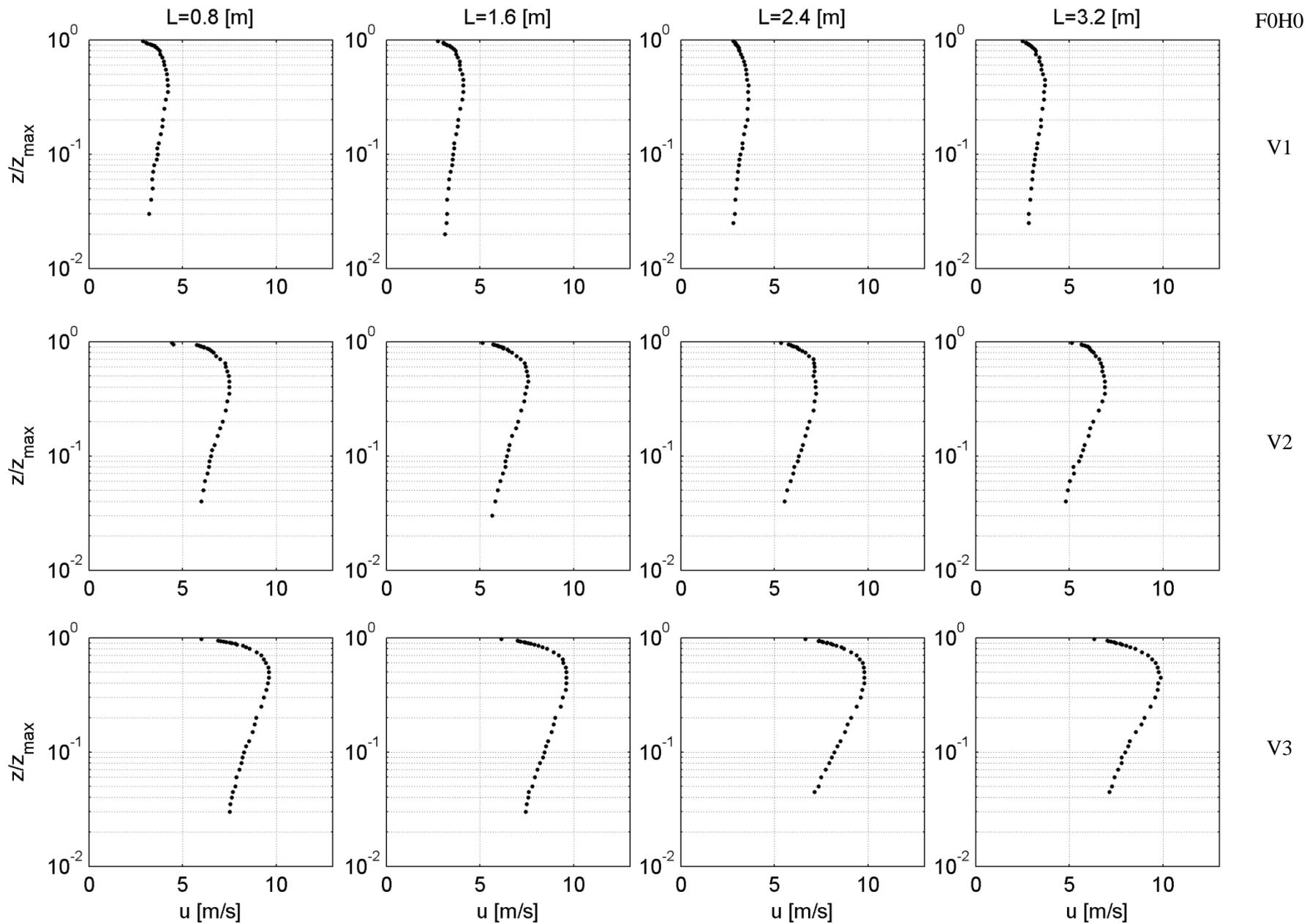
Tabla A.9. Resumen de datos, experiencia F3H2.

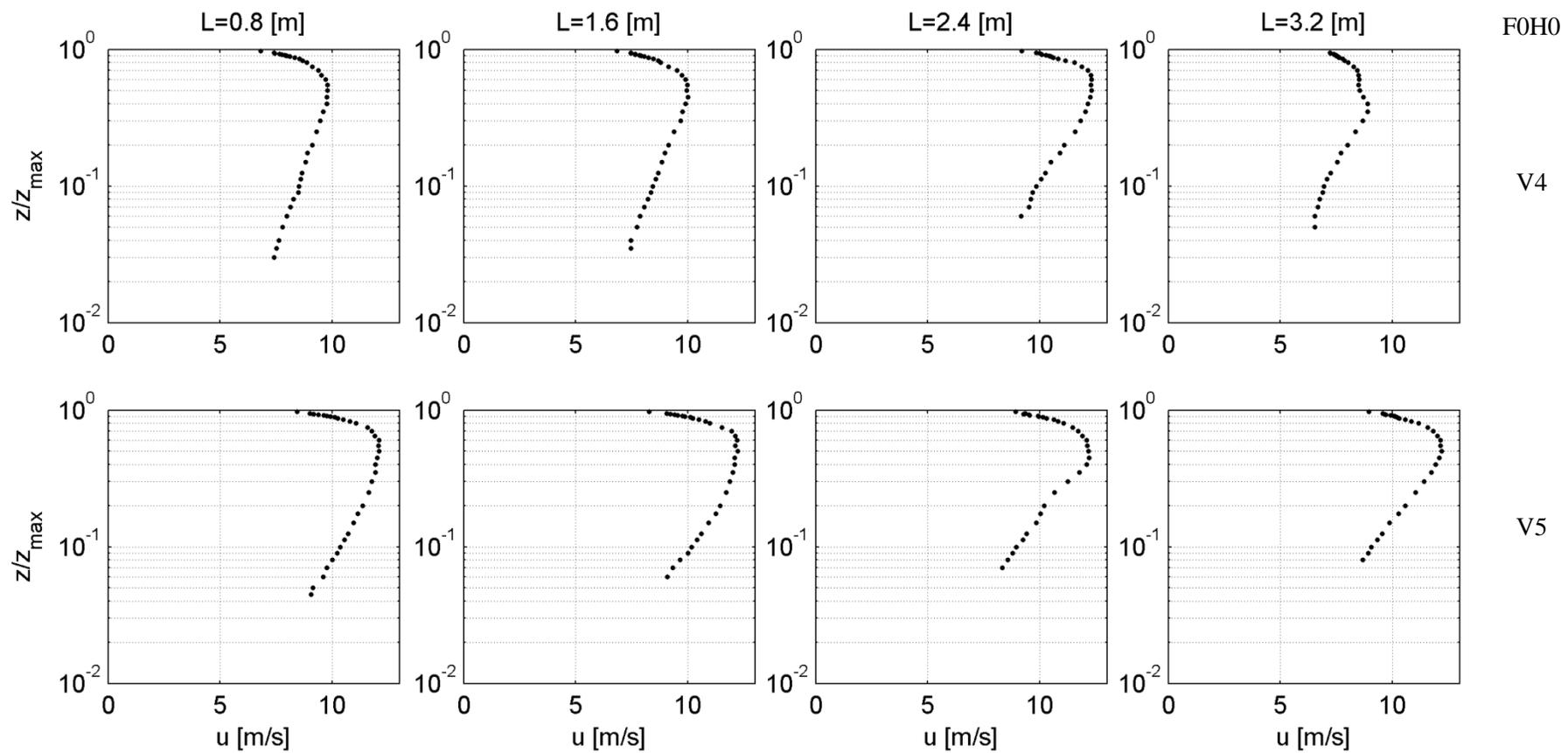
<i>V</i>	<i>L</i>	η <i>mm</i>	s^2	f_p <i>Hz</i>	H_s <i>mm</i>	u_s <i>cm/s</i>	u_* <i>m/s</i>	z_0 <i>mm</i>
0	0.8	6.12	0.009	3.00	0.0	1.5		
	1.6	3.88	0.006	3.00	0.0	2.1		
	2.4	4.24	0.006	3.00	0.0	0.7		
	3.2	4.59	0.005	3.00	0.0	0.9		
1	0.8	6.20	0.009	2.99	0.0	7.2	0.208	0.0463
	1.6	4.60	0.010	3.01	0.0	5.2	0.202	0.0333
	2.4	5.31	0.010	3.00	0.0	8.1	0.233	0.1034
	3.2	6.03	0.010	2.99	0.0	6.2	0.245	0.1751
3	0.8	7.77	0.014	2.99	0.0	28.5	0.382	0.0318
	1.6	5.91	0.010	3.00	0.0	25.9	0.461	0.1311
	2.4	7.70	0.010	2.99	0.0	21.8	0.524	0.4294
	3.2	7.16	0.012	2.99	0.0	18.7	0.573	0.5469
5	0.8	8.26	0.019	3.00	0.0	60.4	1.029	1.4008
	1.6	8.15	0.021	2.97	0.0	62.1	1.134	1.9185
	2.4	8.12	0.020	3.01	0.0	54.5	1.070	1.6016
	3.2	8.56	0.021	2.99	0.0	35.4	0.882	0.6823

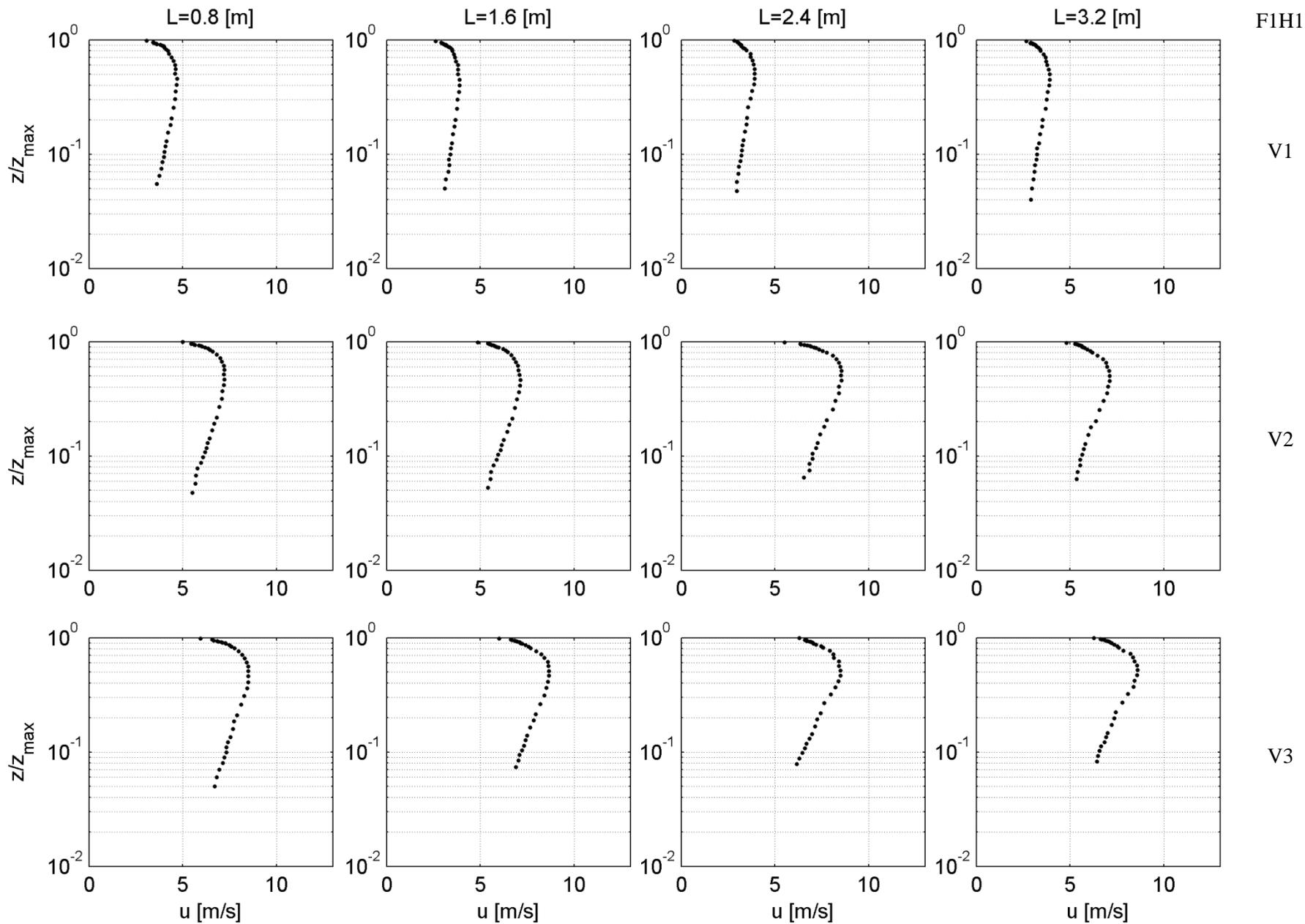
Tabla A.10. Resumen de datos, experiencia F3H3.

