



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

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
UTILIZANDO UNA CÁMARA BÉNTICA PARA LA MEDICIÓN DEL CONSUMO DE
OXÍGENO EN SEDIMENTOS CON CONTENIDO ORGÁNICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA DEL MAR BUSTOS MIRANDA

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARÍA FERNANDA BALADRÓN MANRÍQUEZ
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERA CIVIL
POR: MARÍA DEL MAR BUSTOS MIRANDA
FECHA: 09/05/2012
PROF. GUIA: SR. ALBERTO DE LA FUENTE
STRANGER

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL UTILIZANDO UNA CÁMARA BÉNTICA PARA LA MEDICIÓN DEL CONSUMO DE OXÍGENO EN SEDIMENTOS”

El intercambio de oxígeno disuelto (OD) en la capa de contacto entre el agua y los sedimentos en el fondo de sistemas lénticos responde principalmente al consumo de OD hecho por los sedimentos (SOD), debido a la acción microbiana y procesos químicos, y al mecanismo de transporte de oxígeno entre el agua y los sedimentos. Como parte del proyecto FONDECYT 11100306 “Couplingwater- and sediment-sides perspectives for quantifying dissolved oxygen exchanges across the water-sediment interface in an extremely shallow flow energized by the wind”, se diseñó y construyó una cámara béntica que permite medir el consumo de OD por parte del sedimento del fondo de sistemas acuáticos, y su relación con la velocidad del fluido en contacto con éste. Además, se definió una metodología experimental y de análisis de datos, que primero estima el valor del flujo de oxígeno desde el agua a los sedimentos a partir de cambios temporales de OD ($|J_s|$), y posteriormente calcula el valor del coeficiente de transferencia de masa (k_t) y coeficiente de caracterización del sedimento (S). S agrupa los valores de la tasa de consumo bioquímico de OD en los sedimentos (r), el coeficiente de difusión molecular de oxígeno en sedimento (D_s) y la porosidad del sedimento (ϕ).

La cámara diseñada es de tipo batch, con recirculación de agua, impulsada por una bomba sellada. La velocidad del flujo de agua es regulable mediante válvulas, y el caudal se mide directamente con un flujómetro. Para las muestras se utilizan testigos de sedimento tomados por medio de un contenedor especialmente diseñado para conectarse a la cámara béntica. Y se implementó un estanque de refrigeración que amortigua los cambios de temperatura del agua producto de variaciones de la temperatura ambiente.

Se realizaron ensayos de medición del OD en dos tipos de sedimentos provenientes de la laguna Carén y laguna de Aculeo ubicadas en la Región Metropolitana, para revisar el funcionamiento de la cámara béntica. Se analizó el funcionamiento de la cámara para: i) distintas velocidades promedio del agua de la cámara béntica, ii) distintos tiempos de acondicionamiento de las muestras, iii) condición de luz y oscuridad del sistema, iv) disminución de la temperatura, y v) condición de entrada de oxígeno atmosférico a la cámara. Se identificó que para obtener resultados correctos se debe: evitar filtración de oxígeno y utilizar una velocidad del flujo que evite resuspensión de las muestras de sedimento. La metodología de cálculo de los parámetros k_t y S permitió obtener valores de r dentro de lo esperado en relación con otros estudios (30 a 70 $\text{g/m}^3/\text{día}$) y el error cuadrático medio entre las curvas $|J_s|$ obtenidas con los datos de OD medidos dentro de la cámara y las curvas obtenidas con el ajuste de los parámetros k_t y S , fue del orden de 4 $\text{g/m}^2/\text{día}$. No se obtuvo relación una entre el tiempo de acondicionamiento y $|J_s|$, pero si se encontró una relación lineal entre k_t y la velocidad de flujo del fluido.

A mis padres y abuelos

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, mis padres y hermanos, que estuvieron en los momentos más difíciles y siempre me mostraron un apoyo incondicional. A mi Gabriel, por hacerme sentir la dicha y la ternura que sólo la infancia puede dar, alegrando mis días con sus travesuras.

Muchas gracias a mis queridos amigos, que con su alegría y entusiasmo hicieron de mi estadía en Beauchef una increíble experiencia. Especialmente a Miguel, Diego, Xime, Sandra, Javier, Daniel, Carlos, Andrés, Max y Victoria. Valeria y Paulina, les agradezco sus buenos consejos siempre tan oportunos. A los chicos de la Pastoral de Ingeniería. Y también a mis amigos fuera de Beauchef que me obligaron a tener vida de vez en cuando, gracias Germán, Naty y Leo.

A Manuel del laboratorio de hidráulica, a Vivi y Eduardo del laboratorio de calidad del agua, que sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible. A mis profesores por su ayuda y buena voluntad para responder a todas mis dudas. Especialmente a Alberto y Fernanda.

Al Club de Regata Aculeo, especialmente a Manuel Reyes y Javier Pérez, por darme todas las facilidades para realizar la experimentación de este trabajo.

Agradezco también el financiamiento del proyecto FONDECYT 11100306, que permitió llevar a cabo este trabajo.

Y finalmente agradezco a mi compañero de aventuras y desventuras, de fantasías y locuras. Espero que sigamos viviendo historias juntos por mucho tiempo más.

Índice de Contenidos

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodología	3
1.3.1	Revisión bibliográfica	3
1.3.2	Diseño de la Cámara Béntica.....	3
1.3.3	Construcción de la Cámara Béntica.....	3
1.3.4	Campañas de muestreo y realización de los experimentos	4
1.3.5	Diseño de la metodología experimental y de análisis de datos.	4
2	Marco teórico	5
2.1	Mecanismos de transporte de oxígeno	5
2.2	Principales factores que afectan el consumo de oxígeno por el sedimento	9
2.3	Implementaciones de cámaras bénticas realizadas en estudios similares	12
2.3.1	Sistema de flujo continuo con agitador	12
2.3.2	Sistema de canal rectangular con instalación de recirculación.....	14
2.3.3	Sistema con cerrado y muestras inalteradas	15
2.3.4	Sistema combinado canal rectangular con muestra inalterada de sedimentos ...	16
3	Descripción del estudio experimental	17
3.1	Instalación experimental	17
3.1.1	Diseño de la instalación	17
3.1.2	Descripción de la Instalación.....	18
3.2	Toma de muestras	22
3.2.1	Contenido de materia orgánica en las muestras.....	23
3.3	Procedimiento experimental	26
3.3.1	Instalación de muestra de sedimento y llenado de la cámara.	26
3.3.2	Periodo de acondicionamiento.....	27
3.3.3	Pruebas realizadas.....	27
4	Metodología de cálculo de parámetros.....	29
4.1	Cálculo del flujo de oxígeno hacia los sedimentos, $ J_S $	29
4.2	Ajuste de los datos experimentales de $C_{\infty}(t)$	29
4.3	Sensibilidad del flujo de oxígeno $ J_S $ con respecto a los parámetros S y k_t	31

5	Presentación y Análisis de Resultados	33
5.1	Pruebas de entrada de oxígeno a la cámara	33
5.2	Respuesta a distintos tiempos de acondicionamiento	34
5.3	Respuesta al uso del estanque amortiguador de temperatura.....	40
5.4	Pruebas en muestras con distintos grados de materia orgánica	44
5.5	Efecto de la velocidad del flujo de agua	47
5.6	Inconsistencia experimental en respuesta de la exposición a la luz.....	53
6	Conclusiones y Recomendaciones	55
7	Referencias	57

Índice de tablas

Tabla 3.1.	Diseño de las dimensiones de la cámara	18
Tabla 3.2	Pruebas de DQO realizadas a los sedimentos de la laguna de Aculeo y laguna Carén.	25
Tabla 3.3.	Resumen de pruebas realizadas	28
Tabla 5.1	Ajuste a las curvas de $C_{\infty}(t)$ en cada prueba de acondicionamiento para obtener el valor de k_t	35
Tabla 5.2	Cálculos del parámetro S en prueba con 0 horas de acondicionamiento.	35
Tabla 5.3	Cálculos del parámetro S en prueba con 3 horas de acondicionamiento.	36
Tabla 5.4	Cálculos del parámetro S en prueba con 6 horas de acondicionamiento.	36
Tabla 5.5	Cálculos del parámetro S en prueba con 9 horas de acondicionamiento.	37
Tabla 5.6.	Parámetros S y flujo Js en pruebas de tiempo de acondicionamiento.	38
Tabla 5.7	Temperatura extremas en pruebas realizadas con y sin estanque de amortiguación.	40
Tabla 5.8	Oscilación térmica promedio de las pruebas realizadas con y sin estanque de amortiguación.	40
Tabla 5.9	Datos temperatura de las pruebas con estanque de amortiguación, sin estanque de amortiguación.	41
Tabla 5.10.	Datos temperatura de las pruebas con estanque de amortiguación con uso de hielo en muestras de la laguna de Carén.....	42
Tabla 5.11	Tasa de transferencia de masa, k_t , de las pruebas de temperatura	43
Tabla 5.12.	Valores del parámetro S, r y del flujo Js	43
Tabla 5.13	Tasa de transferencia de masa, k_t , en distintos tipos de sedimento.....	44
Tabla 5.14	Valores del parámetro S, r y del flujo Js	45
Tabla 5.15	Tasa de transferencia de masa, k_t , a distintas velocidades de flujo de agua	48
Tabla 5.16	Cálculos del parámetro S en prueba con caudal de 1 L/min	48
Tabla 5.17	Cálculos del parámetro S en prueba con caudal de 2 L/min	49
Tabla 5.18	Cálculos del parámetro S en prueba con caudal de 3 L/min	49

Tabla 5.19 Parámetros S y r obtenidos en pruebas de velocidad.	50
Tabla 5.20 Tasa de transferencia de masa en pruebas de luz.	53
Tabla 5.21 Valores del parámetro S , r y del flujo $ J_s $	54

1 Introducción

1.1 Motivación

Uno de los factores ambientales más importantes en los sistemas acuáticos es el oxígeno disuelto (OD). El conocimiento de los niveles de OD que hay en el agua permite modelar y estimar como cambiará la calidad del agua de un ecosistema acuático como por ejemplo lagos, embalses y bofedales. Distintos niveles oxígeno, en conjunto con otras variables como nutrientes, condicionan las especies que pueden desarrollarse afectando la diversidad del ecosistema (Wetzel, 1981). Es por esto que conocer cómo evolucionan los niveles de oxígeno en estos sistemas es muy relevante.

La principal motivación del presente trabajo de título es conocer la forma en que se comportan los sistemas ambientales acuáticos en su forma natural, sus principales componentes y la forma en que interactúan. Este conocimiento permitirá a futuro el desarrollo de tecnologías para predecir su comportamiento cuando se alteran sus condiciones originales.

El trabajo de memoria que se realizará forma parte del proyecto FONDECYT de iniciación #11100306 “Coupling water- and sediment-sides perspectives for quantifying dissolved oxygen exchanges across the water- sediment interface in an extremely shallow flow energized by the wind”, que lleva a cabo el profesor Alberto de la Fuente¹. El objetivo de este proyecto de investigación es realizar un balance de OD en pequeñas lagunas de agua formadas por afloramientos de agua subterránea llamadas vegas o bofedales, que se encuentran ubicadas en la región del altiplano chileno, y para llevar a cabo este balance de OD se debe cuantificar cada uno de los agentes que intervienen; tales como (Inoue & Nakamura, 2009):

- Intercambio de oxígeno entre la atmósfera y el agua,
- OD transportado por el flujo de agua entrante y por el flujo de agua saliente
- Mecanismos de transporte de oxígeno en la columna de agua,
- Producción de oxígeno por organismos fotosintéticos,
- Consumo de OD por la materia orgánica disuelta y organismos de la columna de agua, y
- Consumo por parte de los sedimentos del fondo.

¹ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER. Ing. Civil (U. de Chile), Ph. D. (U. de Chile). Profesor, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Física y Matemáticas, U.de Chile.

En la Figura 1.1, se esquematizan los intercambios de oxígeno que ocurren en los sistemas acuáticos.

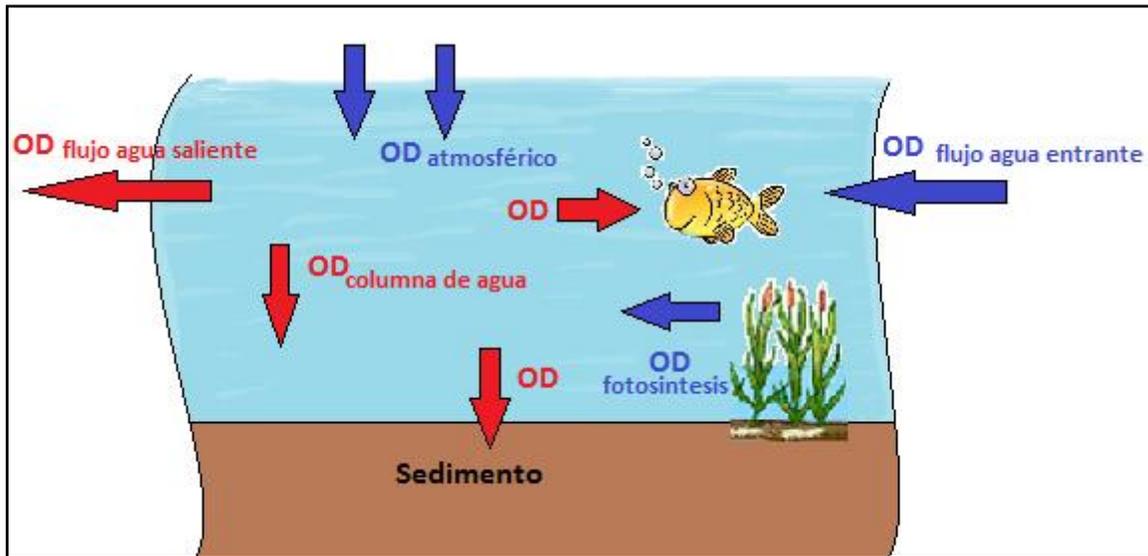


Figura 1.1 Intercambio de OD en sistemas acuáticos. En rojo se presentan los consumos y salidas de OD, y en azul las fuentes de entrada de OD al sistema.

La estimación del oxígeno que se consume en el sedimento es parte fundamental para el desarrollo de un modelo con el que se pueda representar la evolución temporal y espacial de los niveles de OD en un sistema ambiental.

Se han realizado estudios en los que el consumo de OD en sedimentos se determina experimentalmente (Inoue & Nakamura, 2009; Miller-Way & Twilley 1996; Yew-Hoong & Padma, 2010). Estos experimentos se realizan midiendo la concentración de OD en una cámara cerrada, de modo que no ingrese oxígeno desde el exterior, llena de agua con muestras de sedimento en su fondo. Se somete al sedimento a una velocidad del agua conocida, hasta que la mayor parte del OD en el agua sea consumido por el sedimento. Sin embargo, la tasa de consumo de oxígeno medida es representativa de las condiciones del flujo dentro de la cámara cerrada, y no necesariamente del flujo en el sistema natural, por lo que es necesario desarrollar una metodología de análisis que permita medir, separadamente, los parámetros del transporte de masa dentro de la cámara y los parámetros de consumo de oxígeno en la muestra de sedimentos.

Este trabajo, como parte del proyecto FONDECYT descrito, se enfocará en diseñar y construir un sistema que permita cuantificar la cantidad de OD consumido por el sedimento, a través de los parámetros de consumo de oxígeno en los sedimentos.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

Construir una instalación experimental que permita medir el consumo de OD por parte de los sedimentos del fondo de sistemas acuáticos, de modo de medir este consumo en bofedales. La instalación experimental deberá considerar la relación del consumo de OD con la velocidad del flujo de agua sobre él.

Objetivos específicos:

- Diseñar y construir una cámara béntica para la medición del consumo de OD de una muestra de sedimento expuesto a diferentes velocidades del flujo de agua.
- Diseñar e implementar una metodología experimental y análisis de datos que permita obtener los parámetros de consumo de oxígeno por los sedimentos de sistemas acuáticos. En particular los coeficientes de caracterización del sedimento independientes de la velocidad del flujo.

1.3 Metodología

Para completar los objetivos del trabajo se realizarán las siguientes actividades.

1.3.1 Revisión bibliográfica

Se investigó sobre los mecanismos por los cuales se transporta el oxígeno disuelto en la columna de agua y en la interfaz agua sedimento, y también los principales factores que afectan el consumo de oxígeno por el sedimento, de modo de ver cuales interfieren o podrían interferir en el experimento. Además se recopiló información sobre implementaciones experimentales de cámaras bénticas realizadas en estudios similares previos.

1.3.2 Diseño de la Cámara Béntica.

Se realizó el diseño la cámara béntica que se utilizó como instalación experimental. Para esto se determinó cuáles de los factores encontrados en la revisión bibliográfica se deben controlar y cuáles se deben aplacar de modo de eliminar interferencias en las mediciones.

1.3.3 Construcción de la Cámara Béntica

El diseño elaborado se construyó utilizando recursos del laboratorio de hidráulica Francisco Javier Domínguez del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Los dineros utilizados para la obtención de los materiales requeridos provinieron de los fondos del proyecto FONDECYT antes mencionado.

1.3.4 Campañas de muestreo y realización de los experimentos

Con el fin de ver el comportamiento de la cámara en muestras diferentes, se realizaron pruebas de medición de la concentración de OD en el agua al interior de la cámara béntica, utilizando muestras de sedimento extraídas de 2 lagunas de la región metropolitana, Laguna Carén y Laguna de Aculeo.

Se analizó el contenido de materia orgánica en las muestras obtenidas en la campaña. El análisis se realizó en el laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, por medio de ensayos de DQO sobre el sedimento diluido.

Las experiencias se realizaron utilizando diferentes combinaciones de los factores relevantes para el fenómeno analizado, encontrados en la revisión bibliográfica; y se llevaron a cabo en el laboratorio de hidráulica Francisco Javier Domínguez del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

1.3.5 Diseño de la metodología experimental y de análisis de datos.

Utilizando la información recopilada durante la revisión bibliográfica se diseñó la metodología a seguir para trabajar con la instalación experimental. El manejo de la instalación se perfeccionó gracias a las experiencias realizadas.

La metodología de análisis de datos se implementó en forma mixta con planillas de cálculo realizadas en el programa Excel® y el desarrollo de una rutina con código para el programa Matlab®. Los datos registrados experimentalmente, se analizaron usando estos dos recursos y se obtuvieron los valores de los parámetros de consumo de oxígeno para los sedimentos analizados.

2 Marco teórico

El intercambio de OD entre el agua y los sedimentos del fondo se puede ver afectado por diferentes factores. A continuación se describen los mecanismos de transporte de oxígeno disuelto en la interfaz agua-sedimento y algunos factores que podrían generar interferencias en la realización de los experimentos.

2.1 Mecanismos de transporte de oxígeno

El intercambio de oxígeno en un cuerpo de agua ocurre por entradas y salidas de oxígeno que se pueden identificar como OD transportado por el flujo de agua entrante, OD transportado por el flujo de agua que sale, intercambio entre agua y atmósfera, intercambio entre sedimentos y agua (Inoue & Nakamura, 2009), consumo por organismos vivos en la columna de agua y también por el ingreso de oxígeno proveniente de generación por organismos vegetales a través de la fotosíntesis.

El transporte de oxígeno ocurre tanto por advección, debido por ejemplo a las mareas, como por difusión turbulenta. El fenómeno de advección corresponde al transporte de masa que se produce debido a la acción de un campo vectorial, que en este caso es la velocidad del fluido que mueve el oxígeno de un punto a otro del cuerpo de agua (Streeter & Wylie, 1987).

Por otro lado, la difusión turbulenta se entiende como el fenómeno de transporte de alguna propiedad o de partículas debido a movimientos aleatorios. Dependiendo de la escala se tiene difusión molecular, movimiento Browniano o difusión turbulenta (del Rosario, 2005). La ley de Fick modela la difusión que se produce debido al gradiente de concentración de un compuesto en un fluido en estado estacionario, ecuación 2.1 (Gerdtzen, 2009).

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad 2.1$$

Donde D corresponde al coeficiente de difusión en el medio, C es la concentración del compuesto que se difunde y J el flujo del compuesto que se difunde en la dirección del eje z por unidad de área.

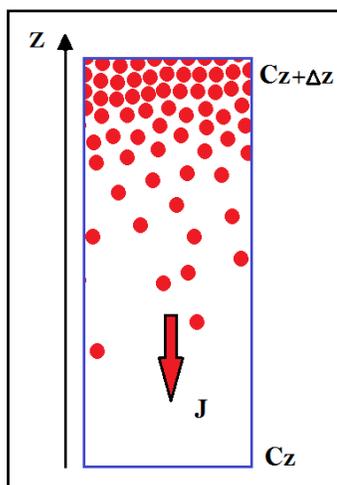


Figura 2.1 Esquema que explica la ley de Fick. El flujo del compuesto va en la dirección contraria al gradiente de concentración

Fick llegó a modelar la concentración cuando el flujo no está en estado estacionario según la expresión 2.2 (Gerdtzen, 2009).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad 2.2$$

Para modelar el consumo de oxígeno disuelto en el fondo del sistema acuático se toma como volumen de control la columna de agua, donde el flujo másico por unidad de área de oxígeno hacia el sedimento, se denota como $|J_s|$. Se hace la suposición de que $|J_s|$ corresponde sólo a la demanda de OD por parte del sedimento el que se denota SOD por su sigla en inglés (sediment oxygen demand), es decir, sin tomar en cuenta los otros intercambios de oxígeno mencionados, como las contribuciones de la atmósfera, el OD transportado por el flujo entrante de agua y la fotosíntesis.

En la interfaz agua-sedimento se puede ver el intercambio de oxígeno desde dos puntos de vista: desde el agua y desde el sedimento. Desde el punto de vista del sedimento se puede considerar que el consumo de oxígeno responde al consumo que se realiza en una serie de reacciones bioquímicas. Este consumo bioquímico se puede representar como una reacción de orden cero, con una cierta tasa de consumo y que depende de la porosidad del sedimento y del espesor de la penetración del OD en el sedimento, ecuación 2.3 (Rasmussen & Jørgensen, 1992).

$$J_s = -\delta_s \cdot r \cdot \phi \quad 2.3$$

Donde:

$|J_s|$ = Flujo de oxígeno hacia los sedimentos [$\text{g}/\text{m}^2/\text{día}$]

r = tasa de consumo de OD [$\text{g}/\text{m}^3/\text{día}$]

ϕ = porosidad del sedimento

δ_s = espesor de la penetración del OD en el sedimento [mm]

Desde la perspectiva del agua el flujo de OD hacia el sedimento corresponde al fenómeno de difusión a través de la subcapa límite difusiva (Dade, 1993; Steinberger & Hondzo, 1999; Hondzo & Steinberger, 2002; Hondzo et al., 2005). La capa límite de momentum se define como la zona donde el flujo de un fluido es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto (Streeter & Wylie, 1987). Esto se refleja en que la velocidad cambia de acuerdo a un comportamiento logarítmico, desde la superficie del sólido hasta la velocidad del escurrimiento que no siente los efectos de la pared del sólido. Sobre el lecho existe una capa donde los fenómenos de transporte son dominados por la difusión de masa, la subcapa límite difusiva. En ella la variación de concentración de OD se puede considerar lineal (Figura 2.2), por lo que se pueden generar modelos de transferencia basados en la diferencia de concentraciones entre el lecho y la zona turbulenta inmediatamente sobre la subcapa límite difusiva (Muñoz, 2007).

Si se utiliza la Ley de Fick, ecuación 2.1, en la distancia determinada por el grosor de la subcapa límite difusiva δ (Arega & Lee, 2005) se obtiene la siguiente expresión:

$$J_s = -\frac{D}{\delta}(C_\infty - C_s) \quad 2.4$$

Donde:

D = coeficiente de difusión molecular de OD [$m^2/día$].

δ = espesor de la subcapa límite difusiva [mm].

C_∞ = concentración de OD fuera de capa límite difusiva [mg/L].

C_s = concentración de OD en la interface agua – sedimento [mg/L].

El término D/δ se conoce como la tasa de transferencia de masa (k_t). El signo negativo de la expresión anterior refleja que el flujo va en contra de la dirección z , como se aprecia en la Figura 2.1. En la Figura 2.2 se distinguen la subcapa límite difusiva (δ) y la distancia hasta la que se difunde el OD en el sedimento (δ_s).

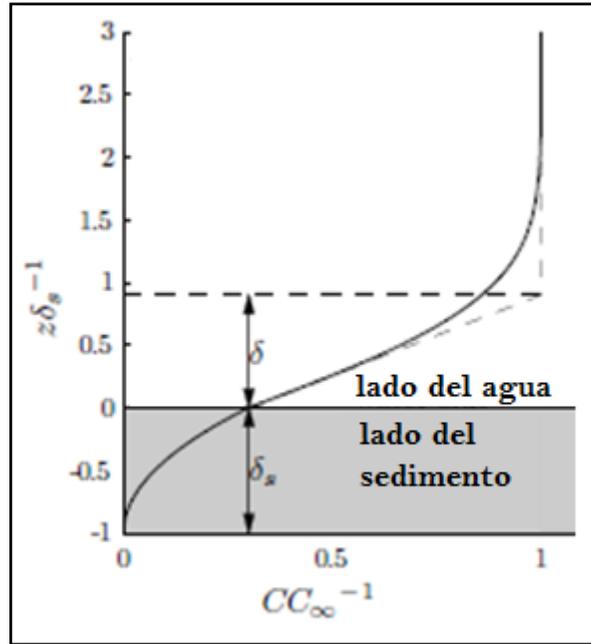


Figura 2.2. Perfil de oxígeno disuelto normalizado por la concentración fuera de la subcapa difusiva C/C_∞ , a través de la interface agua sedimento (de la Fuente, 2010).

