

00550

9



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUIMICAS

TRANSFERENCIA DE OXIGENO POR CONVECCION EN SISTEMAS QUE SIMULAN HUMEDALES ARTIFICIALES UTILIZANDO COLUMNAS EMPACADAS

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A :

FRANCISCO ENRICO FENOGLIO LIMÓN

TUTOR: DRA. CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ



Ciencias Químicas

autorizo a la Dirección General de Sist. UNAM a difundir en formato electrónico el contenido de mi trabajo rec

NOMBRE: FRANCISCO ENRICO FENOGLIO LIMÓN

FECHA: 22/08/2007

FIRMA: [Signature]

2003

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

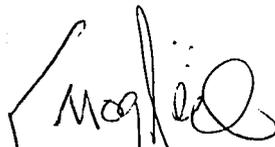
Jurado:

Presidente	Dra. Martha Aguilar Martínez
Vocal	Dr. Simón González Martínez
Secretario	Dr. Joan Genescá Llongueras
Primer Suplente	M. en C. Trinidad Martínez Castillo
Segundo Suplente	Dr. Germán Buitrón Méndez

Sitios donde se realizó la investigación:

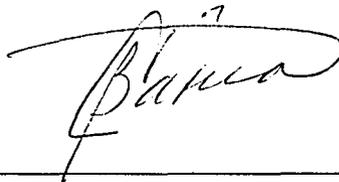
UNAM, Facultad de Química, Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Laboratorios 301 a 303 del Conjunto "E"

Sustentante



Francisco Enrico Fenoglio Limón

Tutor principal



María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa

TESIS CON
VALIA DE ORIGEN

Agradecimientos

El autor agradece:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado, así como para realizar dos estancias académicas en la RFA en el marco del Proyecto 2+2 y por el apoyo recibido con el Proyecto 00-06-016-V del Sistema Golfo de México “*Depuración de aguas residuales domésticas usando humedales artificiales*”.

A la Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica, GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit).

Al Centro de Investigaciones Ambientales, UFZ (Umwelt Forschung Zentrum) Leipzig-Halle, Alemania.

A la Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa, al Dr. Joan Genescá Llongueras y al Dr. Oliver Bederski por su valioso apoyo académico a lo largo de esta investigación.

A los miembros del comité tutorial por sus comentarios y aportaciones.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Resumen	10
Abstract	11
Glosario de términos	12
I. INTRODUCCIÓN	14
I.1 Aspectos generales de los humedales artificiales	14
I.1.1. Aplicaciones de los humedales artificiales	15
I.1.2. Transferencia de oxígeno en los HA	16
I.2. Métodos para la medición de oxígeno disuelto	17
I.2.1. Potencial de óxido-reducción	18
I.2.2. El electrodo normal de hidrógeno	19
I.3. Objetivos	20
I.4. Hipótesis	21
II. FUNDAMENTOS	22
II.1. Determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La})	22
II.2. Balance de oxígeno en una columna empacada	23
III. MATERIALES Y MÉTODOS	26
III.1. Potencial de óxido-reducción como medición indirecta del oxígeno disuelto	26
III.1.1. Construcción de las columnas	28
III.1.2. Construcción y colocación de los electrodos	29
III.1.3. Operación del equipo	30
III.1.4. Pruebas preliminares	31
III.2. Evaluación de la transferencia de oxígeno por convección	33
III.2.1. Construcción e instalación del equipo	33

III.2.3 Medición del aire succionado	35
III.2.4 Medición del oxígeno disuelto	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
V. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	49
ANEXOS	51
Anexo A. Construcción del equipo experimental	52
A.1. Determinación de la relación entre oxígeno disuelto y potencial redox utilizando lodos activados	52
A.2. Determinación de la relación entre oxígeno disuelto y potencial redox utilizando bisulfito de sodio (Na_2SO_3)	53
A.2.1. Equipo, materiales y reactivos	53
A.2.2. Procedimiento	53
A.2.3. Evaluación de los electrodos	54
A.3. Características generales del equipo utilizado para la determinación de la aportación de oxígeno por convección	56
Anexo B. Resultados experimentales	57
Anexo C. Especificaciones de los equipos de medición	69
C.1. Medidor de oxígeno y cloruros	69
C.1.1. Especificaciones del sensor de oxígeno (YSI Incorporated, 1999)	69
C.1.2. Cloruros	70
BIBLIOGRAFÍA	71

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Listado de tablas y figuras

	Pág.
Figura III-1. Arreglo general del sistema experimental para las mediciones de potencial redox	27
Figura III-2. Detalle de la construcción de las columnas para los experimentos de mediciones redox	28
Figura III-3. Detalle de la colocación de los electrodos dentro de la columna	29
Figura III-4. Detalle de la construcción de los electrodos de referencia y de medición	30
Figura III-5. Características generales de las dos columnas en las que se realizaron los experimentos y de la colocación de los equipos de medición	33
Figura IV-1. Valores comparativos entre potencial redox y oxígeno disuelto usando (a) bisulfito de sodio y (b) lodos activados	38
Figura IV-2. Oxígeno disuelto vs. tiempo utilizando una columna sembrada con una planta alimentando agua potable desoxigenada con bisulfito de sodio	39
Figura IV-3. Datos de potencial redox vs. tiempo en la columna con planta y agua residual	40
Figura IV-4. Datos de potencial redox vs. tiempo en la columna sin planta y agua residual	40
Figura IV-5. Datos de potencial redox vs. tiempo en la columna con planta y agua de la llave	41
Figura IV-6. Datos de potencial redox vs. tiempo en la columna sin planta y con agua de la llave	41
Figura IV-7. Valores de DQO ₅ medidos a la entrada y a la salida de cada una de las columnas alimentadas con agua residual sintética	43
Figura B-5. Concentración de oxígeno a la salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min) x4	44
Figura B-6. Concentración de oxígeno disuelto durante los periodos de alimentación de 6 horas alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min) x4	44

Figura A. 1.	Conexión e instalación del equipo utilizado para la prueba experimental usando lodos activados	52
Figura A-2.	Equipo usado para medir correlaciones entre oxígeno disuelto y potencial redox	54
Figura A.3.	Sistema para evaluar la capacidad de respuesta de los electrodos contruidos de CuSO_4 comparándolos contra un electrodo de calomel	55
Figura A.4.	Sistema para evaluar la velocidad de respuesta de los los electrodos de platino-Cu/ CuSO_4 comparándolos con el par grafito-calomel	55
Figura A-5.	Dimensiones generales de las dos columnas en las que se realizaron los experimentos de aire succionado	56
Figura B-1.	Volumen de salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4	57
Figura B-2.	Flujo volumétrico a la salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4	57
Figura B-3.	Datos ajustados del flujo volumétrico a la salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4	58
Figura B-4.	Flujo másico alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4	58
Figura B-5.	Aire succionado alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4	59
Figura B-6.	Valores ajustados del volumen de aire succionado alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4	59
Figura B-7.	Flujo volumétrico de aire succionado alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4	60
Figura B-8.	Flujo másico de oxígeno succionado dentro de la columna alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4	60
Figura B-9.	Concentración de oxígeno a la salida alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4	61
Figura B-10.	Concentración de oxígeno a la salida durante un periodo de alimentación de 6 horas alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4	61
Figura B-11.	Volumen de salida alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4	62

Figura B-12.	Datos ajustados del volumen de salida alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4	62
Figura B-13.	Datos ajustados del flujo volumétrico alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4	63
Figura B-14.	Flujo másico alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4	63
Figura B-15.	Perfil de la variación en la concentración a la salida de la columna alimentada con agua residual sintética a 1130 mL/min (1min) x4	64
Figura B-16.	Valores comparativos de potencial redox (Calomel y Cu/CuSO ₄) reaccionando CuSO ₄ y amoníaco para determinar la velocidad de reacción	65
Figura B-17a,b.	Curva de saturación y velocidad de transferencia de oxígeno para el cálculo del coeficiente de transferencia (K _L a) del sistema	66
Tabla III-1.	Características de los sustratos utilizados para empacar las columnas	34
Tabla III-2.	Composición del agua residual sintética utilizada (Koppe y Stozek, 1986)	34
Tabla B-1.	Valores de concentración a la salida de la columna alimentada con agua residual	64
Tabla B-2.	Desviaciones de la diferencia de potencial comparando un electrodo comercial de calomel con los electrodos de Cu/ CuSO ₄ construidos	65
Tabla B-3.	Cálculo del coeficiente de transferencia (K _L a) del sistema	68

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Resumen

Actualmente en nuestro país se hace necesario desarrollar técnicas para resolver la cada vez más grande problemática de escasez de agua. Los "Humedales Artificiales" son sistemas depuradores de agua residual, que se presentan como una alternativa viable para la solución de este problema puesto que son sistemas con bajos costos de construcción, operación y mantenimiento. La eficiencia de remoción de estos sistemas depende, entre otros factores, de la transferencia y difusión de oxígeno dentro del sistema radicular. La transferencia de oxígeno es un factor limitante para la remoción de materia orgánica y para la nitrificación. Esta investigación tuvo dos objetivos principales. En primer lugar, establecer una metodología para la medición indirecta del oxígeno disuelto en los sistemas de humedales artificiales utilizando electrodos de potencial de óxido-reducción como un parámetro que depende de la actividad microbiana en estos sistemas. Por otro lado, describir la influencia de la transferencia de oxígeno por medio de la convección al interior de estos sistemas utilizando columnas empacadas que simulan humedales artificiales de flujo vertical. Los métodos convencionales para la medición de oxígeno son difíciles de utilizar para el seguimiento y el control de estos sistemas de tratamiento. Por otro lado, el potencial redox es un parámetro que guarda una relación directa con la cantidad de oxígeno disuelto y puede ser utilizado como un indicador del comportamiento aerobio, anóxico o anaerobio de los sistemas biológicos de tratamiento de agua. En esta investigación se planteó un procedimiento para construir electrodos de medición de potencial redox (Pt vs. Cu/CuSO₄) para ser utilizados en el campo del estudio de los humedales artificiales como un instrumento económico para la medición indirecta de la concentración de oxígeno y de la actividad microbiológica dentro de estos sistemas. Para esto se realizaron pruebas comparativas entre la medición de potencial redox (PR) y oxígeno disuelto (OD) bajo diferentes condiciones y se evaluó el uso de estos dispositivos haciendo pruebas en columnas empacadas a escala de laboratorio operadas bajo diferentes condiciones. La transferencia de oxígeno por convección dentro de los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical es un proceso que ha sido poco estudiado pero algunos autores han reportado que la cantidad de oxígeno transportado por esta vía es considerable. Para la medición de esta variable se construyeron columnas empacadas a escala de laboratorio, siguiendo los procedimientos establecidos por las normas europeas. Fueron alimentadas bajo los mismos criterios que los experimentos anteriores. Los resultados obtenidos indican que el potencial redox muestra un comportamiento de acuerdo con lo esperado (con valores entre -100 y +380 mV), mostrando una tendencia de proporcionalidad directa en función de la cantidad de oxígeno disuelto y puede utilizarse como un parámetro que ayude a describir el comportamiento microbiano en los humedales artificiales. Se considera importante mencionar que deben realizarse pruebas preliminares para corroborar la correlación entre los datos obtenidos y el contenido real de oxígeno disuelto antes de ser utilizados bajo condiciones reales de operación. Por otro lado, se demostró que no se puede sustituir con este tipo de dispositivos a los electrodos de oxígeno disuelto si se requiere de mediciones específicas de este parámetro. Se estableció una relación entre el volumen de aire succionado dentro de la columna y el volumen de agua alimentado. Se realizó un balance de oxígeno con la finalidad de establecer el comportamiento dinámico de la transferencia de oxígeno dentro de la zona de la rizosfera por acción de la convección.

Abstract

Presently, all over the world, and particularly in Mexico, is necessary to develop technical approaches to solve the ever growing problem of water shortage for supply. The "Constructed Wetlands" are wastewater treatment systems which represent a viable alternative this problem, because they are low cost systems considering its construction, operation, and maintenance characteristics. The removal efficiency of these systems depends among different factors, on the oxygen transfer and diffusion into the root-zone. The oxygen transfer is an important factor for the organic mater removal and for nitrification. This research had two main objectives. The first one, to establish an indirect measurement methodology to assess the dissolved oxygen (DO) presence into constructed wetland systems using oxidation-reduction potential electrodes depending upon the microbial activity into these systems. The second one was to describe the influence of the oxygen transference by convection into vertical flow constructed wetlands. The conventional oxygen measurement methods are difficult to use for control and monitoring of wastewater treatment systems. Considering that the oxidant-reduction potential (ORP) is a parameter which can be directly related with the dissolved oxygen concentration and work as an indicator of the aerobic, anaerobic or anoxic behavior for biological wastewater treatment systems, the construction procedure for low cost ORP electrodes (Pt vs. Cu/CuSO_4) useful in the constructed wetlands was carried out. These electrodes can be used for the field study of these systems as an indirect measurement for oxygen concentration and microbial activity. Oxidant-reduction potential and dissolved oxygen were tested in laboratory under different conditions using lab scale packed columns under different operation conditions. Oxygen transference by convection into vertical flow constructed wetland systems has not yet been thoroughly studied but some authors have reported that oxygen transferred by this way is considerable. For the measurement of this variable lab scale packed columns were constructed, following the European established procedures and fed under the same criteria. Results obtained indicate that the oxidant-reduction potentials describe the expected behavior (between -100 and 380 mV) with a direct proportionality relationship between dissolved oxygen and ORP, and this parameter can be used to describe the microbiological activity in constructed wetlands. However, calibration tests must be performed, to corroborate the ORP and DO correlation before using it in real operation conditions. It was shown that dissolved oxygen electrodes can not be substituted with ORP electrodes if precise measurements of OD are required. A relationship between sucked air volume into the column and the fed water volume were established. An oxygen balance was carried out in order to establish the dynamic behavior of convective oxygen transfer into the root zone.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Glosario de términos

Aerobio	Proceso metabólico que se realiza en presencia de oxígeno y el oxígeno molecular es el aceptor de electrones
Anaerobio	Proceso metabólico que se realiza en ausencia total de oxígeno y la generación de energía se efectúa por medio de la fermentación
Anóxico	Proceso metabólico que se realiza en ausencia de oxígeno y compuestos orgánicos oxidados como nitrato y nitrito son los aceptores de electrones
Bioma	Microorganismos responsables de la degradación de materia orgánica
C	Concentración de oxígeno (mgO_2/L)
C_s	Concentración de saturación de oxígeno (mgO_2/L)
C_L	Concentración de oxígeno en el líquido (mgO_2/L)
c	Constante de la integración de la ecuación II-1
DO	Demanda de oxígeno en la columna [$\text{mg OD}/\text{min}$]
DQO	Demanda química de oxígeno (mg/L)
DQOt	Demanda química de oxígeno total (mg/L)
\mathcal{E}	Potencial de electrodo
Eh	Potencial de óxido-reducción (mV)
F	Cantidad de electricidad llevada por un equivalente gramo (Faradio)
HA	Humedal artificial
HAFV	Humedal de flujo vertical
K_{La}	Coefficiente de transferencia de oxígeno (min^{-1})
K_{LaT}	K_{La} a la temperatura de la prueba
m_i	Flujo másico de oxígeno disuelto en la alimentación [$\text{mg OD}/\text{min}$]
m_s	Flujo másico de oxígeno introducido por succión a la columna [$\text{mg O}_2/\text{min}$]
m_o	Flujo másico de oxígeno medido a la salida de la columna [$\text{mg OD}/\text{min}$]
m_d	Demanda de oxígeno en la columna [$\text{mg OD}/\text{min}$]
n	Número de valencia
OD	Oxígeno disuelto
PVC	Cloruro de polivinilo
R	Constante de los gases expresada en unidades eléctricas
Redox	Reacciones de óxido-reducción
T	Temperatura

t	Tiempo
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
V	Flujo volumétrico de agua [mL/min]
Vs	Volumen de aire succionado (mL)
Vo	Volumen de agua a la salida de la columna (mL)

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Aspectos generales de los humedales artificiales

En términos generales los humedales son áreas de transición entre algún cuerpo acuífero y el suelo y se caracterizan por tener suelo pantanoso. El tipo de vegetación que crece en estas zonas son plantas adaptadas a las condiciones de suelo húmedo.