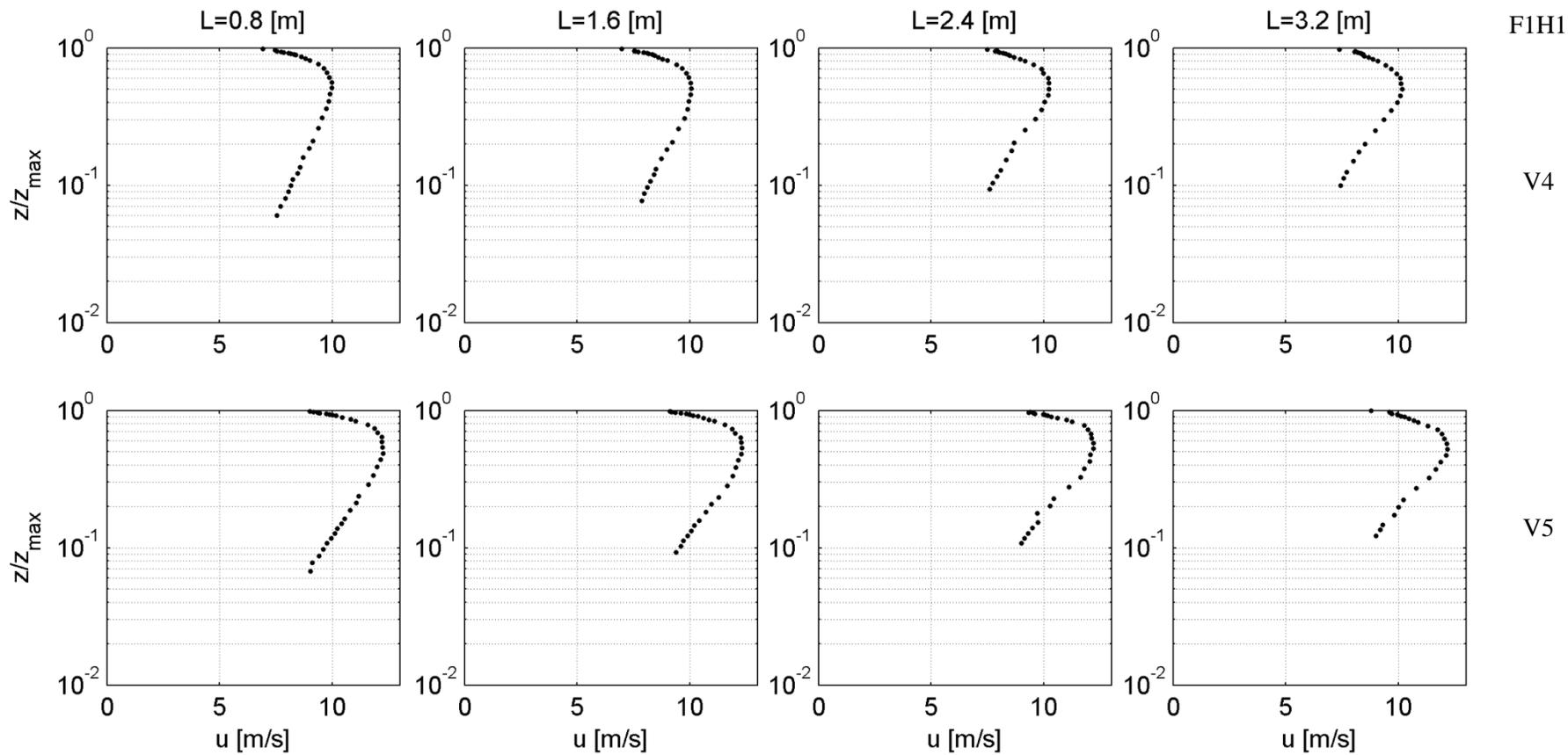
<i>V</i>	<i>L</i>	η <i>mm</i>	s^2	f_p <i>Hz</i>	H_s <i>mm</i>	u_s <i>cm/s</i>	u_* <i>m/s</i>	z_0 <i>mm</i>
0	0.8	5.78	0.016	2.99	0.0	4.7		
	1.6	6.33	0.015	3.00	0.0	5.2		
	2.4	6.13	0.014	2.99	0.0	5.1		
	3.2	5.79	0.011	2.99	0.0	4.7		
1	0.8	6.60	0.016	2.99	0.0	7.0	0.284	0.2262
	1.6	6.65	0.016	3.00	0.0	7.3	0.245	0.1680
	2.4	7.81	0.017	2.98	0.0	8.5	0.267	0.3536
	3.2	5.71	0.012	3.00	0.0	7.7	0.275	0.3702
3	0.8	6.74	0.013	3.00	0.0	13.7	0.636	0.4231
	1.6	7.66	0.015	2.99	0.0	20.7	0.554	0.3225
	2.4	7.88	0.013	3.00	0.0	23.5	0.553	0.4083
	3.2	6.43	0.012	3.02	0.0	21.8	0.574	0.4494
5	0.8	8.50	0.024	3.00	0.0	18.5	1.066	1.0639
	1.6	8.05	0.022	3.00	0.0	15.3	1.021	0.8686
	2.4	8.80	0.026	2.99	0.0	23.7	1.321	2.4478
	3.2	8.14	0.021	2.99	0.0	37.3	0.968	0.8797