La conexión entre las dos perspectivas anteriores, la de consumo en el sedimento y la de difusión en la subcapa difusiva, se produce por medio de la difusión de OD a través del espesor de sedimento (Rasmussen & Jørgensen, 1992) la que está condicionada por r , la tasa de consumo de OD en el sedimento.

$$r = \phi D_s \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad 2.5$$

Al integrar la expresión 2.5, donde D_s es el coeficiente de difusión molecular de OD en el sedimento y C es la concentración de OD a lo largo de la distancia δ_s , se puede encontrar la concentración de oxígeno en la interface agua sedimento (C_s), expresión 2.6.

$$C_s = \frac{r \delta_s^2}{2 \phi D_s} \quad 2.6$$

Combinando las 2 perspectivas (ecuaciones 2.3 y 2.4) y reemplazando la expresión para la concentración de OD en la interfaz (ecuación 2.6) se obtiene la siguiente expresión (de la Fuente, 2010), en donde al tomar el valor absoluto del flujo de OD se omite su sentido:

$$|J_s| = k_t \left(C_\infty - \frac{|J_s|^2}{2 \phi D_s r} \right) \quad 2.7$$

De la ecuación 2.7 se pueden distinguir tres aspectos: el flujo ($|J_s|$), los parámetros propios del sedimento ($r\phi D_s$) y el efecto de la velocidad del flujo en la tasa de transferencia de masa (k_t). El parámetro k_t es lineal con respecto a la velocidad del flujo u , de la forma $k_t = \alpha u$ (O'Connor et al, 2009), de modo que para distintas velocidades el valor de k_t es distinto.

2.2 Principales factores que afectan el consumo de oxígeno por el sedimento

El consumo de OD puede verse afectado por varios factores, los que se deben controlar o suprimir para obtener una estimación experimental precisa de $|J_s|$. Entre esos factores se encuentran la morfología de los sedimentos, su contenido de materia orgánica, la temperatura, la luz y la velocidad del flujo de agua.

Existe una influencia por parte de la morfología de los sedimentos del fondo de un sistema acuático en el perfil vertical de oxígeno. Mientras mayor es la irregularidad del fondo, mayor es el área superficial de los sedimentos ricos en materia orgánica que demandan oxígeno (Fuentes & Massol-Deyá, 2002) y por tanto la demanda de oxígeno puede ser mayor.

En cuerpos de agua naturales hay bacterias aerobias que utilizan el oxígeno disuelto presente en el agua para realizar la descomposición de la materia orgánica en compuestos inorgánicos, que luego son utilizados por organismos fotosintéticos (Castillo, 2008). El oxígeno que se consume en este proceso es proporcional a la materia orgánica degradada (Henry & Heinke, 1999), de modo que para niveles bajos de materia orgánica disponible en el sedimento se llegaría más rápido a un equilibrio en la concentración de oxígeno disuelto que cuando hay mayor disponibilidad de materia orgánica degradable.

Otro factor importante es la temperatura, ya que el crecimiento bacteriano depende del rango de la temperatura del ambiente en donde se hallen los microorganismos. El rango de temperatura óptimo para el crecimiento microbiano es particular para cada especie, sin embargo, en ambientes naturales se encuentran típicamente organismos mesófilos que pueden desarrollarse entre 10 y 45°C aproximadamente (Madigan et al, 2003). Además la temperatura también afecta la solubilidad de oxígeno en el agua. La concentración de oxígeno en el agua es inversamente proporcional a la temperatura, es decir, si aumenta la temperatura del agua el OD disminuye (Manahan, 2007). Un aumento de temperatura durante el experimento disminuiría la solubilidad de oxígeno de modo que volvería gaseoso y no disponible para ser consumido por el sedimento. Esto se reflejaría en pequeñas burbujas en el agua de la cámara.

En la SOD hay una fuerte influencia de los procesos bioquímicos en el sedimento, pero también de las condiciones hidrodinámicas (Inoue & Nakamura 2009). Procesos bioquímicos en los que interviene el oxígeno disuelto son por ejemplo la fotosíntesis, la oxidación-reducción; en que el oxígeno actúa como oxidante cediendo electrones para formar nuevos compuestos (Campbell & Reece 2005); la solubilidad de minerales y la descomposición de materia orgánica (Fuentes & Massol-Deyá, 2002).

Si existiera producción fotosintética de oxígeno podrían darse 2 configuraciones. En la Figura 2.3 A se esquematiza la producción de oxígeno fotosintético representado por la letra P, si este alcanza a suplir la demanda SOD y además queda un excedente, este difunde hacia la atmósfera. En la figura B, en cambio, P es consumido completamente por la demanda SOD y lo que falta por suplir proviene del OD en el agua. En la primera configuración se mediría un aumento del OD en la cámara béntica, ya que no puede escapar a la atmósfera, por lo que podría ser fácilmente reconocido y corregido en la instalación experimental. Sin embargo, en la segunda configuración el consumo de OD registrado por el sensor de la instalación experimental sería menor al que se mediría sin producción fotosintética, lo que es más difícil de notar al realizar la experiencia, de ahí que sea muy importante prevenir que no se produzca producción fotosintética (de la Fuente 2010). Para anular la fotosíntesis se puede utilizar el bloqueo de la luz necesaria para que se produzca (Yew-Hoong & Padma, 2010).

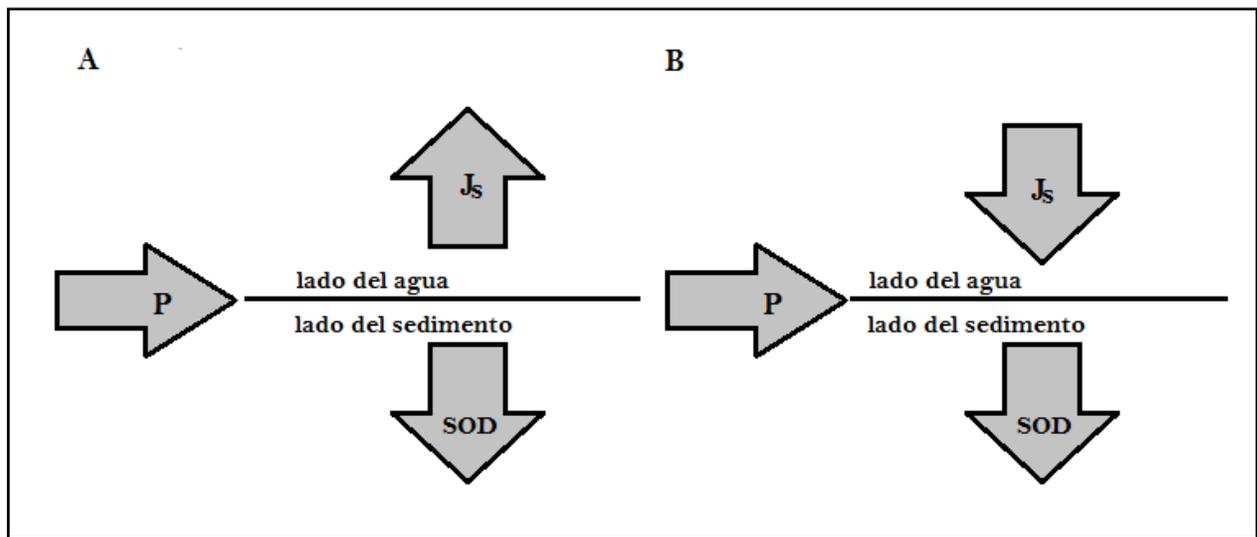


Figura 2.3. Alternativas para flujos de OD en la interfaz agua sedimento considerando que se hay producción fotosintética de oxígeno (de la Fuente, 2010).

Otro de los factores que influye en el transporte de oxígeno disuelto en la columna de agua es el tipo de distribución de velocidad. Estudios que involucran distribuciones de concentración de oxígeno sobre una muestra en cámaras cilíndricas (Broström & Nilsson, 1999) muestran perfiles de distribución de oxígeno fuertemente dependientes del radio de la cámara y de la velocidad de circulación en ella. En la Figura 2.4 A se muestran perfiles de la concentración de OD en un corte transversal del cilindro para diferentes velocidades de rotación, mientras que en B se muestra el espesor de la capa límite difusiva.

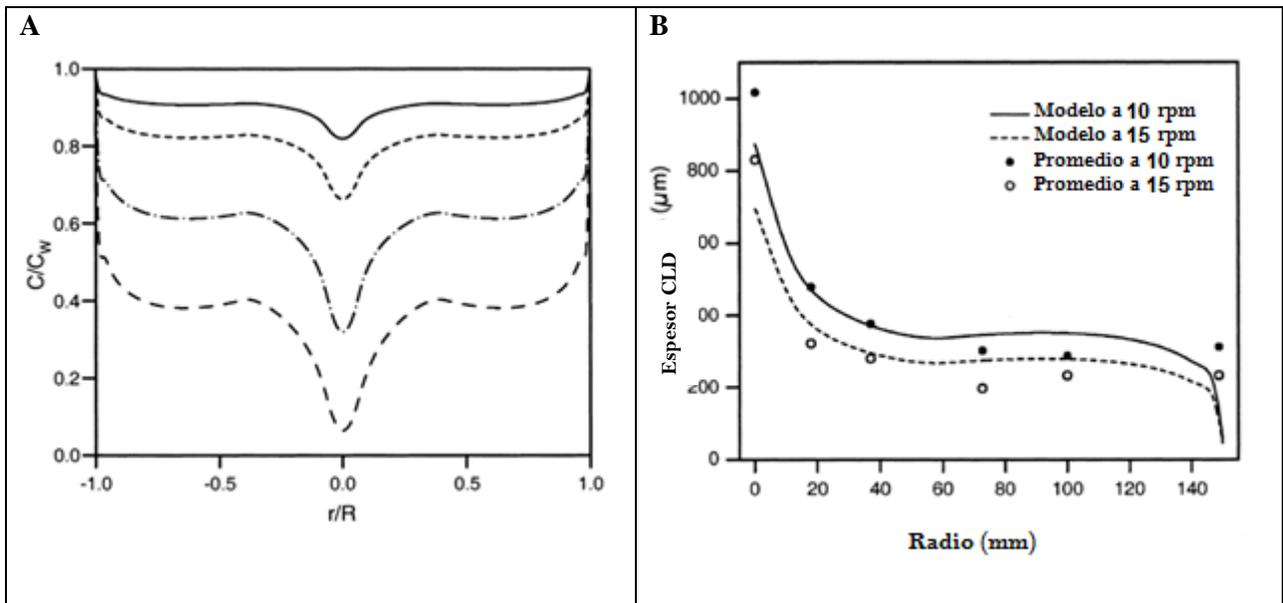


Figura 2.4. En A se muestra la distribución de la concentración de oxígeno normalizada por la concentración de OD en la pared de la cámara (C/C_w) a lo largo del diámetro normalizado. En B se presenta el espesor de capa límite difusiva (CLD) a lo largo del radio en cámara cilíndrica para distintas velocidades de circulación (Broström & Nilsson, 1999).

Además de los factores antes descritos, el tiempo de acondicionamiento es una variable que puede afectar los procesos bioquímicos de consumo de oxígeno. Este periodo permite al contenido biológico de las muestras adaptarse a su nueva condición de oxígeno y temperatura, de modo de que salgan del estado de latencia en el que están durante el transporte y almacenamiento refrigerado de las muestras de sedimento. Esto hace que las condiciones anteriores al comienzo del experimento no afecten los resultados.

2.3 Implementaciones de cámaras bénticas realizadas en estudios similares

El bentos se refiere a la comunidad de organismos vivos, tanto animales como vegetales, que viven semienterrados, fijos o móviles, en el fondo marino. Son los organismos vegetales se encuentran fijados en el fondo, ubicándose en la superficie del fondo, y también los primeros centímetros de sedimentos formados por limo, arena, rocas o fango (ILCE, 2011). En este caso la palabra béntica hace referencia al fondo de cualquier sistema léntico.

Las cámaras bénticas, ya sea en forma de cajas, campanas o cilindros, son un método aceptado para realizar mediciones in situ de flujos de elementos no conservativos involucrados en intercambios biológicos y geoquímicos, como gases disueltos, nutrientes, trazas de metales y aceptores alternativos de electrones que ocurren en el sedimento de sistemas lénticos (Sommer et al, 2008). A continuación se realiza una revisión de distintos tipos de cámaras bénticas utilizadas para realizar mediciones similares.

2.3.1 Sistema de flujo continuo con agitador

El propósito de este estudio fue examinar el efecto de la velocidad de flujo en la tasa de transferencia difusiva de la DO en la interfaz sedimento-agua (Inoue & Nakamura, 2009). El diseño posee un agitador en el interior de cada cilindro. Además cuenta con 6 cilindros de muestras inalteradas lo que permite realizar mediciones simultáneas a distintas velocidades.

Elementos:

- Agitador
- Estanques cilíndricos
- Entrada de agua con OD conocida.
- Salidas múltiples, una para cada probeta.
- Sensor de OD disuelto a la salida del flujo de agua desde la cámara.

Ventajas:

- Permite medir y comparar varias muestras a la vez.
- Se tiene un estanque con muestra de referencia
- Permite generar un sistema en equilibrio

Desventajas:

- Patrón de flujo artificial y distinto a condiciones in situ.

En la Figura 2.5 se muestra un esquema de la cámara béntica utilizada por Inoue y Nakamura.

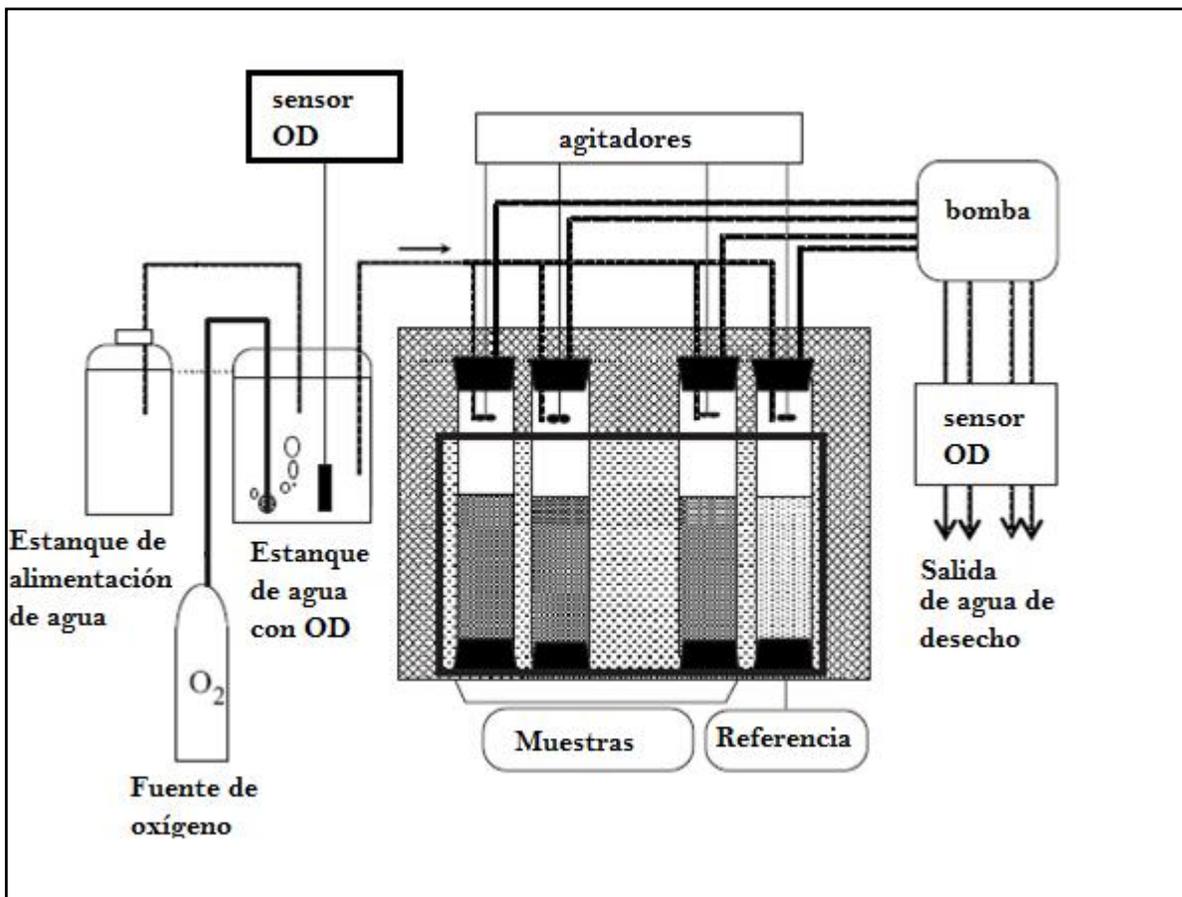


Figura 2.5 Esquema de diseño de instalación experimental de flujo continuo con agitador y muestras inalteradas (Inoue & Nakamura, 2009).

2.3.2 Sistema de canal rectangular con instalación de recirculación

Este sistema utiliza un canal rectangular cerrado, donde se hace re-circular un flujo de agua utilizando un sistema de bomba (Inoue & Nakamura, 2009). En este caso el sistema de recirculación no tiene entradas de flujo con OD, y tampoco permite el ingreso de oxígeno desde la atmósfera. Las mediciones se realizan con un sensor de OD dentro del canal. Este sistema se conoce como Batch.

Elementos:

- Bomba que re-circula el agua
- Estanque rectangular
- Sistema sin ingreso de oxígeno

Ventajas:

- El patrón de flujo es más homogéneo que el anterior, porque el flujo ya no es generado por el giro de agitadores dentro de un cilindro.
- El sistema de canal rectangular hace el control de las condiciones hidrodinámicas más fácil.
- Los tiempos experimentación son más cortos

Desventajas:

- Muestras de sedimento con mayor manipulación
- Las condiciones en el agua cambian con el tiempo, efecto proporcionalmente negativo sobre la exactitud de la estimación de la tasa de consumo de OD (Miller-Way 1994).

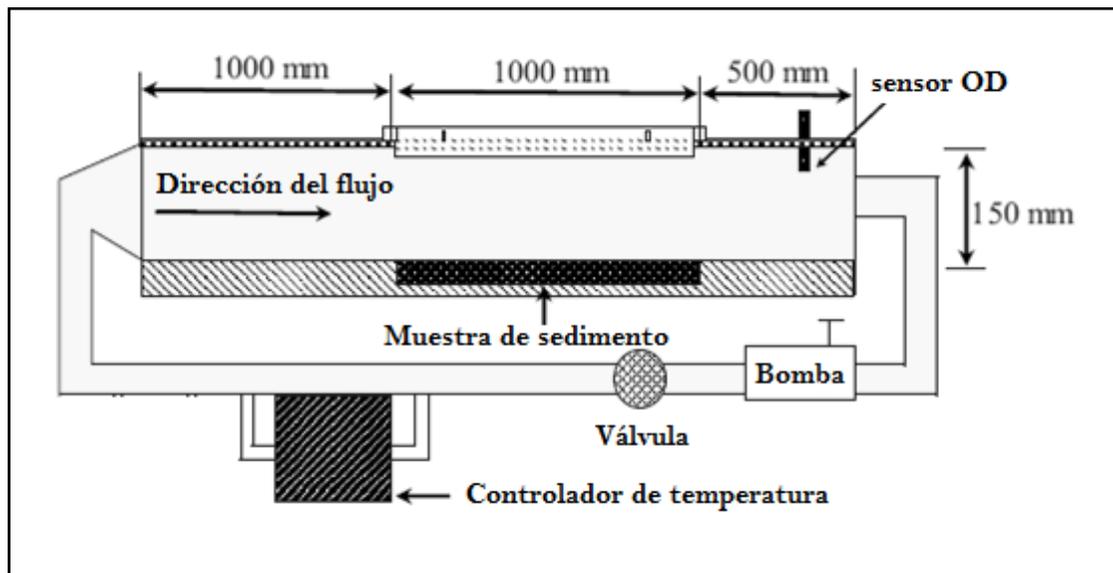


Figura 2.6. Esquema de diseño de instalación experimental tipo Batch en canal rectangular con recirculación (Inoue & Nakamura, 2009).

2.3.3 Sistema con cerrado y muestras inalteradas

Este sistema está construido con estanques cilíndricos los cuales tienen en su fondo la muestra de sedimento y sobre esta se llena el estanque con agua (Yew-Hoong & Padma, 2010). Se utiliza una bomba para re-circular el agua a caudal de 0.25 L/min de modo de lograr un sistema completamente mezclado sin provocar la resuspensión de los sólidos del fondo. Se mide la concentración de OD para poder obtener $|J_s|$ en el cerrado. Todo el sistema está ubicado en una habitación con temperatura controlada a 25°C.

Elementos:

- Bomba de recirculación
- Estanques cilíndricos
- Sensor de OD disuelto a la salida del flujo de agua desde la cámara.

Ventajas:

- Configuración sencilla
- Adaptable a pruebas en condiciones de anoxia del sedimento

Desventajas:

- No permite controlar el tipo de flujo ni la velocidad de éste.
- Las condiciones del agua cambian en el tiempo

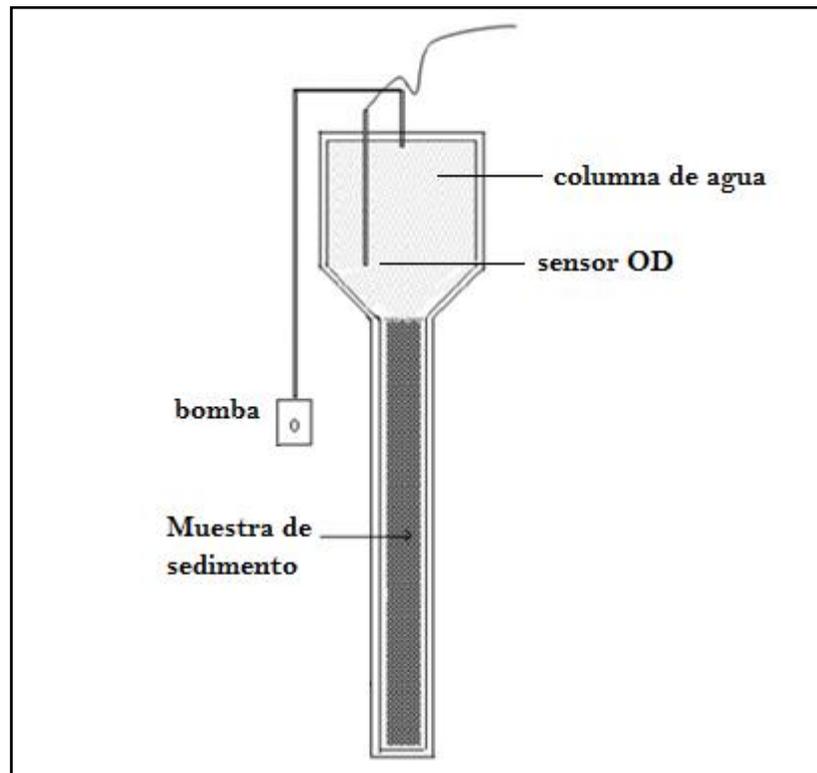


Figura 2.7. Esquema de diseño experimental con entrada continua de OD y muestras inalteradas (Yew-Hoong & Padma, 2010)

2.3.4 Sistema combinado canal rectangular con muestra inalterada de sedimentos

Este diseño utiliza un canal rectangular con recirculación de agua al cual se le atornilla una probeta de sedimento inalterada. El sistema es adaptable a ser de tipo batch o de flujo continuo, mediante la utilización de una bomba de caudal variable que re-circula el agua generando un flujo de agua recto. Además se incorpora un micro-electrodo con un sistema de movilización a una escala tal que permite medir directamente el perfil de concentración de OD a lo ancho de la capa límite, Figura 2.8.

Este sistema es adecuado para estudiar el efecto de los fenómenos microscópicos en los tipos de cambio, ya que puede reproducir los procesos naturales físico microscópico.

Ventajas:

- Puede simular las condiciones naturales de flujo.
- Uso de testigos de sedimento intactos.

Desventajas:

- Las condiciones del agua cambian en el tiempo.