Los humedales artificiales (HA) son, como lo indica su nombre, sistemas construidos por el hombre con el fin de depurar aguas residuales, que imitan los procesos de depuración de los humedales naturales pero controlando las variables físicas, químicas y biológicas que determinan la eficiencia en la remoción de agentes contaminantes del agua (Bahlo y Wach, 1995).

Una característica importante de estos sistemas es la acumulación de materia orgánica debido a un alto índice de producción primaria en comparación con el bajo índice de descomposición en condiciones anaerobias (Kadlec y Knight, 1996).

Está bien documentado que una razón para la preservación de los humedales radica en la capacidad de reducción o remoción de contaminantes incluyendo materia orgánica, materia inorgánica y organismos patógenos (Brix y col., 2001; Decamp y Warren, 2000; Kivaisi, 2001). Para lograrlo, estos sistemas aprovechan las características de depuración natural de los microorganismos y organismos superiores. De este modo, las características fundamentales de depuración biológica de los HA son similares a los de las lagunas de degradación facultativas (Metcalf y Eddy, 1991), pero combinan, además, las ventajas de tener un material de empaque, que sirve como soporte a los microorganismos además de servir como material filtrante de sólidos suspendidos y como superficie de adsorción de metales pesados. Otra

característica adicional de los HA es que, al utilizar plantas sembradas sobre el lecho de soporte, generan condiciones tales que favorecen el desarrollo de microorganismos en la zona de la rizosfera, ayudan a la oxigenación de esta zona y contribuyen de manera significativa a la depuración del agua, pues toman de ésta los nutrimentos presentes, tales como fósforo y nitrógeno (Haberl, 1997).

El funcionamiento de estos sistemas se determina por la influencia de diversos factores dentro de los que destacan: el régimen de alimentación, el comportamiento cinético de los microorganismos, los procesos de transferencia de materia y la transferencia y difusión de oxígeno dentro del sistema radicular. La integración de estos factores para la descripción del comportamiento de los HA es complejo, razón por la cual las ecuaciones de diseño reportadas en la literatura se fundamentan principalmente en estimaciones empíricas (Brix, 1997) y por tal motivo, el comportamiento de estos sistemas sigue siendo visto como una caja negra.

1.1.1 Aplicaciones de los humedales artificiales

En términos generales, la aplicación más común de los HA se encuentra en la depuración de aguas residuales domésticas, aunque no se descarta la posibilidad de que puedan ser utilizados en otros campos del tratamiento de aguas o la de ser alimentados con aguas que no tengan las características generales de las aguas domésticas (Conley, 1991; EPA, 1998; Gersberg, 1985). Independientemente de esto, los HA pueden tratar aguas de origen doméstico (Cooper et al, 1997) y su principal aplicación se encuentra en el tratamiento de aguas que provengan de regiones rurales o de comunidades pequeñas y medianas que no excedan los 20 mil habitantes (Luna-Pabello y col., 1997). La finalidad de proveer a estas comunidades con agua tratada de bajo costo, especialmente a comunidades que no cuentan con obras de suministro de agua para riego debido a la dificultad de acceso por las características geográficas o que no cuentan con los suficientes recursos para desarrollar tecnologías más costosas es una de las ventajas de esta tecnología y el efluente obtenido con estos sistemas tiene aplicación en la industria agrícola, pues se utiliza como agua de riego (Rivera et al, 1997).

Por otro lado, no se recomienda utilizar este tipo de sistemas para satisfacer las necesidades de tratamiento de agua en las grandes urbes o en los megaproyectos de tratamiento de grandes volúmenes de aguas, a menos que se trate de manera individual o modular, esto es, que se construyan de manera independiente para tratar los efluentes por ejemplo de pequeñas zonas residenciales, unidades habitacionales, clubes deportivos, hoteles, restaurantes y hospitales (Laber y col. 1999). También pueden ser utilizados en el caso de grandes volúmenes por depurar como tratamiento terciario o final para lograr alguna característica particular en los efluentes como podría ser, la remoción de nutrimentos como nitrógeno y fósforo (Bolton y Greenway, 1999; Bratili y col., 1999; Gray y col., 2000).

I.1.2. Transferencia de oxígeno en los HA

En los humedales artificiales, la transferencia de oxígeno es determinante para la remoción de materia orgánica y la nitrificación de nitrógeno amoniacal; de hecho, algunas investigaciones recientes en el diseño de estos equipos recomiendan que los flujos de alimentación se establezcan en función de la carga orgánica del influente y del equivalente máximo de oxígeno que se puede transferir al sistema ($30\text{g O}_2/\text{m}^2$ para humedales de flujo vertical). Por este motivo, se han realizado algunas aproximaciones teóricas de la cantidad de oxígeno necesario para degradar la materia orgánica y para nitrificar el amoníaco presentes en un influente (Cooper, 1999). Por otro lado, los procesos de transferencia de gases en los HA son muy complejos y las aproximaciones teóricas se basan, en todos los casos, en suposiciones sumamente simplificadas o dependen de las condiciones particulares de operación de cada sistema en estudio (Kayser y col., 2002).

Hasta el momento se han encontrado en la bibliografía solamente algunos estudios enfocados a determinar los mecanismos de transferencia de oxígeno y su correlación con la correcta operación y el desarrollo de los humedales artificiales, aún cuando el oxígeno es determinante en la eficiencia de estos sistemas. El oxígeno se transfiere a los humedales artificiales a través de dos mecanismos principales, por difusión por medio del rizoma de las plantas presentes en el sistema por diferencia de concentraciones entre el agua presente en el medio de soporte y el rizoma mismo (este oxígeno puede provenir de la fotosíntesis y/o de la difusión del oxígeno

molecular del aire a través de la pared celular de las macrofitas, de su parénquima y de la savia que lo conduzca hasta la zona radicular). En la operación de los HA, se ha logrado demostrar que las plantas presentes en estos sistemas juegan un importante papel, siendo que, entre otras características, aportan una cantidad considerable de oxígeno a la zona radicular. Aunque diversos autores presentan valores muy distintos en las cantidades medidas de oxígeno proporcionado a la zona radicular por efecto de las plantas, todos coinciden con que es una cantidad considerable (Armstrong, 1968; Beckett et al, 1988; Brix, 1997; Stengel, 1993; Wiessner y col., 2001). El otro mecanismo de transferencia de oxígeno a la zona radicular de los humedales artificiales que se ha identificado, es la convección, que se presenta al momento de la alimentación intermitente de agua residual a sistemas de flujo vertical (Stein y col., 2002). Cuando el agua alimentada al sistema fluye a través del material de empaque, succiona de la atmósfera un determinado volumen de aire fresco, que posteriormente será transferido al agua por difusión convectiva en el siguiente intervalo de alimentación. Otra vía de ingreso de oxígeno al sistema, aunque es considerada despreciable para sistemas que operan en condiciones reales, es el que se encuentra disuelto en el agua residual alimentada.

Aunque algunos autores aseguran que el principal mecanismo para la transferencia de oxígeno a un sistema de humedales artificiales se realiza por acción exclusiva de las plantas presentes en el mismo (Brix, 1997; Wynn y Liehr, 2001), la transferencia de oxígeno por procesos mecánicos es significativa y dichos procesos pueden ser un parámetro susceptible de ser controlable con el objeto de aumentar la eficiencia en la remoción de contaminantes y de organismos patógenos utilizando estos sistemas puesto que, un balance de materia entre el oxígeno consumido en la degradación de material orgánico carbonoso y la nitrificación contra la cantidad que es posible transferir al sistema, determina el comportamiento global del mismo.

I.2. Métodos para la medición de oxígeno disuelto

Aún cuando los electrodos de membrana proporcionan un método excelente para analizar oxígeno disuelto (OD) en aguas contaminadas (APHA, 1992), la experiencia en la utilización de estos electrodos muestra que es sumamente complicada puesto que, para una correcta medición, debe realizarse la lectura con agitación constante y esto no siempre es posible.

Los electrodos de membrana sensibles al OD de tipo polarográfico o galvánico están compuestos por dos electrodos metálicos sólidos en contacto con un electrolito de soporte separado de la solución problema por una membrana selectiva. Existe una relativa variedad de electrodos de membrana disponibles comercialmente. En todos, la corriente difusora es linealmente proporcional a la concentración de OD. La corriente puede transformarse fácilmente en unidades de concentración por procedimientos de calibración o con un equipo que traduzca la señal en mV analógicamente a unidades de concentración.

1.2.1. Potencial de óxido-reducción

Las reacciones de óxido-reducción o "Redox" desempeñan una importante función en muchas de las reacciones que se producen en los procesos de tratamiento de aguas residuales tanto químico como biológicos. Ejemplo de esto son los procesos de degradación biológica de contaminantes que consisten, catalizados por enzimas, en la reducción u oxidación de la materia orgánica presente en el agua residual. El potencial redox ha sido utilizado como un parámetro útil que determina algunas características operativas en un sistemas de tratamiento de agua como por ejemplo, para establecer el carácter aerobio, anóxico o anaerobio del metabolismo microbiano prevaleciente en estos sistemas (Reddy y D'Angelo, 1997).

En otros casos este potencial tiene aplicación como una variable de medición y control para la operación de sistemas de tratamiento biológico, particularmente en reactores de lodos activados (Charpentier y col., 1998; Chen y col., 2002; Yu y col., 1997).

Se ha demostrado recientemente, que el potencial redox es también un excelente indicador del estado de operación de los HA pues, al ser una medición de la actividad de las sustancias oxidadas y reducidas en un sistema, ofrece una posibilidad inmediata para el control y la operación de estos sistemas (Kayser y col., 2002).

I.2.2. El electrodo normal de hidrógeno

El electrodo normal de hidrógeno consta de un alambre de platino sumergido en una solución 1.288N de HCl en ésta se burbujea hidrógeno molecular a una atmósfera de presión. Este electrodo es el que se utiliza para definir la escala normal de potenciales de electrodos. Evidentemente, este electrodo no es conveniente para ser utilizado como electrodo de referencia en mediciones y manipulaciones diarias. Por este motivo se han desarrollado toda una gama de electrodos de referencia que resultan mucho más fáciles de utilizar y manipular. Uno de estos electrodos es el del par Cu/CuSO₄. El potencial de este electrodo se determina por la reacción:



y tiene un potencial de +0.337 V en relación con el electrodo normal de hidrógeno. Este valor ha sido obtenido experimentalmente y se encuentra reportado en la bibliografía y se hace de este modo puesto que el electrodo normal de hidrógeno recibe el valor de cero por convención, lo que significa que el potencial medido con este electrodo debe ser referido al potencial normal de hidrógeno.

El electrodo de medición, por su parte, está constituido, normalmente, por un alambre de un material "inatacable", lo que significa que este electrodo no participa en ninguna reacción química bajo las condiciones de medición y su función es exclusivamente la de ceder o aceptar electrones. Los electrodos más comúnmente utilizados para este propósito están formados por materiales como oro, platino pulido, platino recubierto con una capa de óxido de platino y grafito.

En principio, la concentración de oxígeno disuelto puede ser medida utilizando electrodos de potencial de óxido-reducción pues interviene en la determinación de potenciales y existe una relación por el efecto de la concentración de las sustancias involucradas sobre los potenciales medidos. Este efecto se describe por la ecuación de Nernst:

$$E = E^0 - 2.303 RT/(\eta F \log Q) \quad (I-2)$$

donde, E y E^0 son los potenciales del electrodo, R es la constante de los gases expresada en unidades eléctricas, T es temperatura absoluta, η es el número de electrones transferidos por átomo, F es la electricidad llevada por un equivalente gramo (Faradio) y Q , para la reacción hipotética:

$wW + xX \rightarrow yY + zZ$, se define como:

$$Q = [Y]^y[Z]^z/[W]^w[X]^x \quad (I-3)$$

I.3. Objetivos

En función de lo mencionado en esta introducción, el objetivo general de este trabajo es estudiar la transferencia de oxígeno por medio de la convección en sistemas que simulan humedales artificiales de flujo vertical.

Para lograr eso los objetivos particulares planteados para esta investigación son:

- Establecer una metodología para la medición de oxígeno disuelto de manera indirecta utilizando electrodos de potencial de óxido reducción.
- Evaluar el potencial de óxido-reducción como un parámetro de medición indirecto de oxígeno disuelto y de la actividad microbiana en sistemas que simulan humedales artificiales de flujo vertical.
- Establecer una metodología para la medición de oxígeno transferido por convección utilizando columnas empacadas que simulen el comportamiento de los humedales artificiales de flujo vertical.

I.4. Hipótesis

La hipótesis en la que se basa el presente trabajo de investigación es la siguiente:

Es posible estudiar la convección como uno de los mecanismos de transferencia de oxígeno en los sistemas de humedales artificiales ya que la transferencia de oxígeno en estos sistemas determina la eficiencia de remoción de materia orgánica y nitrógeno disueltos y suspendidos en el agua residual. También se plantea como hipótesis que es posible utilizar el potencial de óxido-reducción como un parámetro indirecto para medir el oxígeno disuelto y la actividad aerobia-anaerobia en los sistemas de humedales artificiales además de que los humedales artificiales presentarán ciclos aerobios-anaerobios a lo largo de cada día por acción de la fotosíntesis y que estos ciclos pueden influir en la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS

II.1. Determinación de los coeficientes de transferencia

La eficiencia de la aeración de los sistemas biológicos aerobios de tratamiento se evalúa mediante la determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno (K_La) para cada tipo de equipo y bajo diferentes condiciones de operación (Martínez-Delgado, 1999). En este caso, la curva de saturación se describe en el lapso comprendido por los primeros 10 minutos posteriores a la alimentación. Con estos valores es con los que se calcula la eficiencia de aeración del sistema en su totalidad con el método que se describe a continuación.

La velocidad de transferencia puede expresarse como:

$$dC/dt = K_La(C_S - C_L) \quad (II-1)$$

donde

dC/dt : Velocidad o rapidez de transferencia de oxígeno (mgO_2/Lh)

K_La : Coeficiente de transferencia de oxígeno (min^{-1})

C_S : Concentración de saturación de oxígeno (mgO_2/L)

C_L : Concentración de oxígeno en el líquido (mgO_2/L)

Integrando la ecuación II-1 y suponiendo que K_La no depende del tiempo:

$$\ln(C_S - C_L) = -K_La * t + c \quad (II-2)$$

donde c es una constante de integración.

Si se grafica esta ecuación como una recta con t vs. $\ln(C_s - C_L)$, la pendiente de la recta es el valor de $K_L a$. El valor obtenido se ajusta a las condiciones de temperatura de la prueba utilizando:

$$K_{LaT} = K_{La20} * (1.024^{(T-20)}) \quad (II-3)$$

donde

K_{LaT} : K_{La} a la temperatura de la prueba

K_{La20} : K_{La} 20°C

T : temperatura (°C)

II.2. Balance de oxígeno en una columna empacada

Para la caracterización y cuantificación del aporte de oxígeno al interior de una columna empacada se parte de un balance global de materia que se define como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rapidez de} \\ \text{acumulación} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Rapidez de} \\ \text{entrada} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Rapidez de} \\ \text{salida} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Rapidez de} \\ \text{generación} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Rapidez de} \\ \text{consumo} \end{array} \right\} \quad (II-4)$$

Suponiendo que no existe acumulación ni generación de materia dentro de la columna, se obtiene:

$$m_i + m_s - m_o - m_d = 0 \quad (II-5)$$

donde

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

m_i : Flujo másico de oxígeno disuelto en la alimentación [mg OD/min]

m_s : Flujo másico de oxígeno introducido por succión a la columna [mg O₂/min]

m_o : Flujo másico de oxígeno medido a la salida de la columna [mg OD/min]

m_d : Demanda de oxígeno en la columna [mg OD/min]

Definiendo el parámetro m como

$$m = V C \quad (II-6)$$

en cada punto del intervalo, siendo m el flujo másico de oxígeno disuelto [mg O₂/min], V el flujo volumétrico de agua [L/min] y C la concentración de oxígeno [mg O₂/L]; entonces, el balance se define como

$$V_i C_i + V_s C_s - V_o C_o - DO = 0 \quad (II-7)$$

donde DO es la demanda de oxígeno en la columna [mg OD/min] y OD es el oxígeno disuelto.