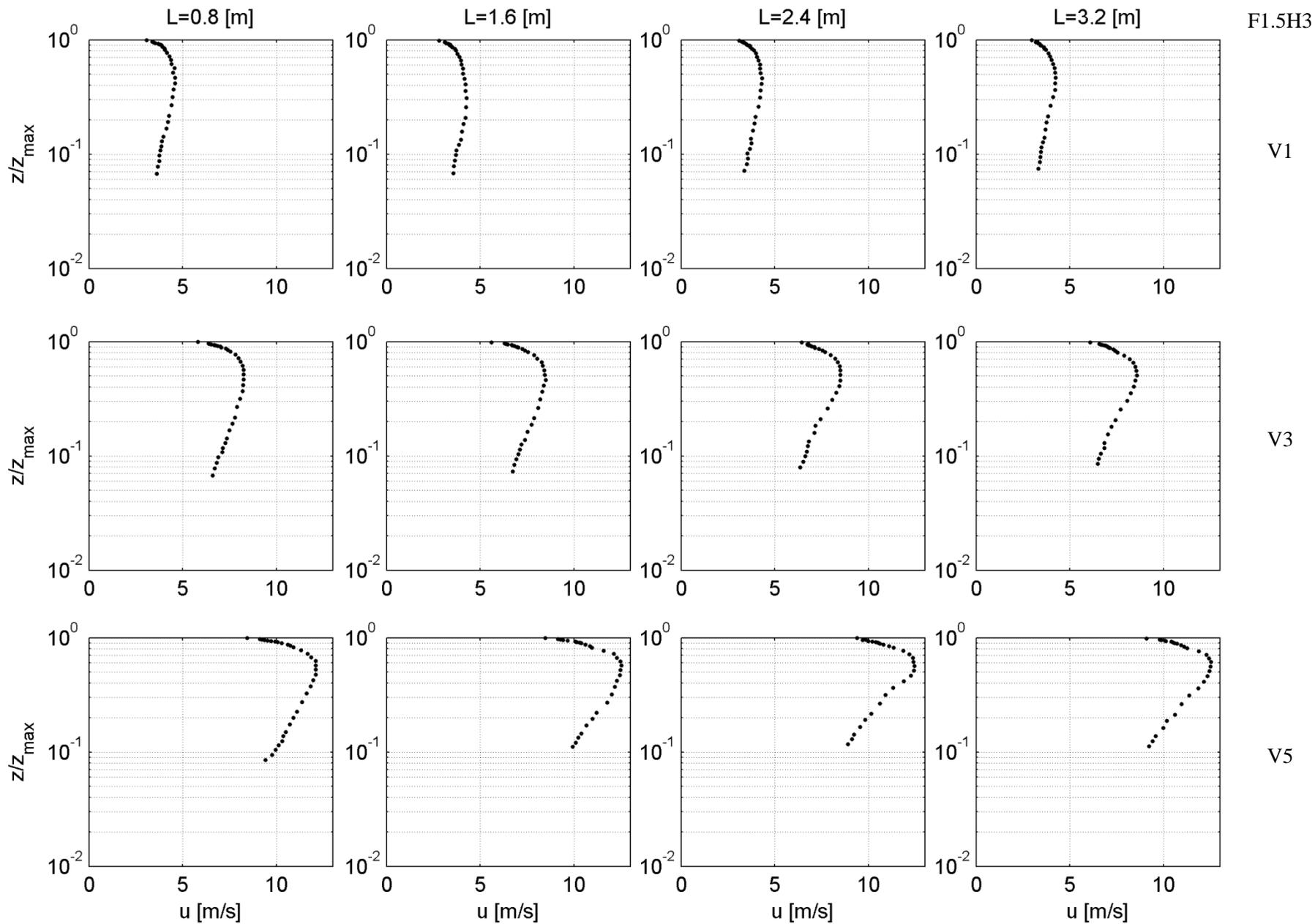
Anexo B

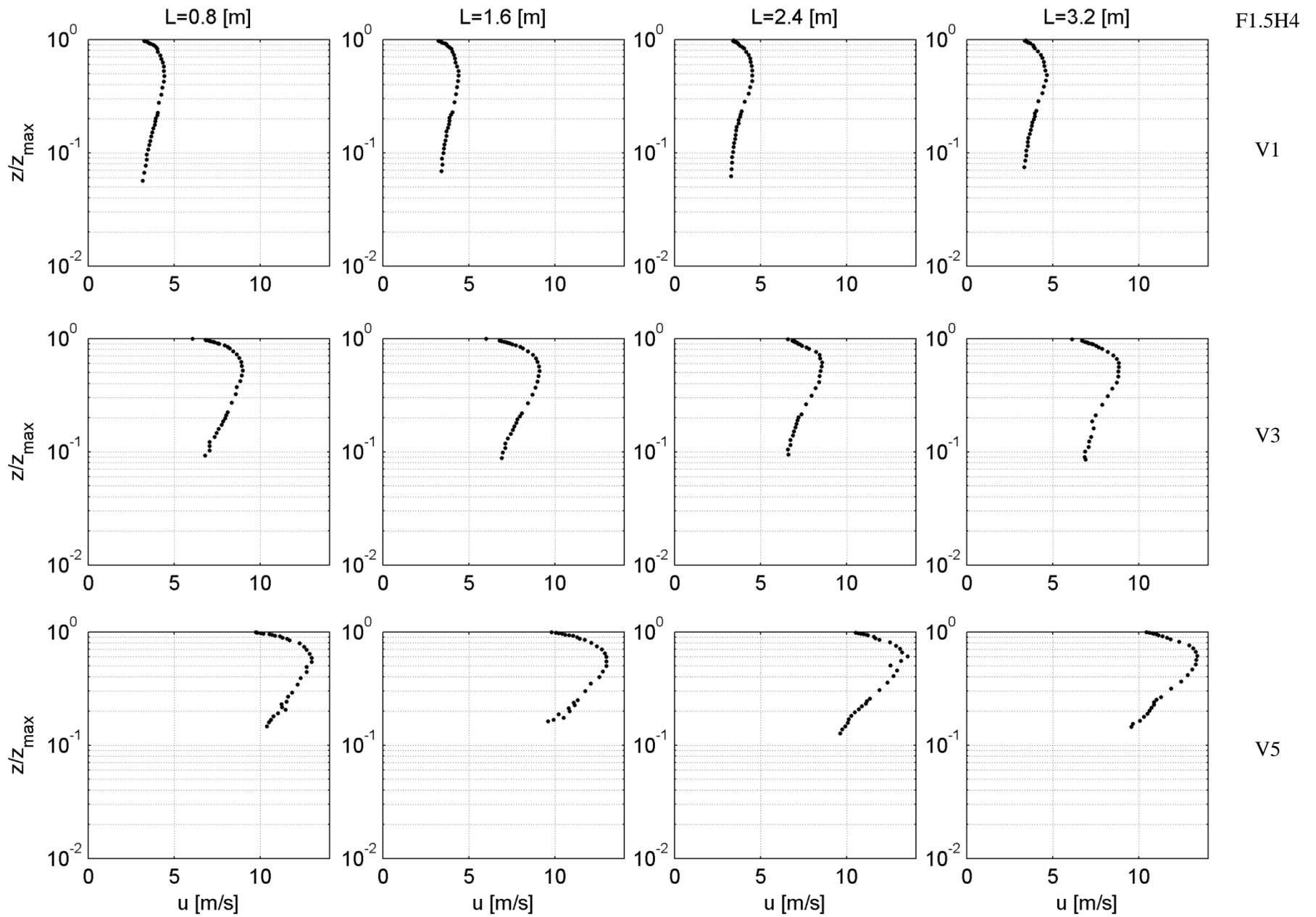


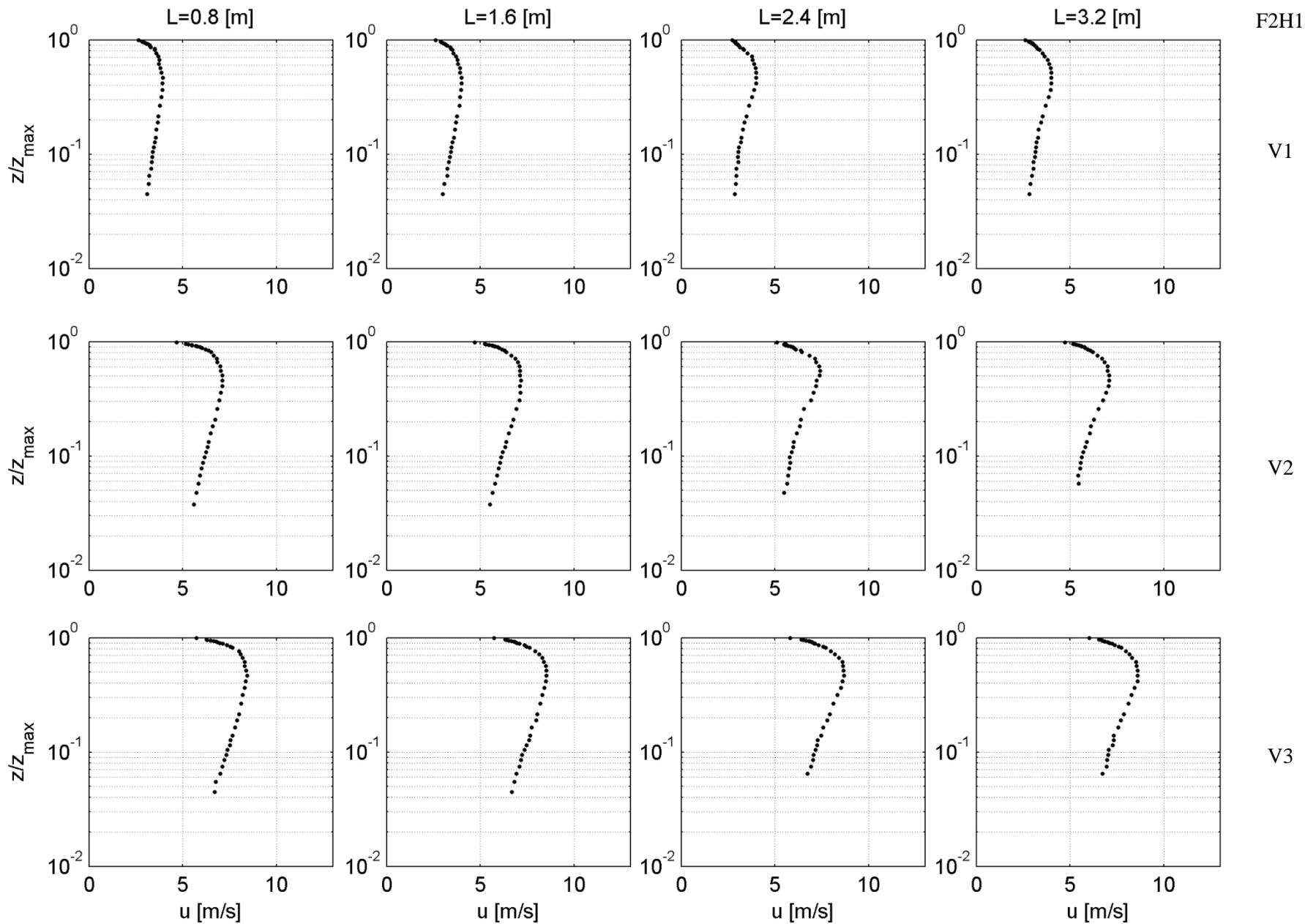


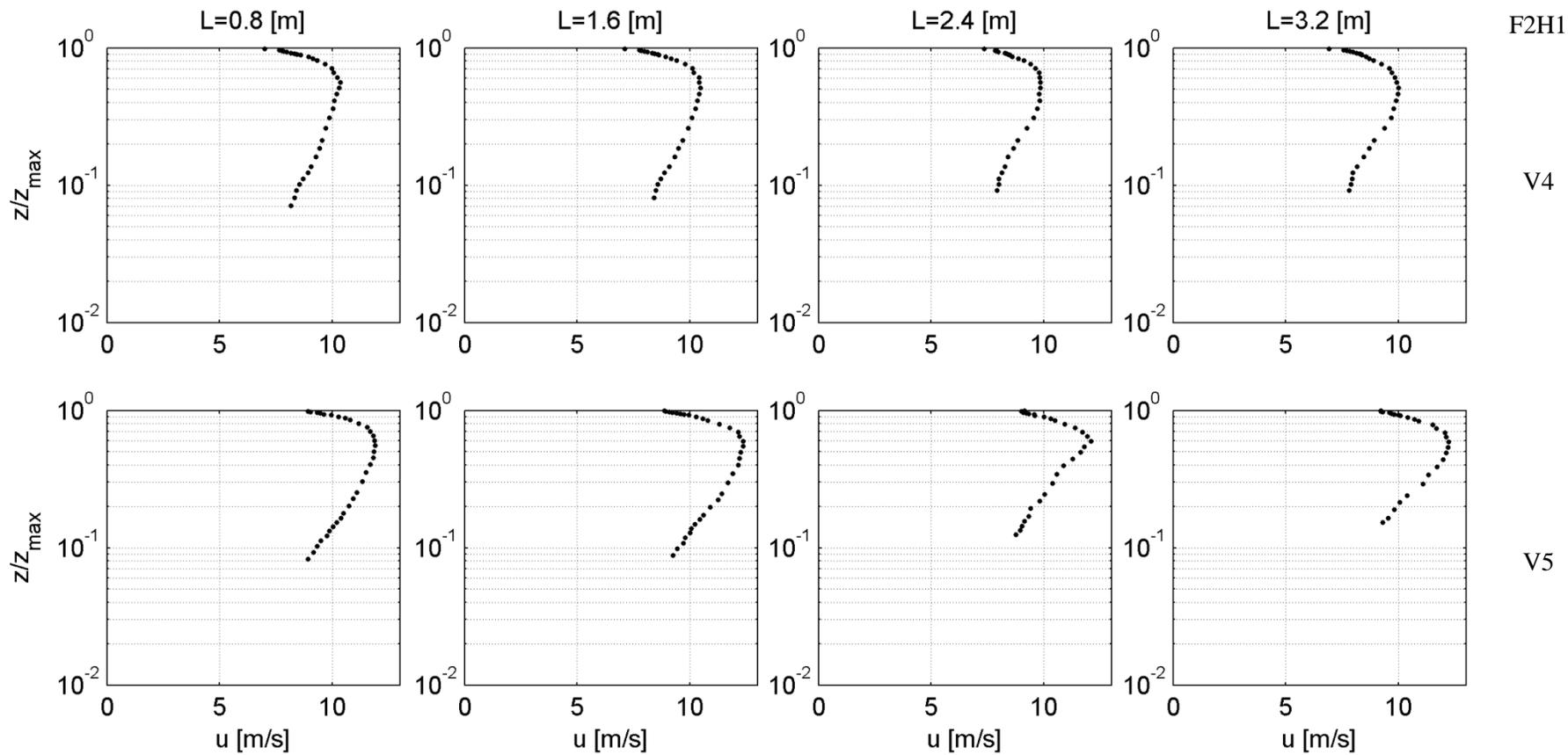


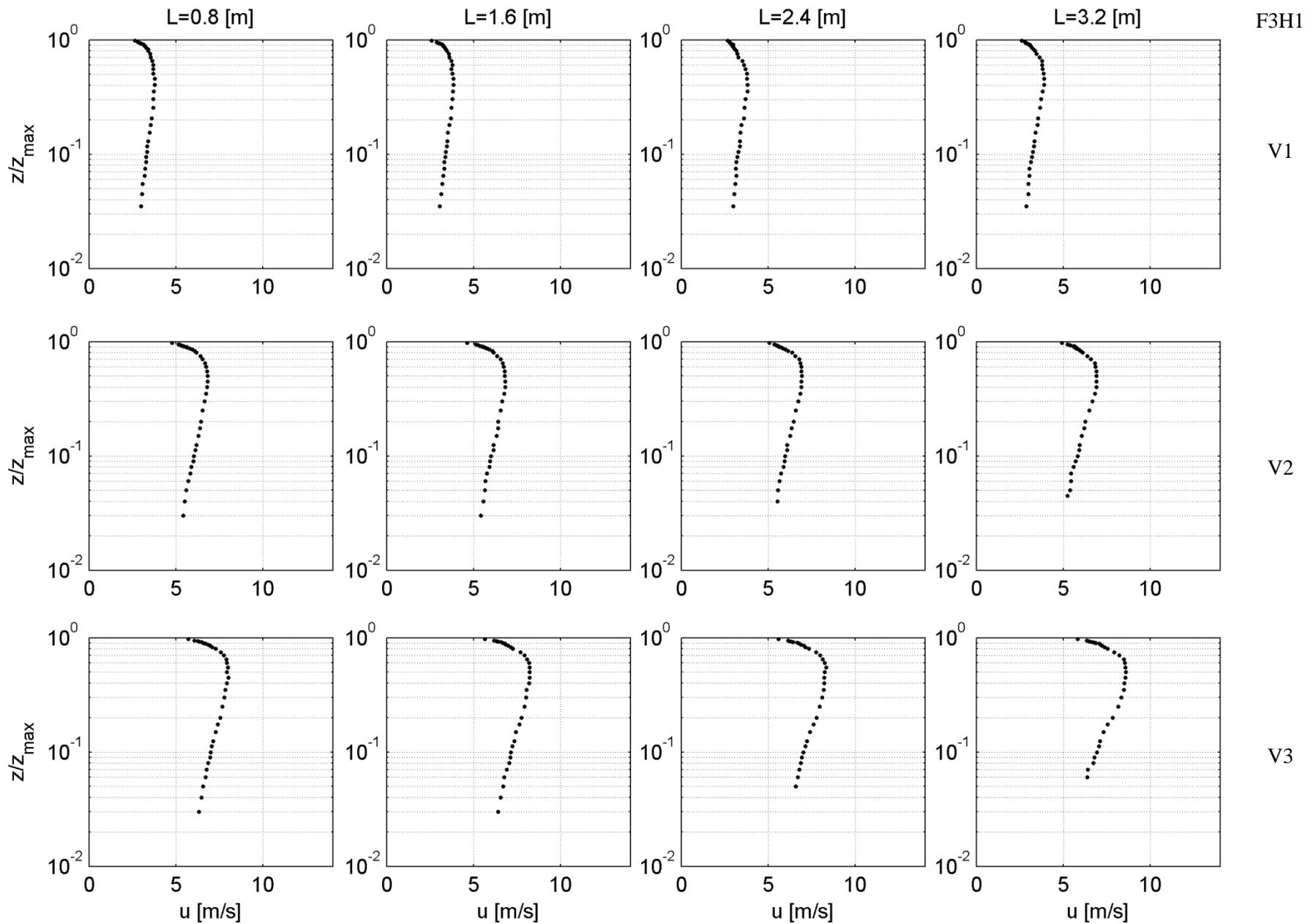