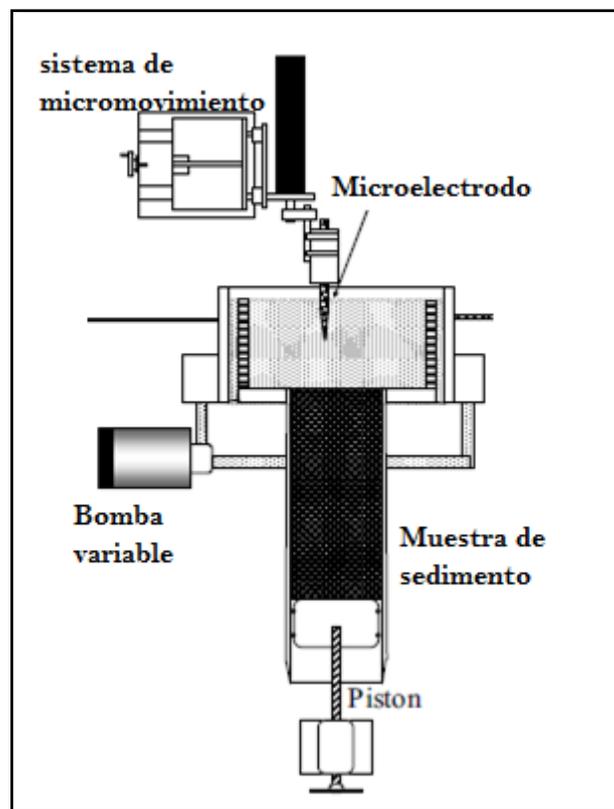


Figura 2.8. Esquema de diseño de instalación experimental para muestras inalteradas en canal rectangular (Inoue & Nakamura 2009).

3 Descripción del estudio experimental

A continuación se hace una descripción de los procesos realizados para alcanzar los objetivos propuestos: diseño de la instalación, toma de muestras y pruebas realizadas para comprobar el funcionamiento de la cámara diseñada.

3.1 Instalación experimental

3.1.1 Diseño de la instalación

El diseño de la cámara béntica para este estudio se decidió tomando en cuenta el estado del arte de las implementaciones experimentales mostradas en la revisión de antecedentes. El diseño utilizado es de tipo Batch, con flujo de recirculación de agua impulsada por una bomba sellada. La velocidad a la que se recircula el agua puede ser regulada a través de válvulas que controlan el caudal del sistema. Para las muestras se utilizan testigos de sedimento, de modo de que se conserve la estructura del sedimento, estos son obtenidos en un contenedor de sedimento especialmente diseñado para ser conectado al fondo de la cámara. Además, se implementó un estanque de refrigeración que permite amortiguar los cambios de temperatura ambiental y se construyó una cámara oscura que permite cortar el paso de la luz que para que los microorganismos fotosintéticos que pueden venir en las muestras de sedimento no realicen fotosíntesis.

Como se vio en el marco teórico el campo de velocidades que se consigue dentro de la cámara afecta la distribución de oxígeno en la columna de agua; es por esto que en el diseño de la cámara se optó por una sección transversal rectangular, por sobre los diseños con cámaras cilíndricas, para poder tener una distribución de velocidades más homogénea sobre la muestra. La Figura 3.1 muestra el tipo de cámara propuesta con la denominación de sus dimensiones.

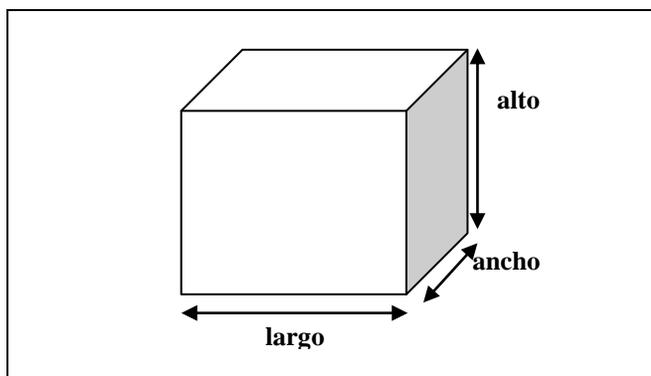


Figura 3.1. Dimensiones de la cámara rectangular propuesta

Para dimensionar la cámara se utilizó el criterio de tiempo de duración de las experiencias. Se buscó una relación de volumen versus área donde se obtuvieran tiempos de experimentación donde en menos de 24 horas se alcanzara una disminución de OD de 7 mg/l dentro de la cámara. Para este cálculo se utilizaron los valores de $|J_s|$ de la literatura analizada y la expresión 3.1, donde V corresponde al volumen de agua del sistema y A al área de la muestra de sedimento.

$$|J_s| = -\frac{V \Delta C}{A \Delta t} \quad 3.1$$

En la Tabla 3.1 se estiman los tiempos que podrían tomar los experimentos según las dimensiones escogidas y los $|J_s|$ de la bibliografía. El caso más desfavorable es para $|J_s|$ de 0.0043 (mg/cm²/hr), registrado por Yew-hoong & Padma, en donde una prueba tomaría cerca de 4.5 días. Para el valor de $|J_s|$ promediado entre los valores de la bibliografía las pruebas deben durar menos de un día, según el diseño propuesto.

Tabla 3.1. Diseño de las dimensiones de la cámara

diámetro contenedor de sedimento	Alto	Ancho	Largo	Vol.	$ J_s $	fuelle	A sed	ΔC	Δt
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(L)	(mg/cm ² /hr)		(cm ²)	(mg/L)	(hrs)
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0461	Inoue&Nakamura	35,257	7	5
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0691		35,257	7	4
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0230		35,257	7	11
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0043	Yew- hoong&Padma	35,257	7	58
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0024		35,257	7	104
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0165		35,257	7	15
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0085		35,257	7	30
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0091	Arega& Lee	35,257	7	28
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0319		35,257	7	8
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,0200		35,257	7	13
6,7	8	12	13,2	1,2672	0,01325	promedio	35,257	7	19

3.1.2 Descripción de la Instalación

En la Figura 3.2 se muestra un esquema de la cámara bética. La cámara consta de un cubo de acrílico en el cual se atornilla el contenedor de sedimento en la parte posterior. Por encima del cubo se instaló un embudo y 2 despiches, que permiten que al introducir agua por el embudo salgan las burbujas de aire por los despiches. Los sensores de OD y temperatura, los cuales son removibles, también están instalados en la parte de arriba del cubo. A los costados del cubo van conectadas mangueras difusoras que sirven de entradas y salidas del agua que recircula en el sistema. Las mangueras difusoras evitan que se produzca resuspensión del sedimento y puntos muertos del flujo en las esquinas de la cámara. En la Figura 3.3 A, se presenta el detalle de diseño de las mangueras difusoras. Estas mangueras difusoras van conectadas a las mangueras principales mediante conexiones de acrílico. Las mangueras principales son flexibles lo que permite dejar la bomba fuera del estanque de refrigeración cuando está lleno de agua. El sistema cuenta con dos válvulas atornillables una a cada lado de la bomba por lo que es posible retirar la bomba durante el lavado de la cámara y del estanque.

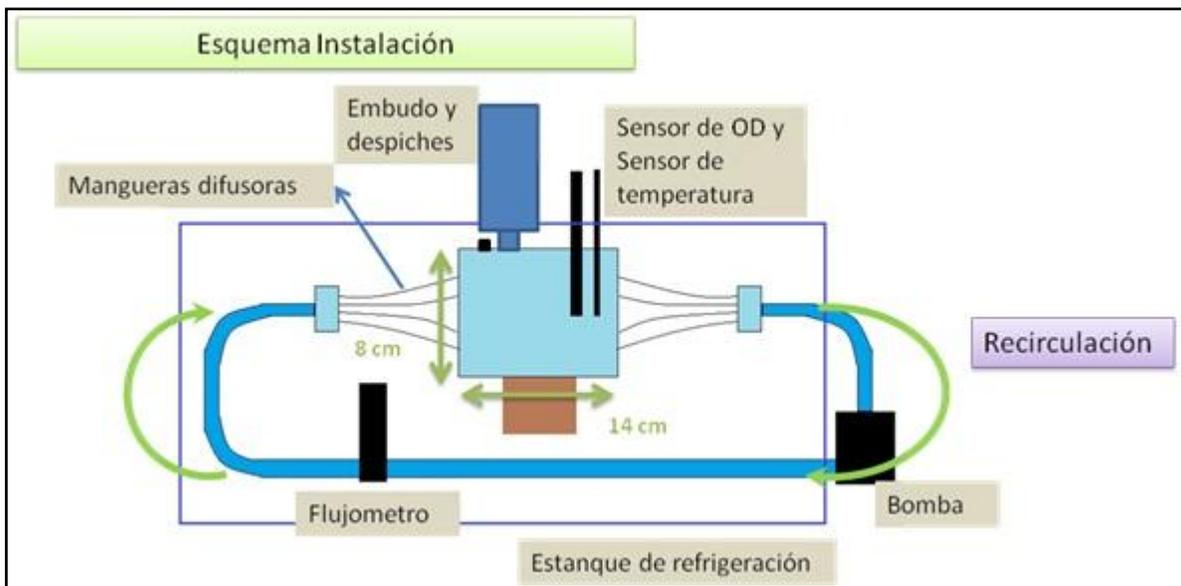


Figura 3.2. Esquema de la instalación experimental

En el sistema se instaló un flujómetro de acero inoxidable que, por medio de una perilla reguladora, controla una válvula que permite regular el caudal que pasa por las mangueras principales (Figura 3.3 B). El flujómetro puede medir de 0.5 a 4 L/min y está graduado cada 0.25 L/min. De acuerdo al área transversal del cubo (96 cm^2), el rango de caudal que puede regular el flujómetro equivale a un rango de velocidad promedio de 0,09 a 0,69 cm/s.

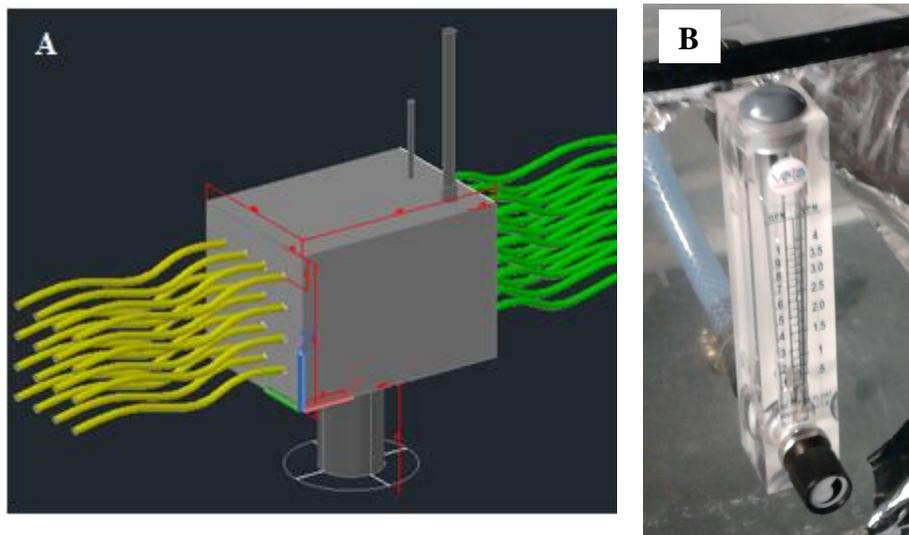


Figura 3.3 A: Detalle del diseño de las mangueras difusoras de la cámara béntica. B: Flujoómetro adosado al estanque de amortiguación

Para medir el OD dentro de la cámara se utilizó un electrodo sensor, TriOxmatic® 300. Para realizar la medición el electrodo se sumerge en el agua de la cámara por una abertura en la parte superior del cubo de acrílico. Esta abertura cuenta con una tapa que cuando se atornilla el sensor

aprieta un o'ring de goma que no permite la entrada de oxígeno a la cámara. El electrodo envía la señal de medición al microprocesador, llamado Oxi3000, que entrega la lectura de OD y también de temperatura. El equipo permite elegir el intervalo de tiempo en el que se realizan las mediciones. La precisión del equipo es de 0.01 mg/L para el oxígeno y de 0.1 °C para la temperatura. En la Figura 3.4 se muestra una ilustración del microprocesador y del sensor de OD (número 2) puesto dentro de la botella de BOD (demanda bioquímica de oxígeno), un accesorio del equipo que no se utilizó en este trabajo.

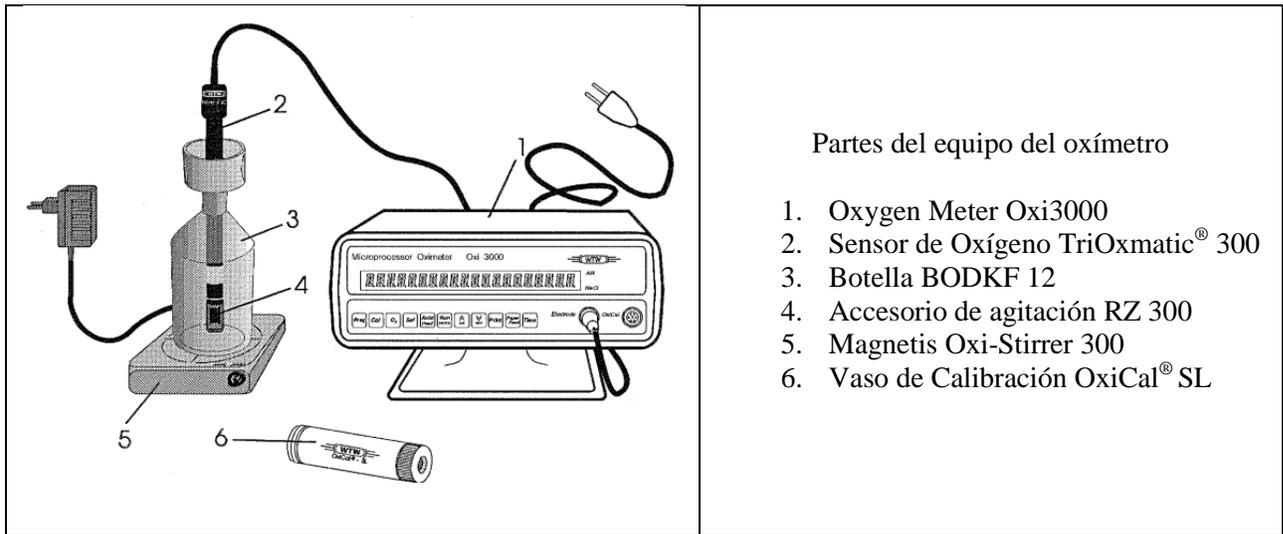


Figura 3.4 Ilustración del equipo de medición del oxígeno disuelto

El diseño de la cámara permite que ocurra una buena mezcla dentro del cubo, esto se comprobó utilizando colorante vegetal diluido en agua que se introducía por el embudo superior. El colorante se mezclaba rápidamente con el agua al interior del sistema (Figura 3.5). Esta prueba también fue un medio eficaz para buscar filtraciones del sistema.

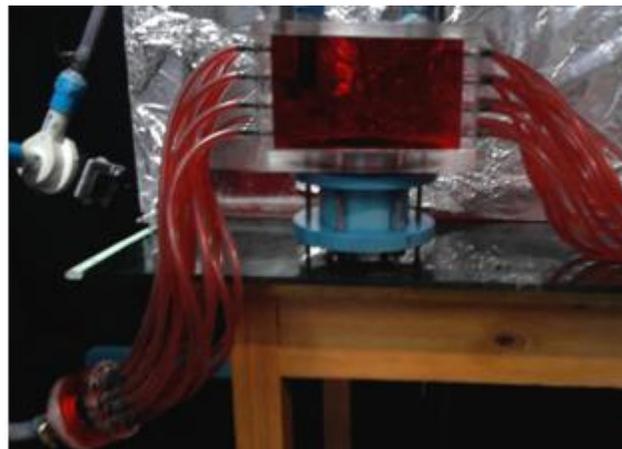


Figura 3.5 Fotografía de la cámara durante prueba con colorante para buscar filtraciones del sistema.

El contenedor de sedimento es removible y consiste en un cilindro de PVC de 67mm de diámetro y 75 mm de alto, abierto en sus dos extremos, lo que permite hincarlo en el sedimento para obtener muestras que mantienen su estructura original. En la parte posterior del contenedor se utiliza una tapa de PVC con una goma, para sellarlo por debajo. El contenedor en conjunto con la tapa se adhiere a la cámara haciéndolo pasar por 6 tornillos sin cabeza que luego se aprietan con 6 pernos tipo mariposa. En la juntura entre la cámara y el contenedor existe una goma flexible que impide la entrada de oxígeno. En la Figura 3.6 puede verse el cierre del contenedor en detalle.

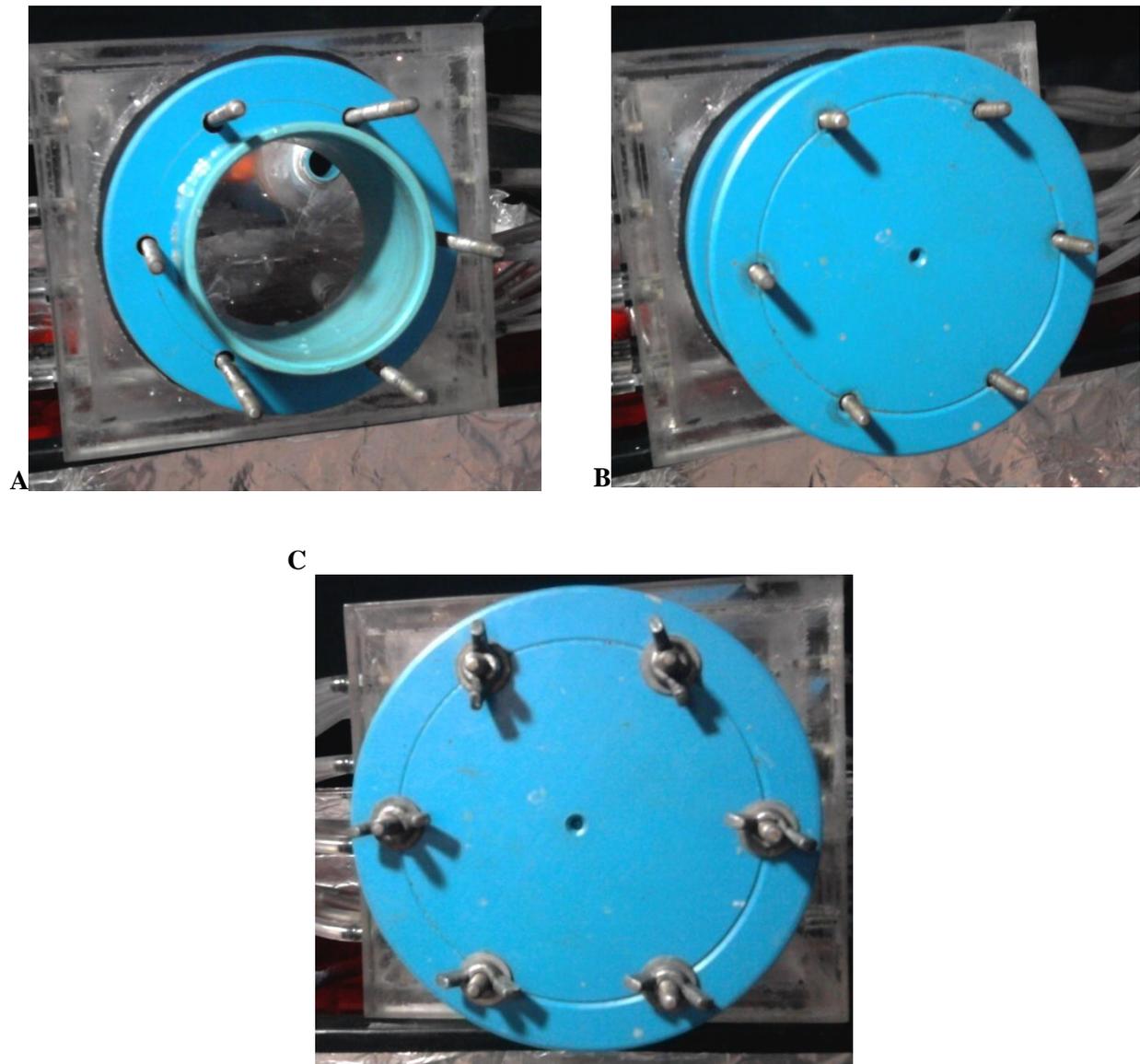


Figura 3.6. A, B y C muestran la secuencia de cierre del contenedor de sedimento

Durante los experimentos todo el sistema se mantuvo dentro de una cámara oscura construida con una estructura de pvc y cubierta con telas opacas de color negro que impedían el paso de la luz. Las dimensiones de la cámara oscura son 2 m de alto, 3 m de largo y 1.60 m de ancho.

3.2 Toma de muestras

Se realizaron campañas de muestreo en terreno en 2 lagunas ubicadas en las cercanías de Santiago. Una de ellas fue la de Aculeo, ubicada a 70 km al sur de Santiago. La zona en la que se encuentra la laguna ha sido explotada tanto en forma agrícola como ganadera desde el siglo XVI, por lo que está altamente intervenida por el hombre. El muestreo se realizó en la zona sur de la laguna, en los terrenos facilitados por el club de regata Aculeo. La otra laguna fue la de Carén, ubicada en la ruta 68 en el kilómetro 18, es alimentada por el Estero Carén y descarga sus aguas a través del Estero Lampa. La laguna Carén recibe descargas de la planta de tratamiento de aguas servidas Ciudad Jardín Lo Prado a través de una quebrada natural que encausa aguas lluvias (Soluziona Chile, 2002).

El muestreo en la laguna Carén se realizó en el punto de coordenadas 328806.93 m Este 6299599.21 m Sur (huso19, datum WGS84). Mientras que en la laguna de Aculeo fue en el punto de coordenadas 323037.74 m Este 6251832.32 m Sur (huso19, datum WGS84). En la Figura 3.7 A se muestra la ubicación de los puntos de muestreo. Ambos puntos contaban con una profundidad de 40 cm aproximadamente.

Los instrumentos utilizados para obtener las muestras se presentan en la Figura 3.7 B y se detallan a continuación:

- Contenedor de sedimento diseñado para la cámara béntica
- Espátulas ancha y delgada.
- Bolsas plásticas con sistema de cierre hermético, permite sellado al vacío de las muestras.
- Papel aluminio, para impedir el paso de la luz.
- Además se utilizó un cooler con enfriadores en gel para transportar las muestras.

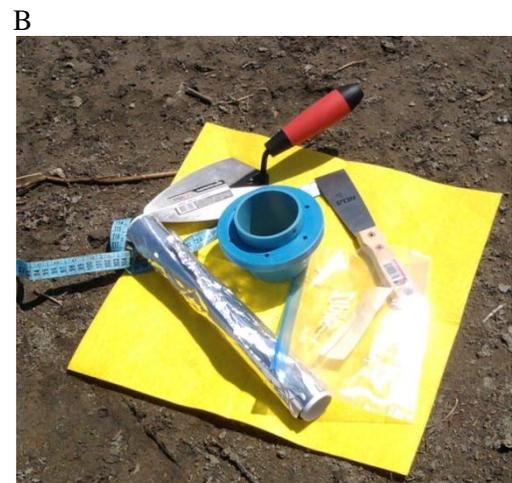


Figura 3.7 En A se muestra la ubicación de lugares de muestreo, B es una foto de los instrumentos utilizados en el terreno.

El procedimiento de muestreo consistió en el hincamiento de los contenedores en el sedimento de la laguna y su posterior retiro utilizando una espátula ancha para tapar su fondo. Luego el contenedor con la muestra en su interior fue completamente forrado con papel aluminio y guardado en las bolsas herméticas. Finalmente se guardaron en cooler, donde se pudo mantener una temperatura de 4,6 °C en su interior. Posterior a su traslado se almacenaron con refrigeración de 4°C, esta temperatura asegura que no hay crecimiento microbiano pues los microorganismos mesófilos se encuentran en estado de latencia (Madigan, et al, 2003). Se fabricaron 6 contenedores removibles lo que permite tomar 6 muestras de sedimento por cada campaña de terreno.

El sedimento de la laguna de Aculeo es suave y limoso, de color verdoso muy oscuro. Por otro lado el sedimento en la laguna Carén es de color café oscuro, muy plástico y compacto, por lo que fue difícil el hincado de los contenedores para extraer las muestras. En la Figura 3.8 se muestra el sedimento de la orilla de la laguna de Acúleo y de la laguna Carén. En ambos lugares se encontró presencia de algas, que son organismos fotosintéticos.