Considerando que el sistema opera a régimen transitorio o dinámico, que alcanza un punto de máxima saturación cada 6 horas y que la concentración de oxígeno disminuye con respecto al tiempo, el balance de materia que describe el comportamiento del sistema es igualmente dinámico:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dV}{dt} C \quad (II-8)$$

De este modo, partiendo de las ecuaciones II-7 y 8, despejando y considerando que C_i es cero durante todo el intervalo, se obtiene:

$$\frac{dDO}{dt} = \frac{dV_s}{dt} C_s - \frac{dV_o}{dt} C_o \quad (II-9)$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Cada uno de los términos de la ecuación II-9 se resuelven gráficamente y con la ecuación resultante se describe el comportamiento dinámico a todo lo largo de cada ciclo de alimentación.

En el siguiente capítulo se presenta la metodología seguida para instrumentar estos conceptos.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describen detalladamente los procedimientos experimentales que se siguieron para cumplir con los objetivos y demostrar la hipótesis planteada. Por consiguiente, se muestran también las características de construcción y puesta en marcha de los equipos utilizados para este fin.

III.1. Potencial de óxido-reducción como medición indirecta del oxígeno disuelto

Para esta prueba experimental se utilizaron cuatro columnas empacadas construidas con tubo de cloruro de polivinilo (PVC, por sus siglas en inglés), de 30 cm de diámetro y 60 cm de largo, empacadas con material volcánico inerte. Dos de estas columnas tenían sembrados tules (*Typha latifolia*), una planta en cada biorreactor y en las dos restantes no se tenían plantas sembradas ya que sirvieron como control. La parte superior de los reactores fue cubierta con un disco de plástico sellado que permitía la salida de la planta y la entrada de la alimentación para dos de ellos y solamente la entrada de la alimentación para los otros dos.

Para la medición del oxígeno disuelto a diferentes estratos se utilizaron tres electrodos de potencial redox (Platino-Cu/CuSO₄) por cada columna, colocados a diferentes profundidades dentro del lecho (2, 10 y 30 centímetros con respecto a la parte superior). Los electrodos fueron colocados directamente dentro del lecho empacado. El oxígeno disuelto se midió de manera indirecta estimando la actividad de óxido-reducción dentro del lecho. Esto se hizo en intervalos regulares tres veces al día. El arreglo general de los equipos se encuentra en la Figura III-1.

Dos de las columnas, una con tule y otra sin él, se alimentaron con agua residual sintética y otras dos con agua de la llave sin ningún tratamiento, con un régimen de alimentación de 5 L/día por cada columna (lo que da un tiempo de residencia hidráulica de 3.8 días). La alimentación se hizo por goteo.

Los períodos de iluminación fueron constantes para los cuatro sistemas empleando luz artificial (tubos fluorescentes) con intervalos regulares de encendido sintonizados por medio de un controlador electrónico de tiempo (12:12 horas).

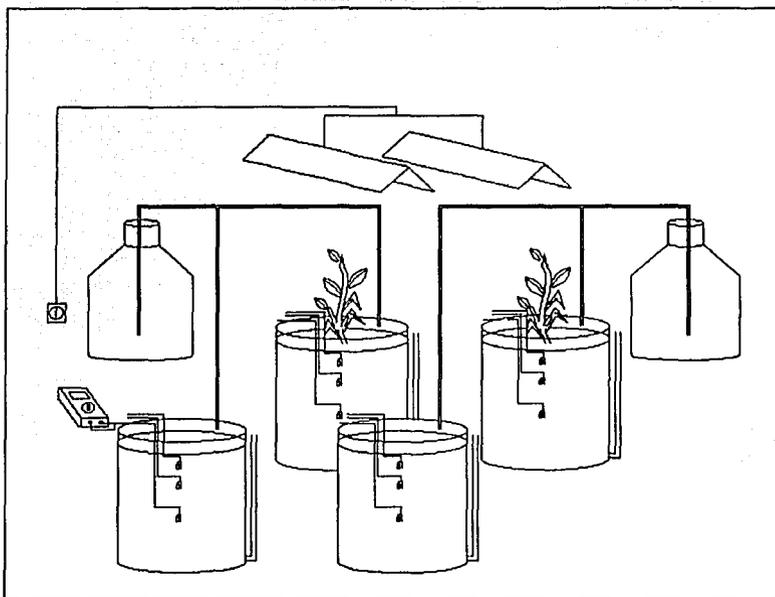


Fig. III-1. Arreglo general del sistema experimental para las mediciones de potencial redox

Los reactores estuvieron ubicados en un cuarto que no tenía control de temperatura ni de humedad relativa (como ocurre en un humedal real).

Para calibrar los electrodos se hizo una curva de calibración de potencial versus oxígeno disuelto bajo las mismas condiciones de alimentación de las columnas con el fin de determinar, de manera indirecta, la concentración de oxígeno disuelto en cada punto.

III.1.1. Construcción de las columnas

Las columnas de PVC contaban en la parte inferior con una zona de drenado construida con tubería de PVC de 3.75 cm (1.5 pulgadas) de diámetro y 30 cm de largo, perforada, con el fin de drenar el agua que se percolaba del interior de la columna. En el extremo exterior de las tuberías tenían acopladas unas mangueras de plástico para controlar el nivel de inundación dentro de cada columna. Los detalles de la construcción de las columnas se detallan en las Figuras III-2 y 3.

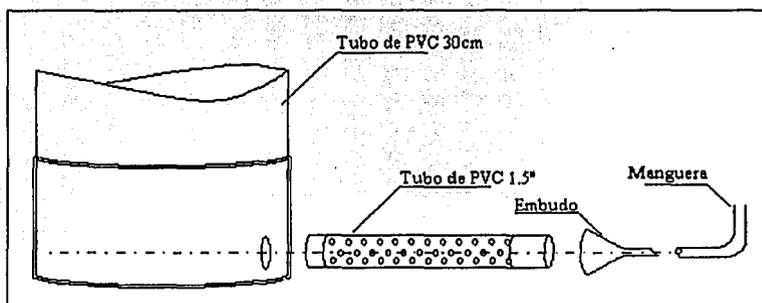


Fig. III-2 Detalle de la construcción de las columnas para los experimentos de mediciones redox

Las columnas se empacaron con tezontle rojo tamizado, con un diámetro granular de 0.5 a 4 mm, que fue previamente lavado (Durán de Bazúa y col., 1998). Se midió el volumen útil de los reactores antes de sembrar las plantas. Sobre este material y en cada una de las dos columnas fue sembrada una planta "adulta" de tule (*Typha latifolia*), proveniente del tanque de "semilla" de macrofitas de la Facultad de Química de la UNAM (originalmente traídas del Lago de Xochimilco y de las lagunas de Zempoala).

Para que se “adaptaran” a las condiciones del laboratorio se alimentaron con agua potable por tres semanas, y su sistema radicular se adaptó al nuevo medio (material inerte de empaque). Se cortaron círculos de 30 cm de diámetro de polipropileno para cubrir la superficie de las columnas y se les perforó un círculo de 2 cm de diámetro para que la planta pudiera crecer. Se sellaron estos círculos con silicón para evitar la difusión de oxígeno molecular del aire ambiente.

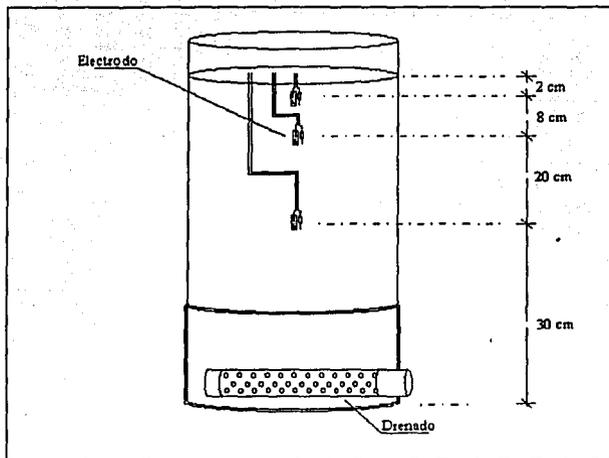


Fig. III-3. Detalle de la colocación de los electrodos dentro de la columna

II.1.2 Construcción y colocación de los electrodos

En cada columna se colocaron tres electrodos a diferentes alturas, 2, 10 y 30 cm con respecto a la superficie introducidos hasta el centro de la columna. La construcción de los electrodos de referencia para potencial es relativamente sencilla, para ello se utiliza un tubo de vidrio de 1 cm de diámetro, en uno de cuyos extremos se coloca una membrana de intercambio iónico (en este caso corcho o madera). El tubo se llena por el otro extremo con una solución de sulfato de cobre saturada y se agregan cristales de la misma sal para asegurarla saturación. Posteriormente se coloca una lámina de cobre acoplada a un alambre de cobre. El alambre de cobre se hace pasar a través de un tapón de plástico, que a su vez se acopla al otro extremo del

tubo de vidrio. Para la construcción del electrodo de medición se utiliza un trozo de alambre de platino conectado a un tramo de cable de cobre. Para evitar la interferencia en la lectura la conexión entre el alambre de platino y el cable de cobre debe estar perfectamente aislada. La construcción de estos electrodos se detalla en la Figura III-4. Estos electrodos producen una señal en mV de baja impedancia que puede ser captada y medida por una interfase o por un potenciómetro convencional.

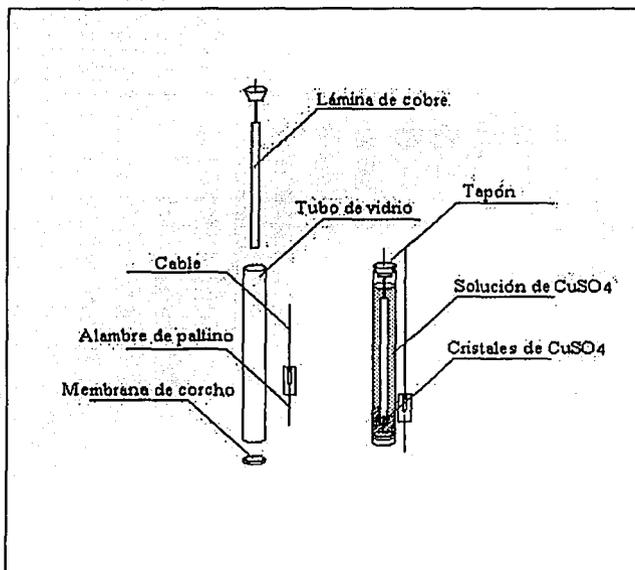


Figura III-4. Detalle de la construcción de los electrodos de referencia y de medición

III.1.3. Operación del equipo

Una vez construidas las columnas, dos de ellas (una con tula y la otra sin planta) fueron alimentadas con agua residual sintética, con una proporción de C:N:P de 15:1:0.1, respectivamente, con una concentración de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno soluble, DQOs, de 100 mg/L (APHA, 1992). La solución sintética se elaboraba disolviendo sacarosa (1.8 g), NH_4SO_4 (120 mg) y Na_3PO_4 (12 mg) en agua de la llave. Las otras dos columnas se alimentaron con agua de la llave. El flujo volumétrico, en ambos casos fue de 5 L/día, alimentando en forma continua por goteo de dos tanques de almacenamiento

elevados, calibrando el flujo con una pinza de Mohr. Uno de ellos contenía agua de la llave y el otro agua residual sintética (TRH = 3.8 días).

Durante el arranque, las columnas se mantuvieron constantemente inundadas para favorecer el crecimiento radicular de las plantas y para que la lectura de los electrodos fuera mejor. El nivel de inundación dentro de las columnas se controló con una manguera de plástico acoplada a la parte inferior de la columna por la parte exterior.

Como ya se mencionó, los ciclos de iluminación y oscuridad se controlaron con 4 lámparas fluorescentes de 30 Watts, a periodos regulares de 12 y 12 horas, regidos con un controlador de tiempo.

III.1.4. Pruebas preliminares

Antes de la instalación completa del sistema experimental se realizaron algunas pruebas preliminares con el fin de determinar la capacidad de lectura del potencial redox en cada una de las columnas en cada uno de los puntos de muestreo. En primer lugar, se realizaron pruebas comparativas para establecer si existía una relación directa entre el potencial redox, leído con un electrodo de platino contra Cu/CuSO_4 y la lectura de oxígeno disuelto, utilizando un electrodo de membrana selectiva.

Para esto se usó un vaso de precipitados de 400mL con agua destilada desoxigenada por ebullición al cual se le burbujeó aire utilizando una bomba convencional (de acuario) y se midieron simultáneamente el potencial redox utilizando el electrodo de referencia mencionado y el electrodo de membrana selectiva hasta obtener el máximo valor de oxígeno disuelto. Posteriormente, se fue agregando bisulfito de sodio para eliminar el oxígeno disuelto por burbujeo hasta obtener una lectura de cero en el equipo de oxígeno disuelto. La metodología que se siguió para esta prueba se explica detalladamente en el Anexo A.3.

Un experimento similar se realizó utilizando lodos activados provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad Universitaria en la Ciudad de México. Para esto se colocaron en un recipiente cerrado los lodos activados previamente aireados por un periodo

de 12 horas con sacarosa como sustrato. Se cerró herméticamente el recipiente y se colocaron los electrodos de oxígeno y de potencial redox. Manteniendo el reactor bajo agitación constante se monitoreo el comportamiento del potencial redox conforme descendía la lectura de oxígeno disuelto consumido por los lodos.

Para este experimento, con duración de cuatro días, se hizo una sola toma de lodos y se repitió el experimento tres veces (una por día) tomando una muestra de lodos sedimentados del recipiente donde se mantenían bajo aeración constante. El procedimiento experimental seguido se muestra con detalle en el Anexo A.2.

Se realizaron también mediciones de oxígeno disuelto con respecto al tiempo utilizando el electrodo de membrana selectiva para definir el comportamiento del sistema empleando una de las columnas sembrada con planta (la que era alimentada con agua de la llave), cambiando ésta por agua desoxigenada con bisulfito de sodio con el fin de conocer la variación en la concentración de oxígeno a lo larga del perfil del lecho empacado de las columnas. Las muestras se tomaron en dos puntos de muestreo, el de la zona superior y el de la zona intermedia y las mediciones se realizaron cada hora durante 12 horas.

Adicionalmente, con el fin de establecer la capacidad de respuesta de los electrodos construidos, se realizaron pruebas rápidas, introduciendo cada uno de los doce electrodos utilizados en la experimentación individualmente en soluciones salinas con diferentes valores de potencial de óxido reducción y se compararon con un electrodo de calomel comercial comparando la desviación de estos valores con los reportados teóricamente.

Para establecer la velocidad de respuesta de estos electrodos, se midió la capacidad de respuesta de un electrodo construido y un electrodo de calomel en una reacción en la que el potencial redox de la solución cambia progresivamente conforme la reacción avanza. Para este efecto se realizó una reacción con una solución de CuSO_4 agregando lentamente NH_4OH . Los procedimientos experimentales seguidos se muestran con detalle en el Anexo A.3.

III.2. Evaluación de la transferencia de oxígeno por convección

III.2.1 Construcción e instalación del equipo

Para este experimento se utilizaron dos columnas de vidrio de 30 cm de diámetro y 180 cm de longitud empacadas con grava, gravilla y arcillas “espumosas” (“foamed clay”) con las características que se listan a continuación en la Tabla III-1. Las dimensiones de las columnas utilizadas para este experimento se muestran en la y en la Figura A-5 del Anexo. Las características de su construcción y la conexión del equipo de medición se muestran en la Figura III-5.

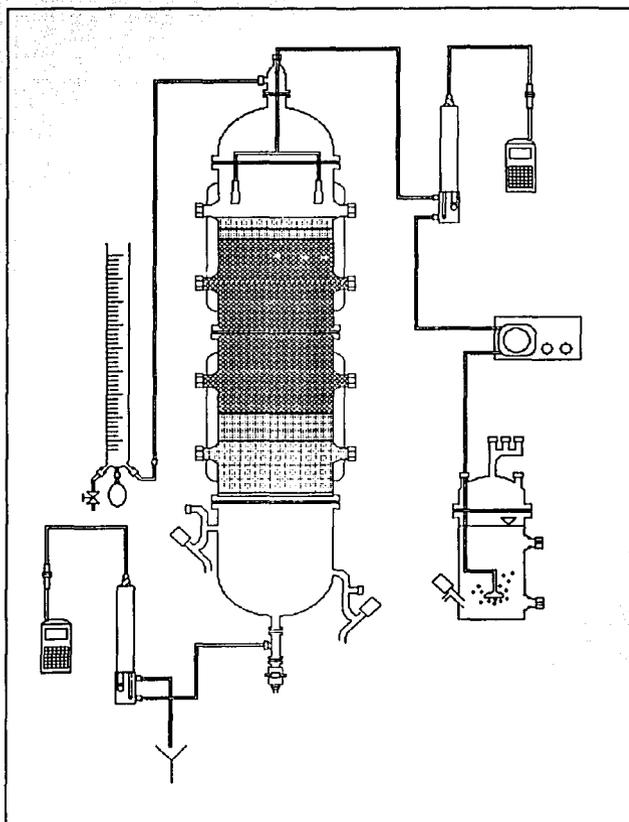


Figura III-5. Características generales del equipo utilizado para la determinación de la aportación de oxígeno por convección

Tabla III-1. Características de los sustratos utilizados para empacar las columnas

Material	Diámetro de partícula (mm)	Longitud del lecho (cm)
Grava	8-16	5
Grava	4-8	5
Arcilla espumosa ("Foamed clay")	2-4	60
Grava	4-8	10
Grava	8-16	20

Las columnas se alimentaron con agua desionizada y con agua residual sintética respectivamente por un período de 60 días de operación continua. El agua residual sintética se preparó con la composición que se muestra en la Tabla III-2, tomada del trabajo de Koppe y Stozek (1986).