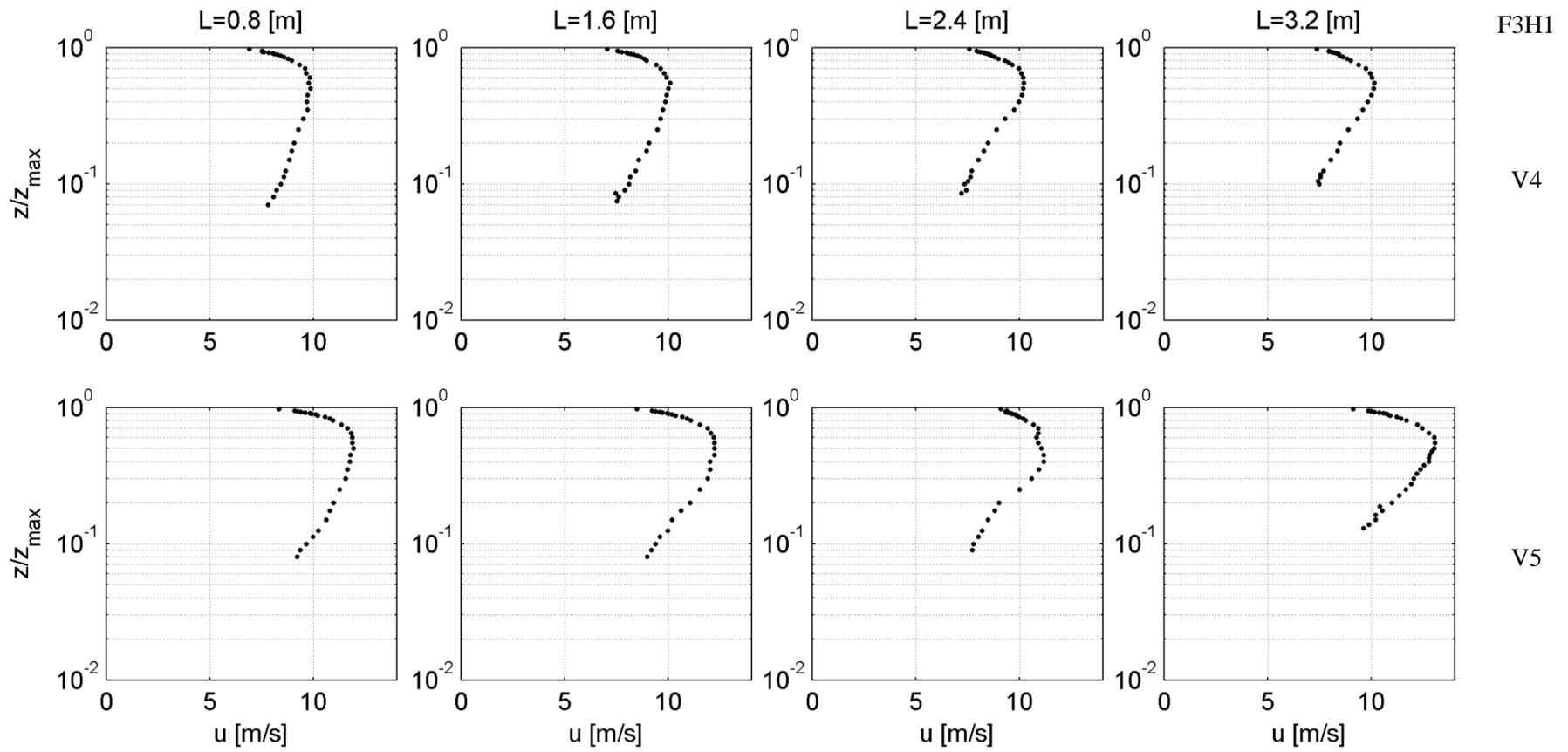


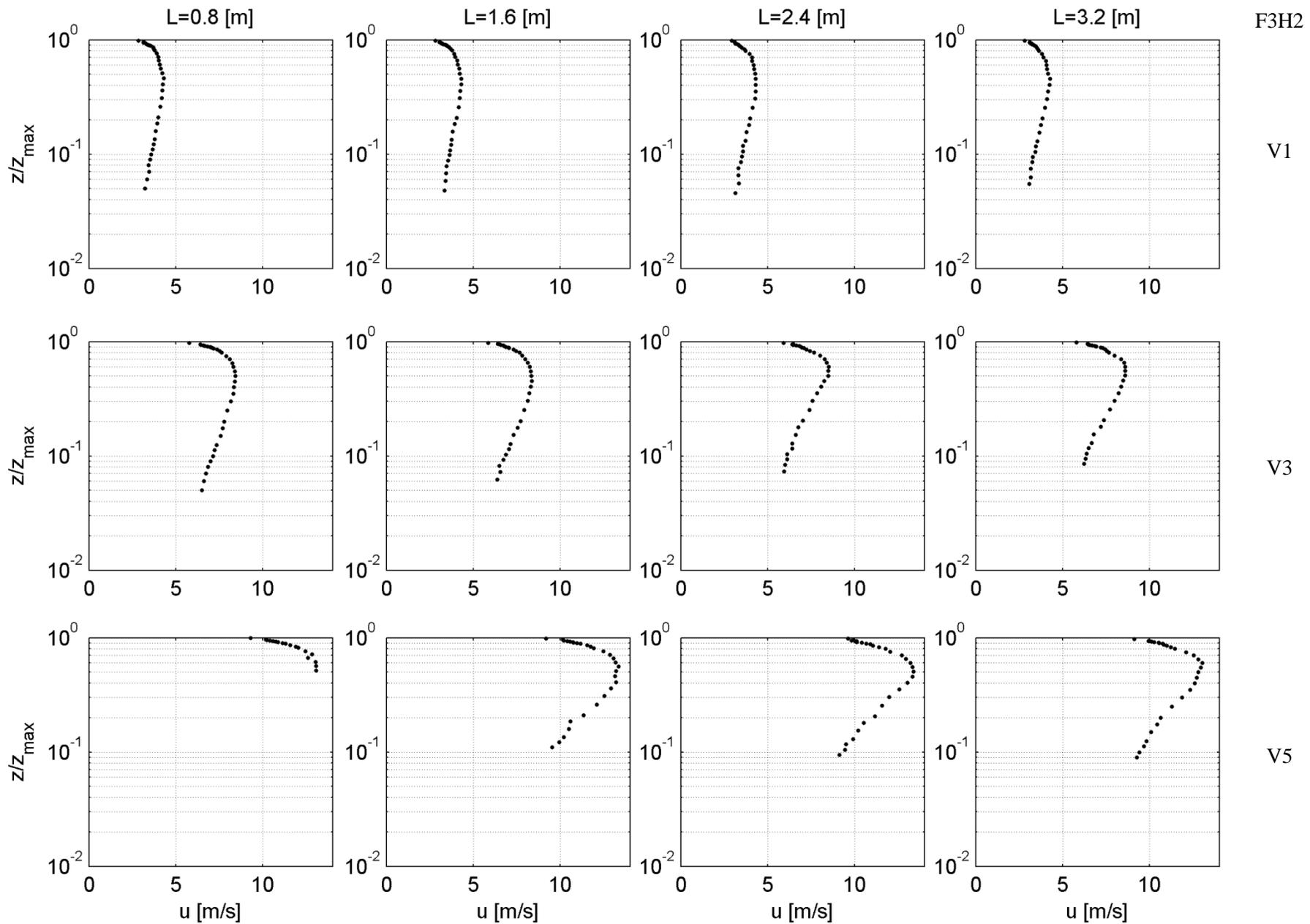


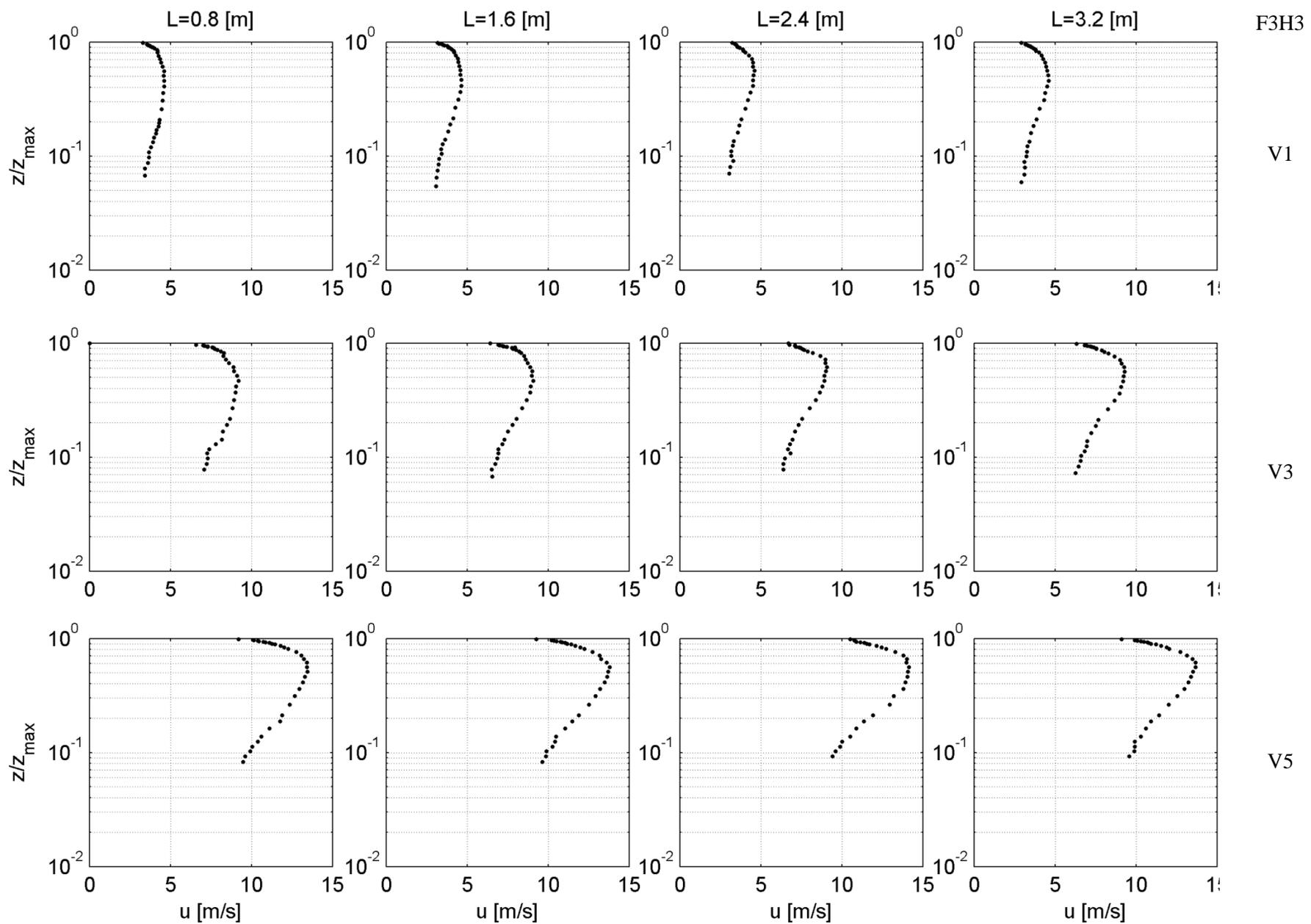












Anexo C

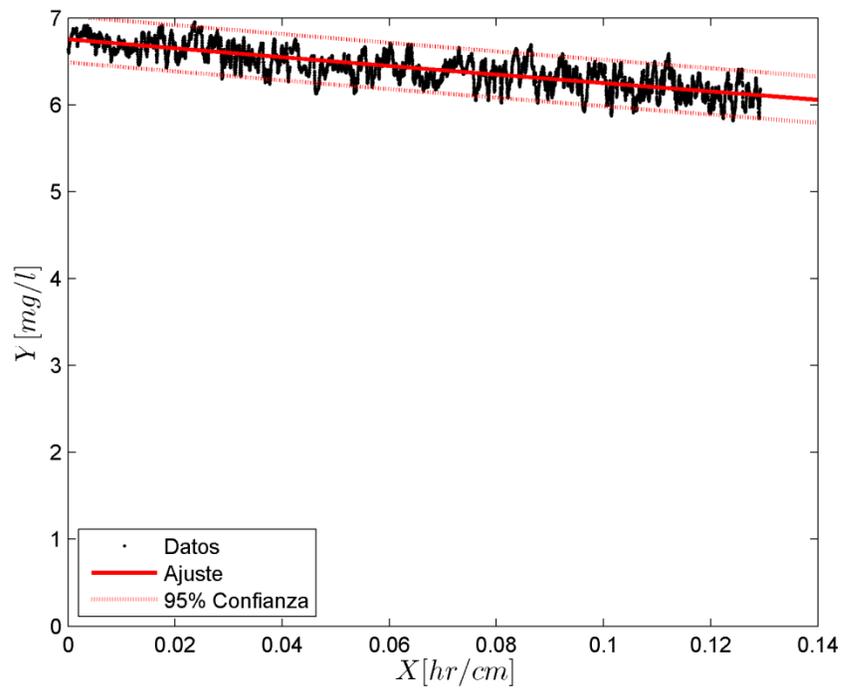


Figura C.1. V1F0H0

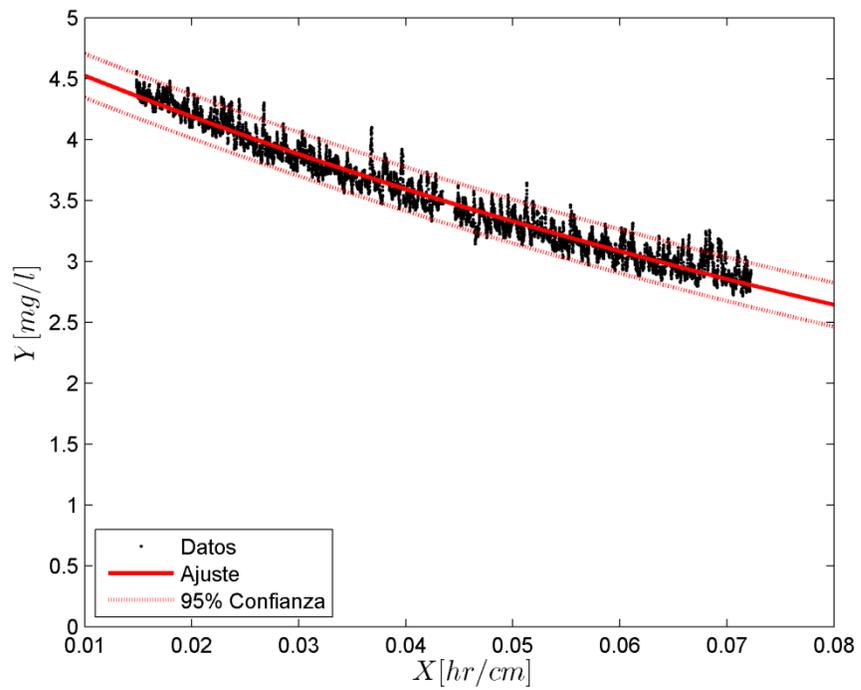


Figura C.2. V2F0H0

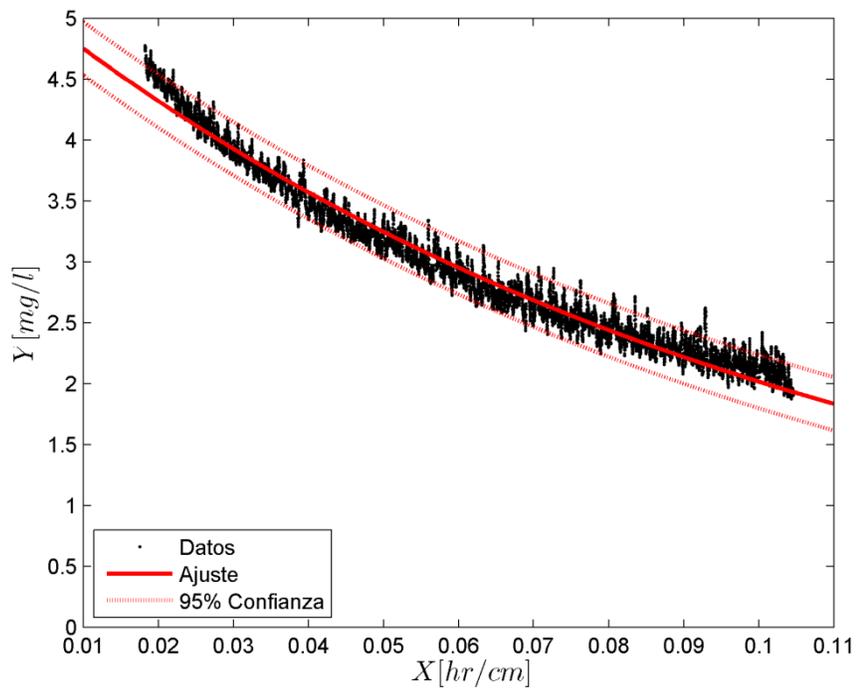


Figura C.3. V3F0H0

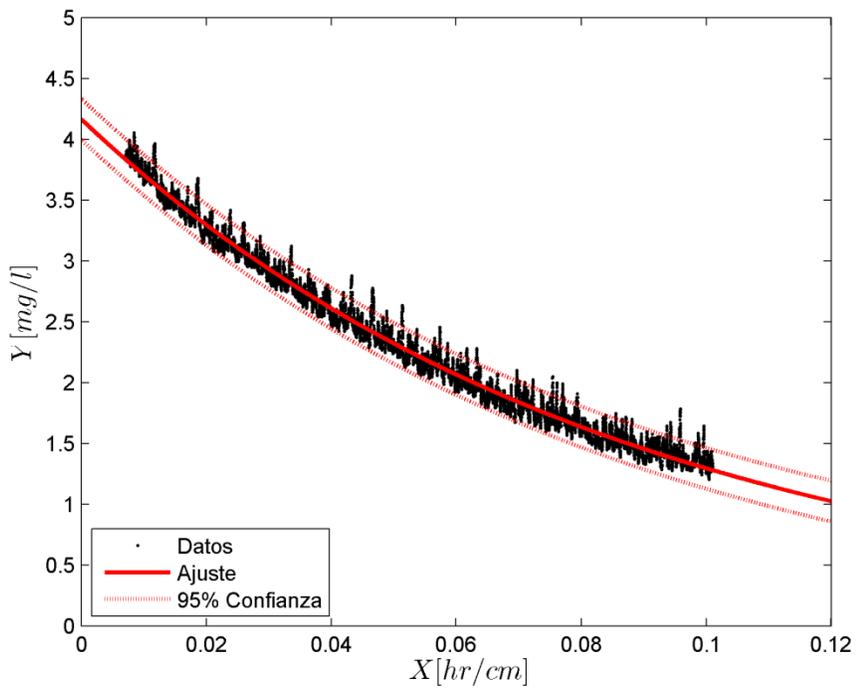
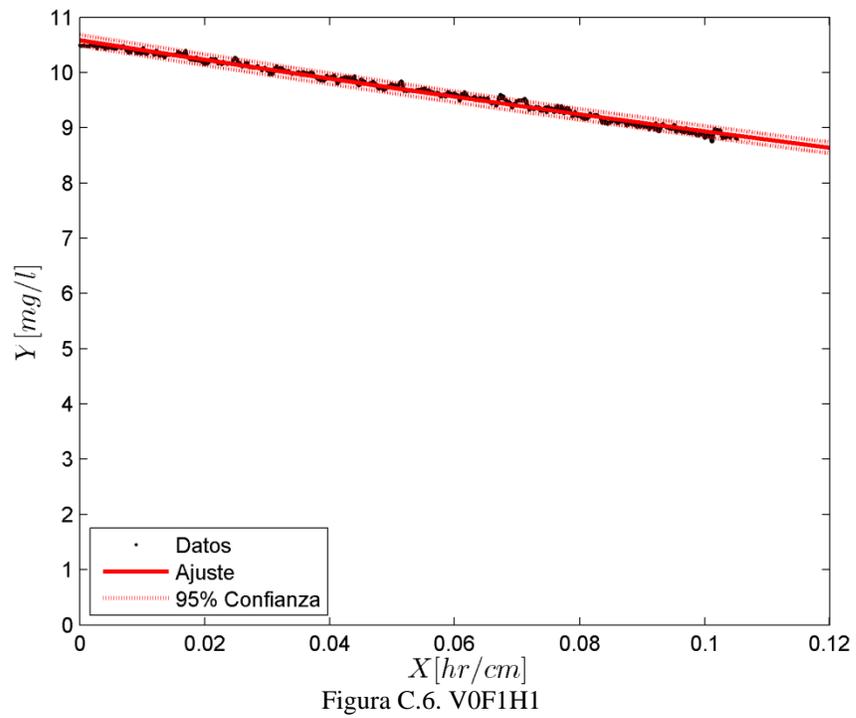
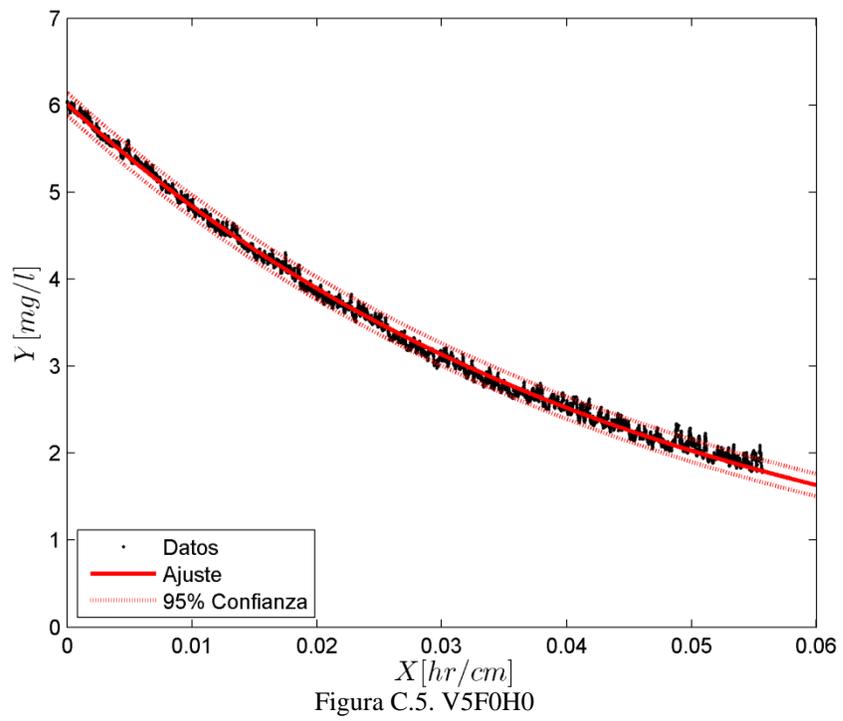