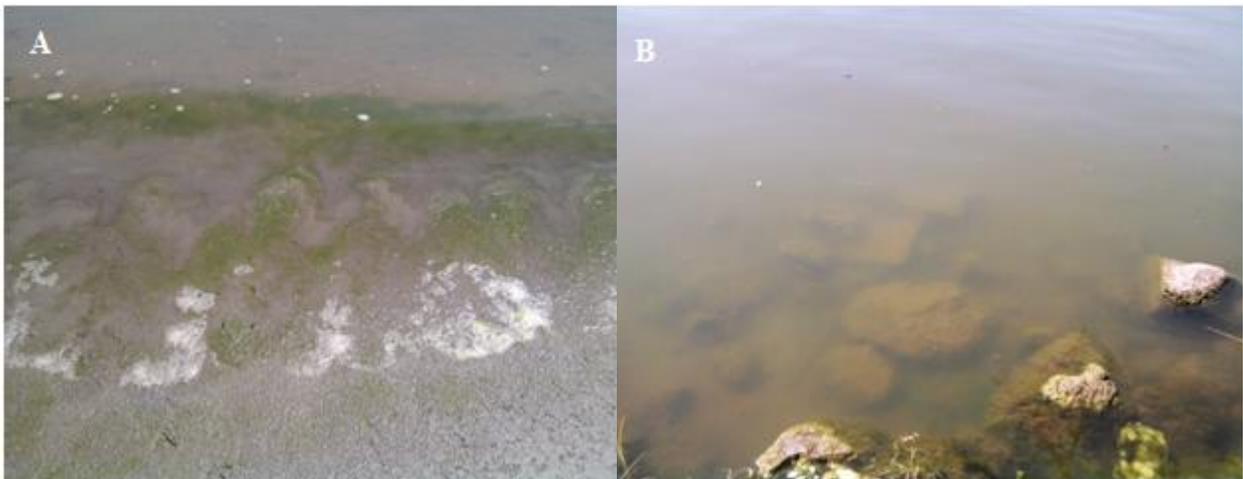


Figura 3.8 A: Agua y suelos de la orilla de la laguna de Aculeo. B: Agua y suelos de la orilla de la laguna Carén.

3.2.1 Contenido de materia orgánica en las muestras

Para tener una referencia del contenido de materia orgánica en las muestras de sedimento analizado se realizaron pruebas de demanda química de oxígeno (DQO) del sedimento diluido en agua destilada.

La DQO mide el oxígeno que requiere un agente químico fuerte para oxidar la materia orgánica contenida en una muestra de agua. Durante la prueba también se utiliza OD en oxidar la materia no biodegradable susceptible de oxidación, es decir, no todo el OD consumido durante la prueba corresponde a materia biodegradable. Es por eso que el método es sólo utilizado en forma referencial para comparar muestras de sedimento y no sirve para cuantificar los procesos de degradación y transporte que se miden con la cámara béntica.

Como el procedimiento estándar de medición de medición de DQO es para muestras de agua, lo que se hizo para adaptar el procedimiento a muestras de sedimento fue diluir las muestras a una concentración de 1%. La medición se realizó en el Laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

La dilución de la muestra se realizó de la siguiente manera: Se pesaron 10 g del sedimento muestreado y se diluyeron en 20 ml de agua en un vaso precipitado de 40ml. Una vez que estuvo bien disuelto se pasó la mezcla a un matraz de cuello angosto donde se agregó agua destilada hasta completar 100ml de mezcla, de modo que la solución quedó al 10% p/v. Se tapó la boca del matraz con film y se realizó un proceso de agitación manual, invirtiendo reiteradamente el matraz durante algunos minutos para asegurar que todo el sedimento se terminara de disolver.

Una vez realizada la dilución del sedimento, se utilizó un vial para medición de DQO rango 20-1500 mg/L HACH 21259-25. Al vial se agregan 1.8 ml de agua destilada y 0.2ml de la disolución del sedimento, logrando una concentración del 1% p/v. Se tapó y agitó manualmente el vial, y luego se dejó calentar a 150°C durante dos horas. Después de las 2 horas se utilizó un espectrofotómetro modelo DR 5000, marca HACH, para obtener el contenido de materia orgánica de la mezcla. El vial se coloca en el espectrofotómetro como se muestra en la Figura 3.9, se elige el porcentaje de dilución y el instrumento calcula la materia orgánica de la muestra original. Antes de insertar el vial con la mezcla se utilizó un blanco de prueba, un vial al que se le agregó 2ml de agua destilada, para comprobar que la medición de este vial en el espectrofotómetro fuera nula.



Figura 3.9 Instalación de vial con dilución de muestra de sedimento

Se realizaron 3 pruebas de DQO válidas para cada tipo de sedimento extraído, cuyo resultado se muestra en la Tabla 3.2. El contenido de materia orgánica de la laguna de Carén fue muy superior al de la laguna de Aculeo, esto puede deberse a que recibe aguas contaminadas con desechos orgánicos directamente en sus afluentes, con descargas a poca distancia de la laguna (conversación con administración de la Laguna Carén).

Tabla 3.2 Pruebas de DQO realizadas a los sedimentos de la laguna de Aculeo y laguna Carén.

Lugar de Muestra	Fecha	DQO (mg/L)	Promedio(mg/L)
Laguna de Aculeo	20-01-2012	33840	34564,7
Laguna de Aculeo	08-02-2012	34013	
Laguna de Aculeo	02-04-2012	35841	
Laguna Carén	13-02-2012	52139	54262,7
Laguna Carén	09-04-2012	52948	
Laguna Carén	09-04-2012	57701	

3.3 Procedimiento experimental

Por medio de pruebas previas realizadas a la instalación experimental se llegó a una metodología de trabajo para realizar los experimentos.

3.3.1 Instalación de muestra de sedimento y llenado de la cámara.

La instalación de un contenedor lleno de sedimento debe hacerse con la cámara completamente vacía, de modo que no ocurran movimientos de agua al interior durante el atornillado de las mariposas. Una pequeña cantidad de agua moviéndose al interior podría provocar que el sedimento se saliera del contenedor, en ese caso ocurriría en error en el procedimiento, ya que quedaría suspendido o sedimentado en algún otro sector de la cubo y el área de sedimento que consume OD será mayor a la cuantificada. De acuerdo a la expresión 3.1 un aumento en el área haría que $|J_s|$ fuera menor.

En primer lugar, se debe colocar la tapa del contenedor en la parte inferior y luego se instala la cámara sobre el contenedor en posición vertical, como se muestra en la Figura 3.10 A. Se toma desde abajo por la tapa del contenedor de sedimento y se colocan las golillas y mariposas siempre teniendo la cámara en posición vertical para no derramar sedimento.

La cámara debe llenarse de agua lentamente, como se muestra en la Figura 3.9 B, esto es para evitar que el sedimento se resuspenda. Además, se debe mantener la cámara por arriba de las mangueras principales para que se llenen evitando que queden burbujas en ellas.

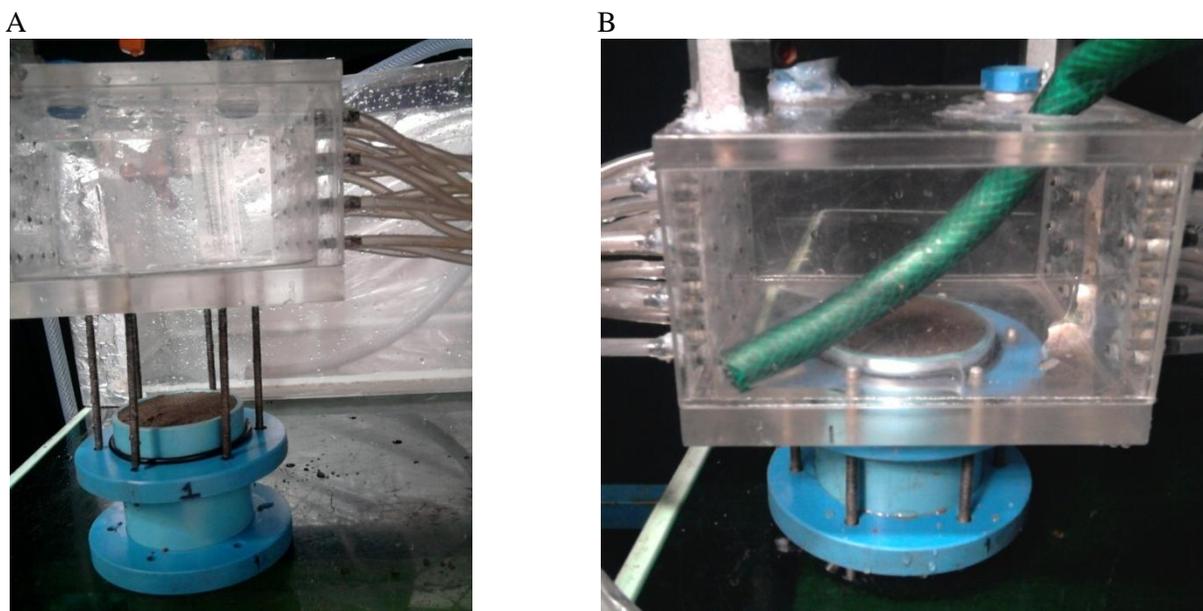


Figura 3.10 A: Conexión del contenedor de sedimento. B: llenado lento de la cámara, utilizando manguera a bajo caudal.

Antes de cada medición se debe realizar la calibración del sensor de OD y temperatura siguiendo los pasos del manual del equipo. En caso de no obtener una calibración dentro del rango permitido se procede a realizar el mantenimiento que se señala en el manual (Anexo D). En el programa de control del sensor se elige la frecuencia de muestreo de OD y temperatura. Para las mediciones realizadas en este trabajo se eligió un intervalo de medición de 1 segundo. Luego de la instalación del sedimento, y una vez llena la cámara de agua, se atornilla el sensor de oxígeno cuidando que no queden burbujas pegadas a la membrana del electrodo.

3.3.2 Periodo de acondicionamiento

Una vez que la cámara está llena de agua se procede a cerrar la válvula del flujómetro y se hace andar la bomba. Luego se abre la válvula del flujómetro para obtener la mayor velocidad de circulación posible sin que se produzca resuspensión superficial en la muestra de sedimento. Para determinar esta velocidad es necesario hacer pruebas preliminares sobre muestras similares, a las cuales no se les medirá el consumo de oxígeno disuelto.

Durante el periodo de acondicionamiento se debe mantener abierto el embudo superior para que se desarrolle una incorporación externa de oxígeno.

3.3.3 Pruebas realizadas

Luego de la construcción de la cámara béntica se hace necesario conocer en profundidad su funcionamiento a fin de obtener una metodología de trabajo que cumpla con la finalidad de la cámara, que es conocer los parámetros k_t y r de la ecuación 2.7. Como se vio en el marco teórico los factores que pueden afectar el proceso de consumo de OD por parte de los sedimentos y su medición con la cámara béntica son: la disponibilidad de OD que ingresa a la cámara, el tiempo de acondicionamiento, la temperatura, el contenido de materia orgánica, la velocidad del agua y el acceso a luz que produce fotosíntesis.

En primer lugar, para comprobar que el diseño y construcción de la cámara evitan el ingreso de oxígeno desde el exterior, el que interfiere con las mediciones, se realizó una comprobación del sellado del sistema.

Para determinar cuál es el periodo que se debe utilizar como tiempo de acondicionamiento se realizaron pruebas con 0, 3, 6 y 9 horas de acondicionamiento, y se compararon los resultados de los parámetros encontrados y las curvas de medición de OD.

En el diseño se contempló utilizar un estanque para amortiguar los cambios de temperatura durante la duración de las experiencias. Para determinar si cumplía su objetivo se realizaron 5 pruebas válidas con el estanque y 2 pruebas sin el estanque de amortiguación de temperatura. Además se presentan los parámetros k_t , S y r obtenidos para las pruebas realizadas en dos muestras sacadas en la laguna de Aculeo con y sin estanque de amortiguación.

También era de interés determinar cómo pueden cambiar las experiencias al utilizar muestras con distintas cantidades de materia orgánica, de modo que se hicieron pruebas con las muestras de la laguna de Aculeo y Carén recolectadas.

La velocidad del agua dentro de la cámara afecta directamente al valor del parámetro k_t , tasa de transferencia de masa, es por ello que se realizaron pruebas a distintas velocidades, de modo de ver el cambio de este parámetro. Se realizaron experiencias con distintos caudales que permiten tener distintas velocidades del flujo de agua dentro de la cámara. Los caudales utilizados fueron 1, 2 y 3 L/min en muestras de la laguna de Carén.

De la misma forma que con el estanque de amortiguación, era necesario conocer el efecto de bloquear la luz para evitar la fotosíntesis. Se procedió a realizar dos ensayos, uno con acceso de luz y otro sin acceso de luz, bloqueándola con la cámara oscura descrita anteriormente.

El detalle de las pruebas realizadas puede verse en la Tabla 3.3, donde se detallan el factor analizado por las pruebas, el lugar donde se tomó la muestra utilizada, el tiempo de acondicionamiento usado, el uso del estanque amortiguador de temperatura y el caudal utilizado en la prueba.

Tabla 3.3. Resumen de pruebas realizadas

Factor	Muestra	Acondicionamiento (horas)	Estanque amortiguador de temperatura	Caudal (L/min)
Ingreso de Oxígeno	Laguna de Aculeo	3	Con	2
	Laguna de Aculeo	3	Con	2
Tiempo de acondicionamiento	Laguna Carén	0	Con	3
	Laguna Carén	3	Con	3
	Laguna Carén	6	Con	3
	Laguna Carén	9	Con	3
Uso del estanque amortiguador de temperatura	Laguna de Aculeo	3	Con	2
	Laguna de Aculeo	3	Sin	2
Contenido de materia orgánica	Laguna de Aculeo	3	Con	2
	Laguna Carén	3	Con	2
Velocidad del flujo de agua	Laguna Carén	3	Con	1
	Laguna Carén	3	Con	2
	Laguna Carén	3	Con	3
Acceso de luz	Laguna de Aculeo	3	Con	2
	Laguna de Aculeo	3	Con	2

4 Metodología de cálculo de parámetros

4.1 Cálculo del flujo de oxígeno hacia los sedimentos, $|J_S|$.

El consumo de oxígeno disuelto por los sedimentos dentro de la cámara béntica se obtiene de realizar el equilibrio másico para este elemento dentro de la cámara. Como el sistema está sellado no hay un ingreso de OD por vía aérea al sistema, por lo tanto los cambios en el nivel de OD dentro de la cámara son sólo debido a consumos en el agua y en los sedimentos (Inoue & Nakamura, 2009). Pero como el agua no contiene materia orgánica, entonces se puede suponer que no existe consumo de OD en el agua de la cámara, entonces el equilibrio de OD se representa como:

$$V \left(\frac{dC_\infty}{dt} \right) = -|J_S| \cdot A \quad 4.1$$

Donde V representa el volumen de agua del sistema y A representa la superficie de sedimento que está en contacto con el agua. Si además, se toman tiempos pequeños Δt se puede suponer que el flujo de oxígeno disuelto hacia el sedimento es constante. Con esta suposición se realiza la integración de la ecuación anterior llegando a una expresión de cálculo para $|J_S|$ a partir de los datos observados.

$$\int_{C_{\infty t}}^{C_{\infty t+\Delta t}} V dC_\infty = \int_t^{t+\Delta t} -|J_S| \cdot A dt \quad 4.2$$

$$|J_S| = -\frac{V (C_{\infty t+\Delta t} - C_{\infty t})}{A \Delta t} \quad 4.3$$

4.2 Ajuste de los datos experimentales de $C_\infty(t)$.

A partir de la expresión 2.7 se obtuvo la expresión 4.4 agrupada en una única variable denominada S a los parámetros que representan al sedimento ($S = 2 \phi D_S r$). Desarrollando la expresión 4.4 del flujo de OD hacia los sedimentos $|J_S|$, se obtuvo la expresión cuadrática de la expresión 4.5.

$$|J_S| = k_t \left(C_\infty - \frac{|J_S|^2}{S} \right) \quad 4.4$$

$$k_t |J_S|^2 + S |J_S| - k_t S C_\infty = 0 \quad 4.5$$

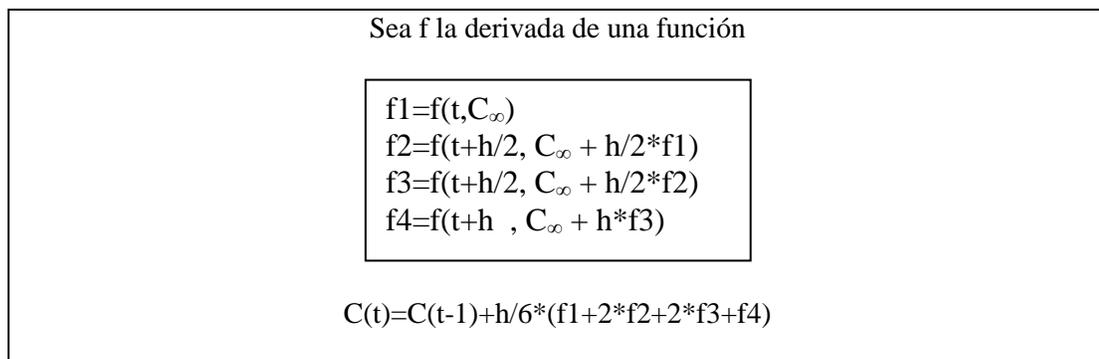
Resolviendo la ecuación anterior, se obtiene una expresión para $|J_s|$, que depende de la concentración C_∞ , expresión 4.6.

$$|J_s| = \frac{S}{2 k_t} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{S}{k_t}\right)^2 + 4 S C_\infty} \quad 4.6$$

Utilizando la expresión 4.1, se llega a la expresión 4.7 que representa el cambio de la concentración de OD dentro de la cámara debido al consumo de los sedimentos.

$$\frac{dC_\infty}{dt} = \frac{A S}{2 V k_t} - \frac{A}{2 V} \sqrt{\left(\frac{S}{k_t}\right)^2 + 4 S C_\infty} \quad 4.7$$

La variación de C_∞ en el tiempo se integró numéricamente utilizando el procedimiento Runge - Kutta 4, que se detalla en el Cuadro 1. Este procedimiento calcula la derivada C_∞/dt en 4 puntos del entorno de un punto $\{t-1; C_\infty(t-1)\}$ y luego los promedia en forma ponderada para calcular la variación de C_∞ en un tiempo Δt . Luego el valor de $C_\infty(t)$ es el valor anterior $C_\infty(t-1)$ más la variación (Mathews,2000).



Cuadro 1: Esquema Procedimiento Runge–Kutta (Mathews,2000)

Durante los experimentos se registró el OD en el agua de la cámara cada segundo, estos datos se promediaron cada 2 horas para disminuir la dispersión, obteniéndose curvas de C_∞ en función del tiempo. Para ello se desarrollo una rutina en el programa Matlab que permite extraer los datos de una planilla Excel y procesarlos para disminuir la dispersión (Anexo B).

Se realizó el ajuste de la curva $C_\infty(t)$ obtenida con el método Runge-Kutta con los valores experimentales de $C_\infty(t)$. Para esto se iteraron los parámetros k_t y S en el programa Solve de Microsoft Excel, minimizando el error cuadrático medio entre las 2 curvas(Anexo C).

Con los valores de k_t y S obtenidos en la iteración y utilizando la expresión 4.4 se calculó $|J_s|$, en este trabajo se denomina “ $|J_s|$ ajuste” a este cálculo, para cada valor $C_\infty(t)$ registrado. Además se calculó $|J_s|$ directamente de los datos usando la expresión 4.3, este cálculo se denomina “ $|J_s|$ datos”.

Para realizar el ajuste de las curvas de $C_{\infty}(t)$ no se utilizó todo el periodo de tiempo en que se midió, sino que, se usó el intervalo de tiempo en el cual el logaritmo de la concentración de OD en la cámara, $\log\{C_{\infty}(t)\}$, tenía comportamiento lineal. Esto debido al supuesto de que el consumo de OD corresponde a una reacción de primer orden, por lo tanto si el logaritmo no es lineal el consumo responde a otro tipo de fenómeno.

4.3 Sensibilidad del flujo de oxígeno $|J_S|$ con respecto a los parámetros S y k_t

Al realizar el ajuste de las curvas se observó que la ecuación 4.6 con la que se calcula $|J_S|$, era más sensible a cambios en el parámetro k_t que a cambios en S. Para analizar la sensibilidad de $|J_S|$ a los parámetros se utilizó el diferencial normalizado de $|J_S|$ para eliminar la dependencia de las unidades de las variables. El diferencial toma la siguiente forma:

$$\frac{dJ_S}{J_S} = \frac{S}{J_S} \frac{\partial J_S}{\partial S} \frac{dS}{S} + \frac{k_t}{J_S} \frac{\partial J_S}{\partial k_t} \frac{dk_t}{k_t} \quad 4.8$$

De la ecuación anterior, la variación adimensional de $|J_S|$ con respecto a k_t esta expresada por:

$$\psi_{k_t} = \frac{k_t}{J_S} \frac{\partial J_S}{\partial k_t} \quad 4.9$$

Mientras que la variación de $|J_S|$ con respecto a S se muestra en:

$$\psi_S = \frac{S}{J_S} \frac{\partial J_S}{\partial S} \quad 4.10$$

Si ψ_{k_t} es mucho mayor a ψ_S se puede interpretar que el cálculo de los parámetros es más dependiente del parámetro k_t , de modo que la precisión del parámetro S no sería buena. Por ello se tomó la decisión de aceptar sólo los valores de S para los cuales la variación con respecto a k_t es menos de 10 veces mayor a la variación con respecto a S.

La metodología de cálculo adoptada fue calcular k_t según lo obtenido del ajuste de curvas, de la forma que ya se mencionó, y con este valor obtener el valor de S para cada tiempo del ajuste a través de la expresión 4.11, deducida de 4.4, donde C_{∞} y $|J_S|$ se calculan a partir de los datos experimentales registrados. El valor de S final corresponde al promedio de los datos que tienen una precisión donde ψ_{k_t} / ψ_S es menor a 10.

$$S = \frac{|J_s|^2}{C_\infty - |J_s|/k_t} \quad 4.11$$

Sólo con el fin de comparar el valor de la tasa de consumo de oxígeno con valores obtenidos en otros estudios, se de calculó un valor referencial de r. Para esto se utilizó un valor de porosidad estándar fijado en la mitad del rango permitido, es decir, $\phi=0.5$; y D_s se utilizó igual al valor del coeficiente de difusión molecular de OD a 20°C para el agua, es decir, $D_s=0,864 \text{ cm}^2/\text{día}$.

5 Presentación y Análisis de Resultados

En las siguientes secciones se presentan los resultados de las experiencias realizadas. Estos resultados están ordenados con respecto a los parámetros que fueron variados para poder analizar por separado el efecto de cada uno.

Además, tomando en cuenta todas las pruebas realizadas se puede comparar lo obtenido con las suposiciones del diseño. Para el diseño de la cámara se utilizaron $|J_s|$ entre 0.0024 a 0.069 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{h}$, donde se obtenía según diseño un tiempo promedio de experimentación de 19 hrs. De todas las pruebas realizadas durante la experimentación con la cámara bántica diseñada, los valores de $|J_s|$ obtenidos van entre 0.002 a 0.024 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{h}$. y los tiempos de experimentación para lograr una estabilización de la concentración de OD en el tiempo o para el consumo total del OD disponible, tomaron en promedio 45 horas. Esta diferencia entre lo esperado según diseño y lo obtenido en la experimentación, se debe a que $|J_s|$ no es constante, como se usó en el diseño, sino que cambia con el contenido de oxígeno disuelto presente fuera de la subcapa difusiva.

5.1 Pruebas de entrada de oxígeno a la cámara

Para comprobar el sellado del sistema se realizaron pruebas utilizando sulfito de sodio disuelto en el agua. Este compuesto hizo que los niveles de OD en el agua dentro de la cámara llegaran a cero y luego se registró el nivel de OD durante 24 horas comprobándose que no aumentaba. Esto permite decir que no entra oxígeno desde la atmósfera que se mezcle con el agua del sistema y eleve el nivel de OD del agua.

Además se realizaron 2 pruebas en similares condiciones: con caudal de 2 L/min, en oscuridad y utilizando el estanque amortiguador de temperatura, con muestras de sedimento de la laguna de Aculeo. Una de las pruebas se realizó con la válvula del embudo abierta, cuyo diámetro no supera 1cm, por lo que tenía acceso a oxígeno desde la atmósfera y la otra completamente cerrada. La comparación entre las curvas de variación de C_{∞} durante estas pruebas se presentan en la Figura 5.1.

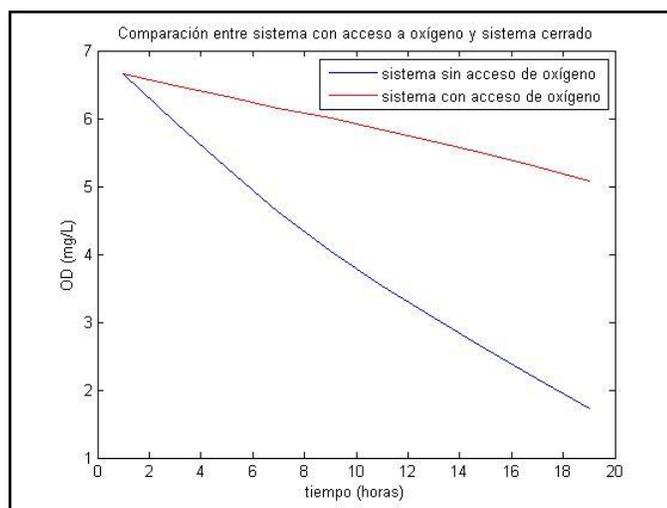


Figura 5.1. Comparación entre sistema con acceso a oxígeno atmosférico y sistema cerrado

Se encontró una clara diferencia entre ambas pruebas, donde en la prueba sellada ocurría una disminución del oxígeno a 1.8 mg/L en 20 hrs para el caso abierto y en el experimento sellado 4.9 mg/L en el mismo periodo. En el experimento en contacto con la atmosfera la disminución de oxígeno es 63% menor que en el experimento cerrado.