Tabla III-2. Composición del agua residual sintética utilizada (Koppe y Stozek, 1986)

Componente	Cantidad
Peptona de caseína	160 mg/L
Extracto de carne	110 mg/L
Urea	30 mg/L
K_2HPO_4	28 mg/L

El agua residual sintética de alimentación se almacenó en recipientes de vidrio de 10 L y era burbujeadada constantemente con nitrógeno para asegurar la remoción completa de oxígeno disuelto.

Ambas columnas se alimentaron bajo dos diferentes condiciones. La primera, que siempre se alimentó con agua desionizada libre de oxígeno, se introdujo, en un primer periodo, en cuatro intervalos de 1 minuto cada 6 horas, con 1,130 mL/min en cada intervalo, que equivale a 60 mm de inundación. En el segundo periodo de alimentación se introdujo con los mismos intervalos pero con un flujo de 700mL/min, que equivale a 40 mm de inundación. Estos datos son sugeridos por la literatura con base en experimentos que han probado la bondad de este

flujo para los sistemas de flujo vertical intermitente (Shutes y col. 1997; Langergraber y col., 2002).

La segunda columna, siempre alimentada con agua residual sintética con los mismos intervalos que la anterior, tenía un flujo de 1,130 mL/min. En el primer intervalo se alimentó con la composición que se muestra en la Tabla III-2. En el segundo período se alimentó con los mismos intervalos pero con una dilución del 50% de la concentración original ya que con la primera concentración la carga orgánica era demasiado alta para el sistema.

III.2.3 Medición del aire succionado

Para la medición del volumen de aire fresco succionado dentro de la columna se construyó un sistema constituido por un tubo de vidrio graduado de 5 cm de diámetro y 50 cm de longitud conectado a la parte superior de la columna dentro del cual fluye una membrana de jabón por efecto del cambio de presión producido por el flujo de agua dentro de la columna (Figura A-2 del Anexo A).

Para el dimensionamiento de este sistema se realizaron previamente pruebas a una escala menor utilizando una columna de 6.2 cm de diámetro y 20 cm de longitud empacada con el mismo material con el que se empacaron las otras dos columnas.

III.2.4 Medición del oxígeno disuelto

Para la medición del oxígeno disuelto se utilizaron dos sondas de medición "YSI Incorporated" modelo "6820 Sonde", operadas constantemente, acopladas a la entrada y a la salida de cada columna. Los datos se almacenaron utilizando un visualizador marca "YSI Incorporated" modelo "Display/Logger 610-DM".

Se descargaron diariamente en una computadora. Las mediciones se realizaron cada minuto utilizando los electrodos de medición de temperatura, oxígeno disuelto, conductividad

eléctrica y cloruros acoplados a dichas sondas. La colocación de este equipo y la información general del medidor se muestran en el Figura A-2 del Anexo A y en el Anexo B, respectivamente. Se analizaron de acuerdo a lo establecido en el Capítulo II.

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron en esta investigación y se discuten.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las pruebas experimentales que se realizaron para establecer la relación directa entre el potencial redox, leído con un electrodo de platino contra Cu/CuSO_4 y la lectura de oxígeno disuelto, utilizando un electrodo de membrana selectiva utilizando bisulfito de sodio los resultados obtenidos se muestran en la Figura IV-1a.

Puede verse que existe una cierta relación equivalente entre el comportamiento del potencial redox medido en la solución y la concentración de oxígeno medida directamente con el electrodo de membrana. Un comportamiento parecido se puede observar en una prueba similar que se realizó utilizando lodos activados, los resultados de dicha prueba se muestran en la Figura IV-1b. En esta gráfica se muestran tres corridas distintas utilizando los mismos lodos, y las corridas se realizaron en tres días distintos.

En ambos experimentos (con bisulfito de sodio y lodos activados) se aprecia un comportamiento similar, con una tendencia logarítmica, pero se hace evidente que esta tendencia se presenta en diferentes intervalos de potencial. En todos los casos, tanto en las tres corridas que se muestran usando lodos activados como en la que se muestra utilizando bisulfito de sodio, las especies químicas presentes que pueden modificar de manera notable el valor del potencial mixto de óxido-reducción en cada prueba y en cada corrida son distintas. De este modo, para utilizar el potencial de óxido reducción como un parámetro de medición del comportamiento de los HA, equivalente al oxígeno disuelto, deben determinarse teóricamente las especies químicas que pueden modificar el comportamiento de este parámetro o realizarse pruebas de calibración bajo las condiciones y características de operación particulares del sistema.

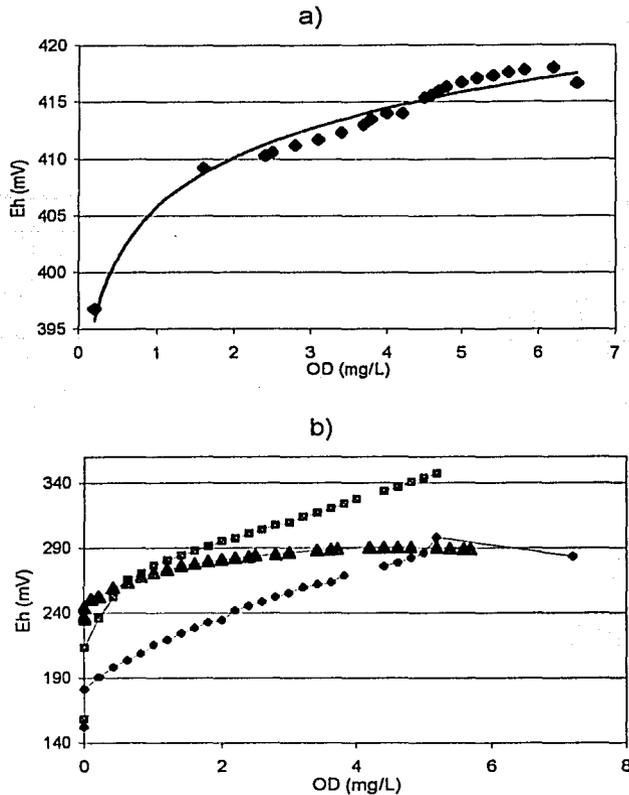


Figura IV-1. Valores comparativos entre potencial redox y oxígeno disuelto usando (a) bisulfito de sodio y (b) lodos activados

En la Figura IV-2 se muestran los resultados experimentales obtenidos al medir la concentración de oxígeno disuelto en dos puntos distintos de la columna empacada. Aunque se observa una discontinuidad en la medición correspondiente al periodo nocturno, en el cual no se tomaron muestras ni se realizaron mediciones, puede apreciarse que en la parte superior del biorreactor, donde se piensa que la densidad radicular es mayor, hay un aumento progresivo del contenido de oxígeno disuelto que alcanza un máximo aparente alrededor de las 19 horas, lo que haría suponer que si hay un efecto por la fotosíntesis, ya que durante la noche vuelve a

bajar el contenido de oxígeno en el reactor, como lo indican las mediciones de las 9 a las 11 horas.

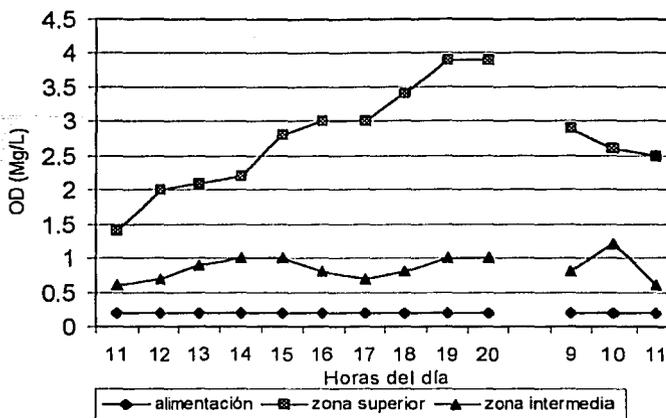


Figura IV-2. Oxígeno disuelto vs. tiempo utilizando una columna sembrada con una planta alimentando agua potable desoxigenada con bisulfito de sodio

Las mediciones de potencial redox se realizaron dos veces durante el período de iluminación (9:00 y 16:00 horas) y uno durante el período de oscuridad (21:00). Los datos se presentan en las Figuras IV-3 a 6, donde se muestran las mediciones realizadas por la mañana (9:00 horas), con la letra M, las realizadas por la tarde (16:00 horas), con la letra T y las tomadas a las 21:00 horas con la letra N. Cada una de las gráficas muestra los datos de los biorreactores en forma individual.

Las Figuras IV-3 a 6 muestran datos interesantes sobre el efecto de la macrofitas y de los "nutrimentos" del agua. En la Figura IV-3, puede observarse claramente que la alimentación y la parte superior del reactor tienen un potencial más positivo en todos los experimentos y la parte intermedia y la inferior del reactor son las más negativas. Esto podría indicar que la macrofitas aporta una cantidad de oxígeno que promueve la degradación de los nutrientes del agua por parte de los organismos que ya se han desarrollado en la zona radicular y que, en la parte media e inferior ya no hay suficiente oxígeno disuelto y los organismos tienen condiciones más anaerobias.

difunda oxígeno al sistema, el oxígeno que se encuentra disuelto en el agua es consumido muy rápidamente y los potenciales registrados en las zonas media e inferior, son todos negativos, indicando condiciones anaerobias o microaerobias (aunque como no se han realizado análisis cuantitativos de medición de DQO ni de nitrógeno total, no se puede todavía corroborar esto).

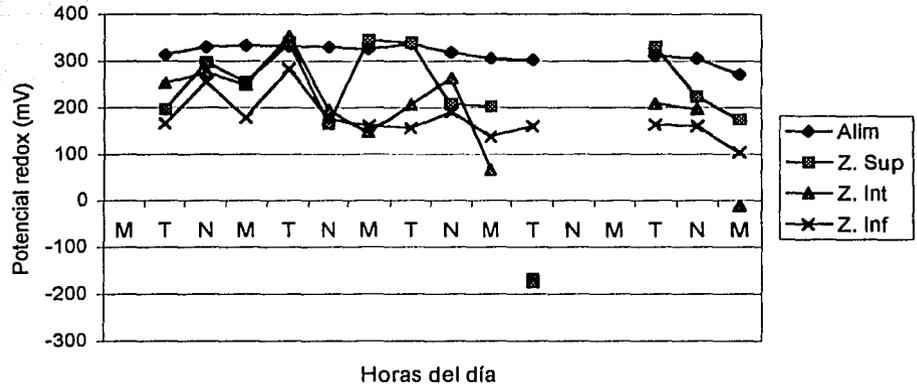


Figura IV-5. Datos de potencial redox vs. tiempo en la columna con planta y agua de la llave

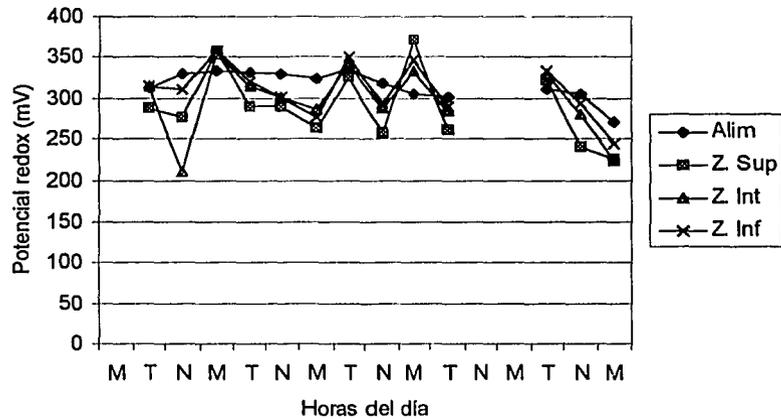


Figura IV-6. Datos de potencial redox vs. tiempo en la columna sin planta y con agua de la llave

En la Figura IV-5 se presentan los datos del biorreactor con planta irrigada con agua de la llave. En este caso, puede verse que, la diferencia en los valores del potencial redox entre la alimentación y los tres diferentes puntos de muestreo es menos significativa que en los datos presentados anteriormente. Dado que no hay material “nutritivo” que promueva la proliferación de bacterias en la zona radicular ni en el material inerte, no hay un consumo significativo del oxígeno disuelto en el agua alimentada. Las diferencias que se observan entre el valor del potencial medido en la zona superior y en las zonas media e inferior, puede deberse a la baja actividad microbiológica promovida por el sustrato que pudiera llegar a producir las células muertas del rizoma. Si bien es cierto que en este biorreactor, se puede suponer que no hay consumo considerable de oxígeno tampoco se aprecia un aumento en el valor del potencial en la zona superior de muestreo, que es donde se encuentra la mayor densidad de crecimiento radicular de la planta. Esto puede explicarse en el trabajo de Wiessner y col. (2001) donde demuestran que, para la especie en estudio (*Typha latifolia*), la transferencia de oxígeno del rizoma de la planta al medio depende del potencial redox del mismo y ésta se presenta entre valores de potencial de -150 y -250 mV. Por este motivo, no se encuentra una variación significativa de la cantidad de oxígeno transferido por la planta.

Finalmente, en la Figura IV-6 se muestran los resultados obtenidos al alimentar agua de la llave al biorreactor sin macrofitas, utilizado como control. Aquí se puede observar que no existe una variación considerable entre los potenciales medidos en cada uno de los puntos y tampoco con el potencial redox del agua alimentada. Esto se debe al hecho de que el agua contiene una cierta cantidad de oxígeno disuelto que se mantiene relativamente constante durante su trayecto a lo largo del biorreactor ya que aunque hubiera microorganismos presentes en el material de empaque puesto que las condiciones de trabajo del sistema y las características del agua de alimentación no son totalmente asépticas su proliferación es mínima.

En la Figura IV-7 se muestran los valores de la DQO soluble medida a la entrada y a la salida de las dos columnas alimentadas con agua residual sintética.

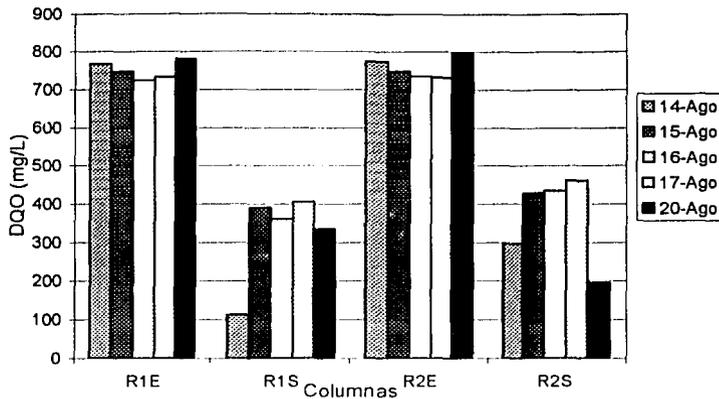


Figura IV-7. Valores de DQO_s medidos a la entrada y a la salida de cada una de las columnas alimentadas con agua residual sintética (R1E, R1S: entrada y salida respectivamente de la columna con planta. R2E, R2S: entrada y salida respectivamente de la columna sin planta)

En la Tabla B-2 del Anexo B, se presentan los resultados experimentales, que muestran los valores de las desviaciones del valor teórico de potencial redox entre los electrodos de Cu/CuSO₄ y calomel para cada uno de los electrodos utilizados en la experimentación. En esta tabla puede verse que los electrodos que presentan mayor desviación del valor teórico es de alrededor de 3 mV. Considerando que los valores de potencial medidos en las columnas son de entre -50 y 400 mV, la lectura de los electrodos construidos puede considerarse confiable, aunque no se hicieron evaluaciones estadísticas de significancia.