Figura C.4. V4F0H0



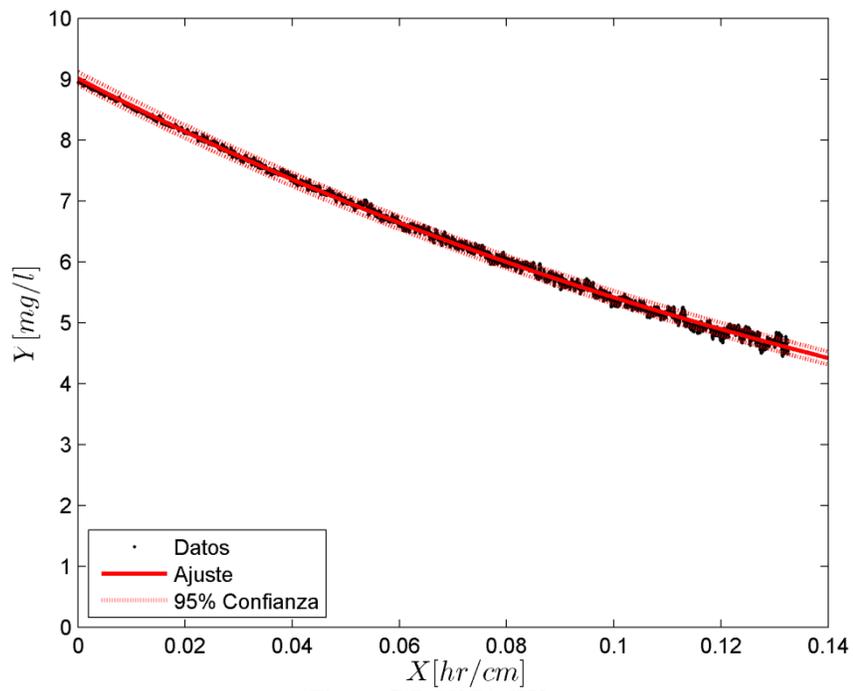


Figura C.7. VOF1.5H3

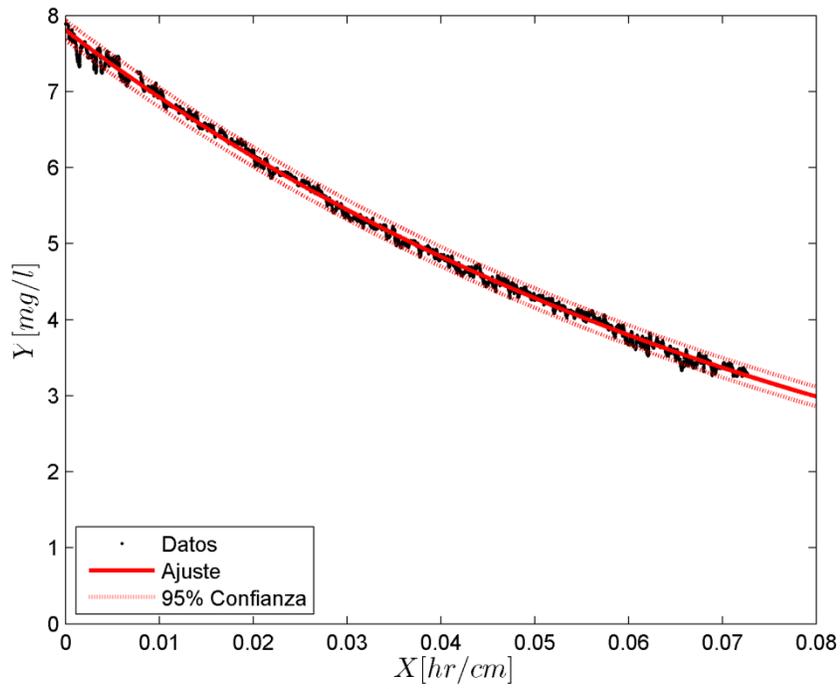


Figura C.8. VOF1.5H4

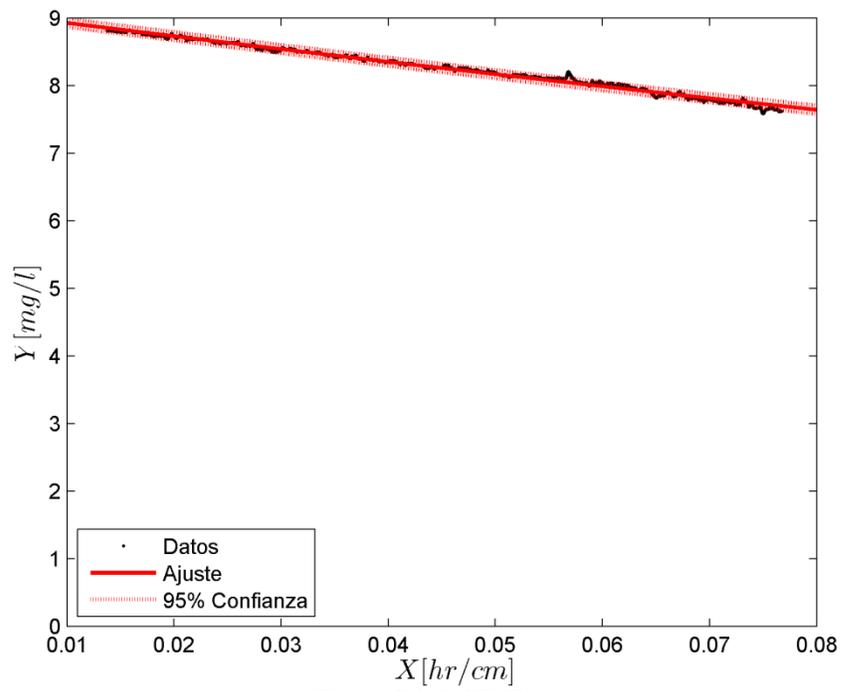


Figura C.9. VOF2H1

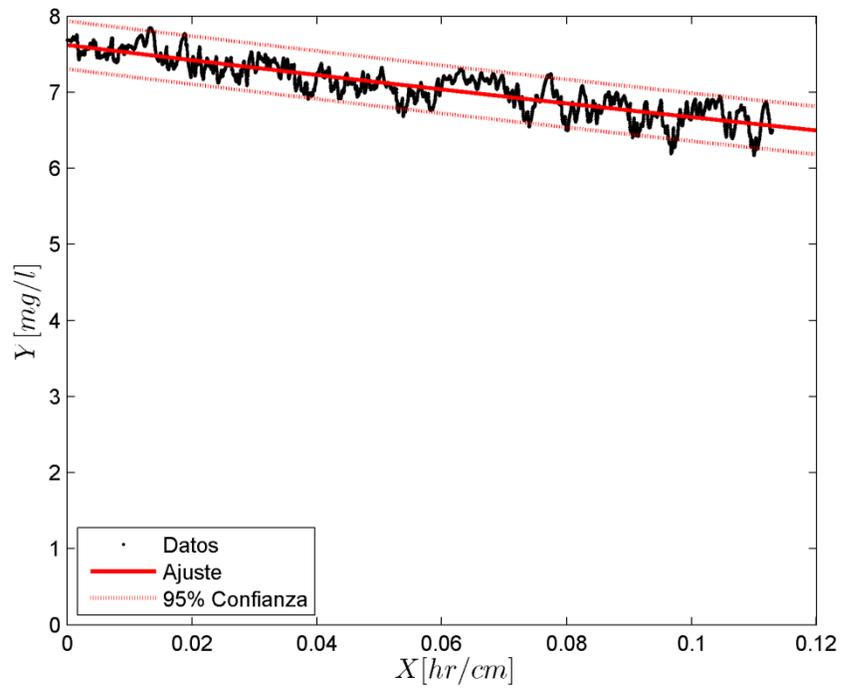


Figura C.10. VOF3H1

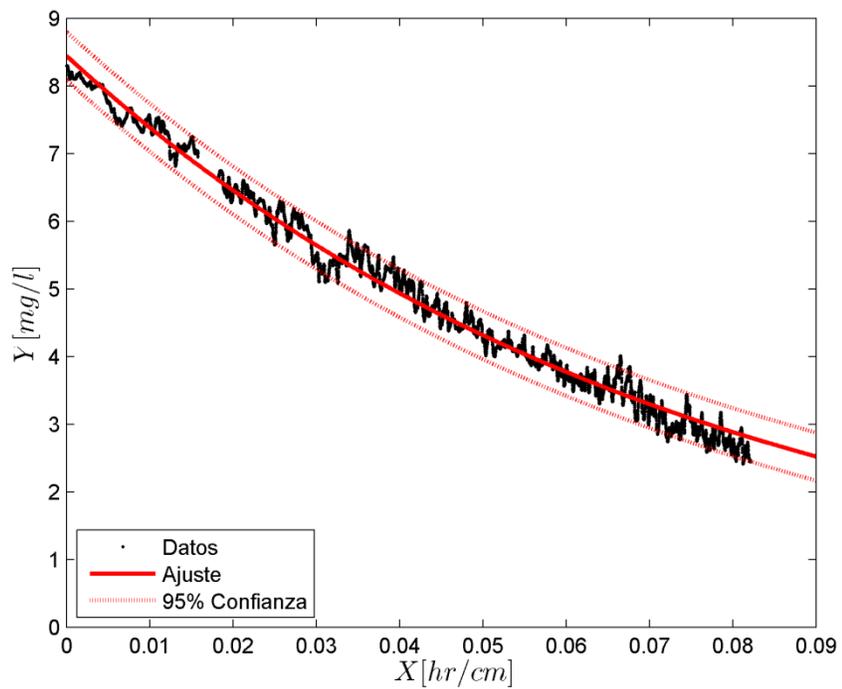


Figura C.11. VOF3H2

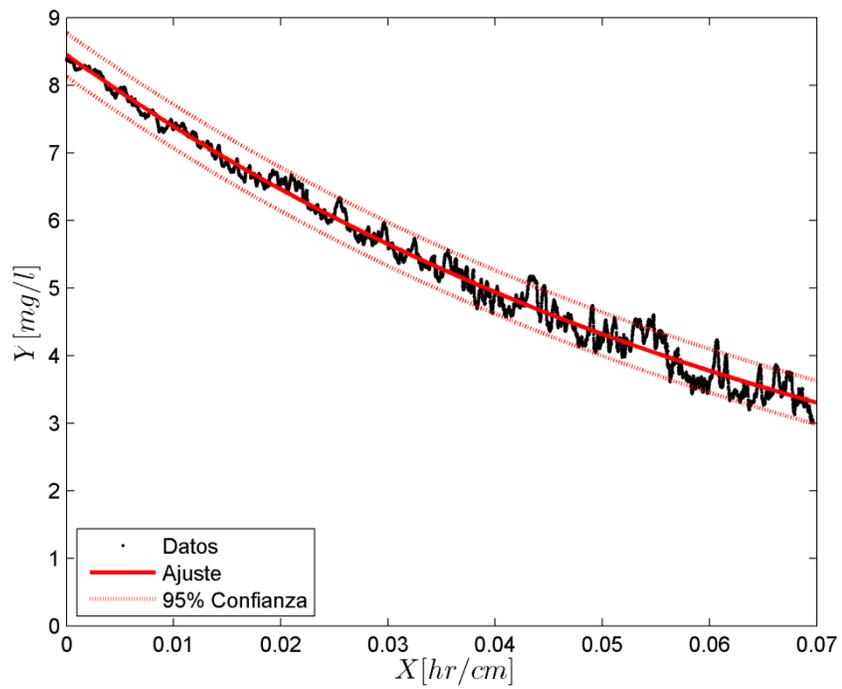


Figura C.12. VOF3H3

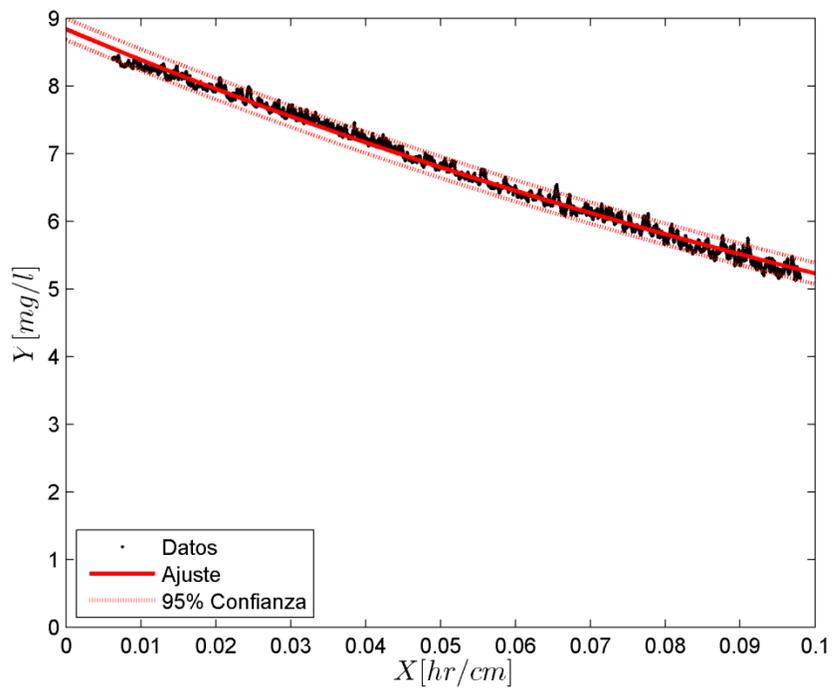


Figura C.13. V1F1H1

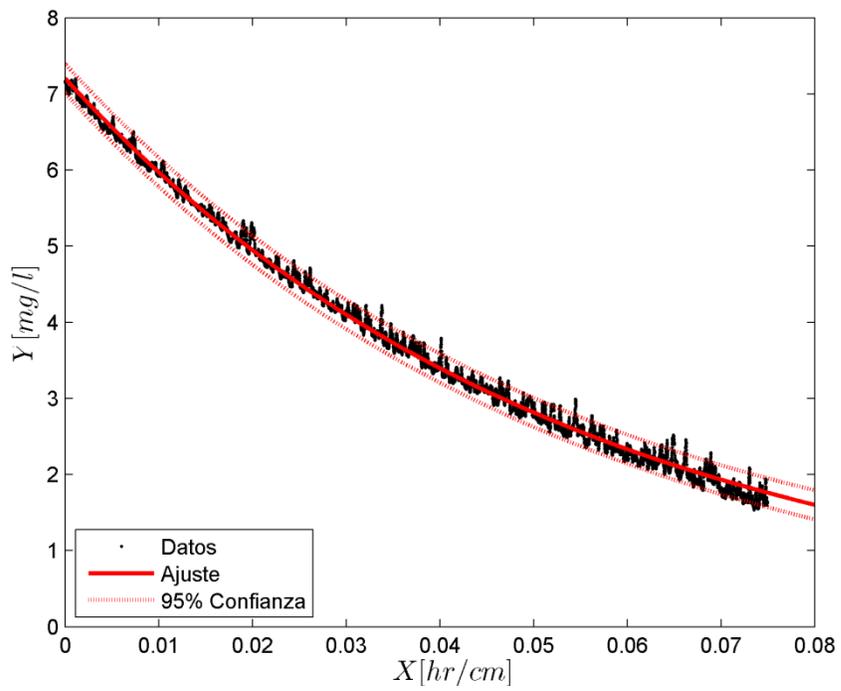


Figura C.14. V2F1H1

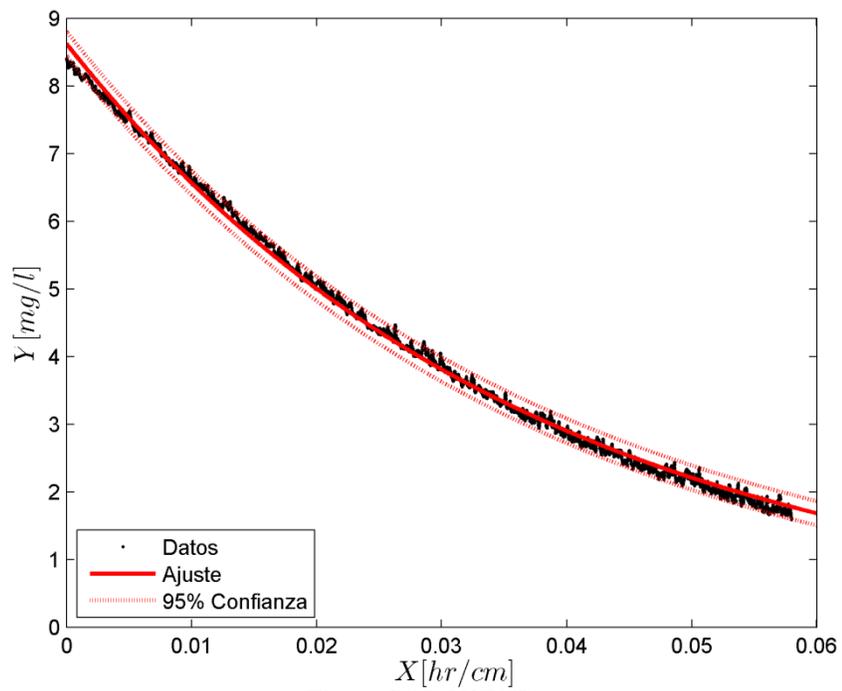


Figura C.15. V3F1H1

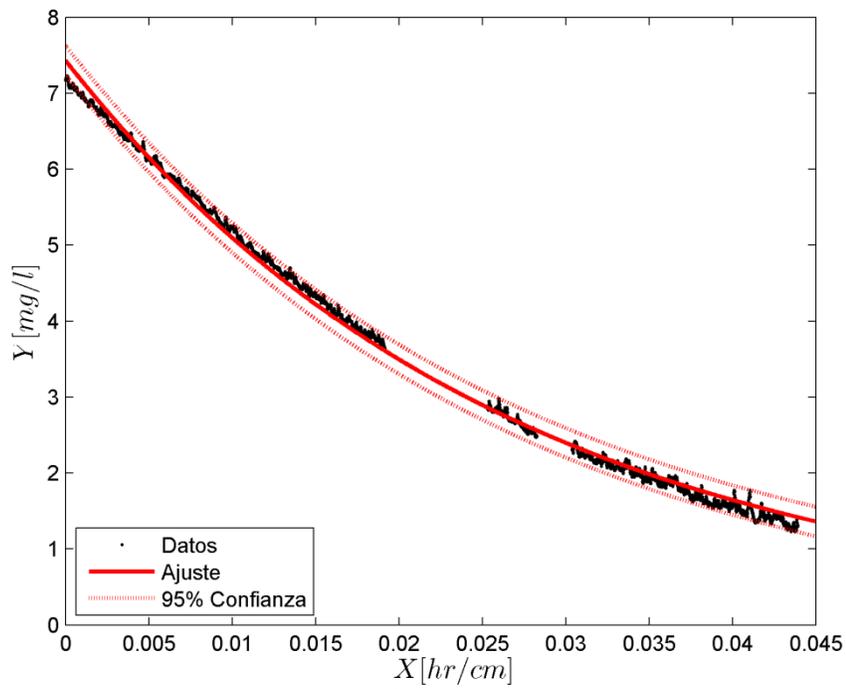
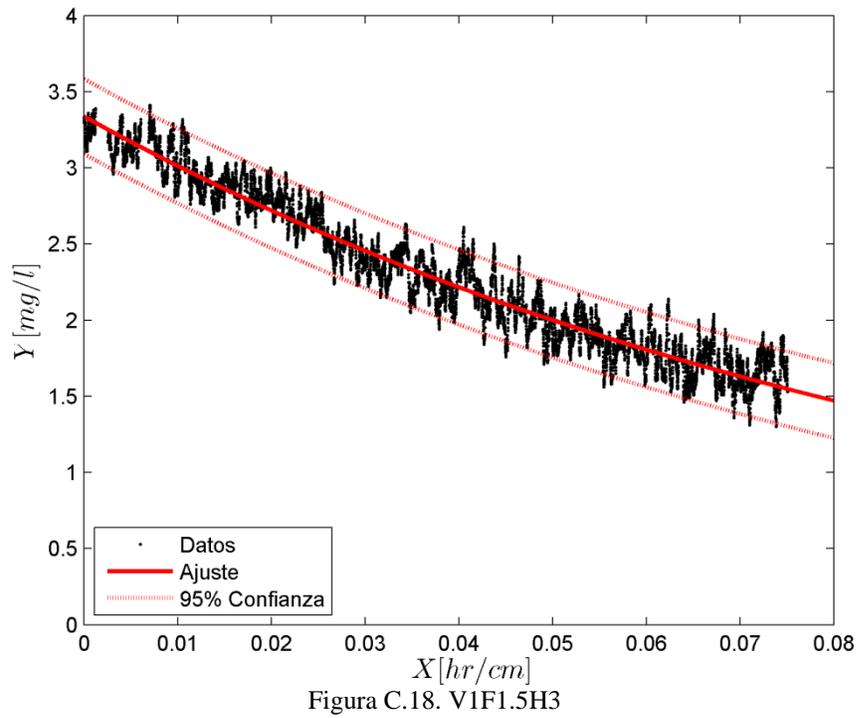
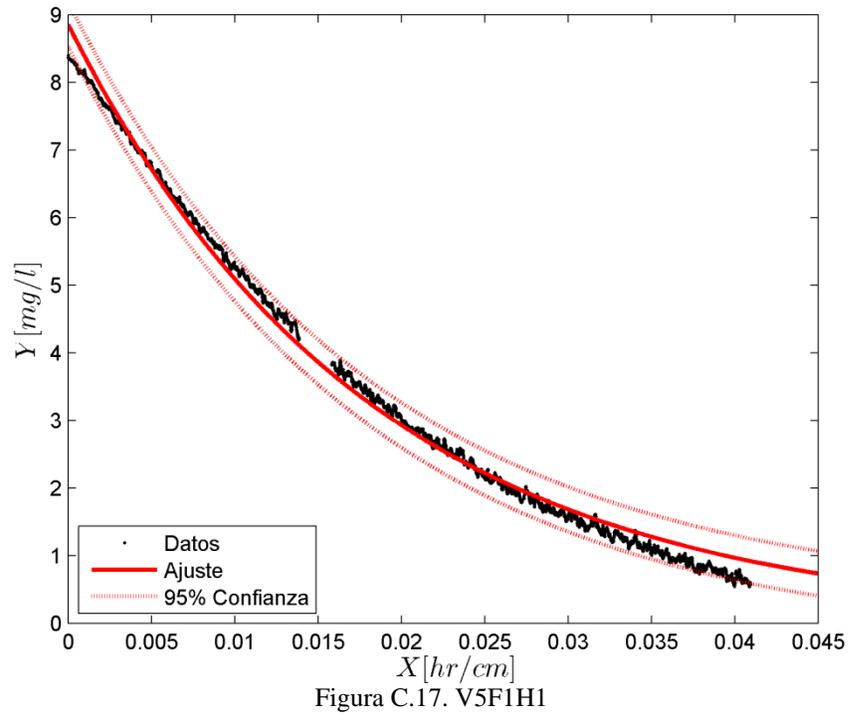


Figura C.16. V4F1H1



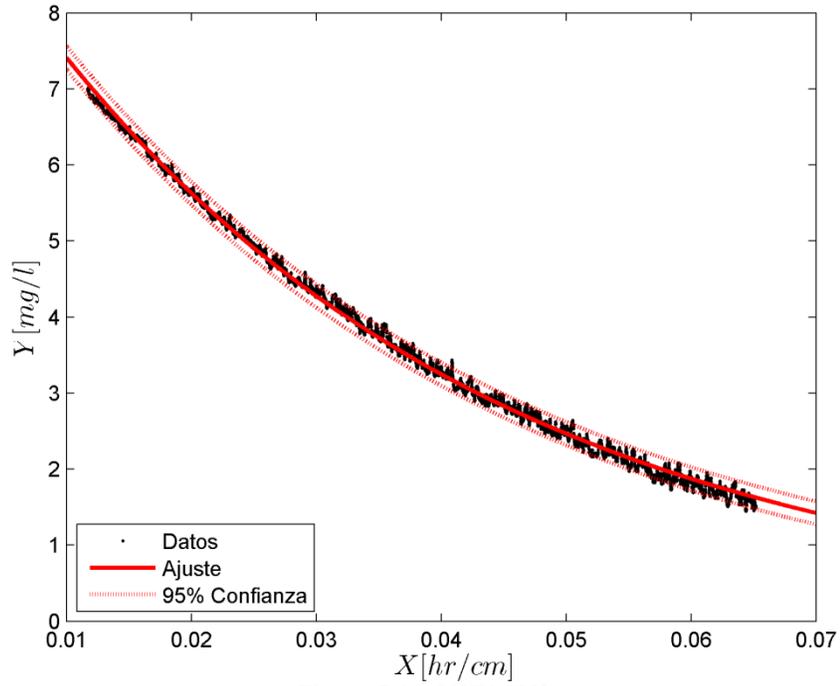


Figura C.19. V3F1.5H3

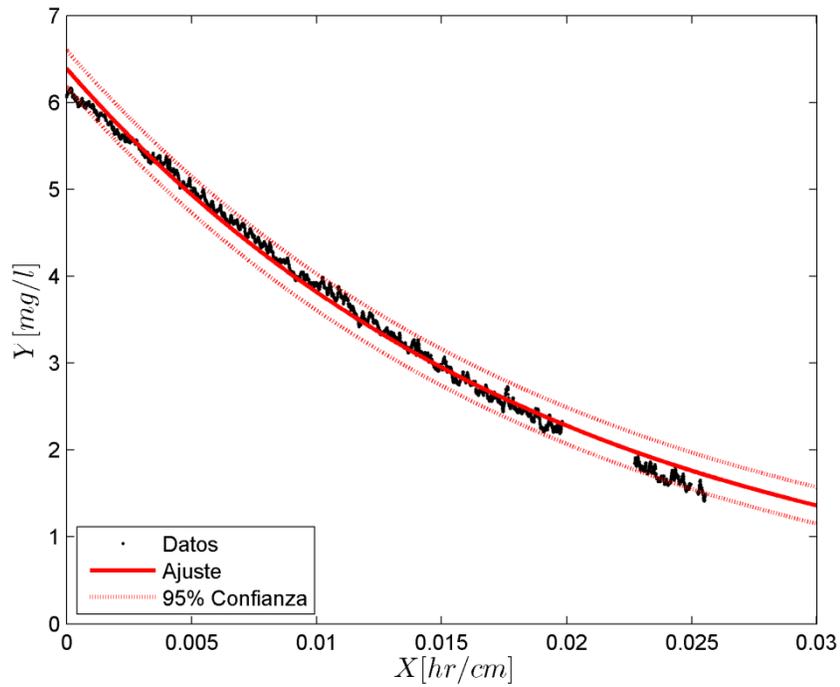


Figura C.20. V5F1.5H3

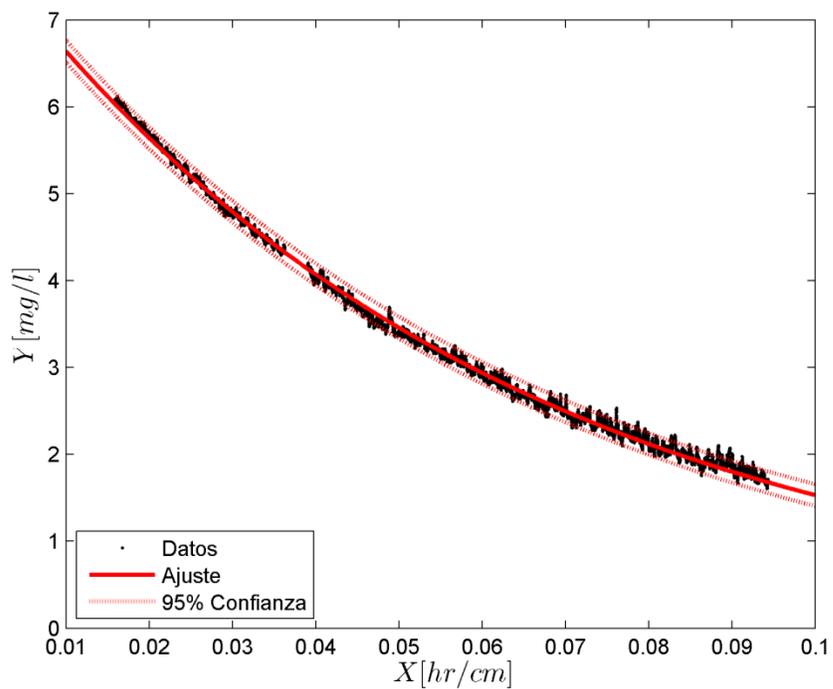


Figura C.21. V1F1.5H4

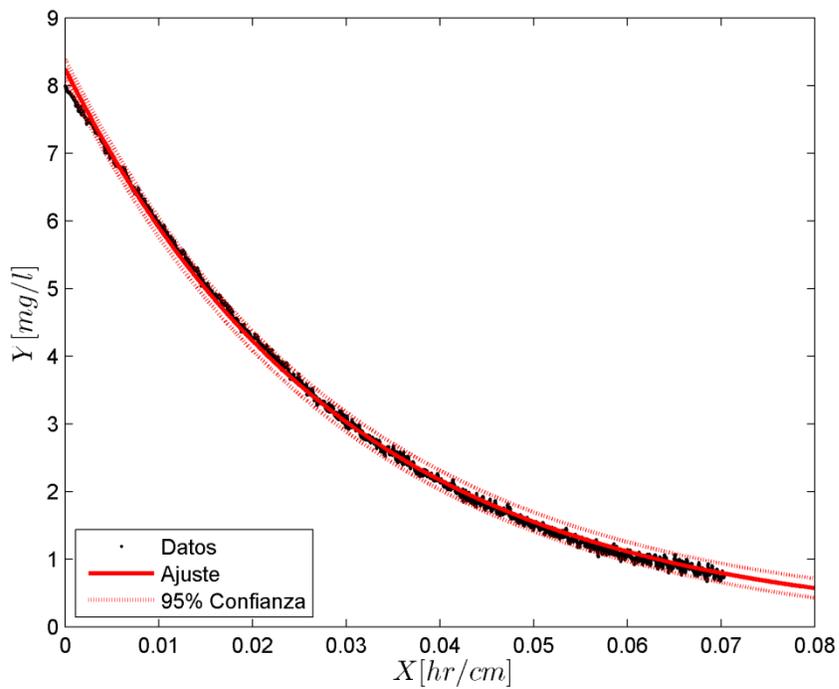


Figura C.22. V3F1.5H4

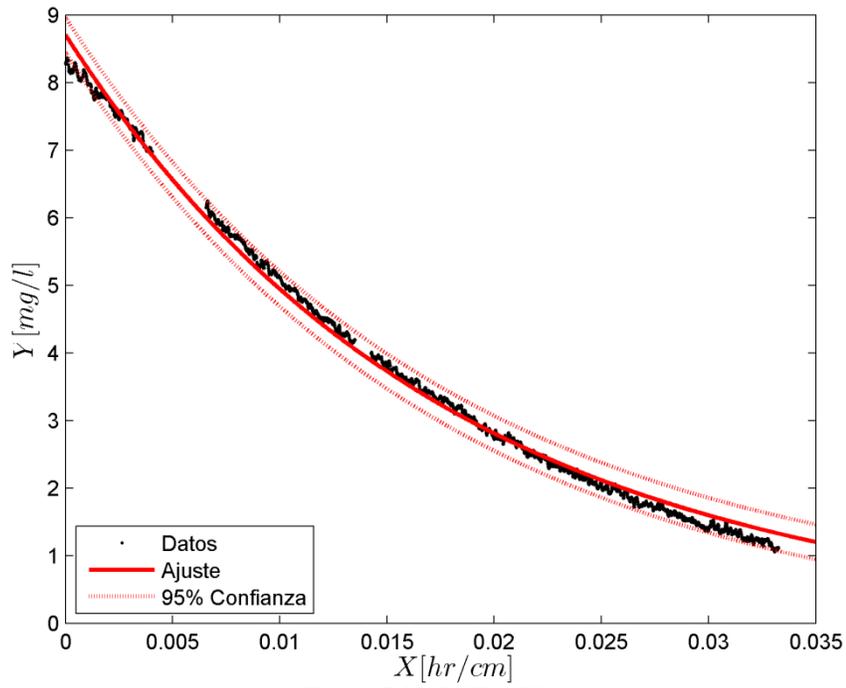


Figura C.23. V5F1.5H4

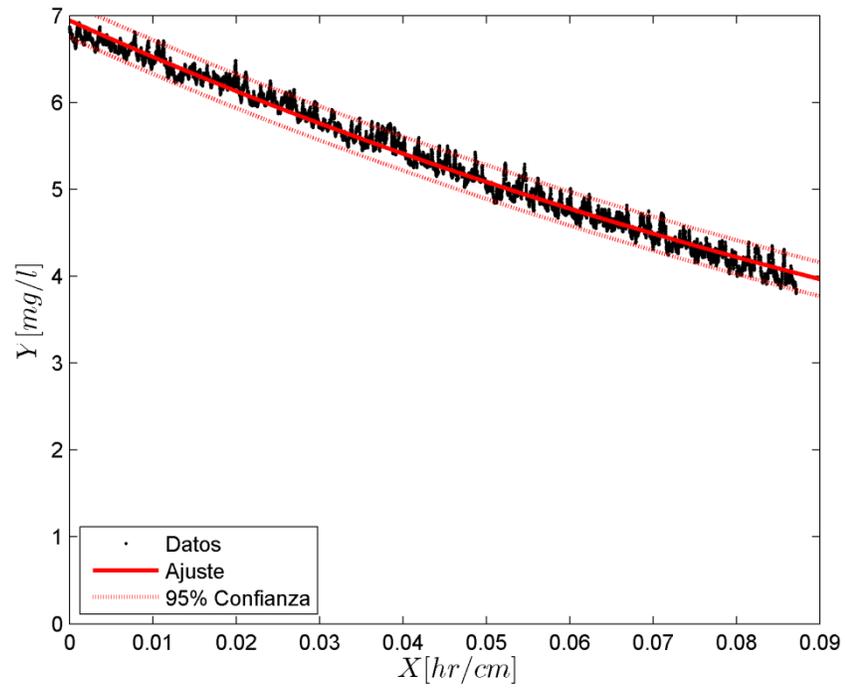


Figura C.24. V1F2H1

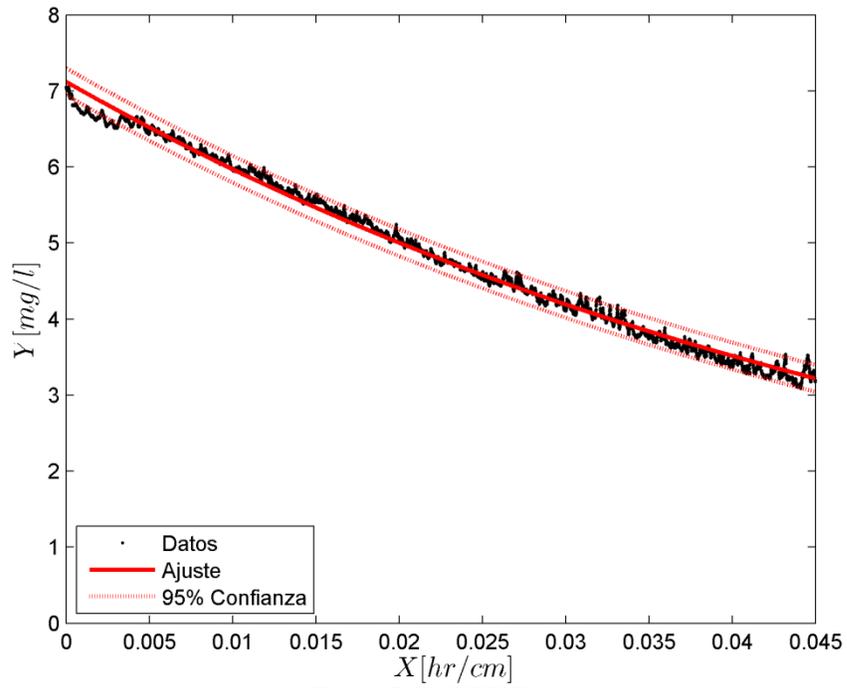


Figura C.25. V2F2H1

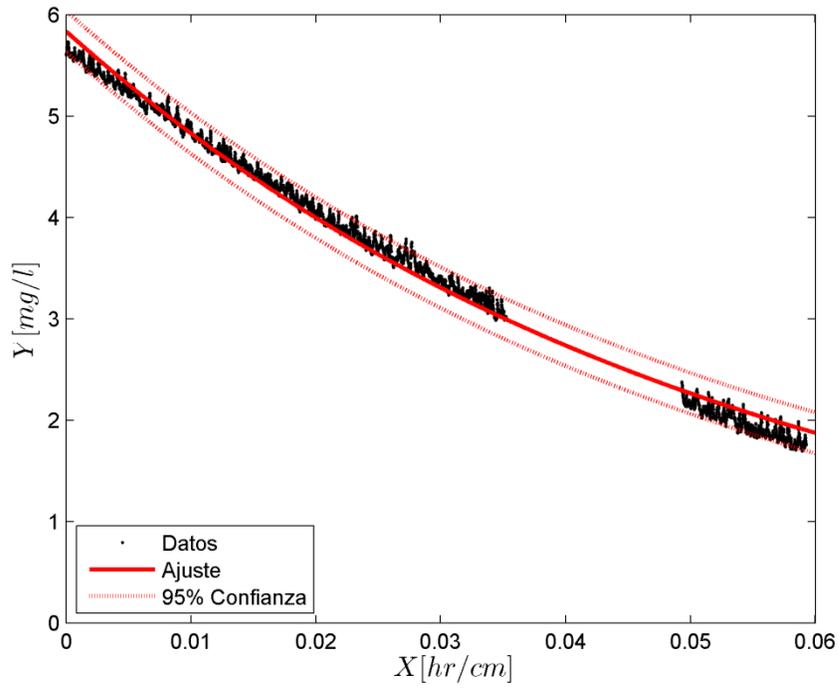


Figura C.26. V3F2H1

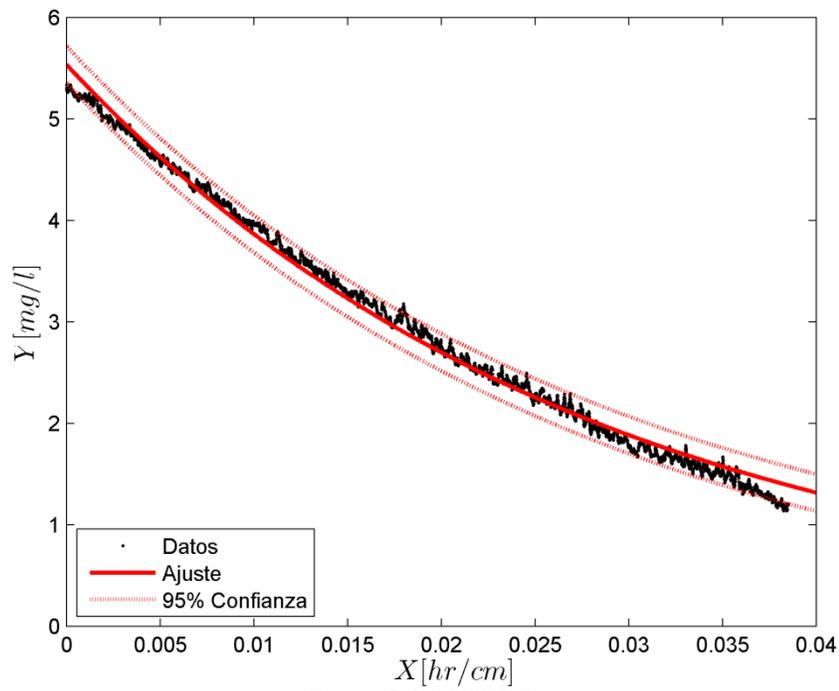


Figura C.27. V4F2H1

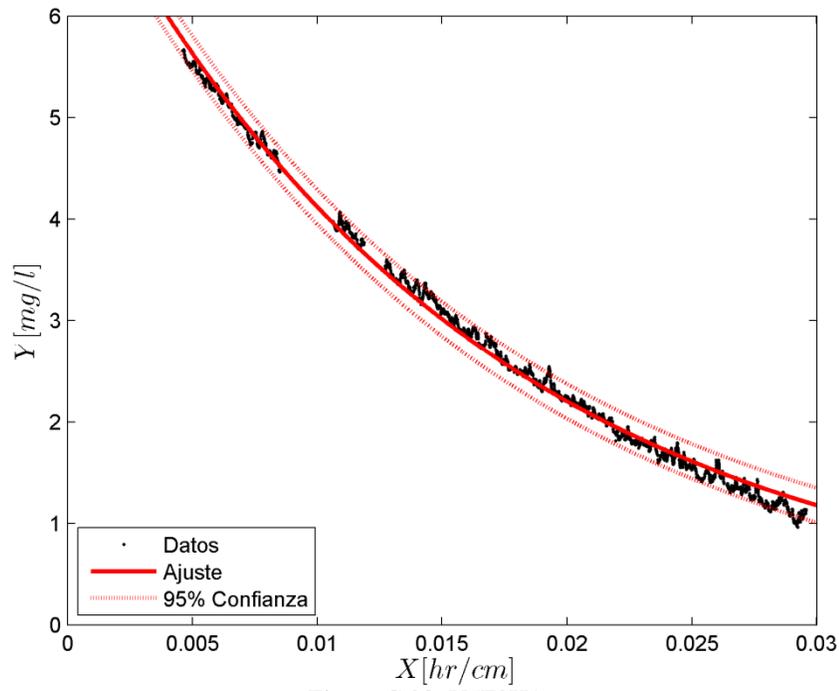


Figura C.28. V5F2H1

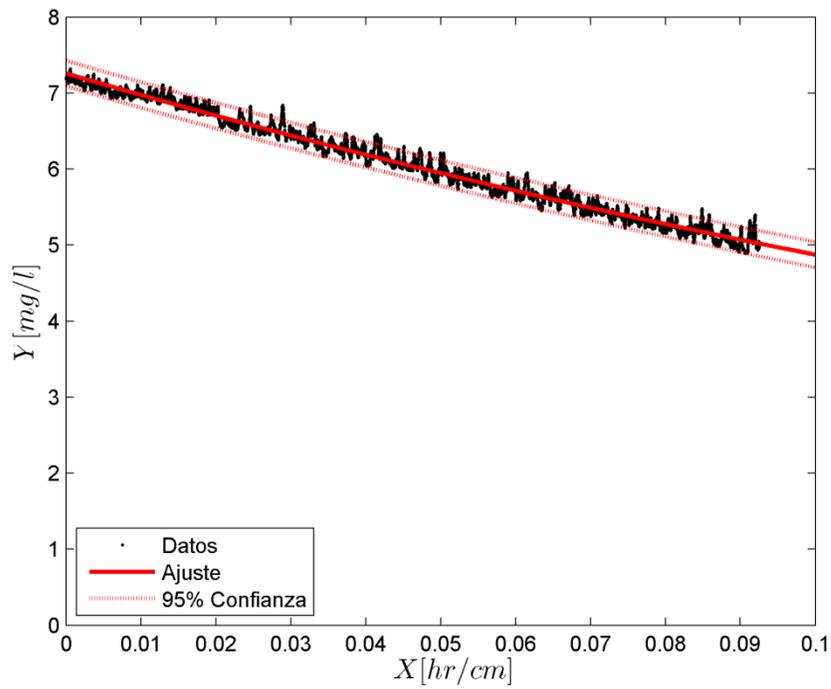


Figura C.29. V1F3H1

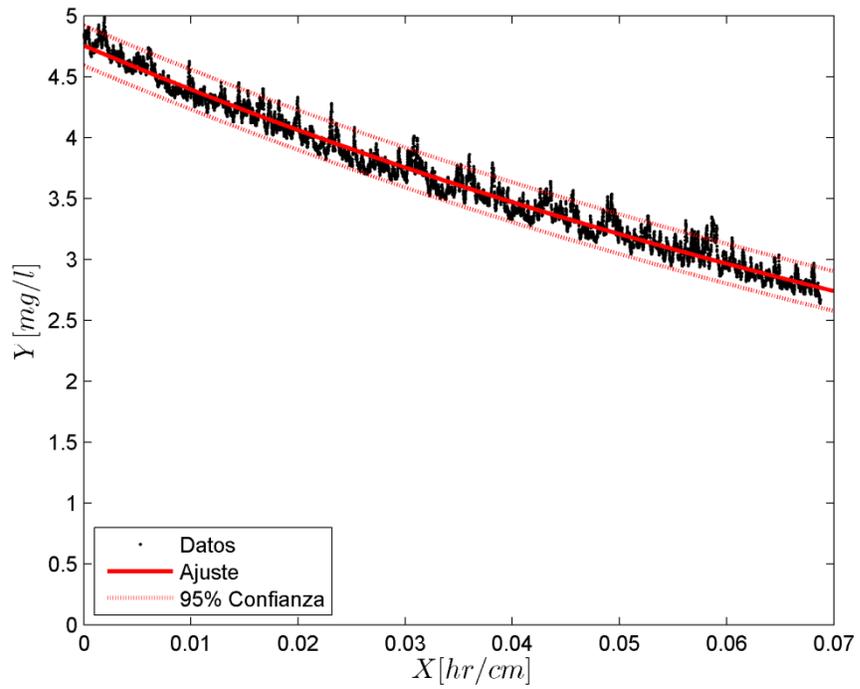


Figura C.30. V2F3H1

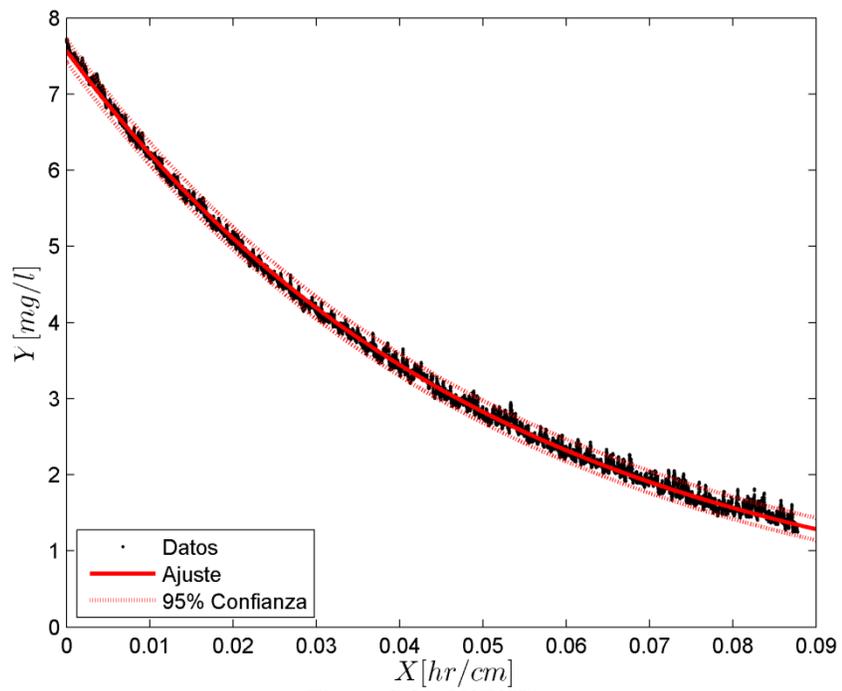


Figura C.31. V3F3H1

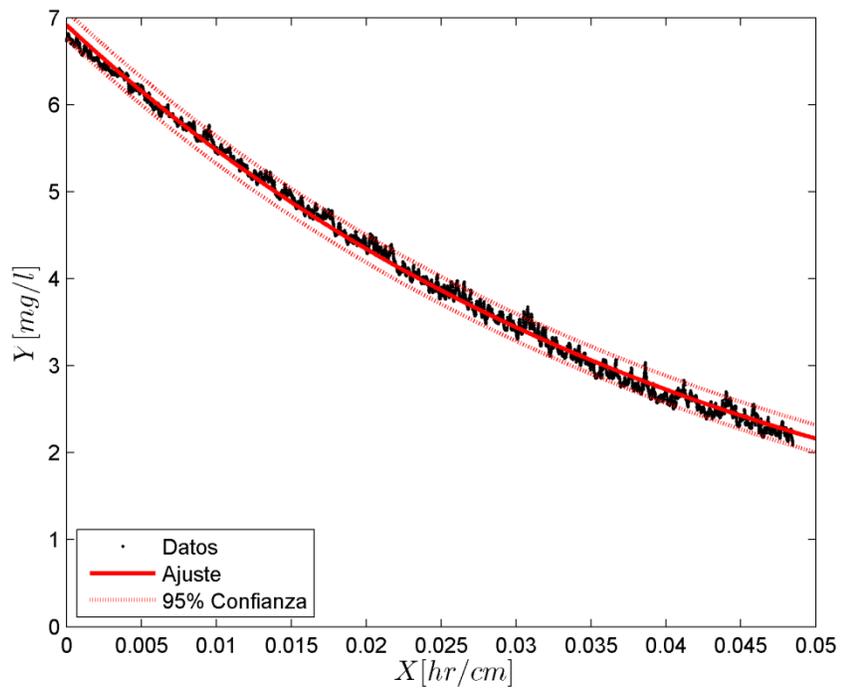


Figura C.32. V4F3H1

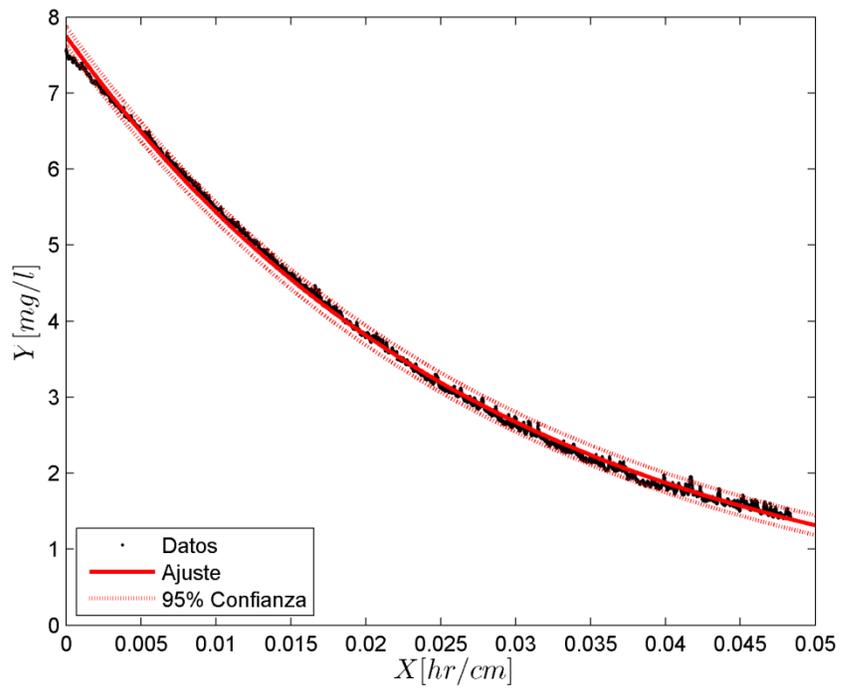


Figura C.33. V5F3H1

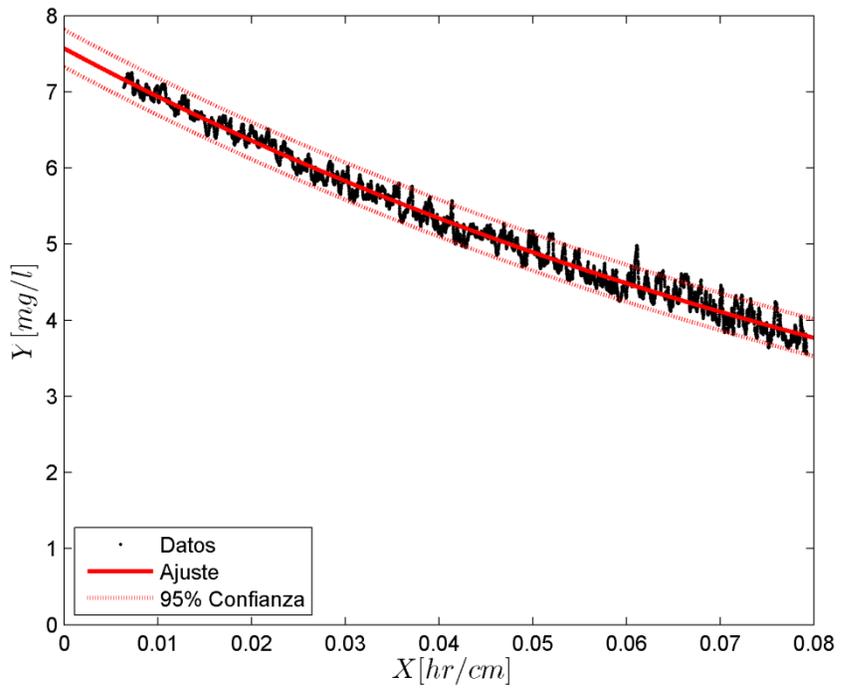


Figura C.34. V1F3H2

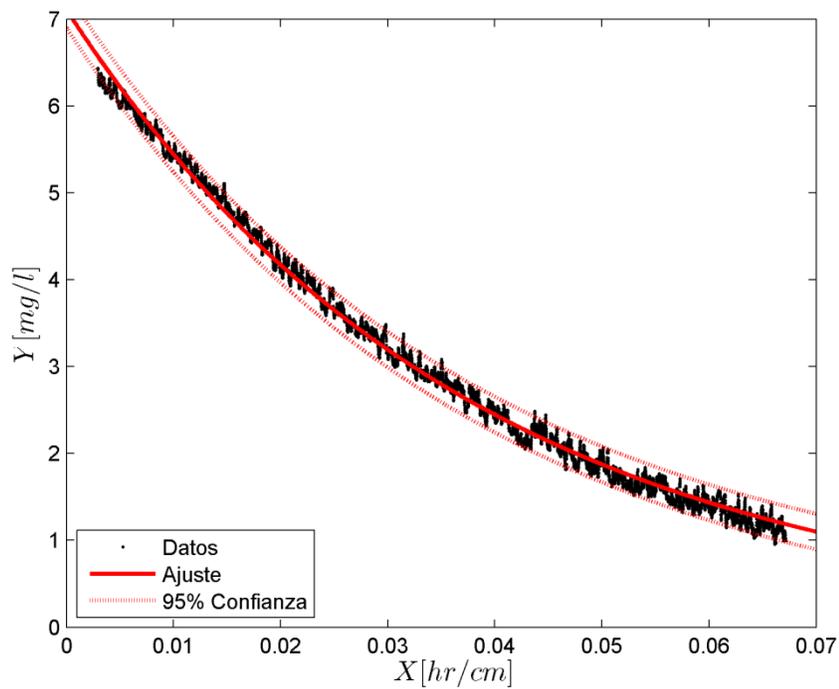


Figura C.35. V3F3H2

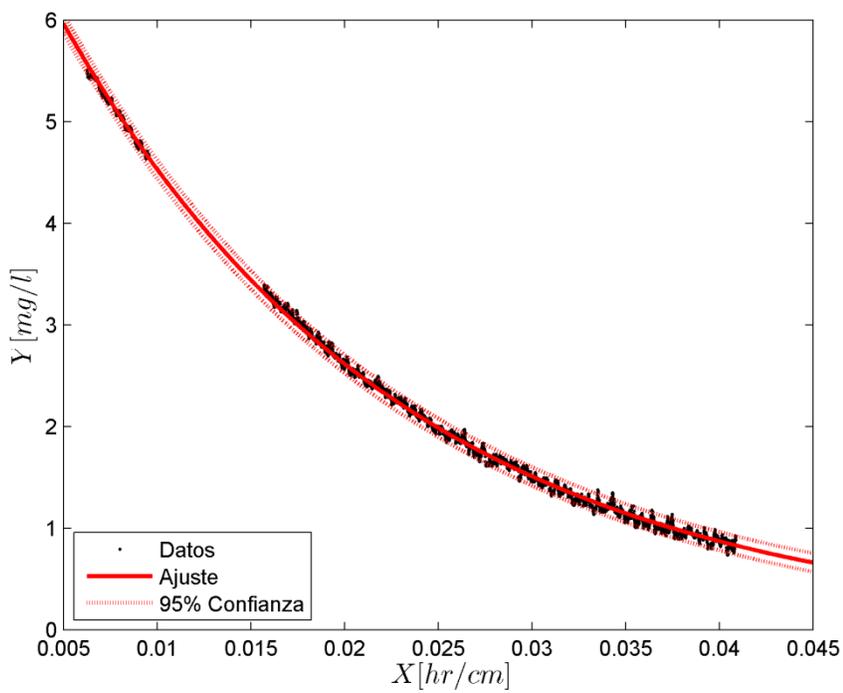


Figura C.36. V5F3H2

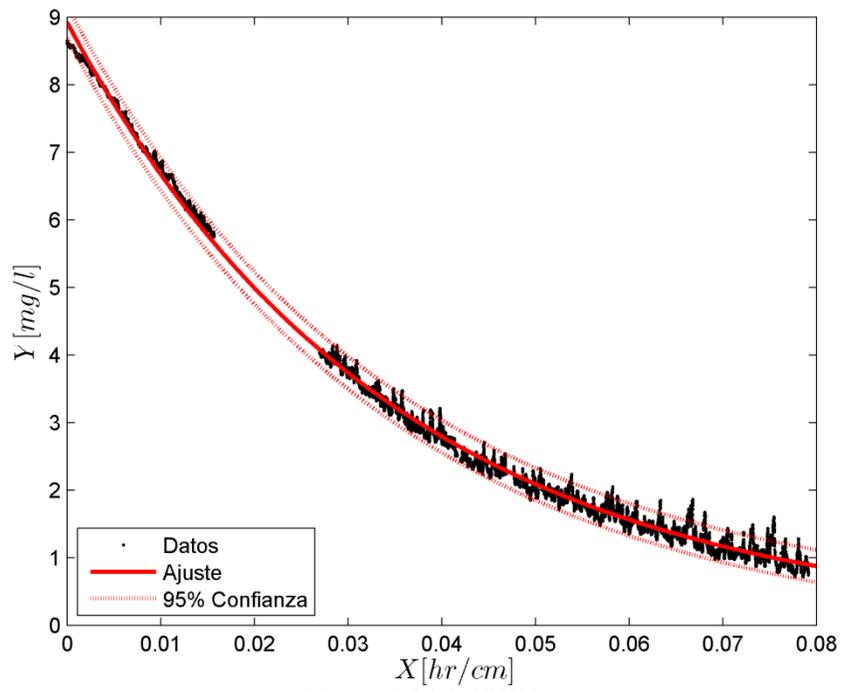


Figura C.37. V1F3H3

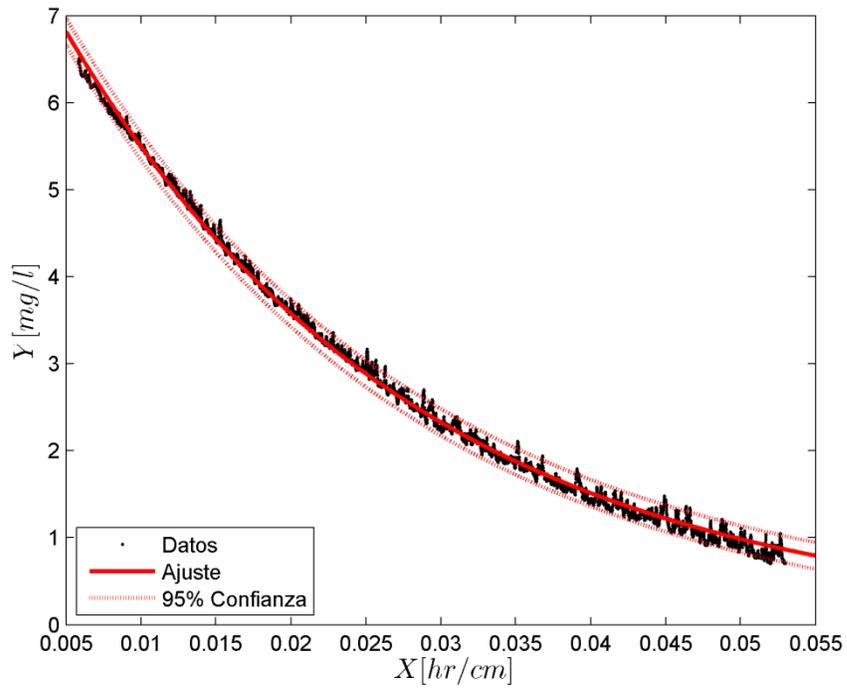


Figura C.38. V3F3H3

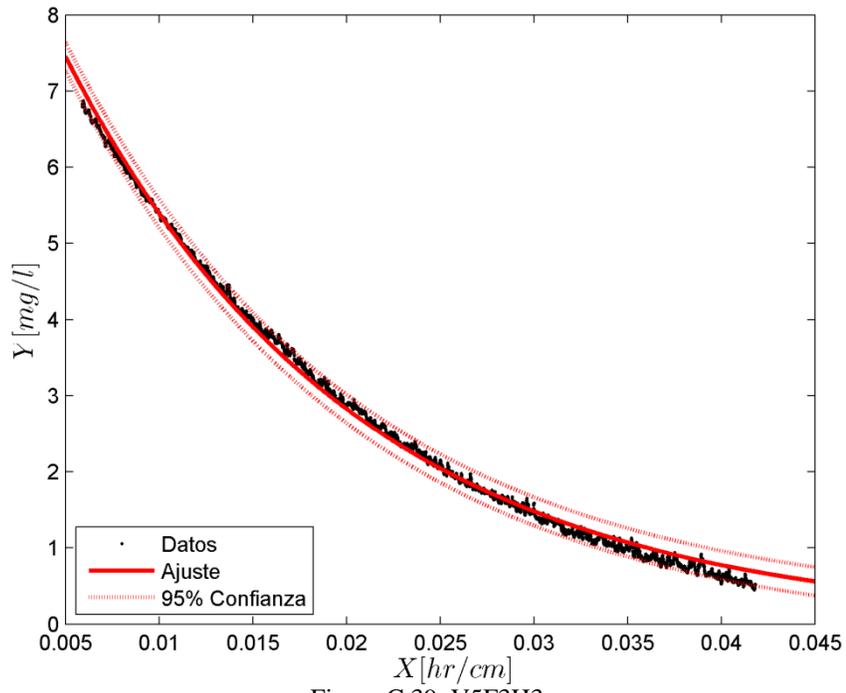


Figura C.39. V5F3H3