Según los resultados experimentales, cuando existe una entrada de oxígeno desde la atmósfera hacia la cámara ocurre de todas maneras una baja en la concentración de OD en el agua de la cámara. La concentración de OD sólo podría ser constante si el ingreso de oxígeno atmosférico alcanza a suplir toda la demanda del consumo de los sedimentos. De todas maneras esta disminución de OD es notablemente menor que la que se puede obtener en un experimento con la cámara completamente sellada, por lo que una falla de este tipo es fácilmente identificable.

5.2 Respuesta a distintos tiempos de acondicionamiento

Al realizar las pruebas de consumo de OD en muestras de la laguna Carén, con distintos tiempos de acondicionamiento, se observó que durante las primeras 15 horas las velocidades de consumo de OD son similares para las pruebas con 0, 3 y 9 horas de acondicionamiento, independientemente del valor inicial del OD dentro de la cámara (Figura 5.2). En cambio la curva del acondicionamiento de 6 horas tuvo un comportamiento diferente, consumiéndose el OD más lentamente que en las otras experiencias. Luego de las 15 horas se registra un comportamiento diferente en la curva de 3 horas de acondicionamiento, el que podría explicarse como un cambio en el proceso de consumo de OD.

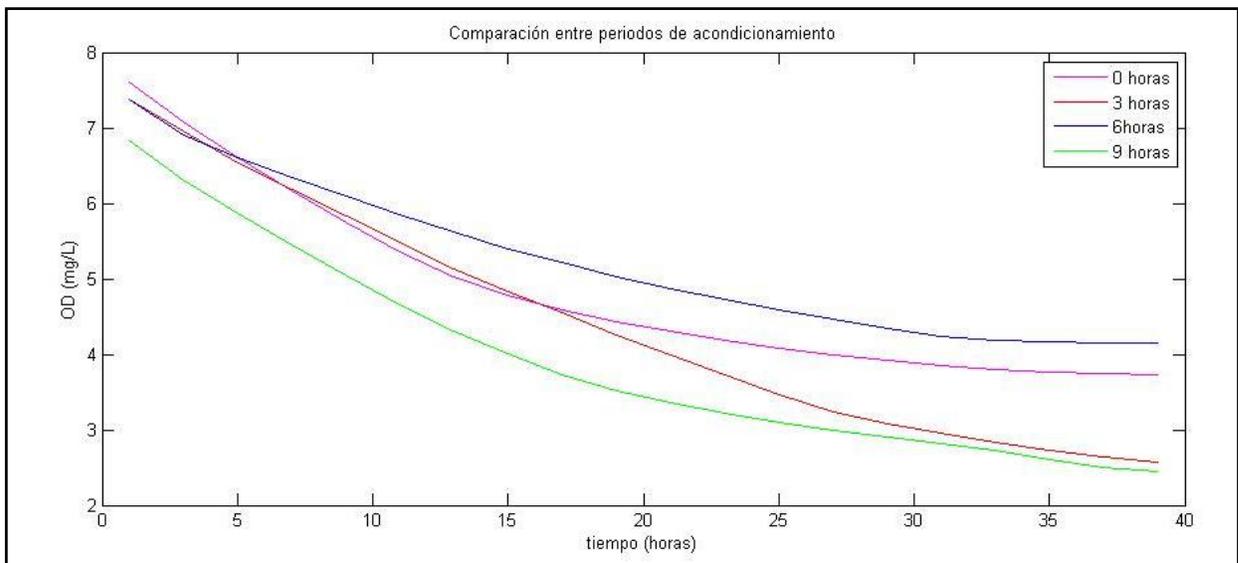


Figura 5.2. Concentración de OD dentro de la cámara béntica. Comparación de periodos acondicionamiento

En la Tabla 5.1 se presentan los valores del parámetro k_t que se obtuvieron ajustando la curva de consumo de oxígeno a los valores obtenidos usando el método Runge-Kutta. El ajuste se realizó al período de tiempo en que el logaritmo de $C_\infty(t)$ es lineal, en el Anexo A se muestran los

gráficos con la regresión lineal de cada periodo. A pesar de utilizar el mismo caudal para todas las pruebas, el valor de k_t para la prueba con 6 horas de acondicionamiento es menor, esto explicaría que la velocidad a la que se consume el oxígeno sea menor en esta prueba. La temperatura promedio del agua dentro de la cámara es similar para todas las pruebas, entre 21.5 y 22 °C.

Tabla 5.1 Ajuste a las curvas de $C_\infty(t)$ en cada prueba de acondicionamiento para obtener el valor de k_t

Tiempo de Acondicionamiento (horas)	Temperatura Promedio diaria (°C)	Periodo de Ajuste (horas)	Caudal (L/min)	velocidad promedio (cm/seg)	k_t (cm/día)	error cuadrático medio del ajuste C_∞ (mg/L)
0	21,8	15	3	0,521	0,047	0,04
3	21,5	20	3	0,521	0,042	0,02
6	22,0	20	3	0,521	0,028	0,08
9	21,9	20	3	0,521	0,060	0,04

Con el parámetro k_t obtenido en el ajuste se calcularon valores de S para cada $C_\infty(t)$ en el periodo de ajuste. Luego se calcularon las variaciones adimensionales de $|J_S|$ con respecto a k_t y a S, para elegir los valores cuya dependencia de k_t no sea tan grande, promediándose los valores de S donde ψ_{k_t}/ψ_S es menor a 10. En la Tabla 5.2, Tabla 5.3, Tabla 5.4 y Tabla 5.5 se muestran los cálculos para obtener el valor de S.

Tabla 5.2 Cálculos del parámetro S en prueba con 0 horas de acondicionamiento.

Tiempo de acondicionamiento	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	$ J_S $ Ajuste	Error cuadrático medio entre $ J_S $ datos y $ J_S $ ajuste
	(mg/cm/dia ²)	-	-	-	(g/m2/día)	(g/m2/día)
0 horas	0,270	-8,34	0,05	157,2	2,78	0,3
	0,100	-0,78	0,11	7,2	2,62	
	0,111	-1,39	0,10	14,5	2,48	
	0,130	-2,62	0,08	32,5	2,34	
	0,100	-1,43	0,09	15,3	2,21	
	0,061	0,18	0,13	1,4	2,08	
	0,013	0,84	0,26	3,2	1,97	
	0,006	0,54	0,32	1,7	1,89	
Promedio de S elegidos (mg/cm/dia ²)		0,047	Varianza de S elegidos		0,002	

Tabla 5.3 Cálculos del parámetro S en prueba con 3 horas de acondicionamiento.

Tiempo de acondicionamiento	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	Js Ajuste	Error cuadrático medio entre Js datos y Js ajuste
	(mg/cm/dia ²)	-	-	-	(g/m2/día)	(g/m2/día)
3 horas	0,086	-0,87	0,11	8,3	2,6	0,1
	0,104	-1,96	0,09	22,4	2,5	
	0,037	0,83	0,17	5,0	2,3	
	0,065	-0,30	0,11	2,6	2,2	
	0,095	-2,34	0,08	28,5	2,1	
	0,171	-10,21	0,05	211,7	2,0	
	0,048	0,41	0,12	3,3	1,9	
	0,087	-2,77	0,08	36,4	1,8	
	0,126	-7,85	0,05	146,9	1,7	
	0,178	-17,48	0,04	466,9	1,6	
Promedio de S elegidos (mg/cm/dia ²)		0,059	Varianza de S elegidos		0,0005	

Tabla 5.4 Cálculos del parámetro S en prueba con 6 horas de acondicionamiento.

Tiempo de acondicionamiento	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	Js Ajuste	Error cuadrático medio entre Js datos y Js ajuste
	(mg/cm/dia ²)	-	-	-	(g/m2/día)	(g/m2/día)
6 horas	-0,029	-7,89	4,17	1,9	1,77	0,4
	0,158	-24,12	0,03	753,6	1,67	
	0,043	-0,89	0,09	9,7	1,61	
	0,039	-0,50	0,09	5,2	1,55	
	0,028	0,78	0,12	6,7	1,49	
	0,035	-0,01	0,10	0,1	1,44	
	0,022	1,37	0,13	10,4	1,39	
	0,013	1,48	0,18	8,4	1,34	
	0,015	1,60	0,16	10,1	1,30	
	0,005	0,97	0,25	3,9	1,26	
Promedio de S elegidos (mg/cm/dia ²)		0,027	Varianza de S elegidos		0,0002	

Tabla 5.5 Cálculos del parámetro S en prueba con 9 horas de acondicionamiento.

Tiempo de acondicionamiento	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	Js Ajuste	Error cuadrático medio entre Js datos y Js ajuste
	(mg/cm/día ²)	-	-	-	(g/m ² /día)	(g/m ² /día)
9 horas	0,093	0,22	0,15	1,5	2,93	0,3
	0,049	0,73	0,20	3,6	2,75	
	0,044	0,80	0,21	3,9	2,60	
	0,054	0,74	0,18	4,1	2,45	
	0,068	0,52	0,15	3,4	2,30	
	0,059	0,70	0,16	4,5	2,16	
	0,029	1,01	0,22	4,6	2,02	
	0,031	1,09	0,20	5,3	1,91	
	0,010	0,66	0,30	2,2	1,79	
	0,005	0,45	0,34	1,3	1,71	
Promedio de S elegidos (mg/cm/día ²)		0,044	Varianza de S elegidos		0,0001	

La única experiencia en donde se cumple que para todos los valores de S ψ_{k_t}/ψ_S es menor a 10, es la realizada con el periodo de acondicionamiento de 9 horas. Las otras pruebas tienen 4 valores de S que cumplen la condición, en las dos primeras pruebas y 7 valores para la prueba con 6 horas de acondicionamiento. A pesar de la diferencia entre el número de valores elegidos para calcular S, el error cuadrático medio calculado entre las curvas de |Js| (C_∞) no tiene una relación directa, siendo similares los 4 valores.

En la Tabla 5.8 se presentan los parámetros k_t , S y r que se obtuvieron utilizando el método de cálculo detallado en el capítulo 4, Metodología de cálculo de parámetros. Para 0, 3 y 9 hrs de acondicionamiento, |Js| de ajuste se encuentra entre 1.6 y 2.7 (g/m²/día), mientras que para la prueba de 6 horas el valor de |Js| de ajuste es menor, con valores entre 1.3 y 1.8 (g/m²/día).

Los valores de r calculados a partir de S y suponiendo igual porosidad y coeficiente de difusión (Ds), son del orden de datos obtenidos en otros estudios (Baladrón, 2011). Nuevamente los valores de 0, 3 y 9 horas de acondicionamiento son similares, mientras que la prueba a 6 horas muestra una diferencia. No se aprecia una dependencia del valor de r con el tiempo de acondicionamiento.

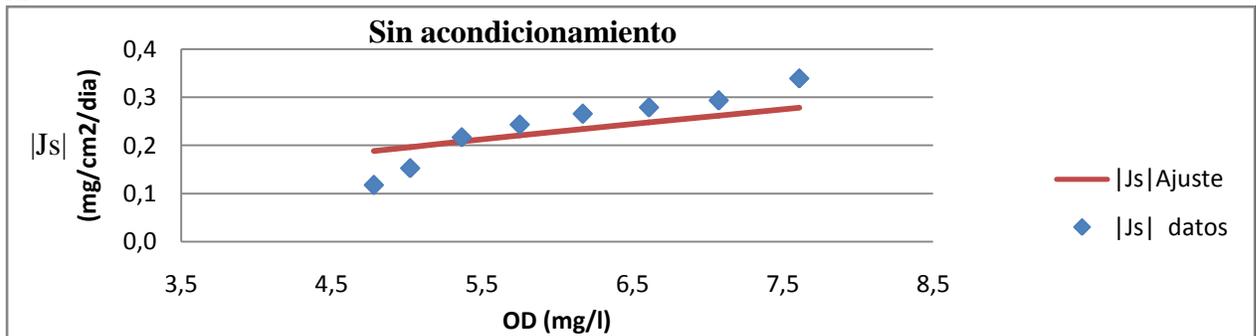
Tabla 5.6. Parámetros S y flujo |Js| en pruebas de tiempo de acondicionamiento.

Tiempo de Acondicionamiento (horas)	S (mg/cm/día ²)	Rango Js ajuste(g/m ² /día)	r (g/m ³ /día)
0	0,045	1,89 - 2,78	52
3	0,059	1,60 - 2,61	68
6	0,027	1,26 - 1,77	31
9	0,044	1,68 - 2,84	51

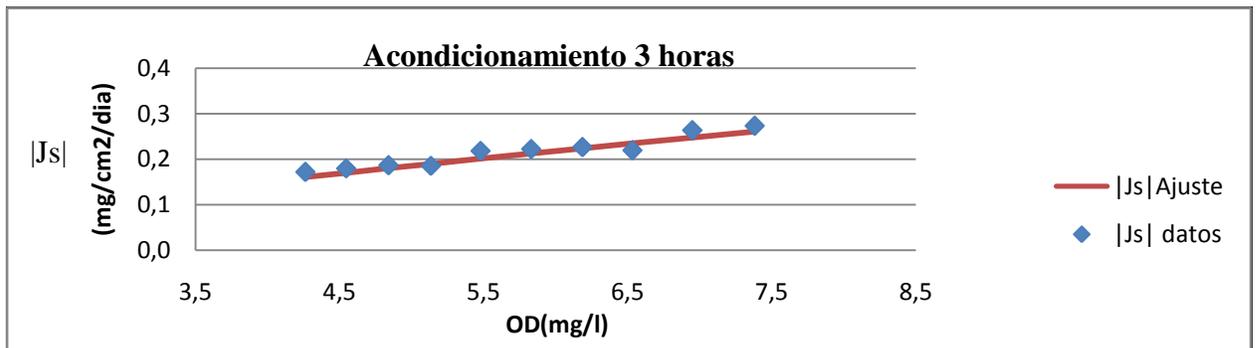
Cabe notar que a pesar de la similitud para los valores del flujo de oxígeno entre los tiempos de acondicionamiento de 0, 3 y 9 horas; el valor final C_{∞} es menor para el ajuste de la prueba con 9 horas de acondicionamiento (parte en 6.8 y llega a 3.5 mg/L), debido al valor inicial de OD en la prueba.

En las Figura 5.3 A, B, C y D se muestra en flujo |Js| de ajuste conseguido con los valores de k_t y S calculados, comparado con los valores de flujo determinados con los datos experimentales de C_{∞} . Los puntos presentados corresponden al periodo de ajuste de 15 y 20 horas para las pruebas.

A



B



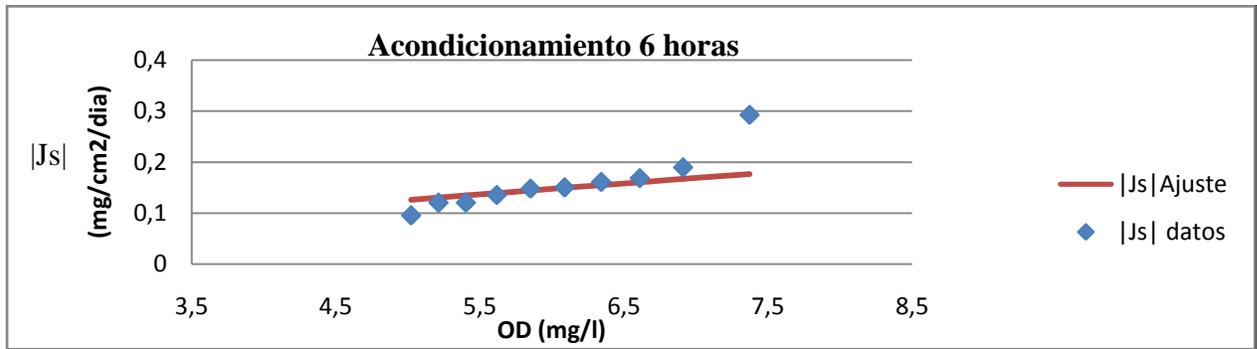
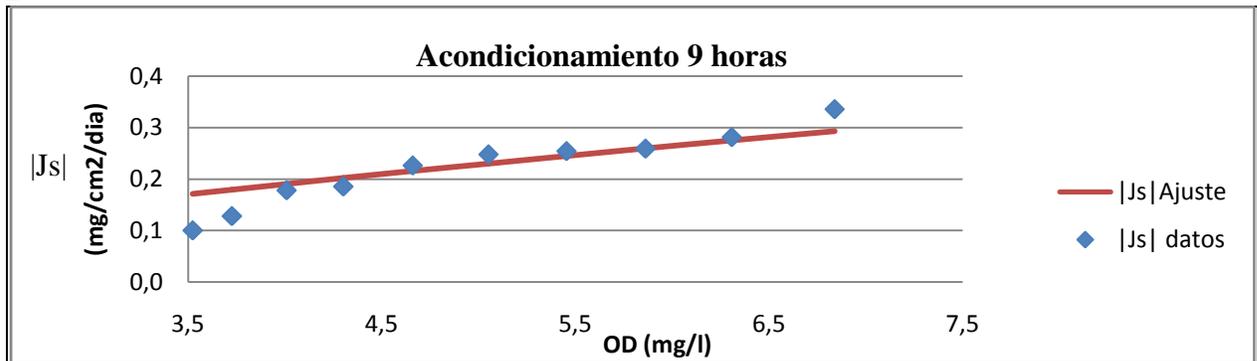
C**D**

Figura 5.3. Flujo de oxígeno hacia los sedimentos. Comparación de periodos acondicionamiento. A: Sin acondicionamiento, B: Acondicionamiento 3 horas, C: Acondicionamiento 6 horas, D: Acondicionamiento 9 horas.

En las figuras A, C y D se muestra que los puntos extremos no tienen tan buen ajuste como los de la mitad del periodo de ajuste. Esto muestra una diferencia en la pendiente entre los datos registrados experimentalmente y el ajuste realizado.

5.3 Respuesta al uso del estanque amortiguador de temperatura

Se realizaron pruebas en donde no se utilizó el estanque amortiguador de temperatura y otras en que si se utilizó, esto para ver si existía una diferencia apreciable en la temperatura del agua dentro de la cámara béntica y también en los valores de los parámetros calculados para el ajuste. En la Tabla 5.7 se muestran las distintas temperaturas extremas registradas para un día completo de medición y temperatura promedio de toda la medición, en pruebas con y sin uso del estanque amortiguador.

Tabla 5.7 Temperatura extremas en pruebas realizadas con y sin estanque de amortiguación.

Fecha de inicio	13-02-2012	15-02-2012	21-02-2012	28-02-2012	02-04-2012	31-01-2012	29-03-2012
Estanque de regulación de Temperatura	Con	Con	Con	Con	Con	Sin	Sin
Temperatura Mínima (°C)	21	20,5	21,4	20,8	20,9	25,4	24,1
Temperatura Máxima (°C)	21,7	21,0	22,2	21,6	22,0	28,0	26,9
Oscilación de temperatura (°C)	0,7	0,5	0,8	0,8	1,1	2,6	2,8
Temperatura promedio (°C)	21,4	20,8	21,8	21,2	21,5	26,7	25,5

Se comprobó que con uso del estanque de refrigeración se reduce la oscilación térmica y se obtiene una oscilación térmica promedio de 0.78°C, entre la mayor y la menor temperatura registrada durante un día completo, a diferencia de la oscilación promedio de 2.70°C obtenida en pruebas si el uso del estanque (Tabla 5.8).

Tabla 5.8 Oscilación térmica promedio de las pruebas realizadas con y sin estanque de amortiguación.

	con estanque de regulación	sin estanque de regulación
oscilación promedio (°C)	0,78	2,70

A continuación se presentan las 2 pruebas realizadas en muestras de la laguna de Aculeo, una con y otra sin estanque de amortiguación, para comparar los valores de los parámetros k_t y S obtenidos. Se encontró que la temperatura promedio de la prueba sin estanque era de 25.5°C, mientras que la prueba en la que se utilizó el estanque era de 21.5°C, es decir, una diferencia de 4.1°C en la temperatura promedio.

La oscilación de la temperatura durante las experiencias está asociada a la oscilación diaria de la temperatura ambiente. Esta oscilación ambiental provocó cambios en la temperatura dentro de la cámara de hasta 2.8°C y temperatura máxima de 26,9°C, en la prueba sin estanque. Esta oscilación dentro del agua de la cámara se presenta en la Figura 5.4 A y B. En la Tabla 5.9 se

expone el rango de temperaturas registrado dentro de la cámara y las temperaturas ambientales máximas del día que se realizaron las pruebas.

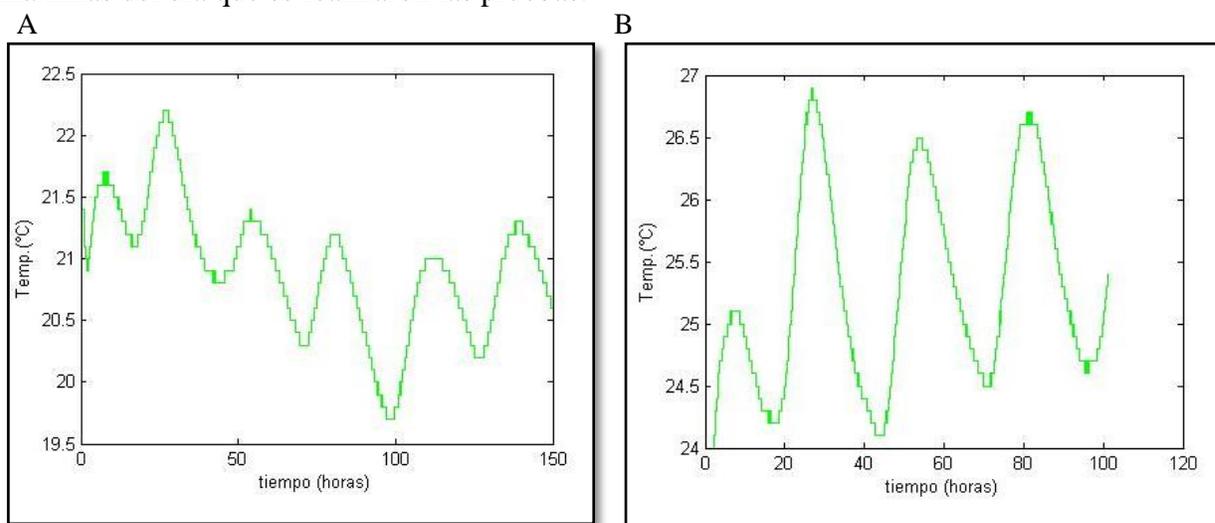


Figura 5.4 Registro de temperaturas para pruebas del estanque. A: Con estanque de amortiguación de temperatura. B: Sin estanque de amortiguación de temperatura

Tabla 5.9 Datos temperatura de las pruebas con estanque de amortiguación, sin estanque de amortiguación.

Prueba	Muestra	Temperatura atmosférica máxima (°C)	Rango Temperatura Prueba (°C)	Temperatura promedio dentro de la cámara(°C)
Sin Estanque	Laguna de Aculeo	32	24,1-26,9	25,5
Con Estanque	Laguna de Aculeo	32	20,9 -22,1	21,5

Las curvas de consumo de OD dentro de la cámara béntica que se obtuvieron en las pruebas con y sin estanque de amortiguación de temperatura se presentan en la Figura 5.5.

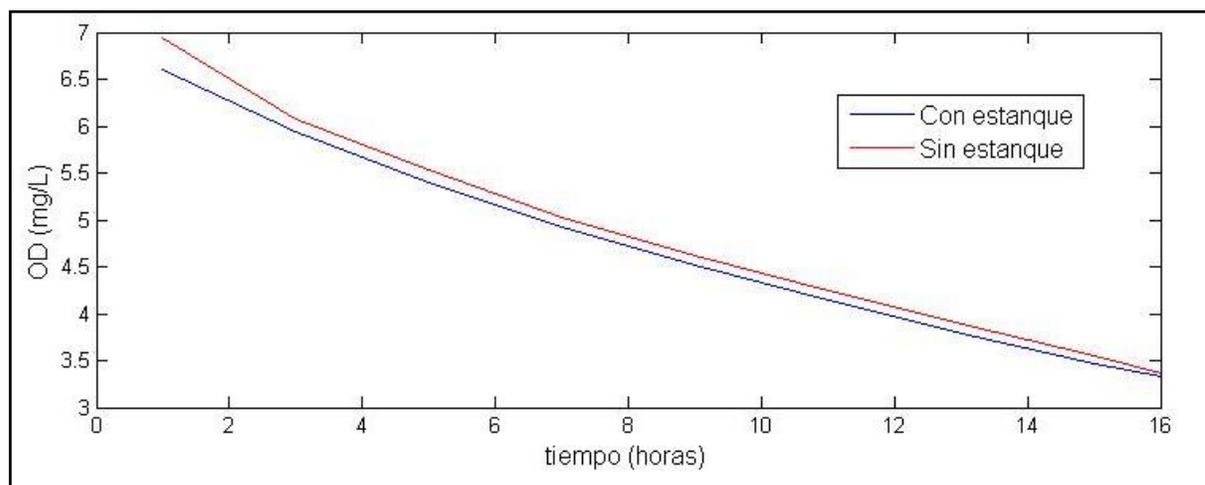


Figura 5.5 Pruebas con y sin estanque amortiguador de temperatura

Otra de las pruebas que se realizaron para ver la dependencia del consumo de OD de la temperatura fue una realizada con muestra de la laguna de Carén donde se agregó 1 kilo de hielo cada 1 hora durante 5 horas. Como se muestra en la Figura 5.6 no se registraron cambios en la curva de consumo que puedan verse explicados por un cambio de temperatura en el interior de la cámara. Este procedimiento permitiría bajar rápidamente la temperatura del sistema para realizar mediciones a menores temperaturas, pero es necesario mejorar la tasa de aplicación de hielo para obtener una temperatura constante o que oscile poco en torno al valor requerido.