Por otro, lado en la Figura B-18 del mismo Anexo se muestra una comparación hecha por duplicado entre la capacidad de respuesta del par platino-Cu/CuSO₄ y grafito-calomel en una reacción progresiva con cambio de potencial de óxido reducción. En este experimento se puede ver que, aunque la lectura puntual es confiable, la velocidad de respuesta de los electrodos construidos es considerablemente menor a la velocidad de respuesta del electrodo comercial de calomel. Esto puede deberse a que el material utilizado para construir la membrana permeable no es el adecuado o que tiene un grosor excesivo.

Ya se mencionó anteriormente que se consideró para esta investigación que los mecanismos de transferencia de oxígeno por acciones mecánicas son importantes y que la cantidad de oxígeno que se transfiere a la zona de la rizosfera es considerable. Para que el oxígeno sea transportado de la atmósfera al interior del HA por convección es necesario que se genere un gradiente de presión entre el interior del lecho empacado y la presión atmosférica y el aire sea succionado. El volumen de aire introducido al material de empaque depende directamente del volumen de agua residual alimentado. De este modo, mientras mayor sea la cantidad de agua alimentada mayor será el volumen de aire introducido. Por otro lado, el volumen de agua que se debe alimentar al sistema se determina por la concentración de contaminantes (principalmente materia orgánica), presentes en el agua y por la capacidad de remoción de los mismos por el sistema. Por esta razón, aunque a un volumen mayor de agua alimentado al sistema corresponde una mayor cantidad de aire succionado, el volumen máximo de alimentación es limitado.

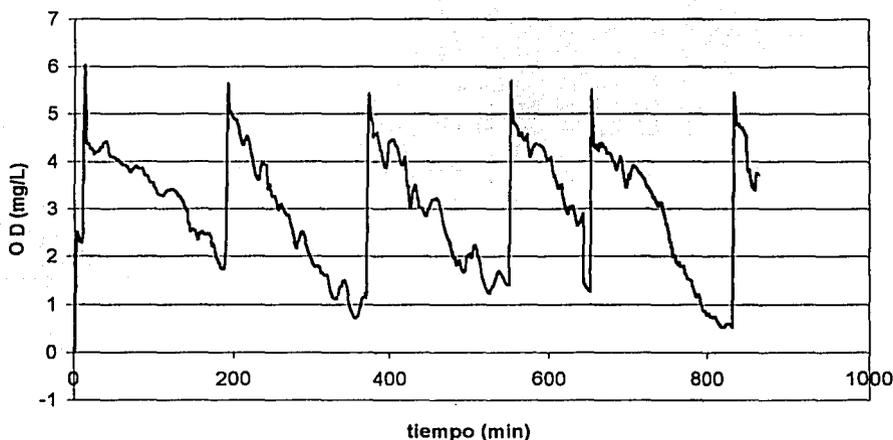


Figura IV-8. Concentración de oxígeno a la salida alimentando agua residual sintética a 130 mL/min (1min) x4

En la Figura IV-8 se muestra la variación de la concentración de oxígeno medida a la salida de la columna. En esta gráfica se muestran 6 periodos de alimentación de agua residual que se realizaron en intervalos de 6 horas. En cada periodo se aprecia que el punto máximo de

saturación se alcanza en los 10 minutos posteriores al intervalo de alimentación correspondiente a cada periodo. Esto puede apreciarse con más detalle en la Figura IV-9 en la que se presenta un promedio de estos periodos.

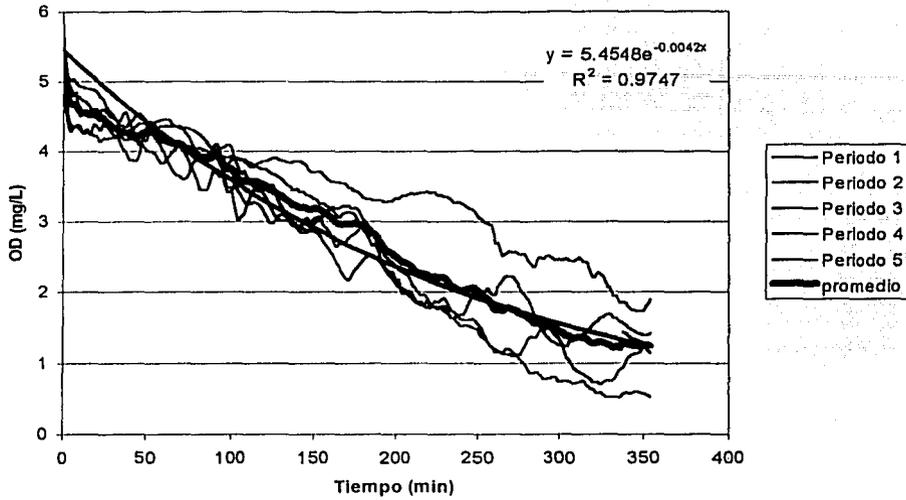


Figura IV-9. Concentración de oxígeno disuelto durante los periodos de alimentación de 6 horas alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min) x4

El valor promedio obtenido para el $K_{L,a}$ del sistema es de 0.5601 min^{-1} . Los valores obtenidos para cada periodo se muestran en la Tabla B-1 y en la Figura B-18 del anexo B.

En las Figuras B-1 y B-2 del anexo se muestra el comportamiento del flujo de salida de la columna alimentada con agua residual durante un intervalo de alimentación. En éstas se puede apreciar que, en términos prácticos, la mayor cantidad de agua alimentada por cada periodo es evacuada durante las primeras dos horas posteriores a cada alimentación. Un resultado similar se observa en la Figura B-11 en la que se muestra el comportamiento del flujo a la salida de la columna alimentada con agua desionizada.

En la Figura IV-8 se presentan los datos de la medición de la concentración de oxígeno a la salida de la columna alimentada con agua residual, medida durante un día y medio de

operación. En esta figura se observan los diferentes periodos de alimentación cada 6 horas. Para realizar el balance de oxígeno durante los periodos de alimentación se tomó un promedio de cada uno de los ciclos de alimentación (Figura IV-9), a partir de los cuales se realiza el análisis.

El volumen de aire succionado dentro de la columna alimentando 1130 mL se muestra en la Figura B-5 del anexo. De estos resultados se puede observar que el volumen de aire introducido al sistema por efecto de la succión es menor al volumen de agua alimentada y que la relación entre volumen succionado entre volumen alimentado es menor mientras menor es el volumen alimentado. Esto puede deberse a que mientras menor es el volumen que percuera a través del material de empaque, menos ideal es el flujo "pistón" que se presenta dentro del humedal. En la Figura B-6 del mismo anexo se muestra el resultado expresado gráficamente de la ecuación ajustada a este comportamiento y el valor de dicha ecuación es el siguiente:

$$V = -57.7075 + 808.6382[1 - \exp(-0.0466t)] \quad (IV-1)$$

donde:

V: Volumen de aire succionado acumulado [mL]

t: Tiempo [min]

Derivando esta ecuación con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{dVs}{dt} = 37.6825 e^{-0.0466 t} \quad (IV-2)$$

Para realizar el producto V C tanto en los flujos de salida de cada columna como del aire succionado dentro de la misma, los valores obtenidos se ajustan a una ecuación que describa su comportamiento. Los valores obtenidos gráficamente con dicha ecuación se muestran, en la Figura B-3, para el volumen de salida de la columna alimentada con agua residual a 1,130 mL/min durante 1 minuto cada 6 horas. La ecuación que resulta de este ajuste es:

$$V=390.5718+591.4149[1-\exp(0.0108t)] \quad (IV-3)$$

donde:

V: Volumen de agua residual acumulado [mL]

t: Tiempo [min]

Derivando esta ecuación con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{dV_o}{dt} = 6.38728 e^{-0.0108 t} \quad (IV-4)$$

A los valores de oxígeno medido a la salida de la columna alimentando agua residual (Figura B-6) se les ajustó también una ecuación la cual se muestra a continuación:

$$C_o=5.4548e^{-0.0042 t} \quad (IV-5)$$

En la Figura B-4 se muestra el resultado del producto V C para esta misma columna, multiplicando los valores presentes en la Figura B-3 del anexo y los mostrados en la Figura IV-9.

Los valores del flujo másico introducidos por succión dentro de la columna se muestran en la Figura B-8. Para determinar el perfil de concentraciones a la salida de la columna alimentada con agua residual se tomaron muestras de 50 mL a diferentes intervalos de tiempo.

Bajo condiciones normales, el aire contiene aproximadamente 300mg/L de oxígeno. Esto significa que por cada litro de aire introducido a la zona radicular se pueden transferir 300 mg de oxígeno. Esto depende del coeficiente de difusión del aire al agua bajo las condiciones de operación. Platzer y Mauch (1997) reportan que, para un coeficiente de difusión de $3.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, utilizando la ley de Fick se obtiene una difusión de $1 \text{ gO}_2/\text{m}^2 \text{ h}$.

En la Tabla B-1 y en la Figura B-15 se muestran algunos valores de concentración a la entrada y a la salida de la columna, el valor promedio de la DQOt a la entrada es de 153 mg/L y para la salida de 44.9 mg/L obteniéndose un valor promedio en el porcentaje de remoción de materia orgánica total de 70.65%.

Según Sengevein (1989 citado por Platzer, 1999) la relación entre oxígeno requerido y materia orgánica oxidada es de 0.7 gO₂/gDQO. Partiendo de este hecho y de las ecuaciones IV-1 a IV-5, se obtiene la ecuación siguiente:

$$\frac{dDO}{dt} = 0.7065 * 0.7 [(300 * 37.6825 e^{-0.0466 t}) - (6.3872 e^{-0.0108 t} + 5.4548 e^{-0.0042 t})] \quad (IV-6)$$

de la cual simplificando se obtiene:

$$\frac{dDO}{dt} = 5590.76 e^{-0.0466 t} - 17.2305 e^{-0.015 t} \quad (IV-7)$$

Con esta igualdad se puede predecir el comportamiento del sistema en términos del balance de oxígeno disuelto en cualquier punto de un ciclo de alimentación.

Con base en estos resultados, a continuación, se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

De los resultados expuestos anteriormente puede concluirse que existe, bajo condiciones controladas de laboratorio, una relación directa entre la concentración de oxígeno disuelto y el potencial redox de la solución. Pero, al encontrarse otras especies químicas en solución, el potencial de óxido reducción se ve influido por estas especies, razón por la cual los resultados obtenidos midiendo este parámetro no son confiables si se desea determinar la concentración de oxígeno real en este tipo de soluciones.

Por otro lado, los electrodos de potencial redox son de fácil construcción y operación a la vez que son muy económicos y no requieren mantenimiento constante como los electrodos de oxígeno disuelto convencionales. Por este motivo, pueden ser utilizados como un equipo de medición para evaluar algunas características de operación en los humedales artificiales, tanto a nivel de laboratorio, como de escala de banco o aún en escala real, tales como: La identificación de las zonas de mayor actividad microbiológica, la identificación de zonas muertas o de corto circuito, el control de las áreas de actividad aerobia, anóxica y anaerobia con el fin de controlarlas y así aumentar la eficiencia global de remoción de contaminantes.

La medición del potencial redox puede ser utilizada, también, como un parámetro de control para los periodos de alimentación del sistema tal y como se realiza en algunos otros sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales (Yu y col, 1996)

De los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados para determinar la transferencia de oxígeno por convección y de aire succionado utilizando colinas herméticamente cerradas puede concluirse que, si bien la mayoría de los autores expertos en el tema afirman que las plantas presentes en los humedales artificiales de flujo intermitente juegan un papel importante en el correcto funcionamiento de estos sistemas proveyendo

durante el día oxígeno a través de la fotosíntesis, no son el único mecanismo de transferencia de oxígeno disuelto dentro de la zona de la rizosfera pues se demuestra que se pueden obtener eficiencias de remoción de medianas a buenas introduciendo oxígeno por succión exclusivamente.

La transferencia de oxígeno por convección a la zona de la rizosfera es una variable que debe ser tomada en cuenta para el diseño de los humedales artificiales ya que es un parámetro que puede ser manipulado para aumentar la eficiencia de remoción de materia orgánica. El control de esta variable depende directamente del volumen de agua residual alimentado al sistema y de la duración de los periodos en las que dicha alimentación se realiza, ya que el volumen de aire succionado dentro del sistema experimental no corresponde exactamente al volumen de agua alimentado tal como la afirman algunos autores.

Con este experimento se diseñó, construyó y probó un equipo que permite medir a nivel de laboratorio el volumen de aire succionado dentro de columnas que simulan el comportamiento de los humedales artificiales de flujo vertical.

Una importante aportación de este trabajo es que al final de esta investigación se cuenta con los elementos necesarios para construir una herramienta que permita simular el comportamiento dinámico de la transferencia de oxígeno dentro de la zona de la rizosfera por convección para ser utilizada como un criterio de diseño de humedales artificiales de flujo vertical.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO A. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

A.1 Determinación de la relación entre oxígeno disuelto y potencial redox utilizando lodos activados

Para esta prueba se utilizaron lodos activados provenientes de uno de los sedimentadores de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria. Los lodos sedimentados se colocaron en un recipiente de 10 L y eran burbujeados constantemente utilizando una bomba de aire convencional. De estos mismos lodos se tomaron tres muestras en tres días distintos y se realizaron de manera independiente para cada muestra, los pasos que se muestran a continuación.

- Colocar los lodos sedimentados, previamente oxigenados en un recipiente de vidrio con tapa de rosca de 500mL. La tapa debe estar previamente perforada para introducir los electrodos como se muestra en la Figura A-1.
- Agregar 100 g de sacarosa y llenar el recipiente hasta el borde de tal modo que evite la formación de burbujas de aire dentro del recipiente cerrado.
- Sellar la tapa usando el empaque de látex como se muestra en la Figura A-1.
- Colocar cada uno de los electrodos y sellarlos a la tapa del frasco utilizando los empaques de látex.
- Mantener los lodos en agitación constante utilizando una parrilla de agitación.
- Hacer mediciones del potencial redox utilizando el potenciómetro en función de la variación en el valor del oxígeno disuelto. Dadas las características del oxímetro utilizado, las mediciones se hacen por cada intervalo de 0.2 mg/L de oxígeno disuelto.

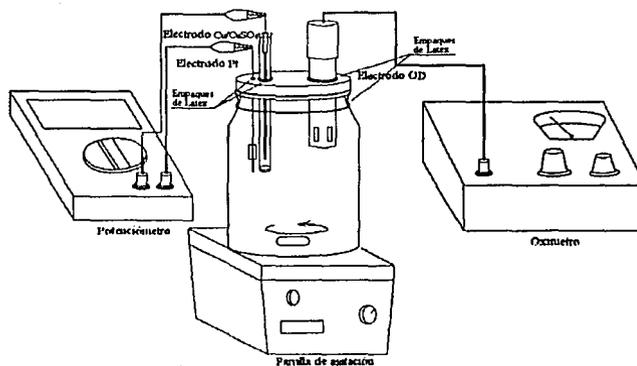


Figura A.1. Conexión e instalación del equipo utilizado para la prueba experimental usando lodos activados

A.2. Determinación De La Relación Entre Oxígeno Disuelto Y Potencial Redox Utilizando Bisulfito De Sodio (Na_2SO_3)

A.2.1. Equipo, materiales y reactivos

Electrodo de oxígeno disuelto
Electrodo de Cu/CuSO_4
Electrodo de Platino
Vaso de precipitados de 500mL
Soporte universal
Parrilla de agitación
Compresor de aire y difusor
Medidor de oxígeno disuelto
Potenciómetro

A.2.2. Procedimiento

Esta prueba tiene por objeto encontrar si existe una relación entre el valor de oxígeno disuelto y el potencial redox leído a lo largo del intervalo comprendido entre los puntos de 0 mg/L de oxígeno disuelto y la concentración de saturación de oxígeno.