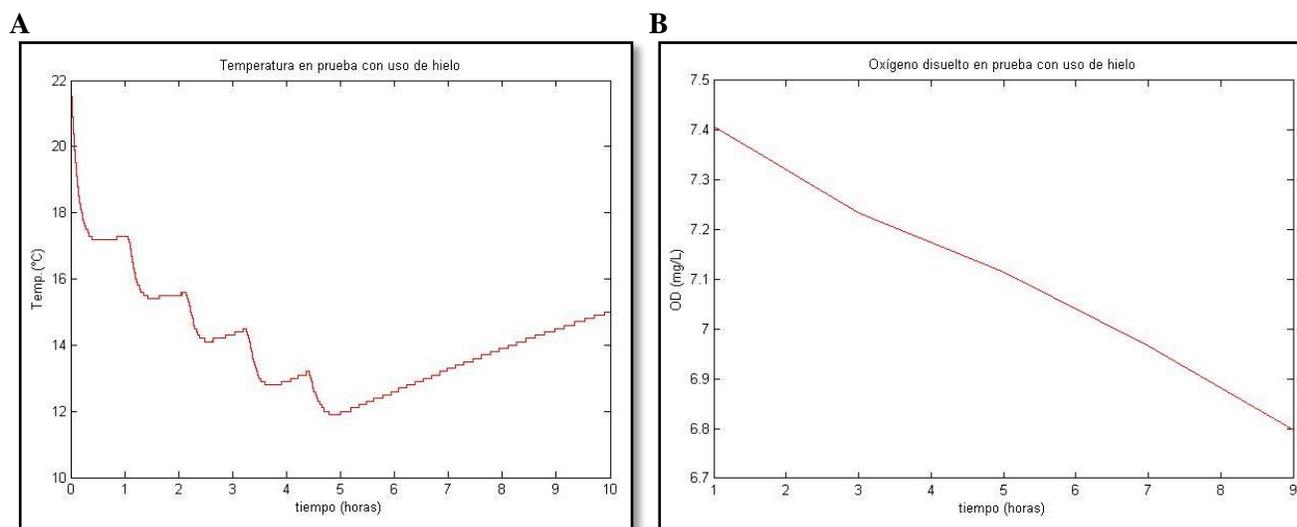


Figura 5.6 Prueba con incorporación de hielo al estanque de amortiguación. A: variación de temperatura. B: consumo de oxígeno.

También se realizó una prueba en sedimento de la laguna Carén usando el estanque de amortiguación de temperatura. En la Tabla 5.10 se muestran la temperatura máxima del día que se realizó la prueba, rango en que osciló la temperatura dentro de la cámara durante la prueba y la temperatura promedio registrada.

Tabla 5.10. Datos temperatura de las pruebas con estanque de amortiguación con uso de hielo en muestras de la laguna de Carén.

Pruebas	Temp. atmosférica máxima (°C)	Rango Temp. Prueba (°C)	Temperatura promedio (°C)
Laguna Carén con Hielo	28	11,9 - 21,9	16,3
Laguna Carén con Estanque	29	20,9 - 21,4	21,1

Los parámetros S y k_t se calcularon como se explicó anteriormente en el capítulo 4. Los valores de k_t obtenidos del ajuste entre las curvas de consumo de oxígeno se presentan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Tasa de transferencia de masa, k_t , de las pruebas de temperatura.

Pruebas	Tiempo de Acondicionamiento (horas)	Periodo de Ajuste (horas)	Caudal (L/min)	velocidad promedio (cm/seg)	k_t (cm/día)	error cuadrático medio del ajuste C_∞ (mg/l)
Laguna de Aculeo Sin Estanque	3	20	2	0,347	0,069	0,04
Laguna de Aculeo Con Estanque	3	20	2	0,347	0,033	0,07
Laguna Carén con Hielo	3	5	2	0,347	0,021	0,09
Laguna Carén con Estanque	3	10	2	0,347	0,038	0,02

Al comparar los valores que se presentan en la Tabla 5.12 para los experimentos de la laguna de Carén, estos indican que el valor de la tasa de consumo es mayor en el caso que se tiene una temperatura promedio más alta.

Tabla 5.12. Valores del parámetro S , r y del flujo $|J_s|$

Pruebas	S (mg/cm/día ²)	varianza de S	Rango $ J_s $ (g/m ² /día)	r (g/m ³ /día)
Laguna de Aculeo Sin Estanque	0,0614	0,0006	1,69 - 3,31	71
Laguna de Aculeo Con Estanque	0,0253	0,00004	1,25-1,83	29,3
Laguna Carén Con Hielo	0,0034	0,000004	0,95-0,97	4,0
Laguna Carén Con Estanque	0,0288	0,00047	1,801 – 2,158	33

5.4 Pruebas en muestras con distintos grados de materia orgánica

En términos generales, al comparar todos los experimentos realizados en muestras de la laguna de Carén (para distintas velocidades y temperaturas) demoraron en promedio 51 horas en llegar a una condición de estabilidad de OD o condición nula de oxígeno, mientras que en las muestras de la laguna de Aculeo el consumo era mucho más rápido demorando 34 horas promedio. En la Figura 5.7 se muestra la comparación de las curvas de consumo de oxígeno para 2 ensayos a igual caudal y temperatura promedio entre los 21.1 y 21.4 °C, en una muestra de la laguna de Aculeo y otra de la laguna Carén.

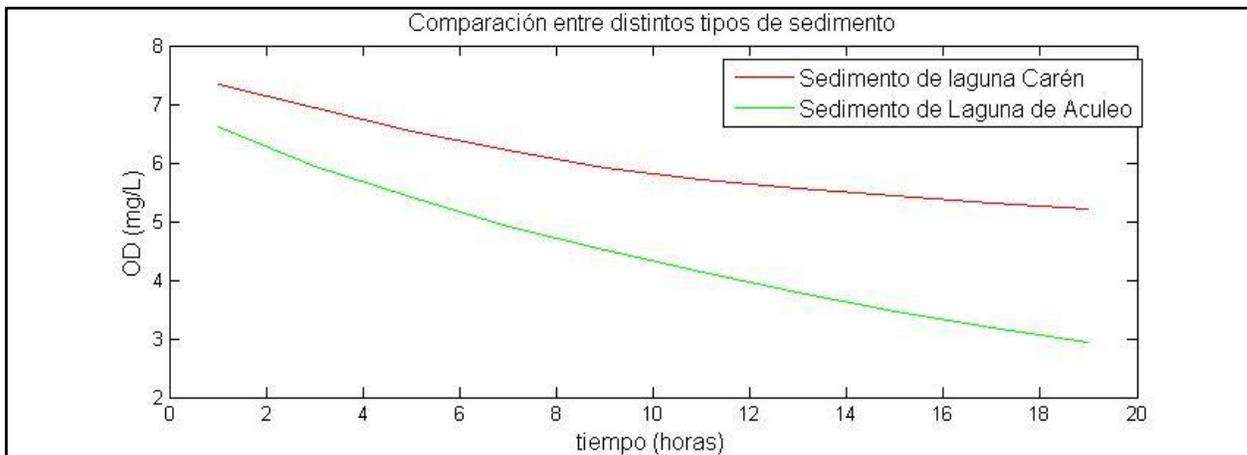


Figura 5.7 Concentración de OD dentro de la cámara béntica. Comparación entre tipos de sedimento

En la Tabla 5.13 se presentan las condiciones de temperatura de ambas pruebas, el caudal con su la velocidad promedio asociada y el periodo de ajuste donde el logaritmo de C_{∞} es lineal. Se realizó el ajuste de las curvas de consumo de oxígeno con la curva de la integración Runge - Kutta, obteniéndose los valores del parámetro k_t para cada prueba. El valor de k_t es mayor en la prueba realizada para la laguna de Carén a pesar de que se utilizó el mismo caudal para ambos experimentos.

Tabla 5.13 Tasa de transferencia de masa, k_t , en distintos tipos de sedimento.

Muestra	Tiempo de Acondicionamiento (horas)	Temperatura Promedio diaria (°C)	Periodo de Ajuste (horas)	Caudal (L/min)	velocidad promedio (cm/seg)	k_t (cm/día)	error cuadrático medio del ajuste C_{∞} (mg/l)
Laguna de Aculeo	3	21,4	20	2	0,347	0,038	0,07
Laguna Carén	3	21,1	9	2	0,347	0,069	0,02

Como el ajuste es a diferentes periodos de tiempo, en la Tabla 5.4 se comparan los valores de $|J_s|$ de las primeras 9 horas de medición. Los valores de $|J_s|$ del ajuste para la laguna de Aculeo son 41% mayores que los conseguidos con el ajuste de la prueba con sedimento de la laguna Carén, a igual valor de OD. Como se muestra en la Tabla 5.13 , los valores de k_t son mayores en la prueba de la laguna Carén y aún así el rango de valores de $|J_s|$ es mayor en la prueba con sedimento de la laguna de Aculeo.

Tabla 5.14 Valores del parámetro S, r y del flujo $|J_s|$

	S (mg/cm/día ²)	Varianza de S (mg/cm/día ²)	Rango $ J_s $ ajuste (g/m ² /día)	r (g/m ³ /día)
Laguna de Aculeo	0,061	0,001	2,439- 3,311	71
Laguna Carén	0,0288	0,0005	1,801 -2,158	33

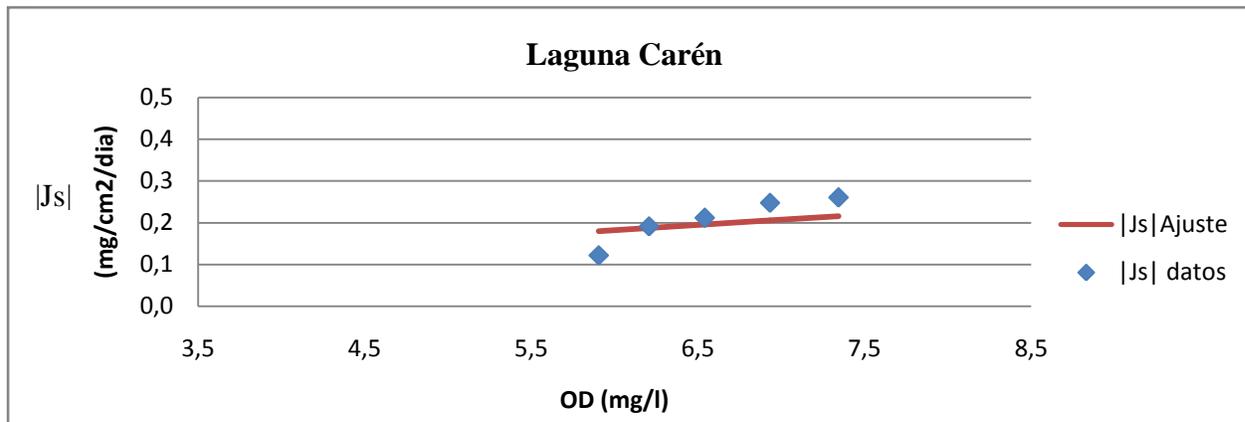
El valor de S es más alto para la laguna de Aculeo que para la laguna Carén, esto podría explicarse en que las muestras de Aculeo eran a simple vista más porosas que el sedimento recolectado en Carén. Si la porosidad es mayor el valor de S aumenta y también lo hace el valor $|J_s|$, suponiendo el mismo valor de k_t .

Como antes se explicó, el valor de r que aparece en la Tabla 5.14 es referencial, pues en el cálculo se supuso una porosidad y un coeficiente de difusión igual para las 2 muestras. Si la muestra de Aculeo tuviera una porosidad mayor que la otra entonces la diferencia entre los valores de r sería menor que el calculado. Esto muestra que un mayor contenido de materia orgánica en las muestras no condiciona por sí sólo un consumo a mayor tasa, sino que es necesario estudiar el sedimento incluyendo su porosidad y coeficiente de difusión.

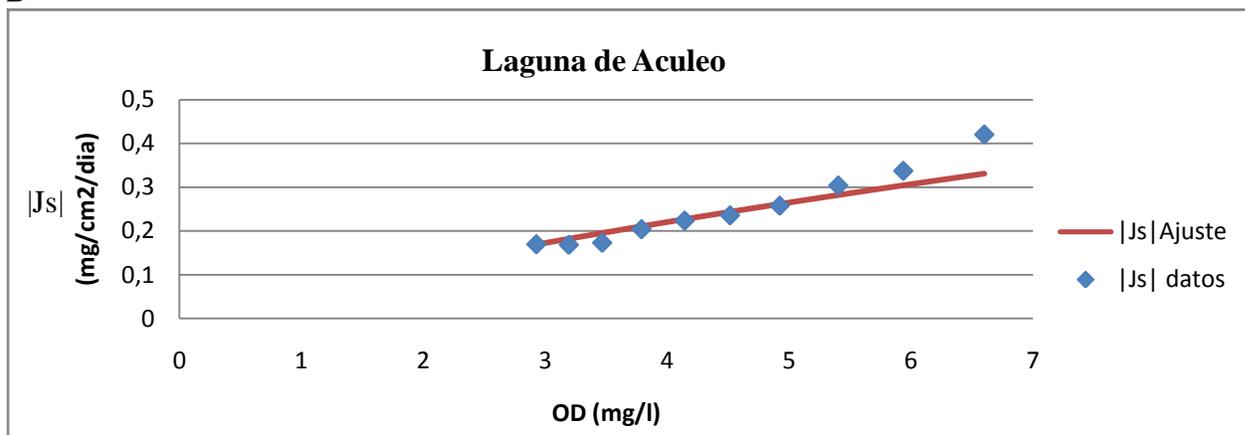
En las Figura 5.8 A y B se muestra en flujo $|J_s|$ de ajuste conseguido con los valores de k_t y S calculados, comparando con los valores de flujo determinados con los datos experimentales de C_∞ . Los puntos presentados corresponden al tiempo de ajuste de 9 horas para la prueba con sedimento de la laguna Carén y 20 horas para la prueba en muestra de la laguna de Aculeo.

Figura 5.8. Flujo de oxígeno hacia los sedimentos. Comparación entre tipos de muestras. A: Laguna Carén, B:Laguna de Aculeo.

A



B



5.5 Efecto de la velocidad del flujo de agua

Para determinar cómo afecta la velocidad del agua del sistema en la determinación de los valores de los parámetros k_t y S , se realizaron 3 pruebas con caudales que no generan resuspensión del sedimento, para los cuales se calculó la velocidad promedio dentro de la cámara. Los caudales escogidos dentro del rango que permite el flujómetro fueron 1, 2 y 3 L/min. En estas pruebas se utilizaron muestras de sedimento tomadas de la laguna Carén.

En la Figura 5.9 se puede ver que para la prueba de 2 L/min hay un cambio de tendencia luego de 9 hrs de experimentación. Esto podría deberse a que el consumo está gobernado por fenómenos diferentes antes y después de este punto. Esto se comprobó utilizando el logaritmo de $C_\infty(t)$, como en las comparaciones anteriores (Anexo A). Debido a esta diferencia, el ajuste de la curva de caudal de 2L/min se realizó sólo a las primeras 9 horas de medición.

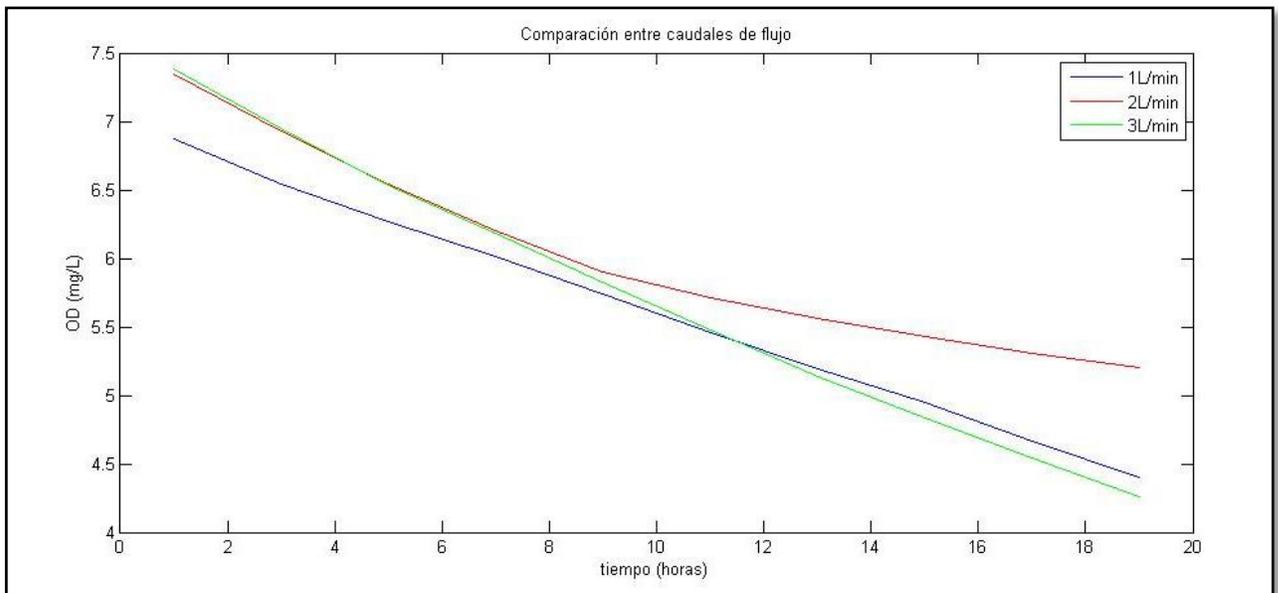


Figura 5.9 Concentración de OD dentro de la cámara béntica para los tres caudales escogidos

En la Tabla 5.15 se muestran los valores de k_t calculados con el ajuste de las curvas $C_\infty(t)$. A medida que crece la velocidad promedio dentro de la cámara la tasa de transferencia de masa se hace mayor

Tabla 5.15 Tasa de transferencia de masa, kt , a distintas velocidades de flujo de agua

Muestra	Tiempo de Acond. (horas)	Temperatura Promedio diaria ($^{\circ}\text{C}$)	Periodo de Ajuste (horas)	Caudal (L/min)	Velocidad promedio (cm/seg)	kt (cm/día)	error cuadrático medio del ajuste C_{∞} (mg/l)
Laguna Carén	3	21,4	20	1	0,174	0,032	0,04
Laguna Carén	3	21,1	9	2	0,347	0,038	0,02
Laguna Carén	3	21,5	20	3	0,521	0,042	0,02

La Tabla 5.16, Tabla 5.17 y Tabla 5.18 muestran el cálculo del parámetro S y los valores de “|Js| ajuste” calculados con los valores de k_t y S obtenidos. Para la prueba con un 1L/min de caudal y velocidad promedio de 0.174 cm/seg, se tienen sólo 3 valores que cumplen con que ψ_{k_t} / ψ_S es menor a 10, es decir no tienen tanta dependencia del parámetro k_t . En el ensayo con caudal de 2L/min ocurre lo mismo, mientras que en la prueba con 3L/min de caudal se tienen 4 valores para el cálculo de S.

Tabla 5.16 Cálculos del parámetro S en prueba con caudal de 1 L/min

Prueba	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	Js Ajuste	Error cuadrático medio entre Js datos y Js ajuste
	(mg/cm/día ²)	-	-	-		
Muestra de la Laguna Carén, con caudal de 1 L/min	0,13	-11,00	0,05	236,0	1,8	0,2
	0,03	0,95	0,14	6,8	1,8	
	0,02	1,14	0,15	7,8	1,7	
	0,04	-0,55	0,10	5,7	1,6	
	0,38	-103,00	0,01	7125,6	1,6	
	0,40	-121,38	0,01	9240,4	1,5	
	0,12	-16,60	0,04	434,0	1,4	
	-0,04*	-	-	-	1,4	
	-0,05*	-	-	-	1,3	
	0,51	-256,59	0,01	30542,3	1,2	
Promedio de S elegidos (mg/cm/día ²)		0,047	Varianza de S elegidos		0,002	

*Valores negativos del parámetro no tienen sentido físico.

Tabla 5.17 Cálculos del parámetro S en prueba con caudal de 2 L/min

Prueba	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	Js Ajuste	Error cuadrático medio entre Js datos y Js ajuste
	(mg/cm/día ²)	-	-	-	(g/m2/día)	(g/m2/día)
Muestra de la Laguna Carén, con caudal de 2 L/min	0,155	-7,23	0,06	128,7	2,2	0,4
	0,173	-10,02	0,05	205,4	2,1	
	0,048	0,18	0,12	1,5	2,0	
	0,032	0,94	0,15	6,1	1,9	
	0,006	0,59	0,31	1,9	1,8	
Promedio de S elegidos (mg/cm/día ²)		0,047	Varianza de S elegidos		0,002	

Tabla 5.18 Cálculos del parámetro S en prueba con caudal de 3 L/min

Prueba	S	ψ_{k_t}	ψ_S	$ \psi_{k_t} / \psi_S $	Js Ajuste	Error cuadrático medio entre Js datos y Js ajuste
	(mg/cm/día ²)	-	-	-	(g/m2/día)	(g/m2/día)
Muestra de la Laguna Carén, con caudal de 3 L/min	0,09	-0,87	0,11	8,3	2,6	0,1
	0,10	-1,96	0,09	22,4	2,5	
	0,04	0,83	0,17	5,0	2,3	
	0,06	-0,30	0,11	2,6	2,2	
	0,10	-2,34	0,08	28,5	2,1	
	0,17	-10,21	0,05	211,7	2,0	
	0,05	0,41	0,12	3,3	1,9	
	0,09	-2,77	0,08	36,4	1,8	
	0,13	-7,85	0,05	146,9	1,7	
	0,18	-17,48	0,04	466,9	1,6	
Promedio de S elegidos (mg/cm/día ²)		0,047	Varianza de S elegidos		0,002	

Una vez obtenidos los parámetros k_t y S, se calcularon los valores de |Js| para cada intervalo de tiempo utilizando la expresión 4.4, a esto se denominó como “|Js| ajuste”. En la Tabla 5.19 se presentan los rangos de flujo calculados a 9 horas, |Js| ajuste, para cada caudal utilizado y los valores obtenidos para los parámetros S y r.

Tabla 5.19 Parámetros S y r obtenidos en pruebas de velocidad.

Muestra	Caudal (L/min)	Rango $ J_s $ ajuste (g/m ² /día)	S (mg/cm/día ²)	r (g/m ³ /día)
Laguna de Carén	1	1,57 - 1,84	0,0325	37,7
Laguna de Carén	2	1,80 - 2,16	0,0288	33,3
Laguna de Carén	3	2,12 - 2,61	0,0590	68,3

El valor del parámetro S, y por lo tanto también r, no muestra una dependencia directa de la velocidad, como se ve en la Figura 5.10. Como se explicó en el marco teórico los parámetros agrupados en S representan propiedades propias del sedimento que no dependen de la velocidad.

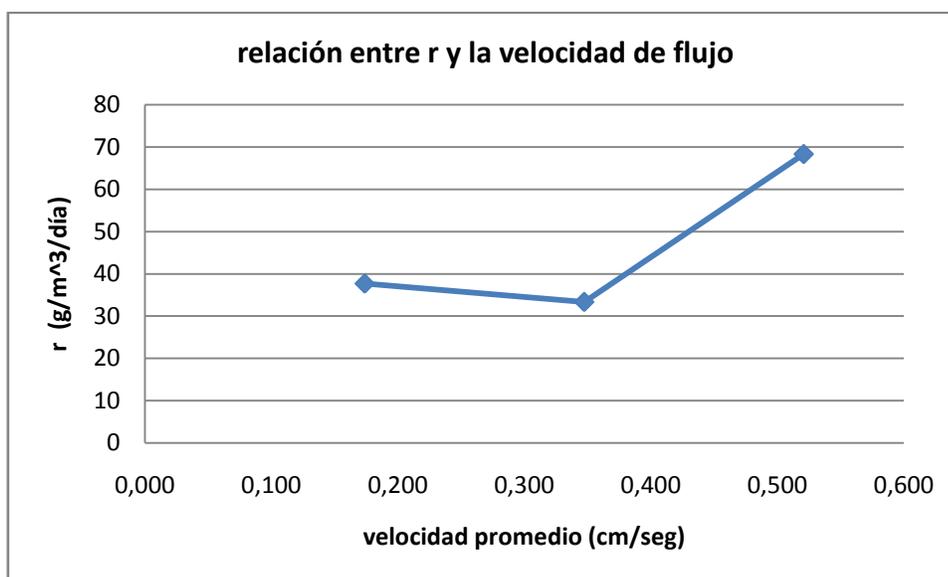


Figura 5.10 Valores de la tasa r obtenidos para las distintas velocidades de las pruebas

Comparando para el mismo valor de oxígeno, $|J_s|$ de ajuste para un caudal de 2L/min es un 10% mayor al valor de $|J_s|$ de ajuste para el caudal 2 L/min. A su vez el valor de flujo de ajuste del ensayo a caudal de 3L/min es un 20% mayor que el de 2 L/min. Las curvas de $|J_s|$ de ajuste tienen errores de 0,2, 0,4 y 0,1 con respecto a la curva de datos experimentales de $|J_s|$. En las Figura 5.11 A, B y C se muestra en flujo $|J_s|$ de ajuste conseguido con los valores de k_t y S calculados, comparado con los valores de flujo determinados con los datos experimentales de C_∞ . Los puntos presentados corresponden al periodo de ajuste de 9 y 20 horas para las pruebas.

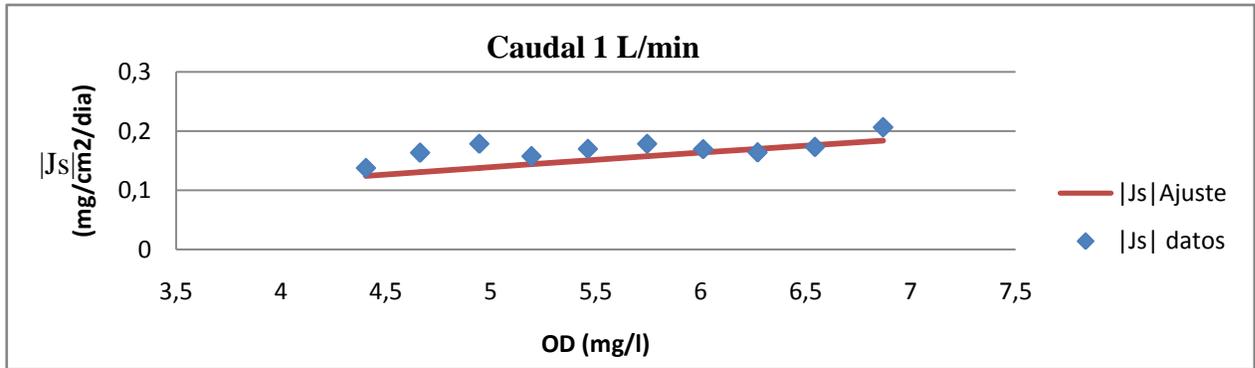
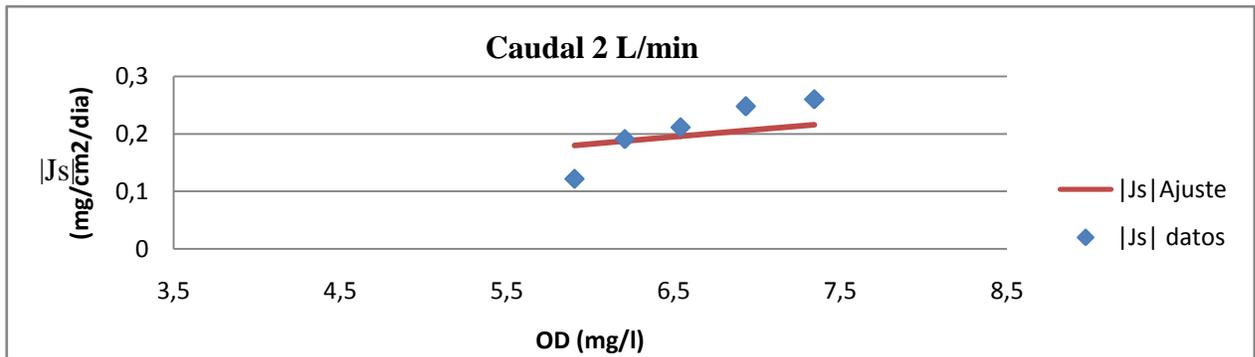
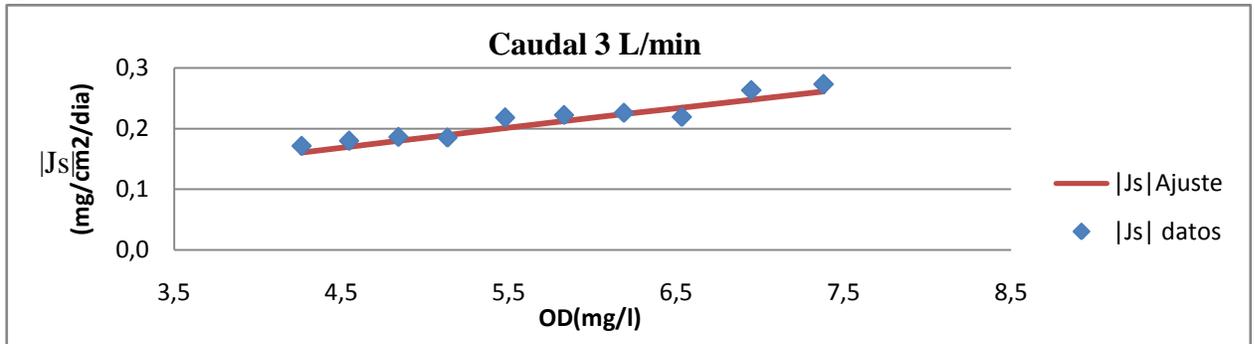
A**B****C**

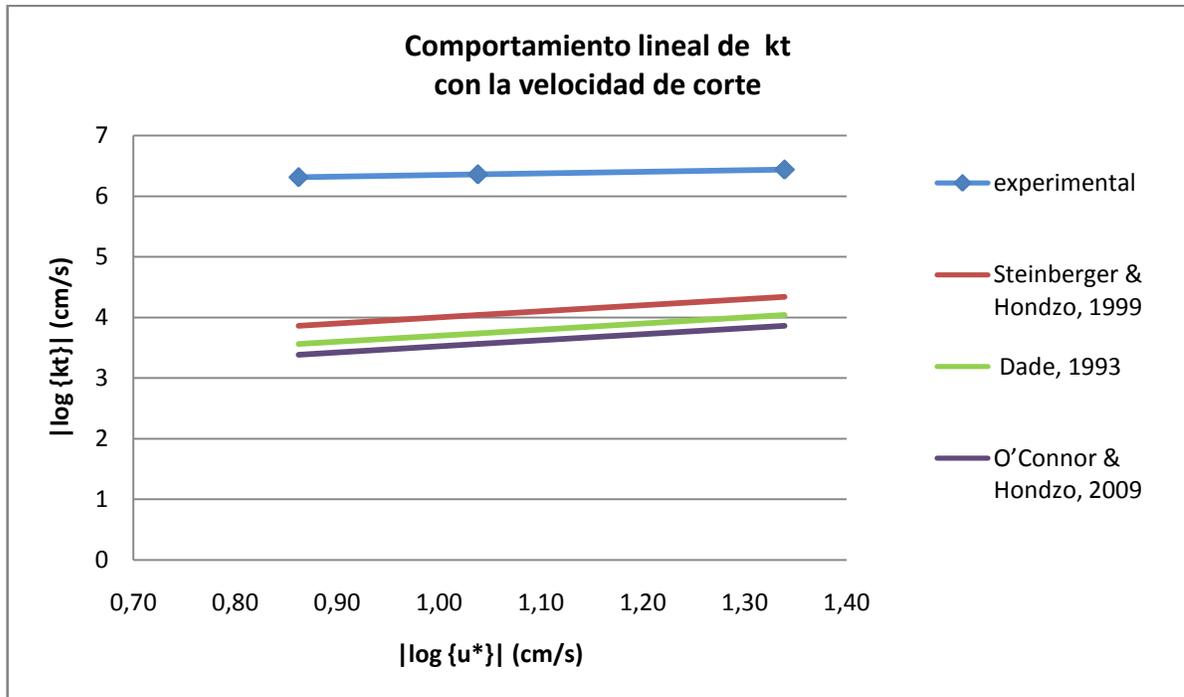
Figura 5.11 Flujo de oxígeno hacia los sedimentos, $|J_s|$, registrado para los 3 caudales utilizados en las pruebas y ajuste realizado con la expresión 4.4. A: Caudal 1L/min, B: Caudal 2L/min, C: Caudal 3L/min.

Los valores del flujo de oxígeno $|J_s|$ y también de k_t crecen con la velocidad promedio del flujo de agua (Tabla 5.19). Se estimó la velocidad de corte de las pruebas, para ello se calculó el coeficiente friccional de Darcy – Weisbach suponiendo que el régimen era hidráulicamente liso en la ecuación de Colebrook White.

Al ver el comportamiento de los valores de k_t obtenidos con respecto a la velocidad de corte u^* , resulta una relación lineal (Figura 5.12) al igual que en experiencias registradas por otros autores

(O'Connor & Hondzo, 2009; Dade, 1993; Steinberger & Hondzo, 1999), pero la pendiente de los datos experimentales es mucho menor a la pendiente de las experiencias referenciadas, $\alpha=10^{-3}$ versus 10^{-6} . Estos bajos valores de k_t responden a que la velocidad utilizada en las pruebas es pequeña en comparación con la utilizada en otras investigaciones, donde la menor encontrada es 1.3cm/s (O'Connor, 2009).

Figura 5.12. Relación del coeficiente de transferencia de masa con la velocidad de corte



5.6 Inconsistencia experimental en respuesta de la exposición a la luz

Se realizaron dos pruebas con los mismos tiempos de acondicionamiento e igual caudal. Una de ellas se realizó en presencia de luz ambiental. El ajuste de la prueba con luz se pudo hacer sólo a las primeras 11 horas, porque después existía un cambio de tendencia para el gráfico del logaritmo del oxígeno, anexo A.

Al existir producción fotosintética en el sistema se suma un ingreso de oxígeno al sistema, por lo que la variación de la concentración de oxígeno es más lenta. Las pruebas realizadas se presentan en la Figura 5.13 donde, contrario a lo esperado, en presencia de luz consumió el OD del agua de la cámara más rápido que la prueba sin luz.

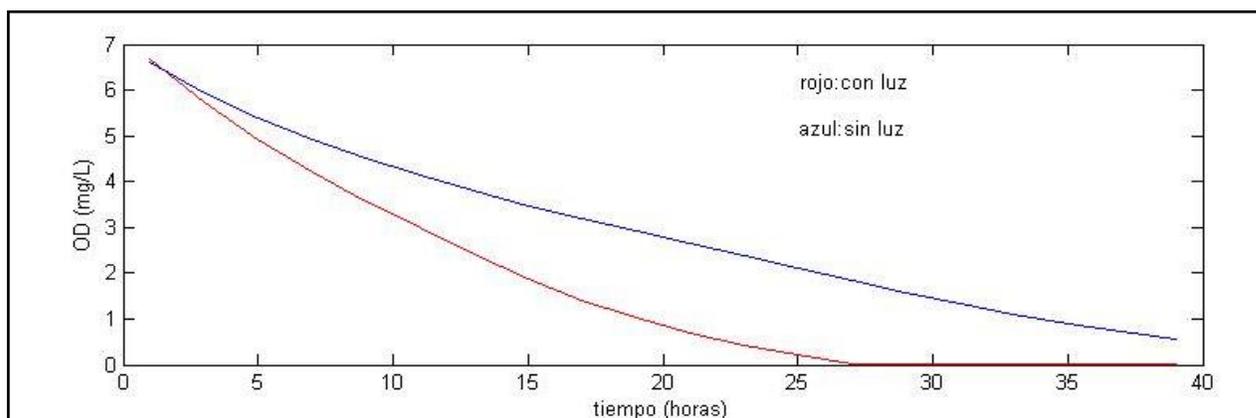


Figura 5.13. Concentración de OD dentro de la cámara béntica. Pruebas de luz.

En la Tabla 5.20 y Tabla 5.21 se muestran los parámetros calculados para estas pruebas. Para la prueba con luz se obtuvieron valores de $|Js|$ 40% mayores que para la prueba sin luz, al comparar para niveles iguales de OD. Por otro lado, los valores de k_t calculados para estas pruebas tienen una diferencia de 0.1cm/día a pesar de que la velocidad promedio dentro de la cámara es la misma en las dos pruebas. En las pruebas realizadas en la sección 5.5 se encontró que la mayor diferencia entre los valores de kt era de 0.01cm/día, por lo que una diferencia en las condiciones de flujo dentro de la cámara podría explicar el comportamiento de la prueba con luz.

Tabla 5.20 Tasa de transferencia de masa en pruebas de luz.

Prueba	Tiempo de Acondicionamiento (horas)	Temperatura Promedio diaria (°C)	Periodo de Ajuste (horas)	Caudal (L/min)	velocidad promedio (cm/seg)	k_t (cm/día)	error cuadrático medio del ajuste C_∞ (mg/l)
Con luz ambiental	3	19,4	11	2	0,347	0,17	0,03
Sin luz ambiental	3	21,4	20	2	0,347	0,038	0,07

Tabla 5.21 Valores del parámetro S, r y del flujo |Js|

Prueba	S (mg/cm/día ²)	Varianza de S (mg/cm/día ²)	Rango Js (g/m ² /día)	r (g/m ³ /día)
Con luz ambiental	0,0964	0,0002	3,267 - 5,731	112
Sin luz ambiental	0,0614	0,001	1,692 - 3,311	71

6 Conclusiones y Recomendaciones

El diseño y construcción de la cámara béntica presentada en esta memoria permite realizar pruebas para medir el coeficiente de caracterización del sedimento (S) que agrupa la porosidad (Φ), el coeficiente de difusión (D_s) y la tasa de consumo de oxígeno (r). Por lo tanto, con la implementación de sistemas que permitan estimar la porosidad y el coeficiente de difusión se puede obtener la tasa de consumo de oxígeno. Sin embargo, se propone el parámetro S como el más adecuado para caracterizar el consumo de oxígeno en un determinado sedimento, pues agrupa las características bioquímicas y estructurales del sedimento. La metodología experimental propuesta permite obtener el coeficiente S con un proceso de menos de un día de duración total, considerando los períodos de acondicionamiento y ajuste de curvas.

La estación experimental diseñada es capaz de simular la circulación de agua a distintas velocidades en un sistema acuático, además permite ensayar muestras inalteradas de sedimento en un entorno sellado, sin incorporación externa de oxígeno y con amortiguación de las temperaturas ambientales. Estas características hacen de la estación diseñada una herramienta para el desarrollo del proyecto FONDECYT 11100306.

Con las pruebas realizadas se pretendió llegar a determinar una metodología de trabajo con la instalación experimental y no fue el objetivo de este trabajo caracterizar los sedimentos de las lagunas Aculeo y Carén, para ello se necesitaría de un diseño de muestreo más acabado, que permita recabar datos más representativos de cada laguna.

Dado que la literatura no menciona valores referenciales de S , se procedió a estimar la tasa de consumo de oxígeno para compararla con las obtenidas en otros estudios (Baladrón, 2011), la similitud entre los valores estimados en este trabajo y los encontrados en esos otros estudios hacen suponer que la metodología y el diseño propuestos entregan rangos de valores de r reales. Es necesario mencionar que la tasa de consumo de oxígeno se calculó en base a una porosidad y un coeficiente de difusión elegidos con los criterios mencionados en el cuerpo de la tesis.

Los parámetros obtenidos en todas las pruebas realizadas durante la experimentación permitieron calcular las curvas de flujo de oxígeno $|J_s|$ de ajuste, cuyo mayor error cuadrático medio con respecto a las curvas $|J_s|$ de datos fue de $0.4 \text{ g/m}^2/\text{día}$.

No se encontró una relación directa entre los valores de kt , S o $|J_s|$ con el tiempo de acondicionamiento. En cambio, se obtuvo que k_t tiene un comportamiento lineal con la velocidad del flujo de agua.

En el diseño de la cámara el rango de medición del flujómetro y la capacidad de la bomba limitan el espectro de velocidades promedio dentro del sistema, y como el valor del parámetro k_t depende de la velocidad no es posible conseguir resultados altos para la tasa de transferencia de masa. En los ensayos realizados se encontraron diferencias significativas en el valor de k_t para experiencias en que se utilizó el mismo tipo de muestra y la misma velocidad de flujo de agua, podrían explicarse por cambios en la rugosidad de la superficie del sedimento que provocarían mayor turbulencia en la capa límite. Por esto se debe tener en cuenta la importancia de que las muestras

tomadas en terreno tengan superficies similares y que el sedimento no se mueva, para que sean comparables dos experimentos. Por otro lado las diferencias de k_t también podrían deberse a que las mangueras principales y secundarias de la instalación hubieran quedado dobladas en el proceso de instalación de la muestra, cambiando el flujo dentro de la cámara. Una mejora en el diseño que podría solucionar esto, sería fijar la posición de la bomba al estanque dejando 2 válvulas de conexión de las mangueras principales de modo de poder sacar la cámara para la instalación de muestras. Además se deberá acortar las mangueras de modo que su posición sea fija.

La utilización del estanque de amortiguación de temperatura permite reducir considerablemente el nivel de las oscilaciones diarias a 0.78°C . Sin embargo no permite elegir una temperatura específica y depende de las condiciones climáticas estacionales. Así se alcanzarán temperaturas distintas si las experiencias se realizan en invierno o verano. De ser necesario trabajar en un rango de temperaturas específica, se deberá evaluar si las temperaturas atmosféricas esperadas para el periodo de experimentación permiten trabajar en el rango adecuado. De no ser así se podría instalar un sistema de regulación de temperatura que produzca las condiciones requeridas

La materia orgánica no es, por sí sola, una forzante del flujo de oxígeno hacia los sedimentos, sino que la porosidad (Φ) y el coeficiente de difusión (D_s) son muy relevantes en el proceso.

Dentro de las posibles fallas experimentales que se pudiesen, tener una es la filtración de oxígeno dentro de la cámara por errores en la instalación de la muestra o de los sensores. Según el comportamiento visto en las experiencias, en casos en que haya problemas de sellado de todas formas se registrará una disminución de OD en el tiempo, sin embargo esta disminución será baja en comparación con experimentos realizados en el mismo tipo de sedimento. Es posible identificar que la cámara tiene filtraciones en las primeras horas de experimentación, pero siempre que se realice más de un experimento para realizar la comparación.

Otra de las fallas más comunes es la resuspensión desde el contenedor de sedimento, durante la instalación de las muestras y/o el llenado de agua de la cámara. Para evitar esto es muy importante aprender a manipular la cámara, por lo que el operador debe realizar ensayos de previos para adaptarse a su uso. Estos ensayos también permitirán conocer el comportamiento del sedimento para distintas velocidades y así elegir aquellas que no generen resuspensión.

La manipulación del equipo de medición de oxígeno y su mantención es muy importante para obtener buenos resultados. Problemas en la calibración del sensor dan mediciones de oxígeno superiores a las reales. Por eso se debe realizar la calibración, del modo que se indica en el manual del equipo, antes de comenzar cada prueba y de ser necesario realizar la mantención del sensor.

Los cambios bruscos en la tendencia de las curvas podrían significar que el consumo de oxígeno es gobernado por mecanismos distintos, por ejemplo un cambio en el tipo de consumo biológico o químico. Por ello conocer el contenido bioquímico de las muestras de sedimentos, podría ayudar a conocer a que se deben estos cambios de tendencia.

7 Referencias

Arega, F. and Lee, J.H.W. 2005. Diffusional mass transfer at sediment-water interface of cylindrical sediment oxygen demand chamber. *Journal of Environmental Engineering*. 131: 755-766.

Balabrón Manríquez, M.F. 2011. Estudio de la termo-hidrodinámica del ecosistema humedal ciénagas del Name. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Bröström, G. and Nilsson, J. 1999. A theoretical investigation of the diffusive boundary layer in benthic flux chamber experiments. *Journal of sea research*.42: 179-189.

Campbell, N.A. y Reece, J.B. 2005. Biología. 7ª Edición. Editorial médica panamericana. Buenos Aires, Argentina.

Castillo, G. 2008. Apuntes curso Calidad de Aguas, Microbiología de Aguas. Diplomado en contaminación de Aguas. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Dade, W.B. 1993. Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor. *Limnol. Oceanogr.* 38:52-69

de la Fuente, A., (Oct. 2010 – Oct 2013). Coupling water- and sediment-sides perspectives for quantifying dissolved oxygen exchanges across the water- sediment interface in an extremely shallow flow energized by the wind. Proyecto FONDECYT de Iniciación 11100306.

del Rosario J.J.A. 2005. Oceanografía ambiental: física de la difusión turbulenta en el océano. Editorial Tébar, Madrid.

Fuentes, F. y Massol-Deyá, A. 2002. Manual de laboratorios ecología de microorganismos. Universidad de Puerto Rico. <<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p3-oxígeno.pdf>>. [Consulta: 28 /06/2011].

Gerdtzen, Z.P. 2009. Difusión y ley de Fick. Apuntes del curso: Biología Celular. *Departamento de Biotecnología. Universidad de Chile*.

Grisolía Santos, D. Apuntes de Contaminación Marina: Procesos Físicos. Lección 4. Turbulencia. Difusión turbulenta. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. <http://www.ulpgc.es/servicios/si/proyectosdocentes/pdf.php?id_proyecto=13499&idioma=1> [Consulta: 04/06/2006].

Henry, G. y Heinke, G. 1999. Ingeniería Ambiental. 2da Edición. Editorial Prentice Hall. México. 264.

Higashino, M., Gantzer, C.J. and Stefan, H.G. 2004. Unsteady diffusional mass transfer at the sediment/water interface: Theory and significance for SOD measurement. *Water Research*. 38: 1-12.

Hondzo, M., and Steinberger, N. 2002. A semi-analytical model for dissolved oxygen mass transfer at the sediment-water interface. *Hydrobiologia*, 479: 63-68.

Hondzo, M., Feyaerts, T., Donovan, R., and O'Connor, B.L. 2005. Universal scaling of dissolved oxygen distribution at the sediment-water interface: A power law. *Limnol. Oceanogr.*, 50, 1667-1676.

ILCE, Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa. Organismos de los fondos oceánicos o bentónicos. Biblioteca Digital IICE.

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/46/htm/sec_5.html>.

[Consulta: 04/06/2011]

Inoue, T. and Nakamura, Y. 2009. Effects of hydrodynamic conditions on sediment oxygen demand: experimental study based on three methods. *Journal of environmental engineering*. 135: 1161-1170.

Josiam, R. and Stefan, H.G. 1999. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Comparison of theory and experiments. *J. Am. Water Resources Assoc.* 35(2): 433-9.

Manahan, S.E. 2007. Introducción a la química ambiental. *Reverté ediciones. Universidad Autónoma de México*.

Mathews, J.H. y Fink, K.D. 2000. Métodos numéricos con MATLAB. 3era Edición. *Editorial Prentice Hall. Madrid*. 498.

Mellado, C. 2010. Apuntes curso Calidad de Aguas, Análisis Físico Químico de Aguas. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Miller-Way, T., Boland, G.S., Rowe, G.T. and Twilley, R.R. 1994. Sediment Oxygen Consumption and Benthic Nutrient Fluxes on the Louisiana Continental Shelf: A Methodological Comparison. *Estuaries*. 17(4):809-815.

Muñoz Quiñones, J.A. 2007. Estudio experimental de los procesos de transporte y transferencia de masa en la capa límite béntica de estuario. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.

Nakamura, Y., and Stefan, H.G. 1994. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: theory. *J. Environ. Engin.* 120: 996–1016.

O'Connor, B.L., Hondzo, M. 2008b. Enhancement and inhibition of denitrification by fluid-flow and dissolved oxygen flux to stream sediments. *Environ. Sci. Technol.* 42: 119-125.

O'Connor, B.L., Hondzo, M. and Harvey, J.W. 2009. Incorporating both physical and kinetic limitations in quantifying dissolved oxygen flux to aquatic sediments. *Journal of environmental engineering.* 135: 1304-1314.

Madigan, M.T, Martinko, J.M, and Parker, J. 2003. Brock: Biología de los microorganismos. 10ª Edición. Prentice Hall.

Rasmussen, H. and Jorgensen, B.B. 1992. Microelectrode studies of seasonal oxygen uptake in a coastal sediment: role of molecular diffusion. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 81: 289-303.

Soluziona Chile S.A. 2002. Declaración de impacto ambiental proyecto planta de tratamiento de aguas servidas Ciudad Jardín Lo Prado. <http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=5664>. [Consulta: 03/07/2012]

Sommer, S., Türk, M., Kriwanek, S. and Pfannkuche, O. 2008. Exchange system for extended in situ benthic chamber flux measurements under controlled oxygen conditions: First application- Sea bed methane emission measurements at Captain Arutyunov volcano. *Limnol. Oceanogr.: Methods.* 6: 23-33.