- Instalar el equipo como se muestra en la Figura A.2
- Agregar agua destilada (400mL) al vaso de precipitados y airear por 30 min.
- Enjuagar los electrodos de oxígeno disuelto y potencial redox y sumergirlos en el agua destilada sosteniéndolos usando el soporte universal.
- Conectar los electrodos de oxígeno disuelto y potencial redox al oxímetro y al potenciómetro respectivamente.
- Con agitación constante y sin aireación, agregar el bisulfito de sodio lentamente. La reacción y la relación estequiométrica se muestran a continuación.



$$\text{Na}_2\text{SO}_3 / \frac{1}{2} \text{O}_2 = 126/16 = 7.9 \quad (\text{A.2})$$

- Es decir, por cada miligramo de oxígeno disuelto por litro añadir 7.9 mg de Na_2SO_4 mas un exceso del 20%.
- Hacer mediciones de potencial redox por cada intervalo de disminución del valor de oxígeno disuelto de 0.2 mg/L

- Una vez alcanzado el valor de 0 mg/L de oxígeno disuelto, iniciar la aireación de la solución y tomar mediciones con los mismos intervalos.

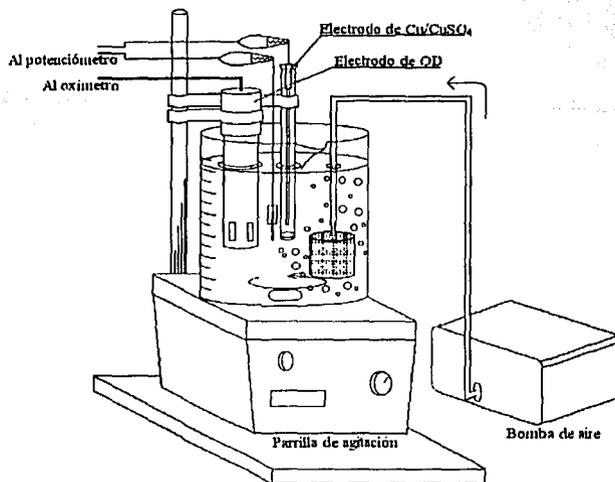


Figura A-2. Equipo usado para medir correlaciones entre oxígeno disuelto y potencial redox

A.2.3. Evaluación de los electrodos

Para evaluar la capacidad de respuesta y la desviación de la lectura de los electrodos de referencia de Cu/CuSO_4 contruidos comparándolos con un electrodo comercial de calomel se realizaron dos pruebas rápidas. En la primera se colocaron un electrodo de CuCuSO_4 y un electrodo de calomel conectados, cada uno, a un extremo del mismo potenciómetro y sumergidos dentro de una solución salina, se comparó la lectura obtenida con el valor teórico esperado. En la Figura A-3 se muestra un diagrama de la colocación de los electrodos.

Para evaluar la capacidad de respuesta de dichos electrodos se comparó la lectura registrada usando dos potenciómetros distintos comparando los pares Pt vs. CuCuSO_4 y grafito vs. calomel. Los electrodos se sumergieron en una solución de CuCuSO_4 a la que se le agregó por goteo amoniaco con el fin de modificar el potencial redox de la solución. En la Figura A-4 se muestra un diagrama de la colocación y conexión de los electrodos para esta prueba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

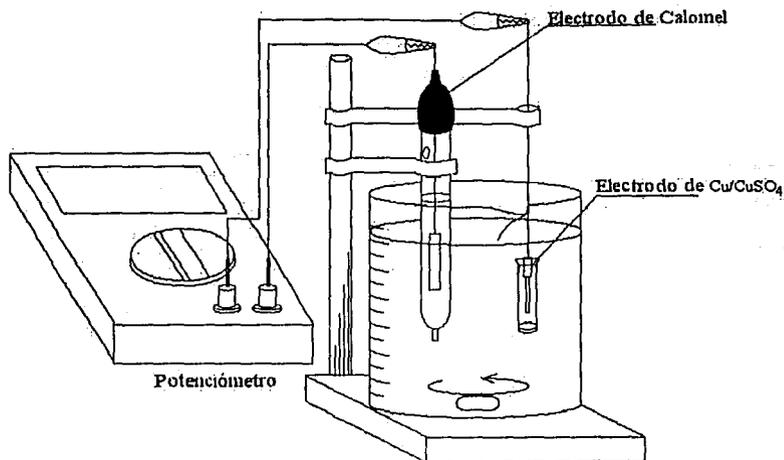


Figura A.3. Sistema para evaluar la capacidad de respuesta de los electrodos contruidos de CuSO₄ comparándolos contra un electrodo de calomel

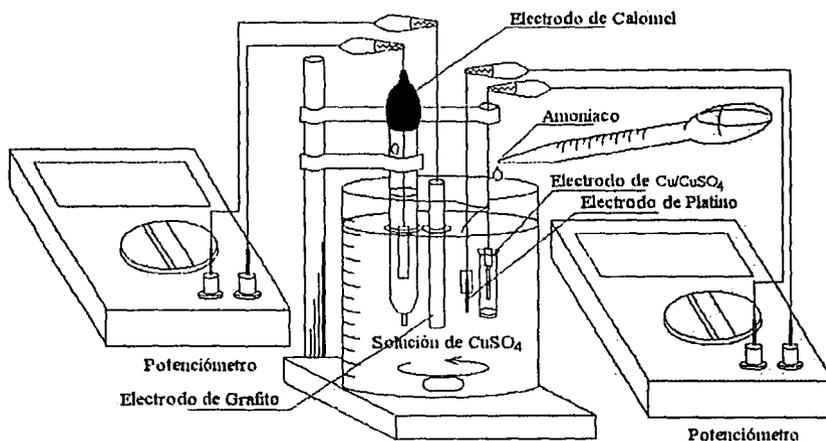


Figura A.4. Sistema para evaluar la velocidad de respuesta del los electrodos de platino-Cu/CuSO₄ comparándolos con el par grafito-calomel

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A.3. Características generales del equipo utilizado para la determinación de la aportación de oxígeno por convección

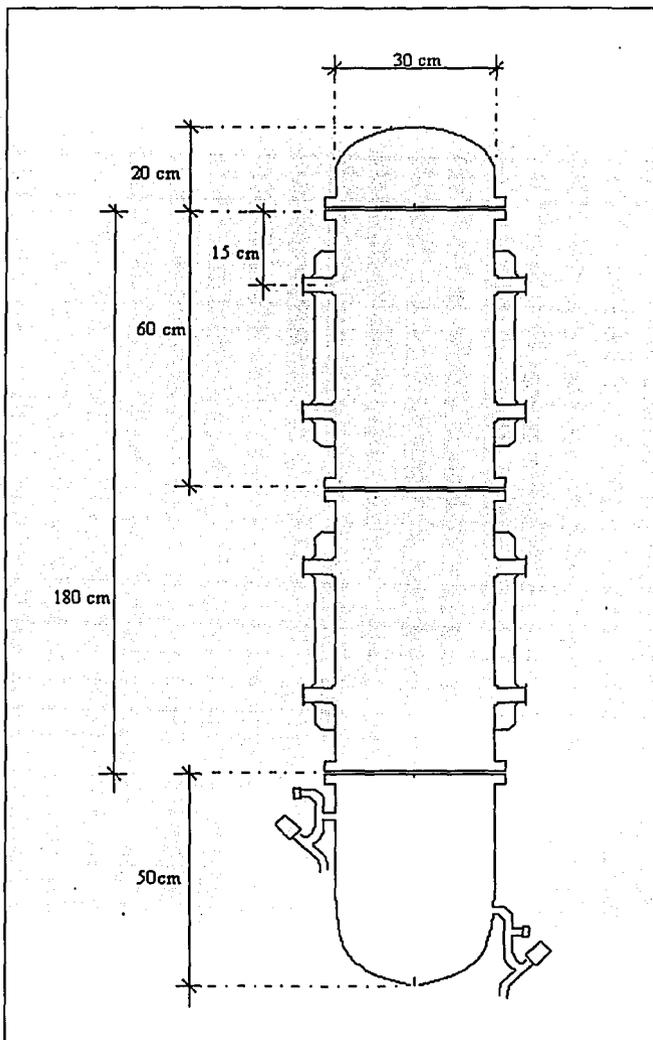


Figura A-5. Dimensiones generales de las dos columnas en las que se realizaron los experimentos de convección

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO B. RESULTADOS EXPERIMENTALES

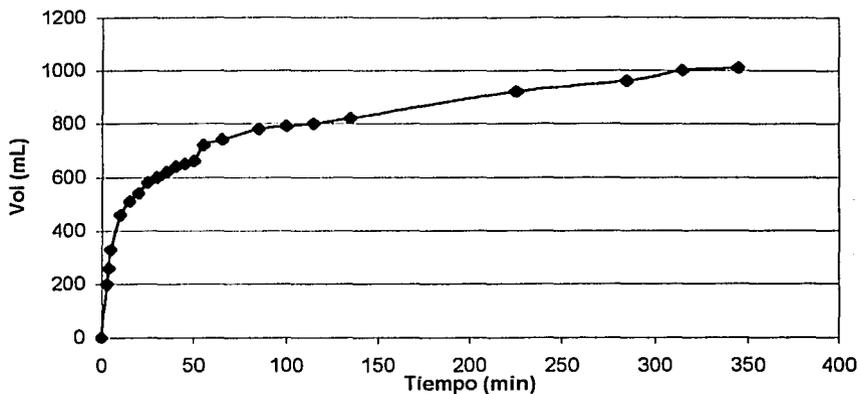


Figura B-1. Volumen de salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4

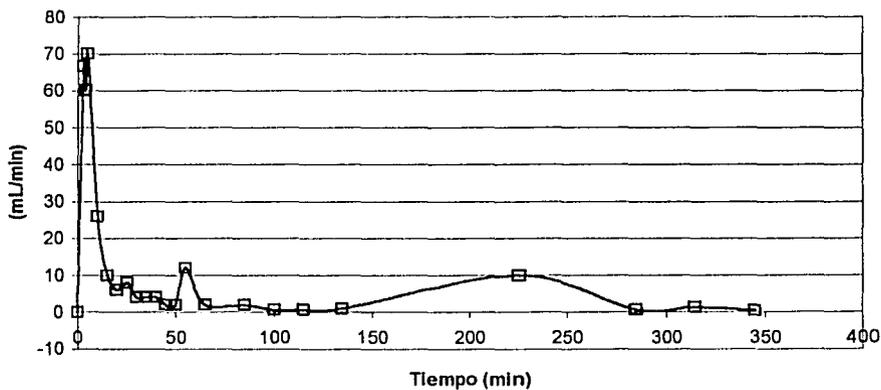


Figura B-2. Flujo volumétrico a la salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

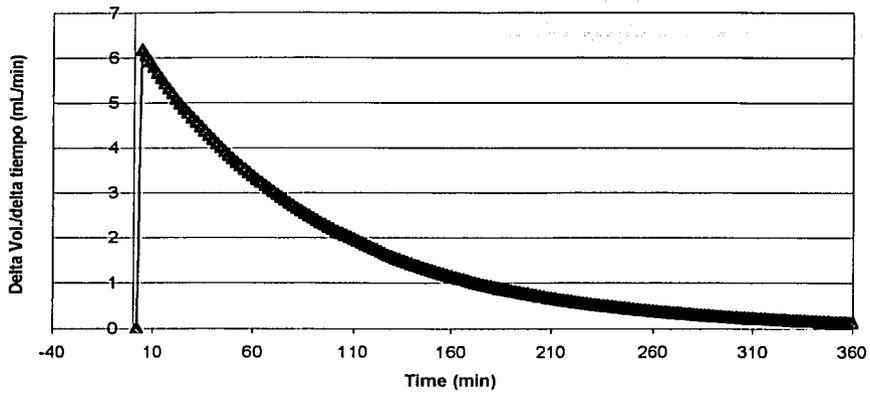


Figura B-3. Datos ajustados del flujo volumétrico a la salida alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4

Ecuación ajustada

$$y = y_0 + a(1 - \exp(-bt))$$

$y_0 = 390,5718$
 $a = 591,4149$
 $b = 0,0108$

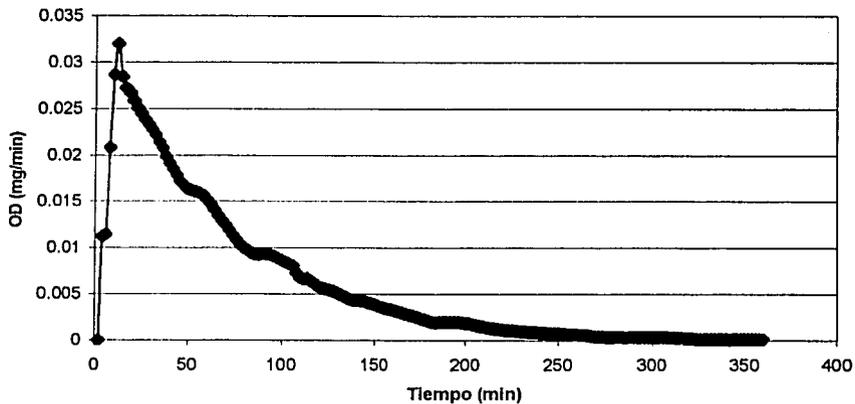


Figura B-4. Flujo másico alimentando agua residual sintética a 1130 mL/min (1min)x4

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

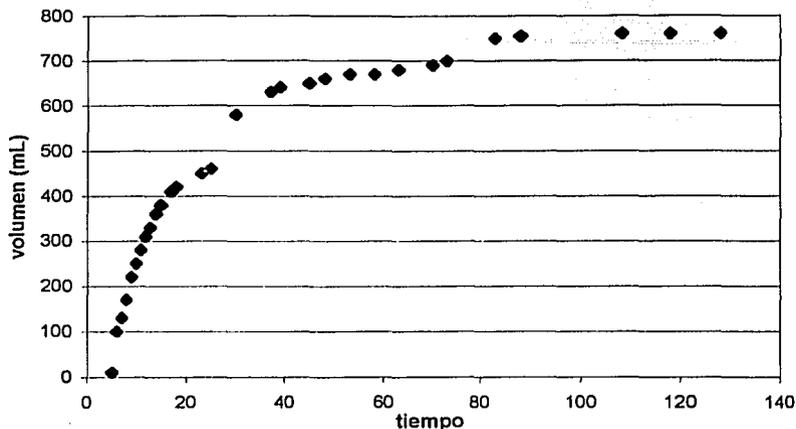


Figura B-5. Aire succionado alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4

Ecuación ajustada
 $y = y_0 + a[1 - \exp(-bt)]$
 $y_0 = -57.7075$
 $a = 808.6382$
 $b = 0.0466$

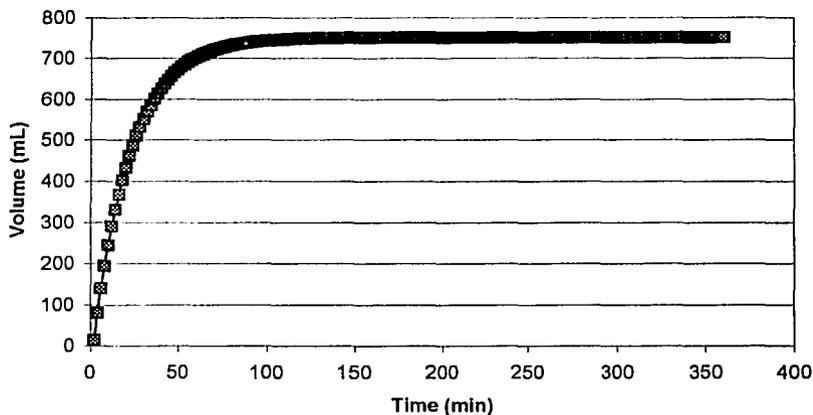


Figura B-6. Valores ajustados del volumen de aire succionado alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

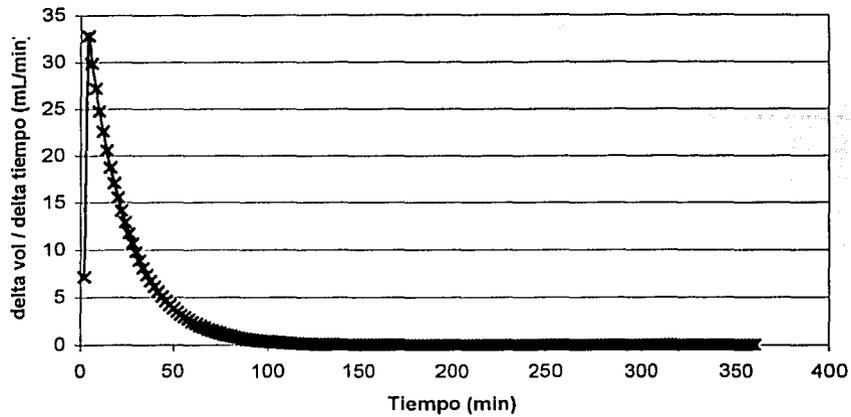


Figura B-7. Flujo volumétrico de aire succionado alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4