Steinberger, N. and Hondzo, M. 1999. Diffusional mass transfer at sediment-water interface. *J. Environ. Eng.* 125(2): 192-200.

Streeter V. L. and Wylie, E. B. 1987. Mecánica de los fluidos. Editorial McGraw-Hill. México

Wetzel, Robert G. 1981. Limnología. Editorial Omega, D.L. Barcelona.

Yew-Hoong Gin, K. and Padma, A. 2010. Sediment oxygen demand and nutrient fluxes for tropical reservoir in Singapore. *J. Environ. Engin.* 136: 78-85.

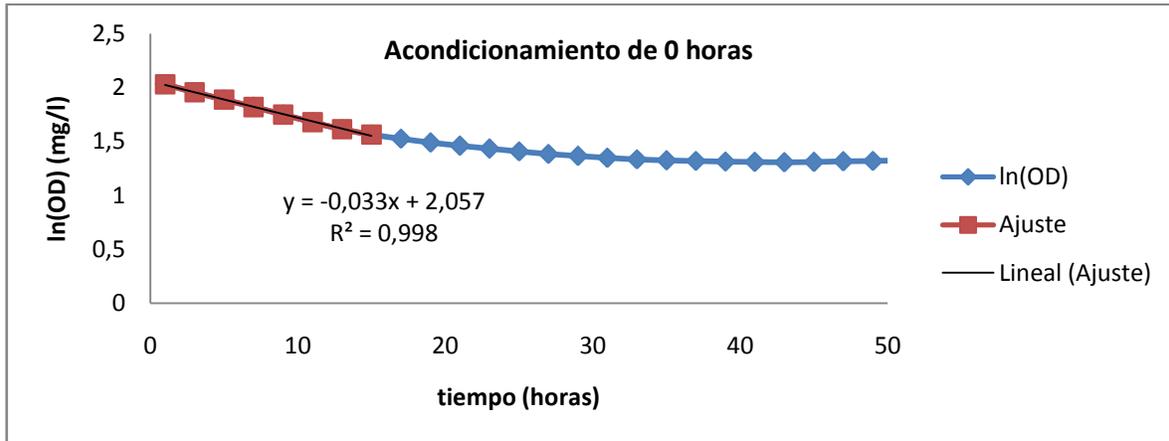
Anexo:A

Gráficos de Logaritmo de oxígeno disuelto en el tiempo

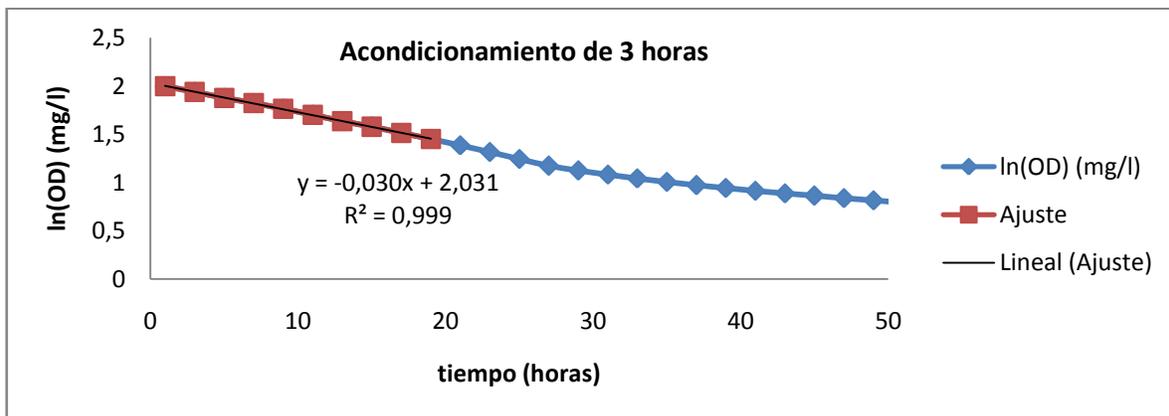
A1. Respuesta a distintos tiempos de acondicionamiento

A continuación se presentan los periodos elegidos para el ajuste a la curva $C_{\infty}(t)$. El periodo elegido se muestra en cada gráfico junto con su regresión lineal y coeficiente de regresión, R^2 .

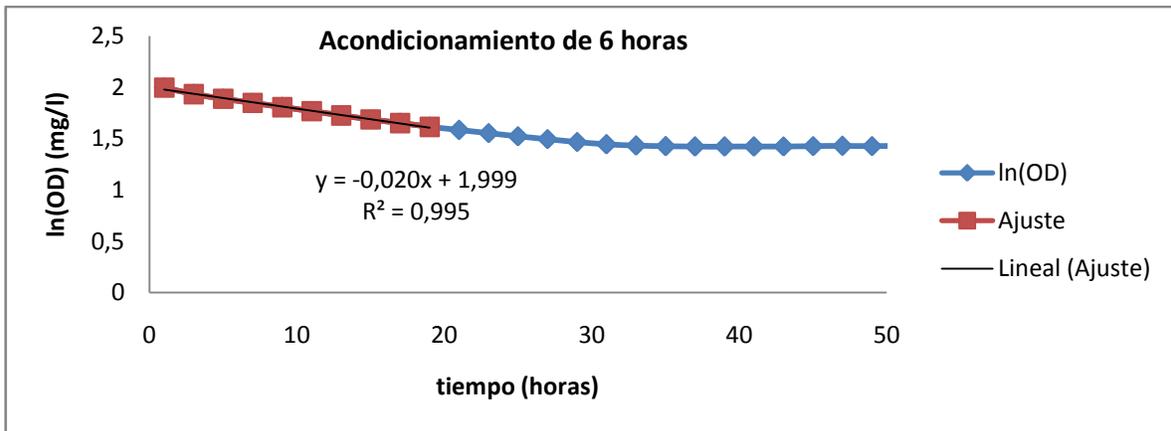
Periodo de ajuste para prueba con acondicionamiento de 0 horas.



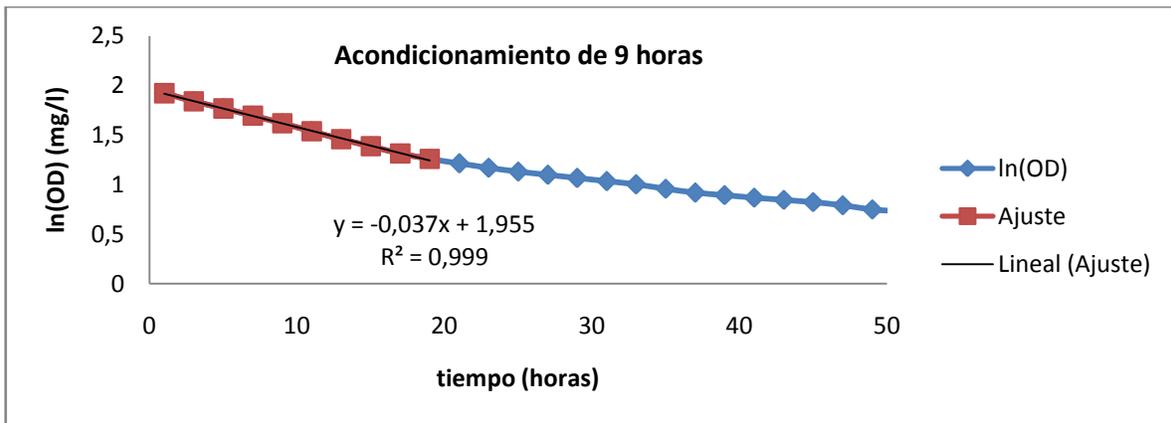
Periodo de ajuste para prueba con acondicionamiento de 3 horas.



Periodo de ajuste para prueba con acondicionamiento de 6 horas.

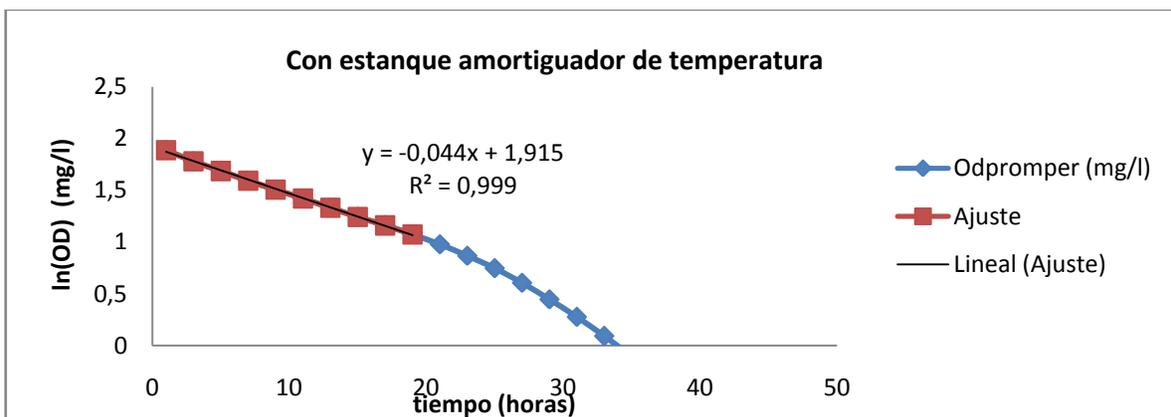


Periodo de ajuste para prueba con acondicionamiento de 9 horas.

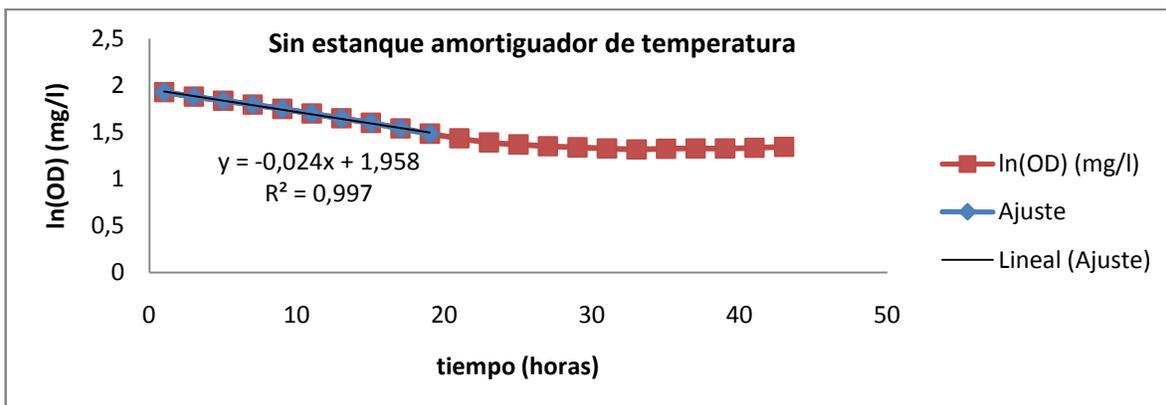


A2. Respuesta al uso del estanque amortiguador de temperatura

Periodo de ajuste para prueba con estanque amortiguador de temperatura en muestra de la laguna de Aculeo.

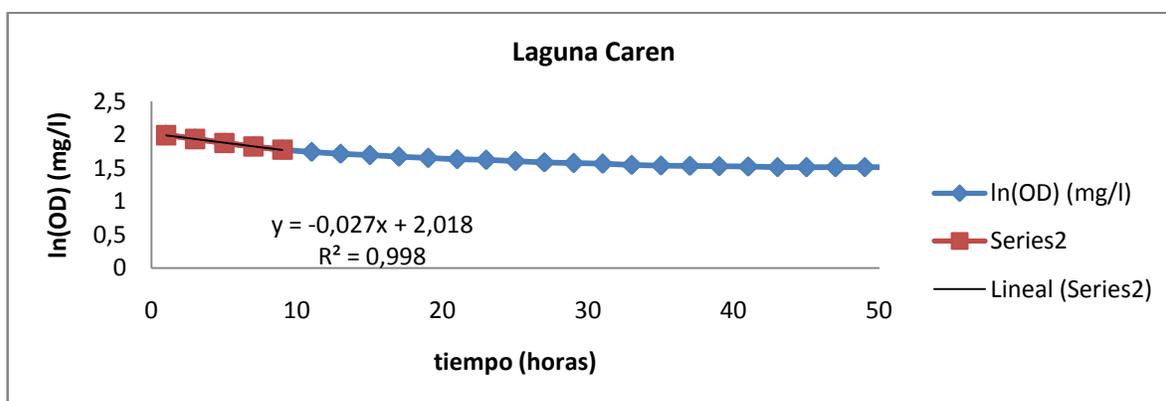


Periodo de ajuste para prueba sin estanque amortiguador de temperatura en muestra de la laguna de Aculeo.

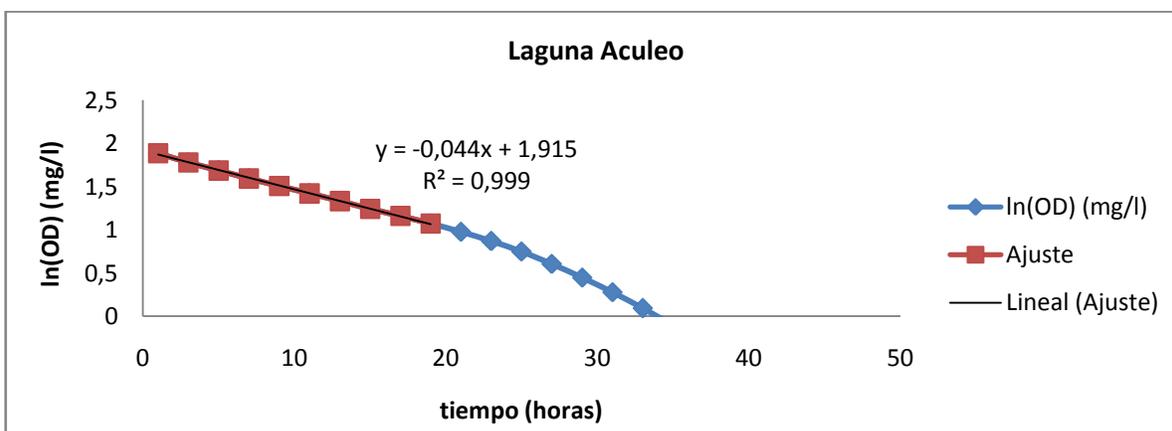


A3. Pruebas en muestras con distinto grado de materia orgánica

Periodo de ajuste para pruebas con sedimentos provenientes de la Laguna Carén

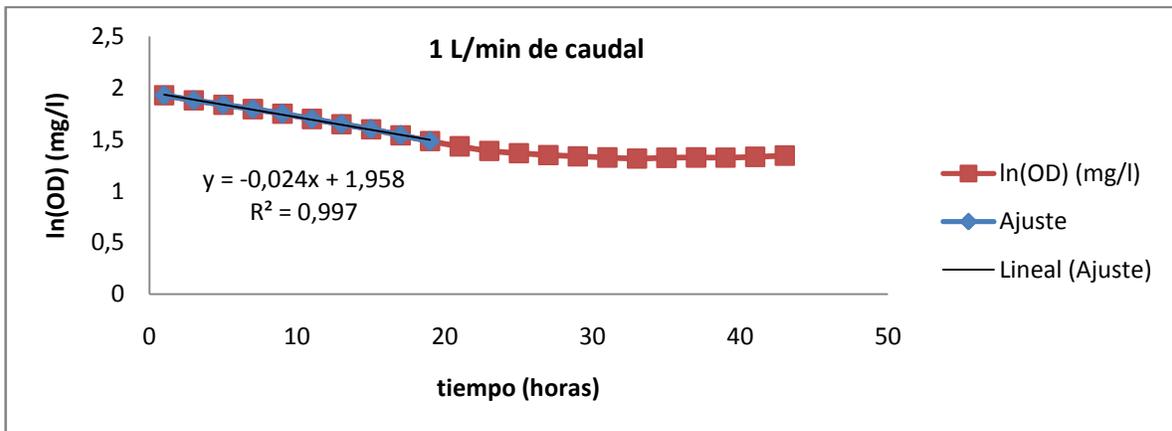


Periodo de ajuste para pruebas con sedimentos provenientes de la Laguna Aculeo

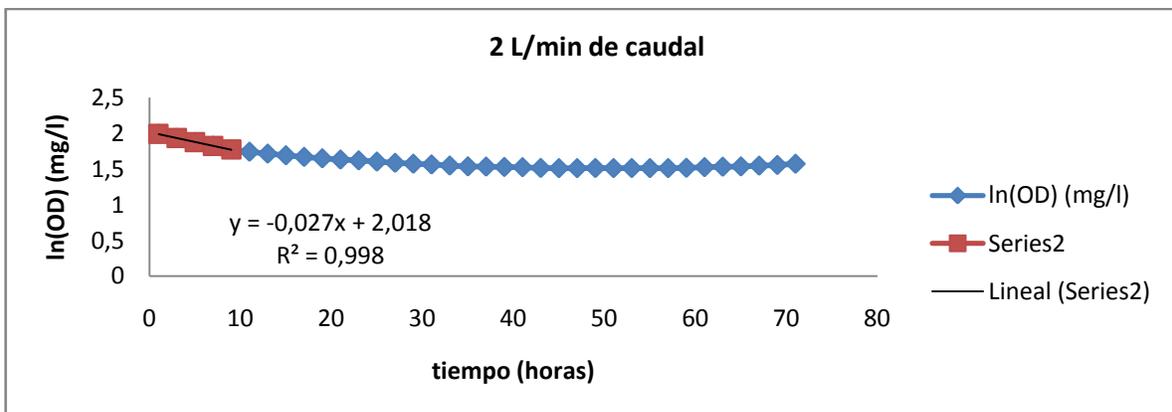


A4. Efecto de la velocidad de flujo del agua

Periodo de ajuste para prueba con 1 L/min de caudal.

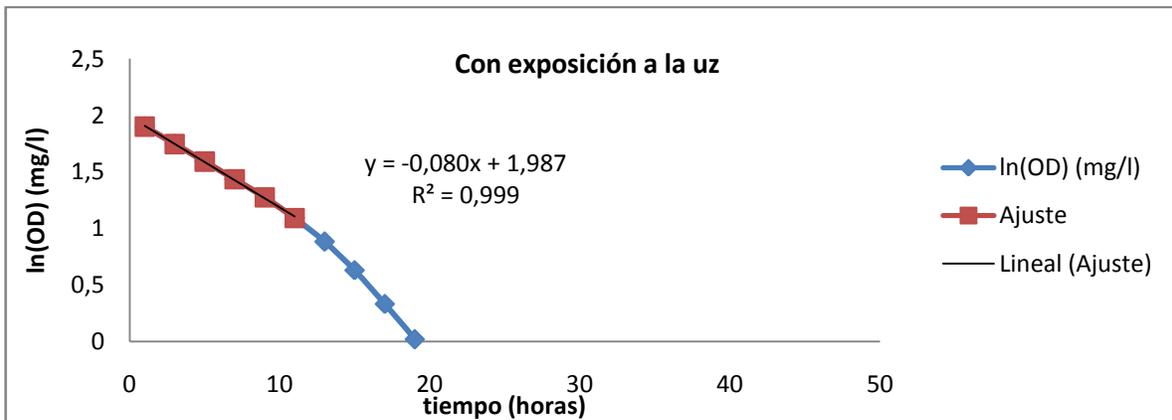


Periodo de ajuste para prueba con 2 L/min de caudal.

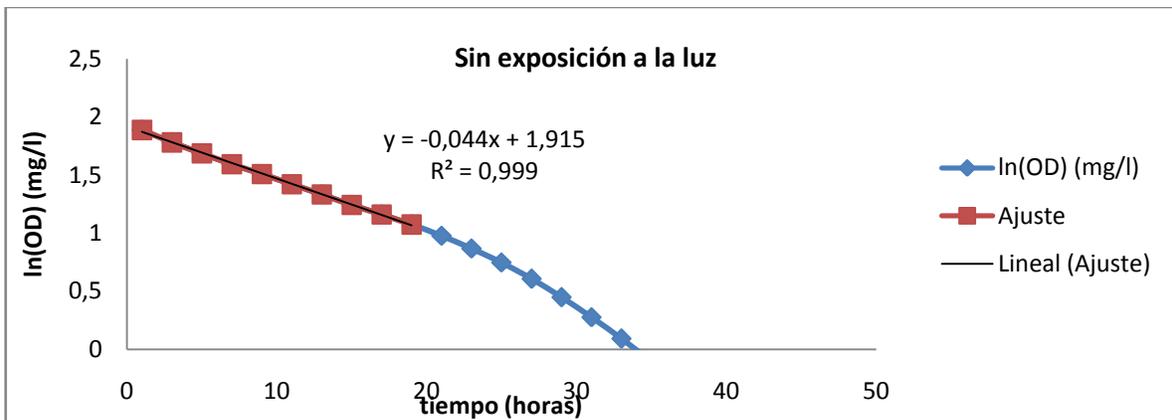


A5. Exposición a la luz

Periodo de ajuste para prueba en presencia de luz.



Periodo de ajuste para prueba sin exposición de luz



Anexo: B

Rutina en lenguaje para Matlab

Rutina en lenguaje para Matlab

Esta rutina permite extraer los datos de una planilla Excel y procesarlos para disminuir la dispersión. Luego envía los datos a un nuevo archivo Excel, donde se puede realizar el ajuste a la curva de la concentración de OD en el tiempo, según se explicó en el capítulo Metodología de . La rutina desarrollada encuentra en forma digital en el DVD incluido en esta memoria. La ruta de acceso a los datos es E:\ DVD_trabajo de titulo_MBustos\Anexo B\rutina_procesamiento_datos

```
%%% Traer datos de OD y temperatura desde planilla excel y graficarlos %%%  
  
clc  
  
while(true)  
  
archivo=input('nombre de archivo excel: \n','s');  
  
try  
  
datos=xlsread(archivo);  
  
break  
  
catch  
  
disp('no existearchivo');  
  
disp(archivo)  
  
break  
  
end  
  
end  
  
  
OD=[];  
  
OD=datos(:,2);  
  
TEMPERATURA=[];  
  
TEMPERATURA=datos(:,4);  
  
  
n=length(datos);  
  
SEGUNDOS=[1:n];  
  
SEGUNDOS=SEGUNDOS';
```

```
MINUTOS=SEGUNDOS/60;
```

```
HORAS=MINUTOS/60;
```

```
figure(1)
```

```
subplot(2,1,1)
```

```
plot(HORAS,OD,'b-')
```

```
disp('gráfico de OD versus tiempo en horas en azul')
```

```
title(archivo)
```

```
xlabel('tiempo (horas)')
```

```
ylabel('OD (mg/L)')
```

```
subplot(2,1,2)
```

```
plot(HORAS,TEMPERATURA,'g-')
```

```
disp('gráfico de TEMPERATURA versus tiempo en horas en verde')
```

```
xlabel('tiempo (horas)')
```

```
ylabel('Temp.(°C)')
```

```
%%%%%%%% para disminuir la dispersión se saca el promedio cada d datos%%%%%%%%
```

```
d=input('¿cada cuántos datos desea sacar el promedio? (datos tomados cada 1 segundo): \n');
```

```
i=floor(d/2);
```

```
k=1;
```

```
ni=length(OD);
```

```
l=floor(ni/d);
```

```
ODm=OD(1:l*d,1);
```

```
ODmatriz=reshape(ODm,d,l);
```

```
globalODpromper
```

```
ODpromper=zeros(1,1);
```

```

tempo=zeros(1,1);
for k=1:l
ODpromper(k)=mean(ODmatriz(:,k));
tempo(k)=HORAS(i);
    k=k+1;
i=i+d;
end

figure(2) %comparación gráfica entre los datos registrados y el promedio por periodos%
subplot(2,1,1)
plot(HORAS,OD,'b-')
title(archivo)
xlabel('tiempo (horas)')
ylabel('OD (mg/L)')
hold on
subplot(2,1,2)
plot(tempo,ODpromper,'g-')
title('promedio por periodos de 10 min')
xlabel('tiempo (horas)')
ylabel('OD por periodos (mg/L)')
holdon
disp('gráfico de OD versus tiempo en horas en azul \n')
disp('gráfico de OD promedio versus tiempo en horas en verde')

%%% Se crea un nuevo archivo Excel donde trabajar con los datos procesados %%%
file=input('Cual es el nombre del archivo: ','s');
hoja=('Hoja1');
[estado]=xlswrite(file,tempo,hoja,'A2');

```

```
if estado==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

else

```
disp('creado');
```

end

```
[estado]=xlswrite(file,ODpromper,hoja,'B2');
```

if estado==0

```
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

else

```
disp('creado');
```

end

Anexo: C

Planilla de cálculo de los parámetros k_t y S.

Planilla de cálculo de los parámetros k_t y S , realizada en programa Excel

La planilla desarrollada para el cálculo de los parámetros S y k_t del ensayo desarrollado en una muestra de la laguna Carén, se encuentra en forma digital en el DVD incluido en esta memoria. Esta planilla se puede utilizar simplemente cambiando los valores de la columna ODpromper, que se refiere a los datos de oxígeno disuelto promediados cada 2 horas. La ruta de acceso a los datos es E:\DVD_trabajo de titulo_MBustos\Anexo C.