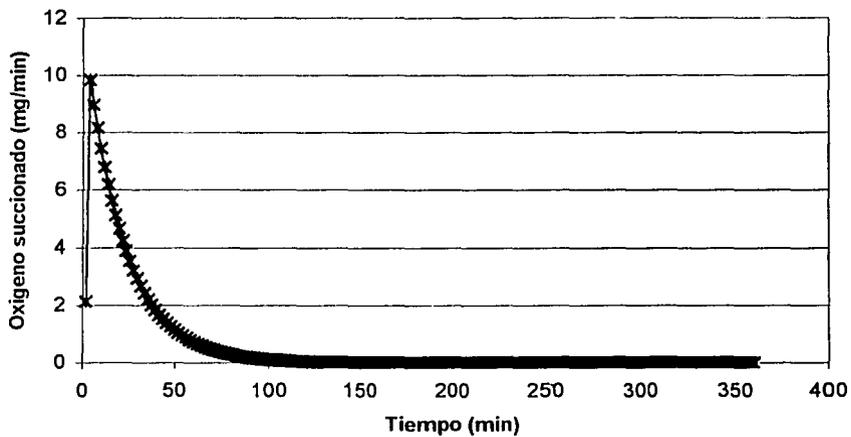


Figura B-8. Flujo másico de oxígeno succionado dentro de la columna alimentando a 1130 mL/min (1min) x 4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

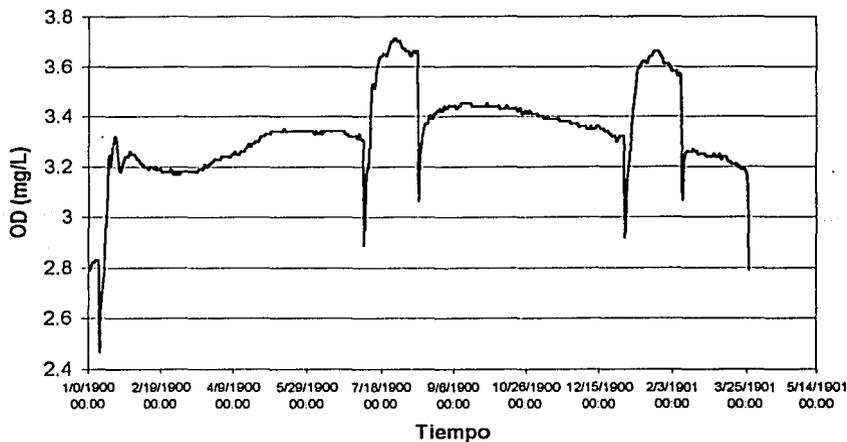


Figura B-9. Concentración de oxígeno a la salida alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4

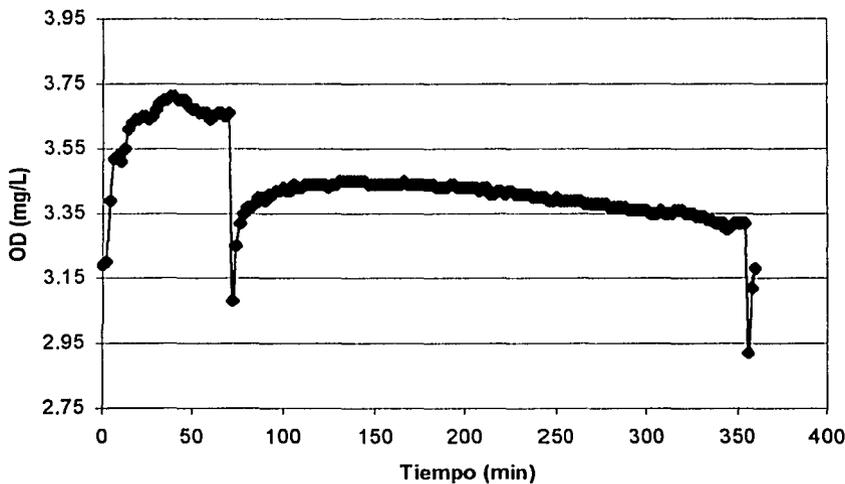


Figura B-10. Concentración de oxígeno a la salida durante un periodo de alimentación de 6 horas alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

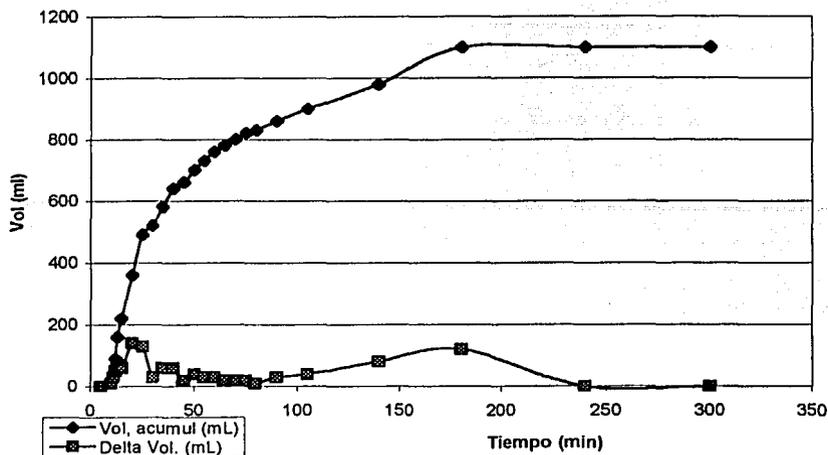


Figura B-11. Volumen de salida alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4

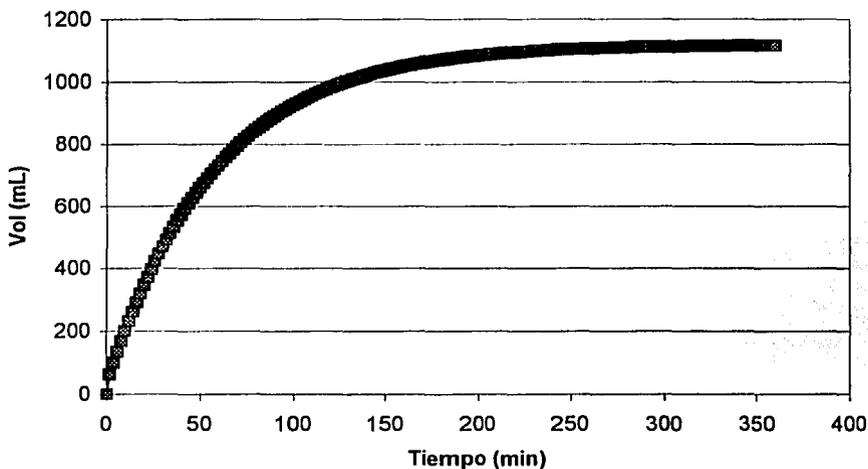


Figura B-12. Datos ajustados del volumen de salida alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

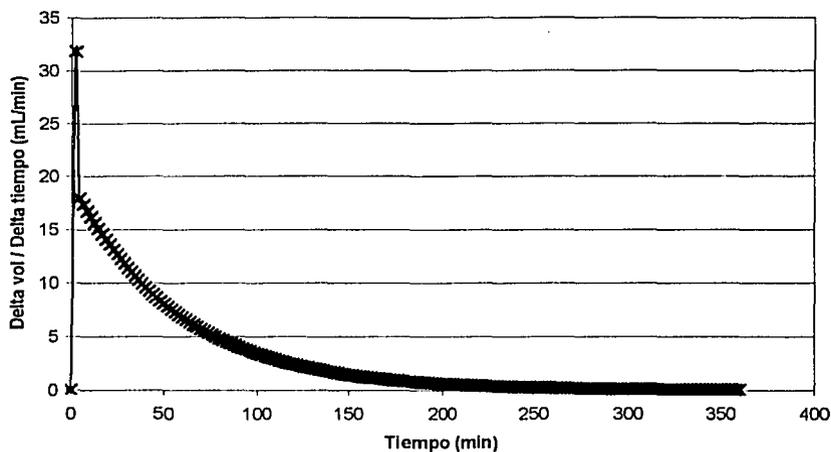


Figura B-13. Datos ajustados del flujo volumétrico alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4

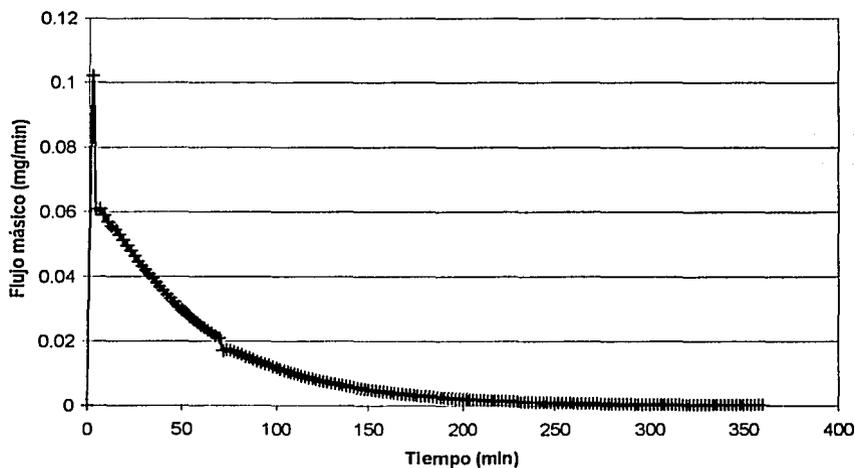


Figura B-14. Flujo másico alimentando agua desionizada a 1130 mL/min (1min)x4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla B-1. Valores de concentración a la salida de la columna alimentada con agua residual residual

	DQO	DBO ₅	N org	NH ₄ -N
Teórico (Koppe y Stozek)	370	195	48.3	1.6
Experimental	296	164	54	0.23
100% dilución	278	-	49.5	0.305
	-	-	52.4	0.158
	-	-	51.3	0.262
	-	-	41.6	0.303
50% dilución	172	92.8	-	-
	-	93	-	-
media a 50% dil	153	-	-	-

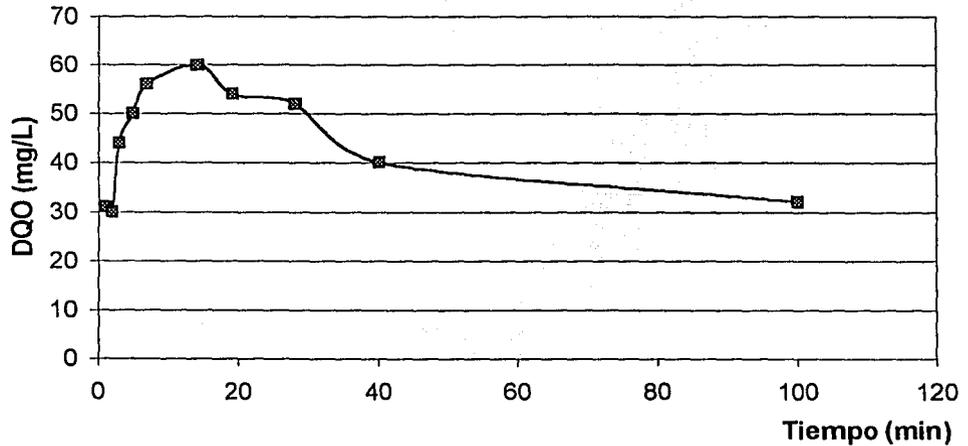


Figura B-15. Perfil de la variación en la concentración a la salida de la columna alimentada con agua residual sintética a 1130 mL/min (1min) x4

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla B-2. Desviaciones de la diferencia de potencial comparando un electrodo comercial de calomel con los electrodos de Cu/ CuSO₄ construidos

Electrodo	A	A	B	B	C	C
Columna	mV	mV	mV	mV	mV	mV
R1	3.1	1.6	2.3	3.6	2.7	3.1
R2	0.6	0.6	1.5	2.3	1.9	1.8
E1	0	0.3	0.7	-0.6	1.1	2.2
E2	0.9	2.6	2.8	2.8	-4.6	-2.5
	Promedio A	Desviación A	Promedio B	Desviación B	Promedio C	Desviación C
R1	2.35	1.06066017	2.95	0.91923882	2.9	0.28284271
R2	0.6	0	1.9	0.56568542	1.85	0.07071068
E1	0.15	0.21213203	0.05	0.91923882	1.65	0.77781746
E2	1.75	1.20208153	2.8	0	-3.55	1.48492424

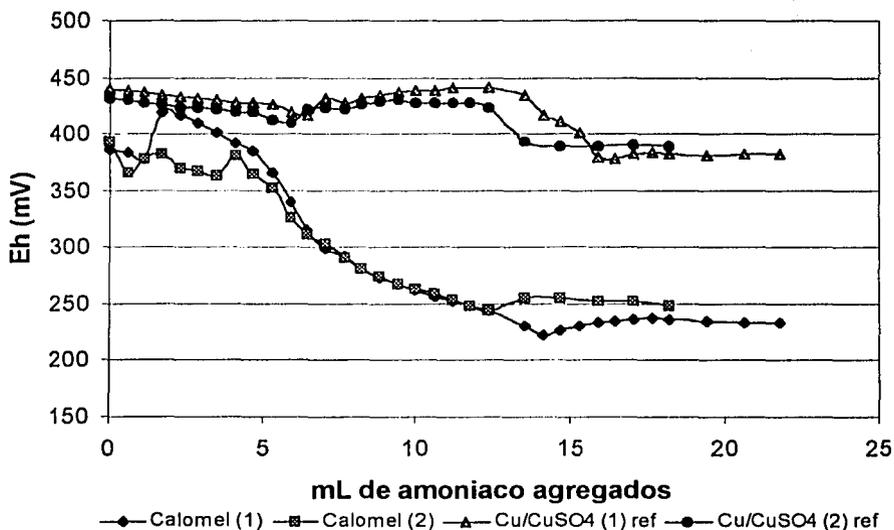


Figura B-16. Valores comparativos de potencial redox (Calomel y Cu/CuSO₄) reaccionando CuSO₄ y amoníaco para determinar la velocidad de la reacción

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

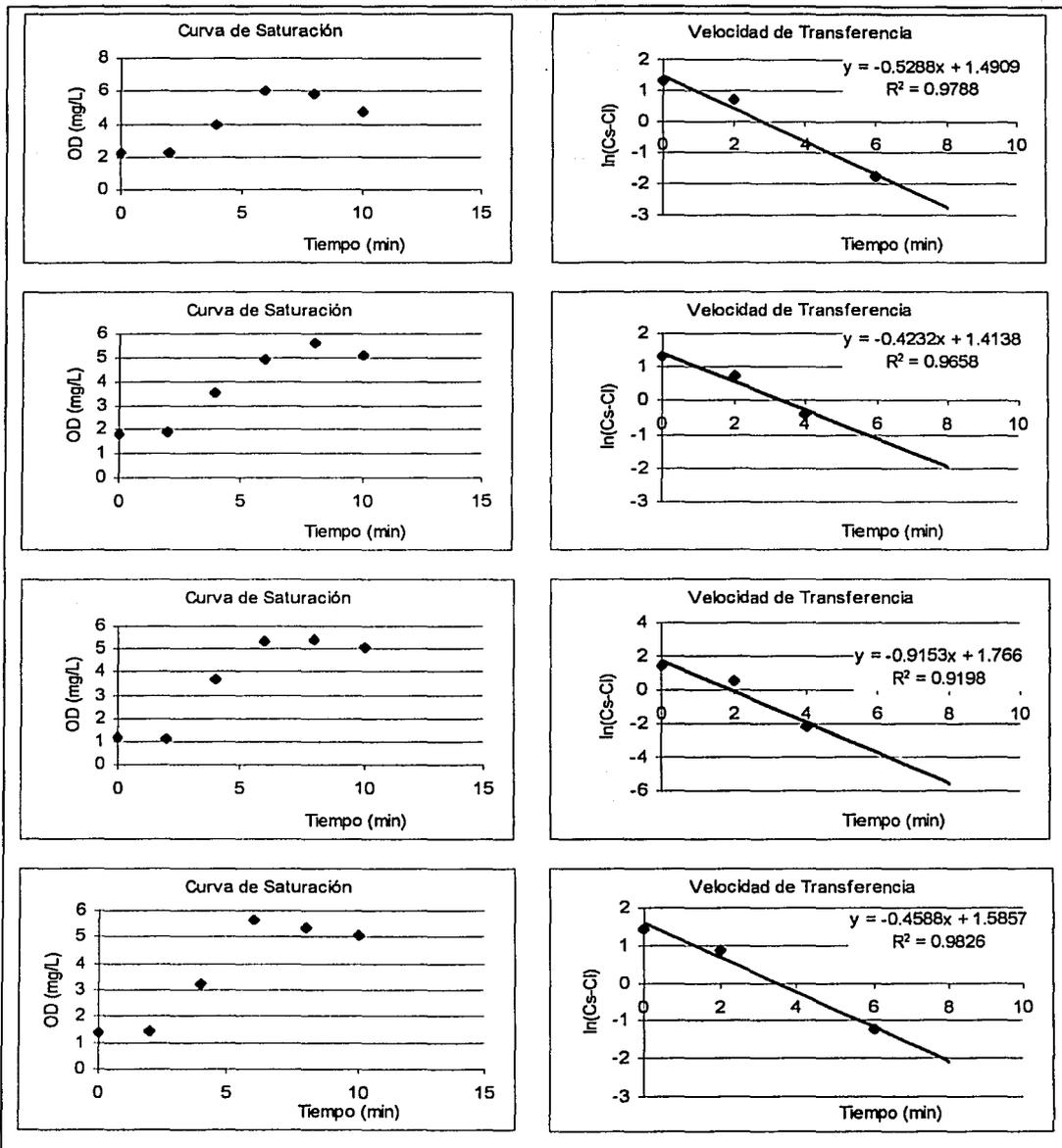


Figura B-17a. Curva de saturación y velocidad de transferencia de oxígeno para el cálculo del coeficiente de transferencia ($K_L a$) del sistema

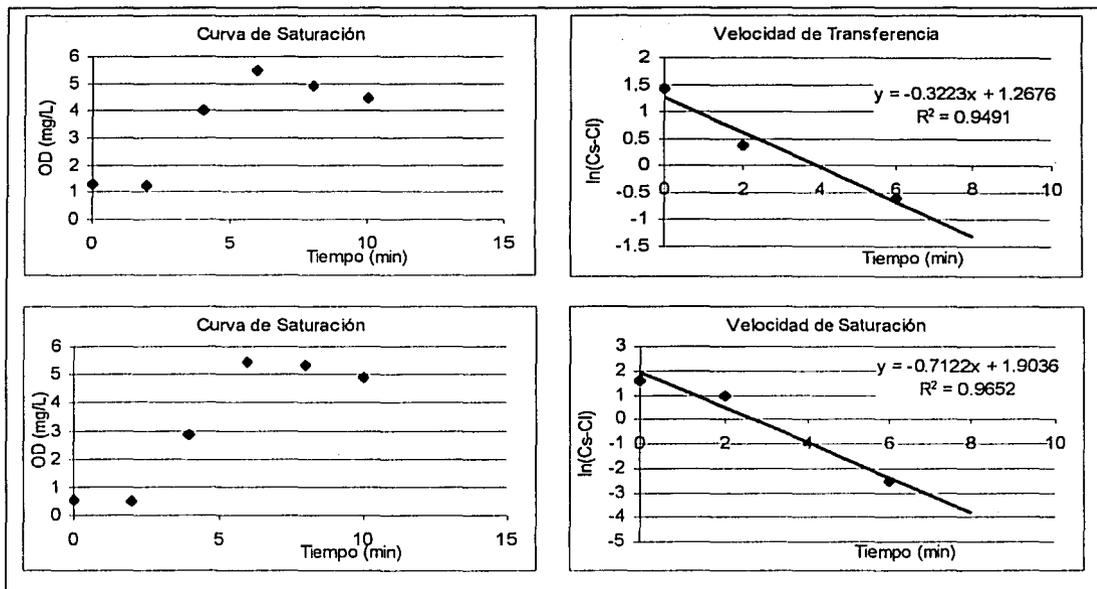


Figura B-17b. Curva de saturación y velocidad de transferencia de oxígeno para el cálculo del coeficiente de transferencia ($K_{L,a}$) del sistema

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla B-3. Cálculo del coeficiente de transferencia (K_{La}) del sistema

	Tiempo (min)	OD(mg/L)	$C_s - C_L$	$\ln(C_s - C_L)$	K_{La} (1/min)
12/12/2001 11:04	0	2.29	3.71	1.31103188	0.5288
12/12/2001 11:06	2	2.29	3.71	1.31103188	
12/12/2001 11:08	4	3.98	2.02	0.70309751	
12/12/2001 11:10	6	6	0		
12/12/2001 11:12	8	5.83	0.17	-1.77195684	
12/12/2001 11:14	10	4.74	1.26	0.23111172	
12/12/2001 17:04	0	1.81	3.83	1.3428648	0.4232
12/12/2001 17:06	2	1.89	3.75	1.32175584	
12/12/2001 17:08	4	3.52	2.12	0.75141609	
12/12/2001 17:10	6	4.95	0.69	-0.37106368	
12/12/2001 17:12	8	5.64	0		
12/12/2001 17:14	10	5.13	0.51	-0.67334455	
12/12/2001 23:04	0	1.2	4.22	1.43983513	0.9153
12/12/2001 23:06	2	1.14	4.28	1.45395301	
12/12/2001 23:08	4	3.67	1.75	0.55961579	
12/12/2001 23:10	6	5.31	0.11	-2.20727491	
12/12/2001 23:12	8	5.42	0		
12/12/2001 23:14	10	5.07	0.35	-1.04982212	
12.13.01 05:04:00	0	1.4	4.26	1.44926916	0.4588
12.13.01 05:06:00	2	1.42	4.24	1.44456327	
12.13.01 05:08:00	4	3.25	2.41	0.87962675	
12.13.01 05:10:00	6	5.66	0		
12.13.01 05:12:00	8	5.37	0.29	-1.23787436	
12.13.01 05:14:00	10	5.1	0.56	-0.5798185	
12.13.01 11:04:00	0	1.28	4.2	1.43508453	0.3223
12.13.01 11:06:00	2	1.26	4.22	1.43983513	
12.13.01 11:08:00	4	4.04	1.44	0.36464311	
12.13.01 11:10:00	6	5.48	0		
12.13.01 11:12:00	8	4.92	0.56	-0.5798185	
12.13.01 11:14:00	10	4.5	0.98	-0.02020271	
12.13.01 17:04:00	0	0.56	4.87	1.58309394	0.7122
12.13.01 17:06:00	2	0.52	4.91	1.59127394	
12.13.01 17:08:00	4	2.85	2.58	0.9477894	
12.13.01 17:10:00	6	5.43	0		
12.13.01 17:12:00	8	5.35	0.08	-2.52572864	
12.13.01 17:14:00	10	4.89	0.54	-0.61618614	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO C. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

C.1. Medidor de oxígeno y cloruros

C.1.1. Especificaciones del sensor de oxígeno (YSI Incorporated, 1999)

Temperatura:

Tipo de sensor	Acero inoxidable alto calibre
Intervalo	-5 a 45°C
Precisión	+/- 0.15°C
Resolución	0.01
Profundidad	200 m

Oxígeno disuelto, % Saturación:

Tipo de sensor	Pulso rápido – tipo “Clark”. Polarográfico
Intervalo	0 a 500 % de saturación de aire
Precisión	0 – 200 % de saturación de aire, +/- 2% para la lectura o 2% de saturación de aire, si es mayor que 200 – 500% de saturación de aire, +/- 6% de la lectura.
Resolución	0.1%
Profundidad	200 m

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Oxígeno disuelto, mg/L (calculado del % saturación aire, temperatura y salinidad):

Tipo	Pulso rápido – tipo “Clark”. Polarográfico
Intervalo	0 a 50 mg/L

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Precisión	0 – 20 mg/L, +/- 2% en la lectura 0.2 mg/L, si es mayor que 20 – 50 mg/L, +/- 6% de la lectura
Resolución	0.01 mg/L
Profundidad	200 m

C.1.2. Cloruros

Tipo de sensor	Electrodo de ion-selectivo de estado sólido
Intervalo	0 – 1000 mg/L
Precisión	+/-15% de la lectura o 5 mg/L (si es mayor)
Resolución	0.001 mg/L a 1 mg/L (dependiendo del intervalo)
Profundidad	15 m

Sonda 6820

Ambiente de operación

Medio:	Agua fresca, marina o residual
Temperatura:	-5 a +45°C
Profundidad:	0 a 61 m
Temperatura:	-40 a +60°C para la sonda y todos los sensores excepto pH/ORP -20 a +60 para pH y pH/ORP
Material:	PVC, acero inoxidable
Diámetro máximo:	7.4 cm
Longitud máxima:	34.5 cm
Masa máxima:	1.5 kg sin cable, con sensor de turbidez 6036

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Bibliografía

- APHA, 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. 19a Ed. American Public Health Association. AWWA y WPCF. Washington, D.C. EEUUA.
- Armstrong, W. 1968. Oxygen Diffusion from the Roots of Woody Species. *Physiol. Plant.*, 21:539-543.
- Bahlo, K. y Wach, G. 1995. Naturnahe Abwasserreinigung: Planung und Bau von Pflanzenklaeranlagen. Auflage Staufen bei Freiburg. Pp. 138-146. 3ª Ed. Freiburg, RFA.
- Beckett, P., Armstrong, W., Justin, S., Armstrong, J. 1988. On the relative importance of convective and diffusive gas flow in plant aeration. *New Phytol.*, 110:463-468.
- Bolton, K., Greenway, M. 1999. Nutrient Sinks in a Constructed *Melaleuca* Wetland Receiving Secondary Treated Effluent. *Wat. Sci. Tech.* 40(3):341-347.
- Bratili, J., Skiple, A., Mjelde, M. 1999. Restoration of Lake Borrevannte: Self Purification of Nutrients and Suspended Matter Through Natural Reed-Belts. *Wat. Sci. Tech.* 40(3):325-332.
- Brix, H. 1997 Do macrophytes play a role in constructed wetland treatment? *Wat. Sci. Tech.*, 35(5):11-17.
- Brix, H., Sorrell, B., Lorenzen, B. 2001. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? *Aquat. Bot.*, 69:313-324.
- Charpentier, J., Martin, G., Wacheux, H., Gilles, P. 1998. ORP Regulation and Activated Sludge: 15 Years of Experience. *Wat. Sci. Tech.*, 38(3):197-208.
- Chen, K., Chen, Ch.-Y., Peng, J.-V., Hough, J.-Y. 2002. Real-time Control of an Immobilized-cell Reactor for Wastewater Treatment Using ORP. *Wat. Res.*, 36:230-238.
- Conley, L. M. 1991. An Assessment of the root zone method of wastewater treatment. *JWPCF.* 63(1):239 - 247.
- Cooper, P., Smith, M., Maynard, H. 1997. The design and performance of a nitrifying vertical-flow reed bed treatment system. *Wat. Sci. Tech.*, 35:207-221.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Cooper, P., Griffin, P., Humphries, S. y Pound, A. 1999. Design of a Hybrid Reed Bed System to Achieve Complete Nitrification and Denitrification of Domestic Wwage. *Wat. Sci Tech.* 40(3): 283 – 289.
- Decamp, O., Warren, A. 2000. Investigation of *Escherichia coli* removal on various designs of subsurface flow wetlands uses for wastewater treatment. *Ecol. Eng.*, 14:293-299.
- Durán-de-Bazúa, C., Luna-Pabello, V.M., Ramírez-Carrillo, H.F. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical. Patente Núm. PA/a/1998/010668. Instituto Mexicano de la Protección Industrial. México D.F. México.
- EPA, 1998. Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. Crites, R; Gunther, D; Kruzic, A. Pelz, J. 45268. EPA/625/1-88/022. U.S. Environmental Protection Agency. Center for Environmental Research Information. Cincinnati, OH, EUA.
- Gersberg, R. M. 1985. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Wat. Res.*, 20:363.
- Gray, S., Kinross, J., Read, P., Marland, A. 2000. The Nutrient Assimilative Capacity of Mearl as a Substrate in Constructed Wetland Systems for Water Treatment. *Wat. Res.*, 34(8):2183–2190.
- Haberl, R. 1997. Constructed wetlands in Europe with emphasis to Austria. En memorias del Tercer Seminario Internacional de Expertos en Tratamiento de Efluentes Industriales y Residuos. México, D. F. México. Pp. 232 – 245.
- Kadlec H. R., Knight, R. L., 1996. Treatment Wetlands. Lewis. P. 893. Boca Raton, Florida. EUA.
- Kayser, K., Kunst, S., Fehr, G., Voermanek, H. 2002. Controlling a Combined Lagoon/ Reed Bed System Using the Oxidation Reduction Potential (ORP). En Memorias de la 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Pub. Universidad de Dar es Salaam Arusha, Tanzania. Pp. 254–265. Arusha, Tanzania.
- Kivaisi, A. 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review. *Ecol. Eng.*, 16:545-560.
- Koppe, P.; Stozek, A. 1986. Kommunales Abwasser. Vulkan Verlag. 178 pags. Essen, Alemania.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Laber, J., Haberl, R., y Shrestha, R. 1999. Two-Stage Constructed Wetland for Treating Hospital Wastewater in Nepal. *Wat. Sci. Tech.*, 40(3):317-324.
- Langergraber, G., Haberl, R., Laber, J. y Pressl, A. 2002. Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands. En *Memorias de la 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Universidad de Dar es Salaam Arusha, Tanzania. Pp. 214-228. Arusha, Tanzania.
- Luna-Pabello, V. M., Durán-de-Bazúa, C., Ramírez-Carrillo, H., Fenoglio-Limón, F. y Sánchez-García H. 1997. Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. *Anuario Latinoamericano de Educación Química*. San Luis, Argentina. Pp 50-56.
- Martínez-Delgadillo, S. 1999. Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. UAM. Sans Serf Editores, S.A de C.V. México, D.F. México.
- Metcalf y Eddy. 1991. *Wastewater Engineering*. McGraw-Hill International Editions. Nueva York, NY, EUA.
- Platzer, C., Mauch, K. 1997. Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters, consequences, and ... solutions? *Wat. Sci. Tech.* 35(5):175-181.
- Platzer, C. 1999. Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. *Wat. Sci. Tech.*, 40(3):257-263.
- Reddy, K.R., D'Angelo, E. M. 1997. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. *Wat Sci Tech.*, 35(5):1-10.
- Rivera, R., Warren, A., Curds, C., Robles, E., Gutiérrez, A., Gallegos, E., Caldeffin, A. 1997. The application of the root zone method for the treatment and reuse of high-strength abattoir waste in Mexico. *Wat. Sci. Tech.*, 35:271-178.
- Shutes, R. B., Revitt, D. M., Mungur, A. S., Scholes, L.N. 1997. The Design of Wetland Systems for the Treatment of Urgan Run Off. *Wat. Sci. Tech.* 35(5):19-25.
- Stein, O., Hook, P., Biederman, J., Allen, W., Borden, D. 2002. Does Batch Operation Enhance Oxidation in Subsurface Constructed Wetlands? En *Memorias de la 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Universidad de Dar es Salaam Arusha, Tanzania. Pp. 177-189. Arusha, Tanzania.
- Stengel, E. 1993. *Species Specific Aeration of Water by Different Vegetation Types in Constructed Wetlands*. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida. EUA.

- Wiessner, A., Kuschik, P., Stottmeister, U. 2001. Investigation into oxygen release by the roots of *Typha latifolia* and *Juncus effesus* in laboratory-scale hydroponic systems. Pub. Departamento de Remediación, Centro de Investigación Ambiental (UFZ), Leipzig-Halle, República Federal de Alemania.
- Wynn ,T., Liehr, S. 2001. Development of a constructed subsurface-flow wetland simulation model. Ecol. Eng., 16:519-536.
- YSI Incorporated. 1999. Environmental Monitoring Systems. Operations Manual. Revision A. Ohio, EUA.
- Yu, R-F., Liaw, S-L., Chang, C-N., Lu, H-J., Cheng, W-Y. 1997. Monitoring and Control Using On-line ORP on the Continuous-flow activated Sludge Batch Reactor System. Wat. Sci. Tech., 35(1):57-66.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN