



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES:
MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO A LA ZONA
RADICULAR, A TRAVÉS DE MEDICIONES DE
POTENCIALES DE ÓXIDO-REDUCCIÓN (pOR)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A :

ANGÉLICA LEÓN MEJÍA



MÉXICO, D.F.

2007.



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 ASIGNADO:

Presidente	Dr. Antonio Valiente Barderas
Vocal	Dra. María del Carmen Durán Domínguez
Secretario	IQ. Rodolfo Torres Barrera
Primer suplente	Ing. Baldomero Pérez Gabriel
Segundo suplente	IQ. Abraham Rodrigo Flores Ramos

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA).
Laboratorio E-303. Facultad de Química. Ciudad Universitaria 04510.
México D.F.

Directora de tesis:

Dra. María del Carmen Durán Domínguez

Sustentante:

Angélica León Mejía

Dedicatorias

A mi abuelito Trifón porque me enseñó a luchar por lo que quiero y a nunca darme por vencida, porque fue la figura paterna a la que admiraba y a uno de los seres que más amo y por que se que en donde quiera que estés al igual que yo estarás feliz porque lo he logrado, algún día nos encontraremos. Siempre estás presente en mi memoria como el más bello recuerdo.

A mi Mamá Carmen Mejía G., porque me enseñó a salir adelante ante las adversidades, a conseguir el éxito, a levantarse después de una caída y a dar siempre la cara a los problemas. Eres la persona a la que más amo y que admiro por ser una mujer emprendedora, entusiasta y por que has cumplido a la perfección con el más difícil de los trabajos, el ser la mejor Mamá del mundo.

A mi hermano Cesar por ser la persona a la que le debo lo que soy y por ser más que un padre para mi, por enseñarme a valorar las cosas, a las personas, los pequeños detalles, los momentos y por recordarme que la meta por alcanzar en la vida, es la felicidad. Eres un ser más maravilloso, no tengo palabras para agradecerte lo que has hecho por mí.

A mi hermana Mariana porque ha sido mi ejemplo de lucha, constancia, carácter, valor y persistencia. Gracias por ser mi confidente, mi guía, mi amiga y la mujer a la que admiro por su carácter y fortaleza, porque con tus consejos he podido superar las adversidades y solo recordar triunfos. Eres una excelente mujer y te admiro por ello.

Doy gracias a Dios por dejarme concluir esta etapa de mi vida con éxito y por darme el privilegio de tener cerca de mí a unos seres maravillosos que llenan mi vida de felicidad.

Agradecimientos

A mis hermanos Cesar, Hugo, Laura, Mauricio, Mariana, Liliana y Miguel porque con cada uno de ustedes he vivido los mejores momentos, inolvidables en mi vida. Gracias hermanos por ser un ejemplo a seguir y enseñarme que el verdadero triunfo esta en obtener la felicidad.

A mis sobrinos Hugo, Paco, Jorge, Cristian, Karen, Ángel, Ari y Martha, porque transfieren toda esa alegría y entusiasmo, y hacen que los momentos en Familia sean mejores.

Gracias Familia porque con ustedes he pasado los momentos más felices de mi vida, los amo.

A mis amigos de la preparatoria: Celia, Luis, David, Gaby, Jessi y Edgar con quienes he pasado las mejores aventuras llenas de alegría, tristeza, enojo, en fin, una serie de eventos que me hacen afirmar que la prepa fue una experiencia inolvidable. Si de algo estoy segura es que nuestra amistad durará para siempre, a pesar de la distancia y las diferencias.

A mis amigos de la universidad: Alma, Ana, Cesar, Iván, Arturo y Paty, porque encontré en ustedes afecto y un apoyo incondicional, y porque he vivido las experiencias más enriquecedoras y agradables en esta etapa de mi vida y las que nos faltan. También a mis compañeros del salón 18 de la generación 2003 por las mejores aventuras en las quemadas de batas.

A la Dra. Carmen Durán por sus enriquecedores comentarios y su apoyo incondicional en el desarrollo del tema de investigación.

A mi jurado, al Dr. Antonio Valiente y al Ing. Rodolfo Torres por el apoyo en la revisión de la tesis y por sus valiosos comentarios.

Al profesor Cuauhtémoc por ser mi amigo y confidente, por los consejos, regaños y por orientarme para que tomará la mejor decisión, estudiar en la UNAM.

A la Dra. María de los Ángeles por los comentarios y consejos que me ayudaron en mi formación académica y sobre todo por su amistad.

A los doctores del PIQAYQA Alejandro, Amalia, Cukys y Salvador por el apoyo brindado para la realización de la investigación. A mis colegas y amigos del PIQAYQA: Omar, Sandra, Sergio, Ivonne, Thalía, Alberto Guido, Juan, Ricardo, Leticia y Benjamín por hacerme agradable la estancia en el laboratorio.

CONTENIDO

	Pág.
Resumen	1
Glosario	3
Capítulo 1 Introducción.....	4
1.1 Problemática.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Alcances.....	6
1.4 Hipótesis.....	6
Capítulo 2 Antecedentes y marco teórico.....	7
2.1 Desarrollo histórico.....	7
2.2 Definición de humedal natural (HN).....	8
2.3 Definición de humedal artificial (HA).....	8
2.4 Componentes de un humedal artificial.....	10
2.4.1 Plantas acuáticas o hidrofitas.....	11
2.4.2 Microorganismos.....	12
2.4.3 Material de empaque.....	13
2.4.4 Hidrología.....	13
2.5 Clasificación de los humedales artificiales.....	14
2.5.1 Humedales artificiales de flujo libre superficial (HAFLS).....	14
2.5.2 Humedales de flujo subsuperficial (HAFSS).....	14
2.5.2.1 Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH).....	14
2.5.2.2 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV).....	15
2.6 Transferencia de oxígeno en los humedales artificiales.....	16
2.7 Potencial de oxidación-reducción.....	18
2.8 Humedales artificiales a escala de laboratorio.....	19
Capítulo 3 Sistema experimental.....	21
3.1 Construcción y arranque del sistema experimental.....	21
3.2 Fase experimental del sistema.....	23
3.3 Mediciones analíticas.....	24
3.4 Medición del potencial óxido-reducción.....	24

	3.5 Calibración de los electrodos de potencial óxido-reducción.....	26
	3.6 Calibración del sistema experimental.....	27
	3.7 Análisis estadístico.....	27
Capítulo 4	Resultados experimentales y discusión.....	28
	4.1 Condiciones experimentales.....	28
	4.2 Valores de potencial óxido-reducción, pOR o Eh.....	28
	4.3 Remoción de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO).....	32
	4.4 Porcentaje de remoción de materia orgánica (promedio) durante la fase experimental.....	33
	4.5 Valores de pH.....	35
	4.6 Valores de temperatura.....	36
	4.7 Comentarios finales.....	37
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones.....	38
	5.1 Conclusiones.....	38
	5.2 Recomendaciones.....	39
Anexo 1	Métodos analíticos.....	41
	A.1.1 Técnica usada para determinar el potencial de óxido- reducción (pOR).....	41
	A.1.2 Técnica usada para determinar el pH y la temperatura.....	42
	A.1.3 Método para determinar de la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales.....	43
	A.1.4 Técnica para obtener la curva de calibración.....	46
	A.1.5 Cálculos para determinar la curva de calibración.....	47
Anexo 2	Manejo, tratamiento y disposición de los residuos generados en esta investigación.....	49
Anexo 3	Preparación del agua residual sintética.....	52
Anexo 4	Datos experimentales.....	54
Anexo 5	Análisis estadístico.....	71
Anexo 6	Acervo fotográfico.....	81
Bibliografía	83

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1	Procesos de depuración en los humedales artificiales	9
Figura 2.2	Ejemplos de hidrofitas emergentes	11
Figura 2.3	Corte longitudinal de un HAFH	15
Figura 2.4	Arreglo típico de un HAFV	16
Figura 2.5	Sistema de un HAFVD a escala de laboratorio utilizado en la investigación	20
Figura 2.6	HAFH a escala real ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán	20
Figura 3.1	Construcción del sistema experimental	22
Figura 3.2	Diagrama esquemático de la metodología	23
Figura 3.3	Diagrama del sistema experimental para la captura de datos de potencial rédox, pOR, en forma automatizada	25
Figura 3.4	Instalación de los electrodos en el sistema experimental	26
Figura 4.1	Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor con hidrofita RA ₁ , durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)	29
Figura 4.2	Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor con hidrofita RB ₁ , durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)	29
Figura 4.3	Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor sin hidrofita RA ₂ , durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)	31
Figura 4.4	Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor sin hidrofita RB ₂ , durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)	31
Figura 4.5	Variación de la DQO en el influente y a la salida de cada reactor	32
Figura 4.6	Gráfica comparativa de los porcentajes de remoción de materia orgánica en los reactores con hidrofita (RA ₁ y RB ₁) y sin hidrofita (RA ₂ y RB ₂)	34
Figura 4.7	Variación de pH en el influente y a la salida de cada reactor	35
Figura 4.8	Variación de la temperatura en el influente y a la salida de cada reactor	36
Figura A.1.1	Diagrama de flujo simplificado para determinar la DQO	45

Figura A.1.2	Curvas de calibración obtenidas en la investigación	48
Figura A.2.1	Diagrama de bloques simplificado del tratamiento de residuos generados en esta investigación	51
Figura A.5.1	Gráfica de medias del potencial rédox a un nivel de confianza del 95%	72
Figura A.5.2	Gráfica de medias del potencial rédox a un nivel de confianza del 99%	73
Figura A.5.3	Gráfica de medias de la DQO a un nivel de confianza del 95%	74
Figura A.5.4	Gráfica de medias de la DQO a un nivel de confianza del 99%	75
Figura A.5.5	Gráfica de medias del porcentaje de remoción de materia orgánica a un nivel de confianza del 95%	77
Figura A.5.6	Gráfica de medias del porcentaje de remoción de materia orgánica a un nivel de confianza del 99%	78
Figura A.5.7	Gráfica de medias del pH a un nivel de confianza del 95%	79
Figura A.5.8	Gráfica de medias de la temperatura a un nivel de confianza del 95%	80
Figura A.6.1	Sistema experimental al inicio de los experimentos, con los brotes de las hidrofitas de menos de 8 cm de altura	81
Figura A.6.2	Sistema experimental en la etapa intermedia de los experimentos, con los brotes de las hidrofitas de menos de 50 cm de altura	81
Figura A.6.3	Sistema experimental en la etapa final de los experimentos, con los brotes de las hidrofitas (RA ₁ : 1.05 m de altura y 5 mm de diámetro; RB ₁ : 0.86 m de altura y 9 mm de diámetro y más follaje que RA ₁)	82

Tabla 3.1	Estratos de material de soporte en las columnas en estudio para mejorar la hidrología	21
Tabla 3.2	Características del agua sintética empleada, C:N:P	23
Tabla 3.3	Valores del E _h de las soluciones estándar a 20°C para electrodos Ag/AgCl-Pt	26
Tabla A.1.1	Preparación de disoluciones para la curva de calibración de la DQO	47
Tabla A.1.2	Valores de absorbancia promedio para obtener la curva de calibración	48
Tabla A.4.1	Valores de E _h (potenciales rédox corregidos, en mV) a las diferentes profundidades en los sistemas con hidrofitas, RA ₁ y RB ₁ en el periodo de iluminación y de oscuridad	54
Tabla A.4.2	Valores de E _h (potenciales rédox corregidos, en mV) a las diferentes profundidades en los sistemas sin hidrofitas, RA ₂ y RB ₂ en el periodo de iluminación y de oscuridad	60

Tabla A.4.3	Valores del potencial óxido-reducción, pOR o E_h , en mV, del sistema experimental y del potenciómetro comercial utilizando una solución estándar pH=4 saturado con quinhidrona, $E_{h-20^\circ\text{C}} = 259.3 \text{ mV}$	67
Tabla A.4.4	Valores de DQO ($\text{mg O}_2/\text{L}$) en el influente y a la salida de cada reactor	68
Tabla A.4.5	Valores de pH en el influente y a la salida de cada reactor	69
Tabla A.4.6	Valores de temperatura ($^\circ\text{C}$) en el influente y a la salida de cada reactor	70
Tabla A.5.1	Tabla ANDEVA del potencial rédox a un nivel de confianza del 95%	71
Tabla A.5.2	Tabla ANDEVA del potencial rédox a un nivel de confianza del 99%	72
Tabla A.5.3	Funciones estadísticas para la serie de valores de pOR, en mV, de los reactores con hidrofitas, RA_1 y RB_1 , a las profundidades de 2, 15 y 30 cm, en el periodo de iluminación y oscuridad	73
Tabla A.5.4	Funciones estadísticas para la serie de valores de pOR, en mV, de los reactores sin hidrofitas, RA_2 y RB_2 , a las profundidades de 2, 15 y 30 cm, en el periodo de iluminación y oscuridad	73
Tabla A.5.5	Tabla ANDEVA de la DQO a un nivel de confianza del 95%	74
Tabla A.5.6	Tabla ANDEVA de la DQO a un nivel de confianza del 99%	75
Tabla A.5.7	Funciones estadísticas para la serie de valores de la DQO en $\text{mg O}_2/\text{L}$	76
Tabla A.5.8	Tabla ANDEVA del porcentaje de remoción materia orgánica a un nivel de confianza del 95%	76
Tabla A.5.9	Tabla ANDEVA del porcentaje de remoción materia orgánica a un nivel de confianza del 99%	77
Tabla A.5.10	Tabla ANDEVA del pH a un nivel de confianza del 95% y 99%	78
Tabla A.5.11	Funciones estadísticas para la serie de valores de pH	79
Tabla A.5.12	Tabla ANDEVA de la temperatura a un nivel de confianza del 95% y 99%	79
Tabla A.5.13	Funciones estadísticas para la serie de valores de temperatura ($^\circ\text{C}$)	80

En México cerca del 80% de agua residual generada por los diversos usos domésticos, agrícolas e industriales se vierte al medio ambiente sin ningún tratamiento previo, lo que ocasiona un problema de contaminación y de salud pública, lo que ha generado la poca disponibilidad de agua no contaminada para las diversas actividades económicas y productivas del país. Los humedales artificiales (HA) o construidos representan una alternativa atractiva al tratamiento de aguas residuales, esto se debe a las ventajas que presenta, entre las principales destacan su bajo costo de operación y mantenimiento, elevados porcentajes de remoción de contaminantes, su vida útil es en promedio de 25 años y emplean fuentes de energía “naturales” (como la gravedad, la energía del sol, etc.). En los HA la eficiencia en las reacciones de transformación bioquímica dependen del “ingreso” de oxígeno por cuatro fuentes: de la atmósfera por difusión a través del lecho; por convección, ya que cuando el agua es alimentada a un HA, ésta succiona un volumen equivalente de aire de la atmósfera; el generado a través de la fotosíntesis de las macrofitas y el que la misma planta transfiere de la atmósfera a través de sus tejidos y, por último, el oxígeno que pudiera venir disuelto en el influente. Sin embargo varios autores señalan que el aporte principal de oxígeno a un HA, proviene del proceso de fotosíntesis. En esta investigación se estudió la transferencia de oxígeno en forma indirecta midiendo potenciales de oxidación-reducción, pOR, a diferentes alturas de un reactor de laboratorio de 35 cm de altura (2cm, 15 cm y 30 cm) desde su superficie hacia el fondo, minimizando en la medida de lo posible el efecto del oxígeno que entra por difusión y/o convección para el estudio a escala de laboratorio del efecto de la oxigenación que pueden proveer las hidrofítas. Se construyeron cuatro reactores empacados con escoria volcánica: El reactor en estudio y su réplica, RA₁, RB₁, así como un control sin hidrofita y su réplica, RA₂ y RB₂. Los electrodos para medir el potencial redox fueron del tipo Demanda química de oxígeno (Cole Parmer), capturando los datos a través de una tarjeta de adquisición de datos computarizada. Los cuatro reactores fueron alimentados en el modo vertical descendente con agua residual sintética (ARS) preparada diariamente con sacarosa, (NH₄)₂SO₄ y Na₃PO₄.12H₂O, disueltos en agua de la llave, dando una relación C:N:P de 15:1:0.04 y una demanda química de oxígeno, DQO, aproximada de 225 mg/L que corresponde a un valor promedio del agua residual doméstica. Los reactores RA₁ y RB₁ tuvieron un brote único de una planta específica (*Phragmites australis*, conocida en México como carrizo), proveniente de un humedal artificial de flujo horizontal ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán. Los reactores se mantuvieron con irradiación artificial constante durante períodos de 16 h de luz (9:00 a 1:00 a.m.) y 8 h de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.) mediante el empleo de 14 lámparas de tubos fluorescentes que emite luz de día y que es la recomendada para el mantenimiento artificial de plantas por tener características similares a la luz natural. El flujo volumétrico de agua residual sintética (ARS) fue de 7 L/día, se obtuvo alimentando con una bomba peristáltica de ocho canales que dio un flujo similar a todos los reactores, manteniendo los sistemas inundados con un sistema de sifón. El tiempo de residencia hidráulica fue calculado tomando en cuenta la porosidad del material (0.51), lo que dio un tiempo de residencia hidráulico de 1.8 días. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: La cantidad de biomasa vegetal generada en los sistemas con hidrofítas, reactores RA₁ y RB₁, de 25.3 g y 10.7 g (base seca), respectivamente. Los valores de los parámetros para el influente (ARS) fueron: DQO de 223±4.2 mg O₂/L, pH de 6.95±0.27 y temperatura de 19.3±1°C. Los reactores que presentaron mayor remoción de materia orgánica medida como la DQO, fueron los reactores con planta, RA₁ y RB₁ (valor de salida de 41±3.5 y 35±3.6 mg O₂/L, respectivamente, 81% y 84% promedio de remoción), lo que indica que la planta tiene un efecto

importante en la remoción de la materia orgánica. Para el reactor control RA₂ y RB₂ (reactores sin planta) tienen una remoción de materia orgánica menor (valores de salida de 81.8±4.6 y 75±4 mg O₂/L, respectivamente, 63% y 66% de remoción), debido a que el único aporte de oxígeno es el que contiene el agua sintética en el influente, al gotear a la entrada del reactor. La tendencia de los valores de pH a la salida de los reactores fueron ligeramente ácidos debido a los fenómenos anaerobios de acidogénesis provocada por la presencia de microorganismos anaerobios (favorecido por las condiciones de inundación de los reactores). Los valores de pH para los reactores con planta (6.19±0.26 para el RA₁ y 6.24±0.17 para el RB₁) son ligeramente mayores (menos ácidos) que en los reactores sin planta (6.19±0.27 para el RA₂ y 6.18±0.25 para el RB₂) esto se debe a que en los reactores sin planta, se tienen condiciones más reductoras ya que en éstas no está presente el oxígeno fotosintético. El perfil de temperatura a la salida de los reactores fueron de RA₁ de 21.7±1.1 °C, RB₁ de 21.6±1.1 °C; RA₂ de 21.6±1.1 °C y RB₂ de 21.5±1.3 °C, mientras que la temperatura del influente disminuye de 19.3±1°C. Los valores del pOR para los reactores con hidrofita RA₁ y RB₁, en la zona radicular (a 15 cm de profundidad) son positivos a diferencia de los obtenidos a 2 y 30 cm, esta variación demuestra que los potenciales se ven afectados de manera indirecta por el oxígeno que la planta aporta por fotosíntesis y por difusión a través de sus tejidos a la zona radicular. En el caso de los reactores sin hidrofita, RA₂ y RB₂, los potenciales de óxido-reducción van haciéndose más negativos a mayor profundidad; sin embargo en la superficie del reactor (2 cm) los valores se ven influenciados por la presencia del oxígeno disuelto en el agua residual sintética y al que se transfiere de la atmósfera. Las condiciones en los reactores sin hidrofita son más reductoras que en los reactores con hidrofita. Asimismo, los datos de pOR para el período sin iluminación cuando no hay fotosíntesis son más negativos, lo que confirma el efecto de la planta en la generación de oxígeno y su transporte a la zona radicular. Además de la parte experimental, se realizó el análisis estadístico para determinar que los factores: reactor (con hidrofita y sin hidrofita), profundidad (2, 15 y 30 cm) y estado lumínico (iluminación y oscuridad) tienen un efecto estadísticamente significativo en el potencial rédox, a un nivel de confianza del 99%. Puede, por tanto, concluirse que la planta de carrizo sí tiene un efecto benéfico en la generación y transporte de oxígeno a la zona radicular, mejorando la eficiencia de depuración.

Palabras clave: Humedales artificiales, transferencia de oxígeno, zona radicular, potenciales de óxido-reducción

Aerénquima	Parénquima, sustancia de los órganos. Tejido vegetal constituido por células de forma aproximadamente esférica o cúbica y con espacios de separación y que sirve para “absorber” el CO ₂ del aire y transformarlo en biomasa celular y oxígeno molecular
Aerobio	Ser vivo que necesita del oxígeno molecular para subsistir
Afluente	Corriente de fluido de un sistema o proceso secundario que desemboca o desagua en otro principal (del latín <i>fluere</i> , fluir y el prefijo <i>a</i> , hacia adentro)
Aguas residuales	Aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas
Anaerobio	Ser vivo que no necesita del oxígeno molecular para subsistir
DQO	Demanda química de oxígeno. Medición indirecta de la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada químicamente por un agente oxidante fuerte
Efluente	Salida de fluido de un sistema o proceso. Descargas contaminantes al ambiente parcial o totalmente tratadas o en su estado natural provenientes de alguna actividad humana (del latín <i>fluere</i> , fluir y el prefijo <i>e</i> , hacia fuera)
Eh	Potencial de oxidación-reducción corregido
$E_{Ag/AgCl-Pt}$	Potencial de óxido-reducción obtenido con el electrodo de Ag/AgCl-Pt
HA	Humedal artificial
HAFH	Humedal artificial de flujo horizontal
HAFV	Humedal artificial de flujo vertical
Influente	Entrada de fluido a un sistema hecho por el hombre (del latín <i>fluere</i> , fluir y el prefijo <i>in</i> , hacia dentro)
Macrófitas	Plantas que crecen en o cerca del agua y que pueden ser emergentes, subemergentes o flotantes
Periodo de estabilización	Se entiende como periodo de estabilización del sistema al tiempo que tarda el soporte, las plantas y los microorganismos en ajustarse a las condiciones hidrológicas
pH	Potencial de hidrógeno
pOR	Potencial de oxidación-reducción (rédox)
Radicular	Perteneiente o relativo a las raíces
RA ₁	Reactor con hidrofita
RA ₂	Reactor sin hidrofita
RB ₁	Reactor con hidrofita
RB ₂	Reactor sin hidrofita
Sistemas convencionales	Técnicas mecánicas, químicas y biológicas de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, lodos activados, biodiscos, etc

Los sistemas de humedales artificiales cuentan con un sistema que separa los contaminantes que pueden afectar la adecuada operación del reactor propiamente dicho. Estos sistemas se conocen genéricamente como sedimentadores primarios. En ellos se separan grasas y aceites y materiales ligeros por la parte superior y por el fondo los materiales más pesados que el agua. A estos residuos se les da el nombre genérico de lodos primarios, por su apariencia y porque son el primer residuo separado en el proceso de tratamiento. Están generalmente contaminados con microorganismos potencialmente patógenos por lo que se consideran como residuos peligrosos y, como tales, deben estabilizarse antes de ser dispuestos al ambiente (Gaitán-Zamora, 2007).

Los materiales disueltos en el agua o presentes en forma coloidal son los que pasan al reactor, donde son eliminados mediante su transformación a gases o a microorganismos, los cuales se van a la atmósfera o son metabolizados por otros organismos, deseablemente hasta formar parte de las hidrofitas que forman parte del reactor, las cuales pueden ser cosechadas y, posteriormente, aprovechadas.

Finalmente, el agua residual tratada pasa por un sistema conocido genéricamente como sistema terciario donde pueden ser desinfectados para garantizar su inocuidad y vertidos al ambiente (Durán-de-Bazúa y col., 1999).

La parte medular es justamente el reactor de hidrofitas, donde se realiza la bioconversión de los materiales disueltos y/o coloidales (difíciles de separar por métodos físicos sin alguna reacción química o bioquímica previa). Es en este reactor donde deben seguirse las reacciones que ocurren con objeto de que, con modificaciones sencillas en las condiciones de operación, puedan reducirse sus dimensiones para hacerlos económicamente más viables, sobre todo para zonas suburbanas y urbanas (Guido-Zárata, 2006). El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente, establecidos en las normas.

Dado que las reacciones bioquímicas aerobias son mucho más eficientes que las anaerobias para transformar estos contaminantes disueltos y coloidales a biogases y organismos, se busca que las condiciones sean aerobias, ya sea a través del “ingreso” de oxígeno atmosférico al sistema por difusión molecular a través de la superficie del reactor o por su entrada a través de los aerénquimas de las hidrofitas hasta su zona radicular, que permiten el intercambio de gases en la planta entre el aire y el agua, especialmente CO_2 y O_2 (Guido-Zárata y col, 2006).

Por ello, se plantea el estudio a escala de laboratorio del efecto de la oxigenación que pueden proveer las hidrofitas, minimizando en la medida de lo posible el efecto del oxígeno que entra por difusión y/o convección.

1.1 Problemática

A nivel mundial la preocupación por los problemas de contaminación del agua se dio con mayor ahínco a partir de la década de los setenta del siglo XX en Europa y países como Estados Unidos de América, Canadá, Gran Bretaña y Japón, en donde la urbanización y la industrialización creciente se vieron acompañadas de graves problemas de contaminación del agua (Durán-de-Bazúa, 1994).

En la actualidad, en México cerca del 80% del agua residual generada por diversos usos domésticos, agrícolas e industriales se vierte al medio ambiente sin ningún tratamiento previo (SEMARNAT, 2006) lo que ocasiona un grave problema de contaminación y salud pública, lo que ha generado la poca disponibilidad de agua no contaminada para las diversas actividades económicas y productivas del país (Guido-Zárate, 2006).

Los HA representan, desde el punto de vista económico y técnico, una opción viable para ser utilizados como sistemas de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales y suburbanas, donde la instalación de una planta de tratamiento convencional implicaría la erogación de importantes sumas de dinero (Dahab y Surampalli, 2000; Shutes, 2001). Asimismo, este tipo de ecotecnología puede emplearse como un sistema complementario en aquellas plantas de tratamiento ya existentes en operación (Shutes, 2001), a fin de mejorar la calidad de agua obtenida, pudiendo usarse para riego o bien para el empleo en la líneas de producción de una industria, o simplemente descargarse con menor cantidad de contaminantes para cumplir con los límites máximos permisibles que establecen las normas.

En cuanto a comunidades pequeñas o rurales, los HA pueden implementarse para el tratamiento de las aguas residuales y que, después de ser tratadas, puedan utilizarse para riego, además de que son estéticamente agradables a la vista.

Un problema asociado con estos sistemas es la necesidad de grandes extensiones de terreno, lo que aumentaría su costo en áreas urbanizadas donde el precio por metro cuadrado es mucho más alto que en las zonas rurales o suburbanas. Por ello, es importante estudiar los parámetros de operación de estos reactores con objeto de buscar la reducción de las áreas necesarias para su adecuada operación.

1.2 Objetivos

- ✓ Estudiar la transferencia de oxígeno en forma indirecta midiendo potenciales de oxidación-reducción, genéricamente conocidos como potenciales rédox (pOR) a diferentes alturas del reactor desde su superficie hacia el fondo.
- ✓ Verificar la tasa de depuración del agua residual sintética (ARS) en un sistema con hidrofita y uno sin ella.

1.3 Alcances

- Caracterizar el sistema en estudio (estimar el volumen teórico de trabajo del reactor, eficiencia de depuración del sistema) se considerará solamente el volumen del agua residual sintética alimentada por unidad de tiempo que pasa a través del sistema por día.
- Caracterizar el agua residual sintética (ARS) tomando como parámetro el contenido inicial y final de DQO total, como parámetro de medición del contenido de sustancias biodegradables, las temperaturas y valores de pH que se tienen en el efluente.
- Evaluar la cinética de conversión de los contaminantes artificialmente adicionados al agua de la llave (agua residual sintética).

1.4 Hipótesis

En un humedal artificial de flujo vertical descendente (HAFVD) inundado y que opera a flujo continuo, el mayor aporte de oxígeno es el que la planta genera fotosintéticamente; por tanto se espera que en la zona radicular del humedal la concentración de oxígeno sea mayor y por ende, los valores de potencial óxido-reducción (pOR) sean positivos o menos negativos que en el resto del humedal.

La implementación e instalación de los humedales artificiales en México son escasos, aunque existen varios sistemas, algunos de estos son instalados para la depuración de aguas residuales domésticas (Miranda-Ríos, 2000). Sin embargo, es conveniente que se continúe con estas investigaciones en México ya que el clima cálido o templado de muchas de las regiones del país es una ventaja para el óptimo funcionamiento de un humedal artificial (Dahab y Surampalli, 2000).

Los humedales artificiales o construidos han representado, una alternativa viable al problema de contaminación. Las principales ventajas de los humedales artificiales, con respecto a sistemas convencionales, es el bajo costo de operación y mantenimiento, su vida útil que es en promedio de 25 años, altos porcentajes de remoción de contaminantes y de microorganismos patógenos, así como requerimientos mínimos de personal capacitado. Además, los humedales artificiales son sistemas que operan con requerimiento energéticos mínimos dado que la conducción del agua a tratar se busca que se realice prácticamente por gravedad, la cual se induce por diferencias en las pendientes por donde fluye el agua (Reed y col., 1995).

Es importante señalar que una de las principales diferencias entre las ecotecnologías y los sistemas convencionales es la fuente de energía utilizada. Aunque las ecotecnologías requieren de la misma cantidad de energía, por cada kilogramo de contaminante a remover, que los sistemas convencionales, las ecotecnologías emplean fundamentalmente fuentes de energía “naturales” (como la gravedad, la energía del sol, etc.), mientras que los sistemas convencionales utilizan generalmente fuentes de energía no renovables (corriente eléctrica, principalmente). Asimismo, las ecotecnologías se distinguen por hacer uso intensivo del terreno, mientras que los sistemas convencionales lo hacen por su uso intensivo de la energía (Miranda-Ríos, 2000).

2.1 Desarrollo histórico

El uso de los humedales artificiales, HA, para el mejoramiento de la calidad del agua no es una invención reciente. El término “humedal artificial” es reciente, si bien el concepto es muy viejo. Las culturas china y egipcia utilizaban los humedales para el tratamiento de aguas residuales. Además se cree que los aztecas también hacían uso de esta ecotecnología debido a lo límpido de las aguas de los lagos, a pesar de la enorme población que vivía en sus riberas (Durán-de-Bazúa, 2004).

Uno de los documentos más antiguos que hace referencia a un humedal artificial fue en 1904, en el cual se describe ya una técnica para construir un humedal con la finalidad de remover contaminantes del agua residual. Más tarde, en la década de los 50 del siglo XX, la doctora Kate Seidel, del instituto Max Planck observó que las espadañas (*Schoenoplectus lacustris*) tenían la capacidad de remover una gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas de aguas contaminadas. Posteriormente se pudo

demostrar, a través de experimentos varios, que las espadañas y otras plantas acuáticas tienen la capacidad de eliminar metales pesados e hidrocarburos tales como el fenol y sus derivados de las aguas residuales (Brix, 1994).

Los humedales han tenido un amplio desarrollo en Alemania y en los países del Oeste de Europa. Comenzaron a construirse a principios de la década de los 70 del siglo XX muchos sistemas basados en estos principios, con tal éxito que pronto se expandieron para tratar las aguas residuales de poblaciones de hasta 20 000 habitantes (Reed, y col; 1995). Entre 1984 y 1993 se construyeron en Europa más de 600 humedales artificiales (Cooper, 1993).

A mediados de la década de los 90, del siglo XX, se terminó en Ciudad Universitaria, en la Universidad Nacional Autónoma de México, la construcción de un sistema experimental de flujo vertical descendente con las dimensiones de una planta piloto, con capacidad de tratar cerca de 6 m³/día de aguas domésticas (Fenoglio-Limón, 2000). Además de este sistema, la UNAM participó en la construcción del sistema de flujo horizontal en el Vivero Forestal de Coyoacán alimentado con aguas residuales de tipo mixto del Río Magdalena, a un flujo de 10 m³/día y con 75 m² de área superficial (García-Arreola, 2006). Se tomaron experiencias de los estudios realizados en éstos sistemas para la construcción de los humedales artificiales a escala de laboratorio utilizados en esta investigación.

2.2 Definición de humedal natural (HN)

Se puede conceptualizar a un humedal natural a toda aquella área que se encuentra inundada por agua dulce o salada, temporal o permanente y que presentan una vegetación típica adaptada para vivir en condiciones de suelo saturado. Son sistemas de transición entre zonas terrestres y acuáticas. Dentro de los humedales naturales se encuentran los pantanos, marismas, ciénegas, esteros, manglares, etc (Huanosta-Gutiérrez, 2006).

2.3 Definición de humedal artificial (HA)

De acuerdo a los principios de ingeniería de los humedales artificiales, un humedal artificial, HA, es un reactor empacado en el que las reacciones de transformación de los contaminantes biodegradables disueltos en el agua ocurren en la superficie del empaque. Los catalizadores de las reacciones son los microorganismos que proliferan sobre la superficie del empaque que usan estos contaminantes como “alimento” y fuente de energía. Sobre el material de empaque se forman biopelículas, estas biopelículas pueden estar formadas por organismos anaerobios, facultativos y aerobios dependiendo de la cantidad de oxígeno que puede estar presente en el reactor (Durán-de-Bazúa, 2006)

Desde el punto de vista de la Ecología, un humedal artificial, HA, es un sistema de tratamiento de aguas residuales donde un material de soporte (grava, arena o escoria volcánica), plantas (plantas vasculares acuáticas) y microorganismos (bacterias,

hongos y protozoarios, principalmente), separados del entorno circundante (suelos adyacentes) mediante una membrana impermeable, interactúan entre sí para remover los contaminantes del agua residual mejorando su calidad. Esto se logra mediante complejos procesos, físicos, químicos y biológicos (**Figura 2.1**).

I. Procesos físicos

Estos procesos tienen lugar dentro de los humedales para mejorar la calidad del agua entre los cuales se encuentran: la sedimentación, la filtración, la adsorción y la volatilización. Dichos procesos ayudan a la remoción de sólidos sedimentables y coloides principalmente, en menor grado, ayudan a la remoción de nitrógeno, fósforo, metales, materia orgánica y organismos patógenos.

II. Procesos químicos

Dentro de los humedales también se llevan a cabo diferentes procesos químicos como la precipitación, adsorción y descomposición o alteración de compuestos menos estables por medio de fenómenos como la irradiación de luz UV y reacciones de óxido-reducción. A través de estos procesos se pueden remover en mayor grado contaminantes como el fósforo, metales pesados y algunos compuestos orgánicos.

III. Procesos biológicos

En este tipo de sistemas, los procesos biológicos son de gran importancia para la remoción de contaminantes presentes en el agua, entre los procesos principales se encuentran el metabolismo microbiano y de las plantas, así como, la adsorción de nutrientes por parte de las plantas y el exterminio o muerte natural. Todos estos procesos van a ayudar a disminuir las concentraciones de los sólidos coloidales, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y organismos patógenos.

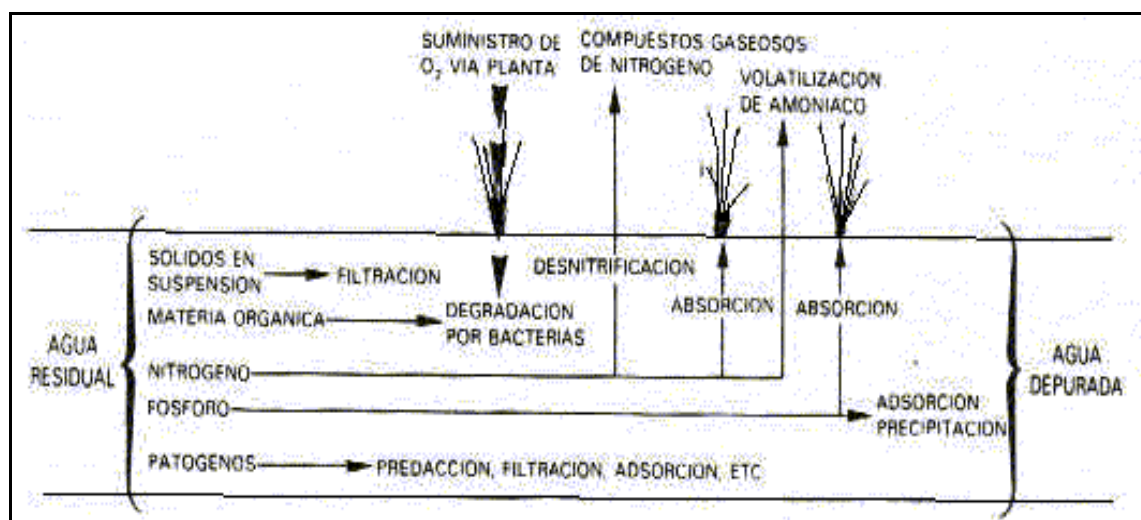


Figura 2.1 Procesos de depuración en los humedales artificiales

Un humedal artificial es una construcción que simula las condiciones de un humedal natural, con la diferencia que en los humedales artificiales se controla la capacidad de agua a tratar, el régimen de flujo y el nivel de inundación, que define la hidrodinámica con el propósito de tener una alta eficiencia de depuración del agua tratada obtenida (Durán-de-Bazúa y col., 1999).

Los humedales artificiales son una alternativa para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales, tales como: aguas pluviales, municipales, efluentes de tratamientos secundarios, de actividades agrícolas, de procesos industriales, de la industria alimentaria, de reservas ecológicas, de ríos y lagos, de descargas acuícolas, de la industria agropecuaria, de descargas sanitarias, centros comerciales, hospitales, etc. Sin embargo estos sistemas se utilizan principalmente para la depuración de aguas que contienen contaminantes de tipo doméstico aunque también, pueden ser utilizados para la depuración de aguas residuales que contienen metales pesados e incluso hidrocarburos (Guzmán-Aguirre, 2004).

Dentro de los principales contaminantes del agua se encuentran (Durán-de-Bazúa 1994):

- ✓ Compuestos orgánicos biodegradables
- ✓ Compuestos químicos inorgánicos
- ✓ Metales
- ✓ Sólidos sedimentables
- ✓ Nutrientes en exceso (N y P)
- ✓ Organismos patógenos
- ✓ Calor y otras formas de energía

La calidad del agua esta determinada por la cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en ella. Dependiendo de su origen, existen normas que estipulan para cada una de estas sustancias un valor máximo permitido. Estas normas proporcionan la información necesaria que permite mantener un control de la calidad del agua. Dependiendo de las características específicas del agua residual se establece un criterio del tipo de tratamiento viable para reducir los contaminantes presentes en ella y volverá a dar un uso al valioso recurso.

2.4 Componentes de un humedal artificial

Un humedal artificial está compuesto por el agua a tratar, un “sustrato” o material de soporte inerte (teóricamente no participa en las reacciones químicas o bioquímicas), plantas vasculares acuáticas y los residuos que ellas generan, invertebrados (larvas y lombrices) y una gran variedad de microorganismos (en su mayoría bacterias).

Otro componente importante de un humedal artificial es la capa impermeable que evita que el agua contaminada se lixivie o difunda hacia el subsuelo y las aguas subterráneas, quedando aislado de los alrededores. El humedal sólo cumple con la función de tratar el agua, quedando así aislado para evitar contaminar.

A continuación se detallan los efectos de cada uno de los componentes en un humedal:

2.4.1 Plantas acuáticas o hidrofitas

Las funciones más importantes de las plantas para el tratamiento de aguas residuales en un humedal son los efectos físicos y químicos que originan dichas plantas (Brix, 1994 y 1997).

Los principales beneficios de las plantas en los humedales son los siguientes:

- Estabilizan el material de empaque, proporcionan un excelente medio para la filtración e impiden que el material de empaque se azolve.
- Los tallos, las hojas y, principalmente, las raíces de las plantas, aportan oxígeno al humedal por fotosíntesis. Las raíces aportan oxígeno a través de sus rizomas a la zona radicular promoviendo el desarrollo de microorganismos en ella que degradan la materia orgánica presente en el agua residual.
- Proveen de una gran área superficial para la adhesión de los microorganismos (Hiley, 1995).
- Incorporan los nutrientes como C, N y P y elementos traza que vienen con el agua residual a sus tejidos y que son importantes para su crecimiento, "limpiándola".
- Debido al movimiento mecánico de las raíces, éstas crean rutas hidráulicas que permiten la transferencia de oxígeno de la atmósfera hacia el empaque y la biopelícula que prolifera sobre él.

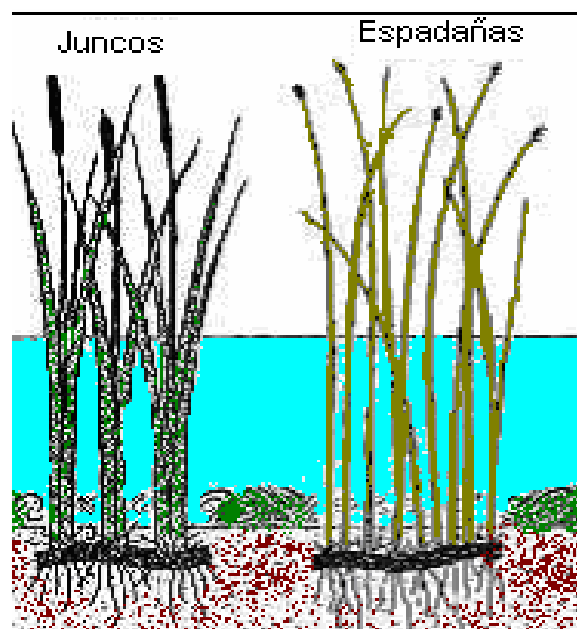


Figura 2.2 Ejemplos de hidrofitas emergentes

- Otro beneficio de las plantas es que cuando mueren, sirven como fuente de nutrientes para los microorganismos saprofitos y forman una biopelícula fija que contribuye también a la degradación de los contaminantes del agua residual.
- La densidad de las plantas en un humedal permite la sedimentación de los sólidos suspendidos debido a las bajas velocidades que se presentan.
- Las plantas además de suministrar oxígeno y tomar nutrientes del agua residual, segregan compuestos antibióticos que resultan letales para los microorganismos patógenos.
- Ciertos tipos de plantas, como el tule o espadaña (*Typha spp*) y el carrizo (*Phragmites spp*), entre otras plantas acuáticas, pueden ser utilizados para la fabricación de productos artesanales y en la construcción (**Figura 2.2**).
- En climas fríos, las plantas protegen la superficie del HA de la nieve o heladas en zonas de gran altitud (Brix, 1997).

Adicionalmente a estas ventajas, las plantas de un humedal pueden servir como hábitat para especies de aves, insectos, reptiles y algunos mamíferos.

La elección de la planta va a depender, en última instancia, de su ubicuidad en la zona donde se desee construir el humedal artificial.

2.4.2 Microorganismos

Los microorganismos presentes en un humedal incluyen a bacterias, hongos, protozoos, etc.

Los microorganismos en los humedales:

- Alteran las condiciones del potencial de óxido-reducción al ser los responsables de llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción (Borrero-Lara, 1999).
- Son responsables de llevar a cabo la degradación biológica de la materia orgánica (microorganismos presentes en el material de soporte).
- Consumen el C, N y P disueltos en el agua y parte de estos nutrientes se integran al tejido celular produciendo nuevos organismos y la otra parte se “mineraliza” o transforma.
- Comúnmente la mayoría de los microorganismos involucrados en estos sistemas de tratamiento son de tipo facultativo, es decir que presentan actividad metabólica tanto en ambientes aerobios como anaerobios.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como plaguicidas y metales pesados y por tanto se debe tener cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales (Guzmán-Aguirre, 2004).

2.4.3 Material de empaque

El material de empaque en un humedal construido puede ser arena, grava, roca, escoria volcánica o incluso el propio suelo del sitio donde se instala.

Este material es importante porque:

- Sirve como soporte, tanto para los microorganismos como para las plantas vasculares.
- Muchas de las transformaciones bioquímicas ocurren dentro de los poros del material usado.
- Además de ser un material de empaque, sirve como filtro para muchos de los sólidos suspendidos en el agua residual.

Dependiendo del tipo de material que se utilice puede modificar el movimiento del agua (hidráulica del sistema) y, consecuentemente, el tiempo de residencia hidráulica.

Una de las novedades en el uso de material de soporte o empaque para los humedales artificiales en general es el uso de material de desecho; por ejemplo, escorias de metal pueden utilizar para mejorar la remoción de fósforo (Reyes-Luz, 2006). El material de empaque en los humedales artificiales debe permitir un flujo uniforme y no contener sustancias tóxicas que limiten o supriman el crecimiento de las plantas y de los microorganismos.

2.4.4 Hidrología

Pequeños cambios en la hidrología puede tener efectos importantes en el humedal y en la efectividad del tratamiento (Guzmán-Aguirre, 2004). El flujo de agua y la capacidad de almacenamiento van a determinar el tiempo de residencia del agua en el humedal, dando oportunidad para que las sustancias presentes en el agua interactúen con la biota presente en el humedal.

La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, creando rutas hidráulicas que permiten que todo el humedal se encuentre irrigado.

La profundidad del agua y la frecuencia del flujo o su periodicidad son importantes en la determinación de las especies de las plantas apropiadas para la construcción del sistema. La profundidad del agua causa diferencias en el crecimiento de las raíces de las plantas en un humedal, restringiéndose el oxígeno en las zonas de sustrato, también puede limitar la penetración de la luz y la actividad fotosintética del fitoplancton en humedales de superficie (Torres-Esquivel, 2005). Finalmente, la granulometría del material inerte de soporte es fundamental para garantizar el adecuado flujo del agua residual evitando zonas no irrigadas (Durán-de-Bazúa y Luna-Pabello, 1998).

2.5 Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales se pueden clasificar de varias maneras, atendiendo al estado en el que se encuentra el agua dentro del sistema. Una clasificación general puede ser la siguiente:

2.5.1 Humedales artificiales de flujo libre superficial (HAFLS)

En este tipo de sistemas, el agua siempre se mantiene por arriba del material de soporte (Padrón-López, 2005). Estos sistemas pueden tener plantas que flotan libremente en el agua con muy pocas raíces y los sistemas donde las plantas se encuentran sobre el nivel del agua flotando y sus raíces se extienden a pocos centímetros del agua o muy adentro sin adherirse al material de empaque. Por último, otro sistema que cae dentro de esta clasificación consiste de plantas de hojas flotantes y raíces adheridas al material de soporte y este tipo de sistemas difiere del anterior en que las hojas de las plantas flotan en la superficie del agua pero sus raíces se encuentran adheridas al material de soporte.

2.5.2 Humedales de flujo subsuperficial (HAFSS)

En este tipo de sistemas, el nivel del agua permanece pocos centímetros (2-5 cm) por debajo del nivel del material de soporte (Cooper, 1993). Los materiales que comúnmente se utilizan como material de soporte en estos sistemas son la grava y arena, aunque hay otros materiales que han sido utilizados para el mismo propósito, como la escoria volcánica (conocida en México como tezontle) o el mismo suelo presente en la zona donde se instala dependiendo de las características hidráulicas y del contenido de materia orgánica (ya que no es deseable que haya nutrientes en el soporte para que los microorganismos y las hidrofitas utilicen los contaminantes del agua solamente). Una de las ventajas de este tipo de sistemas es que al estar el agua por debajo del material de soporte, se evita la proliferación de mosquitos y la propagación de los malos olores provenientes de la descomposición anaerobia del sistema.

Dentro de esta clasificación se pueden encontrar dos variantes en la configuración del sistema, atendiendo a la forma en la que el agua es alimentada al sistema como se mencionó anteriormente. Los dos sistemas de flujo subsuperficial que se emplean actualmente son: de flujo vertical y de flujo horizontal.

2.5.2.1 Humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH)

En esta variante de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, el agua es alimentada por un extremo del sistema de tal manera que ésta fluye a través del humedal en forma horizontal. La transferencia de oxígeno es menor en este tipo de sistemas ya que no existe una succión considerable al momento que el agua se desplaza como sucede en los sistemas de flujo vertical. La degradación de los contaminantes se lleva a cabo a medida que el agua esta en contacto con la rizosfera

siguiendo la línea horizontal. El flujo de agua se logra mediante la pendiente que se le da al sistema de tal manera que la gravedad es la fuerza que permite que el agua fluya a través de todo el sistema sin necesidad del uso de bombas, reduciéndose considerablemente los costos de operación por concepto de energía eléctrica.

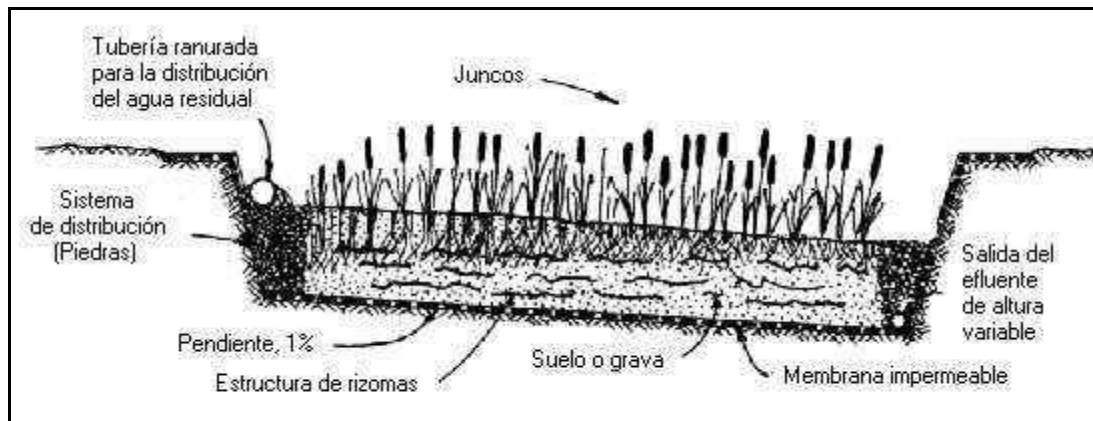


Figura 2.3 Corte longitudinal de un HAFH

Los materiales de empaque comúnmente utilizados en estos sistemas son la grava, el tezontle, etc., que permiten que el flujo del agua sea uniforme previniendo rutas preferenciales en el sistema. El diámetro de este material está comúnmente dentro del intervalo de 3-6 mm o de 5-10 mm (Cooper, 1993).

2.5.2.2 Humedales artificiales de flujo vertical (HAFV)

En este tipo de sistemas el agua es alimentada de manera uniforme y distribuida a lo largo y ancho de la superficie del humedal. Esto se logra mediante el empleo de una red de tuberías perforadas (generalmente de PVC). Se colocan redes unos cuantos centímetros por debajo de la superficie del humedal de tal manera que el agua que cae por ellas se distribuya uniformemente a través de todo el humedal, evitando los flujos preferenciales y zonas muertas dentro del sistema. La transferencia de oxígeno en estos sistemas es mucho mejor que en los sistemas de flujo horizontal ya que cuando el sistema es operado intermitentemente, permite que el flujo de agua succione un volumen equivalente de aire que posteriormente se disuelve en el agua dentro del humedal y es utilizada por los microorganismos aerobios para su respiración mejorando considerablemente la degradación de la materia orgánica y previniendo las condiciones sépticas del sistema (Fenoglio-Limón, 2003).

La plantación de un humedal construido en general puede ser utilizando los rizomas de la planta extraídos de un humedal existente o de los sitios donde éstas proliferan, extrayendo terrones de las plantas que se van a colocar dentro del sistema o utilizando plantas cultivadas en invernaderos. El utilizar plantas cultivadas en invernadero es la que ha dado más resultados ya que estas tienden a reproducirse rápidamente y a ocupar la mayor parte del humedal. La época del año que se recomienda para tal proceso es el mes de mayo ya que en esta época, las condiciones de humedad son

favorables para el crecimiento de las plantas. Estos sistemas pueden funcionar de manera con periodos de 1-2 días de alimentación y de 4-8 días sin alimentar, se ha demostrado que algunos sistemas operando de esta manera han dando excelentes resultados en la remoción de materia orgánica (Guido-Zárate, 2006).

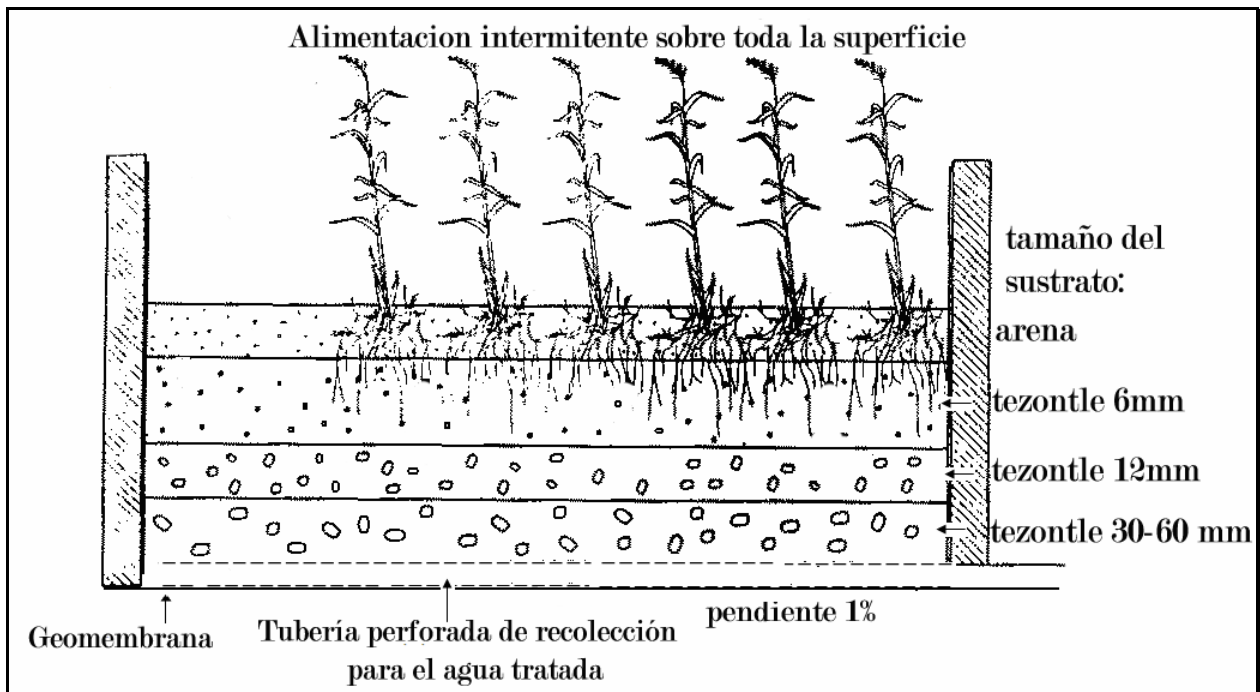


Figura 2.4 Arreglo típico de un HAFV

La principal ventaja radica en que durante el periodo donde el sistema permanece sin alimentar, el oxígeno se difunde hacia las raíces de las plantas y este es aprovechado por los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica y del nitrógeno amoniacal.

2.6 Transferencia de oxígeno en los humedales artificiales

En los humedales artificiales, la transferencia de oxígeno es esencial para que se lleve a cabo la degradación de la materia orgánica y para que se lleven a cabo los procesos de nitrificación del $N-NH_3$. El oxígeno es utilizado por los microorganismos aerobios para su respiración y este elemento también se combina químicamente con las especies reducidas presentes en el agua residual. Se recomienda que el suministro de oxígeno esté dado en función de la carga orgánica del influente y el aportado por la planta a través de sus espacios gaseosos (Guido-Zarate, 2006).

En un humedal el oxígeno transferido proviene de varias fuentes: de la atmósfera por difusión a través del lecho; por convección, ya que cuando el agua es alimentada a un HA, ésta succiona un volumen equivalente de aire de la atmósfera; el generado a

través de la fotosíntesis de las macrofitas y el que la misma planta transfiere de la atmósfera a través de sus tejidos y, por último, el oxígeno que pudiera venir disuelto en el influente.

Varios autores señalan que el aporte principal de oxígeno a un humedal construido, proviene del proceso de fotosíntesis (Durán-de-Bazúa y col., 2004). La cantidad de oxígeno que se libera a través de las plantas depende de la demanda de este elemento en el medio, de la permeabilidad de las raíces y de la capacidad que tenga cada planta de generar este elemento a través de la fotosíntesis.

Las plantas que proliferan en los humedales están morfológicamente adaptadas para vivir en ambientes saturados o completamente inundados con agua en virtud de los espacios aéreos que permiten el transporte de O_2 a las raíces y rizomas. El oxígeno que es transportado por las plantas ya sea generado fotosintéticamente o por difusión a través de sus tejidos, no sólo sirve para la respiración de los tejidos de las mismas sino que también sirven para oxigenar la rizosfera en un humedal. Este oxígeno entra a través de la planta (por los espacios gaseosos) y escapa por las raíces difundándose en la zona radicular del humedal dependiendo de los gradientes de concentración de estos elementos. El oxígeno que escapa de las plantas a través de las raíces, crea condiciones oxidantes que estimula la degradación aerobia de la materia orgánica y permite el crecimiento de bacterias nitrificantes (Brix, 1994).

Existe relativamente poca bibliografía enfocada a determinar los mecanismos de transferencia de oxígeno y su influencia en los potenciales óxido-reducción, aún cuando el transporte de oxígeno en los HA es esencial para el correcto y óptimo funcionamiento de los mismos.

En los humedales, las plantas han demostrado tener un papel muy importante en el aporte de oxígeno, sobre todo en la zona radicular (Guido-Zárte, 2006; Soto-Esquivel, 2003). El crecimiento de las raíces de estas plantas brinda "rutas" en su aerénquima por donde el oxígeno atmosférico puede entrar al humedal contribuyendo así a la degradación de la materia orgánica. El oxígeno disuelto disminuye rápidamente en suelos inundados con agua debido al metabolismo de los microorganismos que consumen materia orgánica en él y por la oxidación de sustancias reducidas (IWA, 2001).

Durante el día, las plantas llevan a cabo la fotosíntesis, aportando gran cantidad de oxígeno hacia la rizosfera del HA. Este oxígeno se difunde a través de las hojas, tallos y rizomas de las plantas promoviendo el desarrollo de los microorganismos aerobios y, con esto, los procesos de degradación de la materia orgánica se ven favorecidos. La variación de la luz durante los periodos de día y noche determina en gran medida los mecanismos de transporte de los gases como la velocidad de flujo de O_2 de las raíces, el flujo de CO_2 y CH_4 de las raíces a la atmósfera y finalmente la cantidad de oxígeno liberado y los gradientes rédox dentro de la zona radicular. Esta variación de las condiciones rédox y su importancia en los procesos de remoción en la zona radicular, es aún desconocido (Guido-Zárte, 2006).

Dentro de un humedal artificial, las áreas próximas a las raíces de las plantas son aerobias, mientras que en la zona inundada, se tiene condiciones conocidas como anóxicas o anaerobias. En las zonas microaerobias (zona radicular y cercana a la superficie en contacto con el aire atmosférico) se lleva a cabo la oxidación de la materia orgánica. Y a medida que la profundidad aumenta, la disponibilidad de oxígeno disminuye hasta llegar a condiciones totalmente anaerobias, donde solamente comunidades microbianas anaerobias llevan a cabo las reacciones de descomposición.

Por la noche, en las zonas aerobias del humedal, los microorganismos aerobios estrictos comienzan a morir por deficiencia de oxígeno debido a que el proceso de la fotosíntesis se detiene casi por completo y, por lo tanto, los microorganismos anaerobios y/o facultativos comienzan a depredar a los aerobios que ha muerto y con eso completamente sus requerimientos de carbono y energía, de la misma manera, los microorganismos facultativos al verse carentes de oxígeno como aceptor de electrones, toman este elemento de compuestos como $\text{SO}_4^{=}$ produciendo H_2S y acidificando al medio. Este hecho hace que los HA se comporten como reactores secuenciales (aerobios por el día y anaerobios por la noche).

2.7 Potencial de oxidación-reducción

El potencial de oxidación-reducción o de óxido-reducción o rédox es una medida de la actividad de los electrones en un medio. Éste está relacionado con el oxígeno aunque no es el único elemento que contribuye a la variación de este parámetro. Es importante resaltar que los potenciales no miden concentraciones de O_2 sino la actividad de los electrones pero, de manera indirecta, este parámetro está relacionado con la concentración de este elemento.

Se ha demostrado recientemente, que el potencial rédox es un excelente indicador del estado de los HA pues, al ser una medición de la actividad de las sustancias oxidadas o reducidas en un sistema, ofrece la posibilidad para el control y la operación de estos sistemas (Fenoglio-Limón, 2003). Además de que ofrece las siguientes ventajas: la técnica de potencial rédox se realiza en poco tiempo, puede llevarse a cabo en campo, el costo de la técnica es bajo, se utiliza en cualquier tipo de agua residual, no sufre interferencias por compuestos inorgánicos, no emplea reactivos que produzcan daños al ambiente y seres vivos y no genera residuos peligrosos.

El estudio de los potenciales rédox es complejo ya que este parámetro al verse modificado por el aporte de oxígeno de las plantas hacia la rizosfera, este dependerá del estado fisiológico de las mismas y de las características del influente utilizado, así como de las especies de microorganismos y de las propias hidrofitas utilizadas. Plantas de diferentes especies pueden presentar patrones en el potencial rédox muy diferentes e incluso individuos de una misma especie pueden también tener variaciones importantes en el comportamiento del potencial rédox (Rodríguez-Monroy, 2004).

La medida del potencia óxido-reducción en aguas naturales, residuales y en los sistemas de tratamiento de agua la han considerado ciertos investigadores como un

parámetro para determinar el estado del agua (es decir, si se trata de un medio aerobio o anaerobio) o del grado de tratamiento esto es, refiriéndose al grado de oxidación biológica de la materia orgánica en las aguas residuales. Estos valores de potencial rédox de aguas naturales y aguas residuales son difíciles de interpretar. A pesar de ciertas limitaciones, la medida del potencial rédox se ha empleado ampliamente en los sistemas biológicos, en donde se considera como medidas ideales de uso cualitativo (Bernal-González y Martínez-González, 1995).

El estudio de potencial rédox en los HA, permite identificar zonas de mayor actividad microbiológica, zonas muertas o de corto circuito. El control de estas áreas de actividad aerobia, anóxica y anaerobia permite aumentar la eficiencia global de remoción de contaminantes con la ayuda de procesos mecánicos que permiten la difusión y transferencia de oxígeno en el sistema. La medición del potencial óxido-reducción también puede ser utilizada como 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.

Es posible estudiar el carácter oxidante y reductor de un sistema tomando como parámetro de control al Eh o pOR y se puede decir indirectamente que a mayor concentración de O₂, mayor es el potencial de óxido-reducción o dicho de otra manera, un potencial más negativo indica que las condiciones del medio son más reductoras y un potencial menos negativo indica que el medio es menos reductor (Bernal-González y Martínez-González, 1995). Algunos microorganismos sólo pueden estar en ambientes oxidados y otros solamente en ambientes reducidos. Los microorganismos aerobios estrictos son metabolíticamente activos a potenciales rédox positivos, mientras que los anaerobios estrictos sólo son metabólicamente activos a potenciales rédox negativos.

2.8 Humedales artificiales a escala de laboratorio

El estudio de humedales artificiales, a escala de laboratorio es una técnica que permite simular las condiciones que se pueden presentar en un humedal a escala real (**Figuras 2.3 y 2.4**), por lo cual se hace necesaria la utilización de diferentes variables de proceso y variables de medición para el estudio de los niveles de remoción de los contaminantes del sistema, mediante variables tales como: pH, temperatura, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO), fósforo (P), nitrógeno amoniacal (N), entre otros. Este tipo de estudios sirve de referencia para la optimización de la operación de un humedal real.

Aunque un HA a escala de laboratorio, permite de cierta manera el control y el estudio de las variables que se presentan en los humedales, no se puede decir que lo que se observa en el laboratorio sucederá en un humedal a escala real, ya que su operación eficiente en la naturaleza depende de muchos factores y las variables que los afectan también son muchas. Por ello, entre más controladas se tengan las variables de operación para las que fue construido un HA, serán más eficientes en la remoción de contaminantes. Dependiendo de lo que se quiera estudiar en los HA a escala de laboratorio, los resultados permitirán inferir cómo será el comportamiento del humedal a

escala real y, con la información obtenida, ayudar en el diseño de un humedal construido (Esponda-Aguilar, 2001).

Los principales criterios de diseño para un HA a escala real, son el tiempo de residencia hidráulica (TRH), la capacidad de carga orgánica, el área superficial requerida y la profundidad del agua en el sistema. Otras consideraciones de diseño son la relación longitud-ancho, consideraciones térmicas y tipo de vegetación (Guido-Zárate, 2006).



Figura 2.5 Sistema de un HAFVD a escala de laboratorio utilizado en la investigación

El estudio de un HA a escala de laboratorio, es una técnica que permite simular las condiciones en un HA a escala real

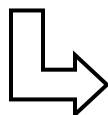


Figura 2.6 HAFH a escala real ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán

El sistema experimental se instaló en el Laboratorio 303 del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental (PIQAYQA), en el Conjunto E de la Facultad de Química, UNAM, México D.F.

Los factores que se mantuvieron constantes fueron:

Flujo de alimentación: 7L/día (la alimentación se hizo por goteo mediante una bomba peristáltica)

Carga orgánica del ARS, medida como demanda química de oxígeno (DQO): 223.8 ± 4.2 mg O₂/L (Davis y Cornwell, 1998)

3.1 Construcción y arranque del sistema experimental

El sistema experimental se montó en un laboratorio donde la temperatura se mantuvo relativamente constante, 22 ± 2 °C. El sistema constó de cuatro reactores de 30 cm de diámetro y 35 cm de altura empacados con escoria volcánica (tezontle) previamente lavada y esterilizada a 121 °C por 30 min (Guido-Zárate, 2006), con un tamaño de partícula específico que permite un adecuado flujo del agua residual. Su granulometría está distribuida como se muestra en la **Tabla 3.1**. El sistema opera a flujo vertical descendente (HAFVD), este diseño se caracteriza porque los reactores son alimentados por la parte superior, fluyendo el agua residual hacia las capas inferiores donde el agua tratada es colectada.

Tabla 3.1 Estratos de material de soporte en las columnas de estudio para mejorar la hidrología (Fenoglio-Limón, 2000, 2003)

Diámetro granular (mm)	Grosor del estrato (cm)	Altura relativa a la parte inferior de la columna (mm)
4-8	20	110
0.5-4	60	90
4-8	10	30
12-16	20	20

El sistema experimental está compuesto por los reactores RA₁ (reactor con planta) y RA₂ (reactor sin planta) y sus duplicados o réplicas (RB₁, con planta y RB₂, sin planta). Los reactores réplica son los también llamados “reactores control” que sirven como punto de comparación para conocer el comportamiento que tiene el reactor con planta y sin planta sobre la remoción de nutrientes contenidos en el ARS. Estos reactores se alimentan con agua residual sintética (ARS), con un flujo de alimentación continua de 7 litros por día manteniendo condiciones de inundación (un centímetro debajo de la superficie) con objeto de no favorecer la solubilización del oxígeno molecular y poder así observar el efecto del oxígeno fotosintético generado por las plantas.

Cada reactor tiene tres llaves de paso para la toma de muestras, un sistema tipo sifón para mantener el nivel de inundación un centímetro abajo del nivel superior y tubos de PVC colocados a 2, 15 y 30 cm de profundidad con respecto de la parte superior del reactor. En el fondo del cilindro se instaló un tubo de PVC con perforaciones que conducen el efluente acuoso al exterior del reactor (**Figura 3.1**).

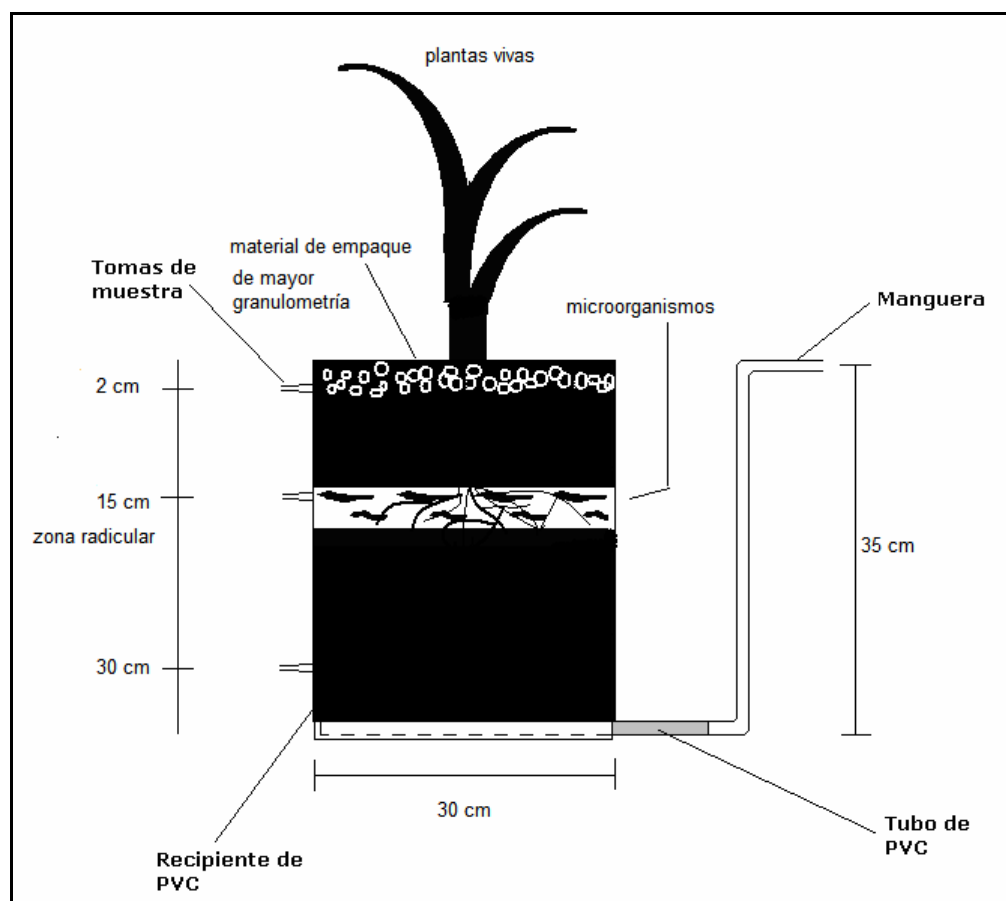


Figura 3.1 Construcción del sistema experimental

Los reactores se mantuvieron con irradiación artificial constante durante períodos de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad (9:00 a 1:00 a.m.) y (1:00 a 9:00 a.m.) mediante el empleo de lámparas de tubos fluorescentes de 30 W cada una (14 tubos), que emiten luz de día, que es la recomendada para el mantenimiento artificial de plantas por tener características similares a la luz natural.

Las plantas que fueron utilizadas (carrizos) se extrajeron de una misma planta madre y con un solo brote del mismo tamaño que fue tomado del humedal de flujo horizontal ubicado en los Viveros de Coyoacán de la Ciudad de México. El brote de carrizo utilizado fue de 1.5 cm de altura y se plantó a 10 cm de profundidad en el reactor RA₁ y otro similar en el RB₁.

Para operar al sistema, se arrancó alimentando a los cuatro reactores con agua de la llave durante los primeros 20 días, en el caso de los reactores con planta (RA₁ y RB₁) los brotes sembrados se empezaron a adaptar.

3.2 Fase experimental del sistema

Durante 21 días se alimentaron a los cuatro reactores con la mitad de la concentración del agua residual sintética para adaptar a los brotes paulatinamente a las condiciones experimentales, en éste tiempo de estabilización, se realizaron varios experimentos midiendo la DQO del efluente que sirvió como criterio de estabilización. La DQO es un parámetro en la calidad del agua a nivel internacional (aún cuando en la normatividad de México es la DBO) y posee un periodo de estabilización corto. Se consideró la variación de la DQO a la salida de cada reactor de $\pm 10\%$ (Soto-Esquivel, 2003).

Una vez que el sistema se estabilizó se inició la fase experimental, se preparaba el agua residual sintética disolviendo 9 g de sacarosa, 1.2 g de (NH₄)₂SO₄ y 0.12 g de Na₃PO₄·12H₂O, dando una relación C:N:P de 15:1:0.04 en peso en 40 L de agua de la llave, el agua residual se preparaba diariamente para evitar variaciones en las características de la misma durante su almacenamiento. La composición del agua residual sintética se presenta en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Características del agua sintética empleada, C:N:P

Sustancia	Elemento	Cantidad, g	Concentración, mg/L
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	C	9	94.74
(NH ₄) ₂ SO ₄	N	1.2	6.36
Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	P	0.12	0.24

Para la preparación del agua sintética, se utilizó un recipiente de 60 litros donde se almacenaba el agua residual sintética y mediante una bomba peristáltica de ocho canales fueron alimentados los reactores por medio de goteo continuo.

En la **Figura 3.2** se muestra la metodología que se utilizó en la investigación.

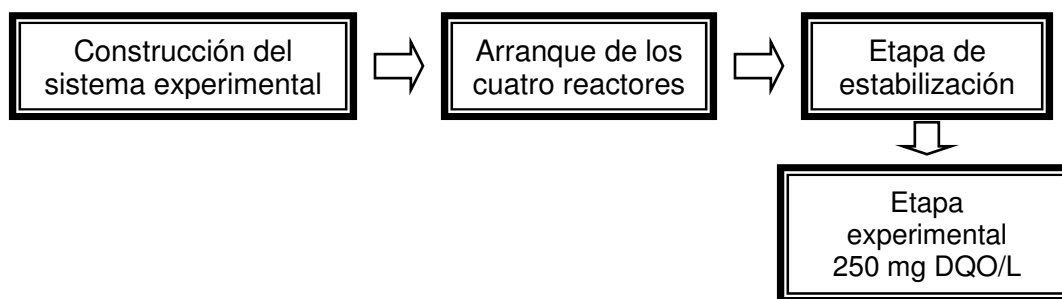


Figura 3.2 Diagrama esquemático de la metodología

3.3 Mediciones analíticas

Durante la fase experimental se realizaron tres mediciones por triplicado a la semana, de las siguientes variables: DQO, pH, temperatura, en el influente y efluente de los reactores siguiendo las normas oficiales mexicanas y el texto de Métodos Normalizados (APHA, 1992). Las mediciones automatizadas de potenciales de óxido-reducción (en el periodo de iluminación y oscuridad) se tienen programadas cada 10 min durante todo el tiempo que duró la fase experimental (tres meses). El crecimiento de las plantas se puede interpretar por la cantidad de biomasa vegetal generada en los sistemas con hidrofitas que se cuantificó durante la etapa experimental.

Las técnicas analíticas empleadas para la determinación de los diferentes parámetros, son:

Medición de DQO (demanda química de oxígeno). Se utilizó el método de reflujo cerrado/método espectrofotométrico que fue obtenido de la norma mexicana **NMX-AA-030-SCFI-2001**, la cual se muestra de forma detallada en el **Anexo 1**. Las medidas de absorbancia fueron tomadas con un espectrofotómetro Spectronic 21D, de acuerdo con el instructivo del fabricante.

Medición de pH. Se realizaron mediciones por triplicado tres días a la semana. Se utilizó un potenciómetro Corning MO-04 comercial, de acuerdo con las instrucciones del fabricante, para la medición del pH. Antes de tomar las mediciones, el potenciómetro se calibra con una solución estándar de pH 4.

Medición de temperatura. Se utilizó un potenciómetro Corning MO-04 comercial, de acuerdo con las condiciones del fabricante (el mismo que se utilizó para la medición del pH).

Cantidad de biomasa generada en los sistemas con hidrofitas, reactores RA₁ y RB₁. Para la medición de biomasa vegetal se utilizó una balanza analítica Bal-01.

3.4 Medición del potencial de óxido-reducción

Para la medición del potencial de óxido-reducción se utilizaron electrodos comerciales de Ag/AgCl-Pt. Se colocaron a diferentes profundidades (2, 15 y 30 cm), con respecto de la parte superior de los reactores y se tomaron mediciones cada 10 minutos con un sistema de adquisición de datos. Estos datos fueron almacenados en una computadora por una tarjeta de adquisición de datos diseñada por la empresa SEV S.A. de C.V. (Sistemas y Equipos de Vidrio, Puebla, México), la cual permitió capturar estos datos y alimentarlos a un procesador para su análisis (**Figura 3.3**). La calibración y prueba de la tarjeta y electrodos fue realizada de acuerdo con la metodología establecida por Guido-Zárte (2006).

El software permitió la captura de potencial de óxido-reducción para cada electrodo en mV durante las 24 horas del día. De esta manera fue posible registrar el

comportamiento del reactor en función de la difusión de oxígeno, medida indirectamente a través de los pOR o E_h .

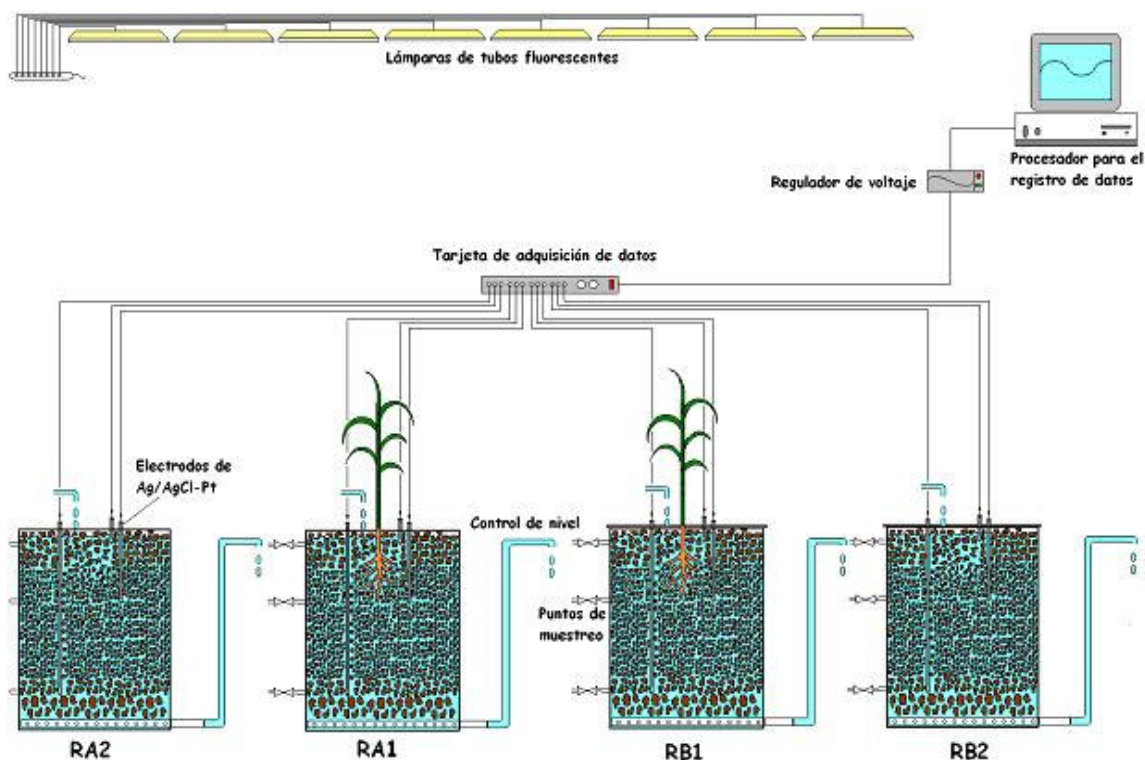


Figura 3.3 Diagrama del sistema experimental para la captura de datos de potencial redox, pOR, en forma automatizada (Guido-Zárate, 2006)

Los valores de potencial óxido-reducción obtenidos con el electrodo indicador de Ag/AgCl-Pt fueron corregidos sumando +209 mV, que es el valor de potencial del electrodo de Ag/AgCl 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 hidrogeno recibe el valor de cero por convección, lo que significa que el potencial medido con este electrodo debe ser referido al potencial normal de hidrogeno.

Para obtener los valores de E_h se empleó la siguiente ecuación:

$$E_h = E_{Ag/AgCl-Pt} + 209 \text{ mV} \quad (3-1)$$

donde:

E_h = potencial de óxido-reducción corregido en mV

$E_{Ag/AgCl-Pt}$ = potencial de óxido-reducción obtenido con el electrodo Ag/AgCl-Pt en mV

Algunos electrodos adquieren un valor de potencial constante, cualquiera que sea la composición de la disolución, por lo que son empleados como electrodos de

comparación o referencia. Mientras que un electrodo indicador, es aquel que por el valor de potencial alcanzado, da la información sobre la concentración o la naturaleza de las sustancias susceptibles de cambiar los electrones.

Los electrodos de platino son electrodos inatacables, es decir no participa en la reacción química en las condiciones de medida, su misión es únicamente ceder o aceptar electrones.

Cuando se sumerge un electrodo en agua por mucho tiempo, la lectura del voltaje varía con el tiempo, casi siempre descendiendo del valor original. Este comportamiento se debe al proceso general de “envenenamiento” de la superficie del electrodo indicador por la acumulación de productos sobre él, por ello es importante calibrarlos al menos una vez por semana, como se describe a continuación.

3.5 Calibración de los electrodos de potencial óxido-reducción



Figura 3.4 Instalación de los electrodos en el sistema experimental

Los electrodos utilizados se calibraron utilizando un potenciómetro comercial y utilizando soluciones estándar de pH 4 y 7 saturados con quinhidrona (5 mg de quinhidrona en 50 mL de solución estándar). Los potenciales redox de estas dos soluciones se muestran en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3 Valores del E_h de las soluciones estándar a 20 °C para electrodos Ag/AgCl-Pt

pH	E_h (potencial óxido-reducción en mV)
3.99	259.3
7.02	83.5

Los valores medidos pueden tener variaciones en un intervalo de unos milivoltios debido a la calidad de la quinhidrona, así como con la temperatura a la que se realiza la medición, por lo que los valores a 23 °C, que fue la temperatura promedio durante todo el experimento, deben ser ligeramente menores.

3.6 Calibración del sistema experimental

Una vez calibrados los electrodos, se procedió a calibrar el sistema experimental (tarjeta de adquisición de datos y software). Esto se realizó colocando los doce electrodos utilizados y midiendo el potencial rédox de las soluciones estándar. En el **Anexo 1** se muestra los valores del potencial rédox obtenidos mediante el sistema experimental y los obtenidos con el potenciómetro comercial.

3.7 Análisis estadístico

A los datos experimentales obtenidos (valores de pOR, DQO, pH y temperatura) se les realizó un análisis de varianza (ANDEVA) a un 95 y 99% de confianza, con el paquete de computación Statgraphics Plus para corroborar su confiabilidad, exactitud y precisión. Además, se calcularon funciones con la ayuda de Excel como promedio, desviación estándar, el máximo y el mínimo valor de la serie de datos, con la finalidad de realizar un mejor análisis estadístico.

4.1 Condiciones experimentales

El flujo de alimentación fue de 7 L/día (se alimentó por goteo mediante una bomba peristáltica). El tiempo de residencia hidráulica (TRH) fue calculado de manera teórica considerando el volumen total de cada reactor y la porosidad del material de empaque (0.51), despreciando el volumen ocupado por las raíces de las plantas (para los reactores que las tenían), electrodos y tuberías, fue de 1.8 días.

$$\text{Volumen del reactor teórico} = \pi * r^2 * h = \pi * (0.3 \text{ m} / 2)^2 * 0.35 \text{ m} = 0.0247 \text{ m}^3 = 24.7 \text{ L}$$

Las variables de medición del influente (ARS) fueron: temperatura de 19.3 ± 1 °C, pH de 6.95 ± 0.27 y DQO promedio de 223.8 ± 4.2 mg O₂/L.

La cantidad de biomasa vegetal generada en los sistemas con hidrofitas fue, para el reactor RA₁ de 25.3 g y para el reactor RB₁ de 10.7 g en base seca. A las hojas de la planta se les cortaba de la parte superior, de manera que no rebasaran la altura de las lámparas; ya que si lo hacían las hojas se deterioraban e impedían el crecimiento.

A continuación se presentan los resultados y la pertinente discusión para los parámetros evaluados, pOR a las diferentes alturas del reactor (2, 15 y 30 cm), DQO, pH y temperatura.

4.2 Valores de potencial rédox, pOR o Eh

Los valores obtenidos del pOR o Eh en los cuatro reactores fueron negativos a las profundidades de 2 y 30 cm. A la profundidad de 15 cm los valores siguen siendo negativos en los reactores sin hidrofita, mientras que a esta misma profundidad los valores del pOR son positivos en los reactores con hidrofita (zona radicular del reactor). Esto se debe a las condiciones oxidantes que se tienen. De acuerdo con los valores positivos de Eh obtenidos, se presume que la masa radicular de un solo brote en los reactores con hidrofita es suficiente para que la planta aporte el oxígeno (medido directamente con los pOR, potenciales óxido-reducción) necesario para oxigenar esa zona del reactor.

En las **Figuras 4.1 y 4.2** se pueden observar las variaciones de los potenciales de óxido-reducción para los reactores RA₁ y RB₁ (reactores con planta y en condiciones de inundación) durante los periodos de iluminación y de oscuridad a las diferentes profundidades de los reactores (2, 15 y 30 cm). En la **Figura 4.1** se muestra el comportamiento oscilante de este parámetro a los 15 cm de profundidad, que corresponde a la zona radicular del reactor. Esta variación demuestra que los potenciales se ven afectados de manera indirecta por el oxígeno que la planta aporta a la zona radicular por vía fotosintética, esto se debe a que la planta durante el día es

generadora “neta” de oxígeno y esto hace que los potenciales se incrementan durante el periodo de iluminación (comenzando de 9:00 a 1:00 a.m.).

Es importante recordar que la planta no solamente aporta oxígeno a la zona radicular por vía fotosintética sino también por difusión del mismo elemento a través de los espacios porosos de las plantas y que es conducido hacia la rizosfera por los espacios gaseosos que se tienen o aerénquimas (IWA, 2001).

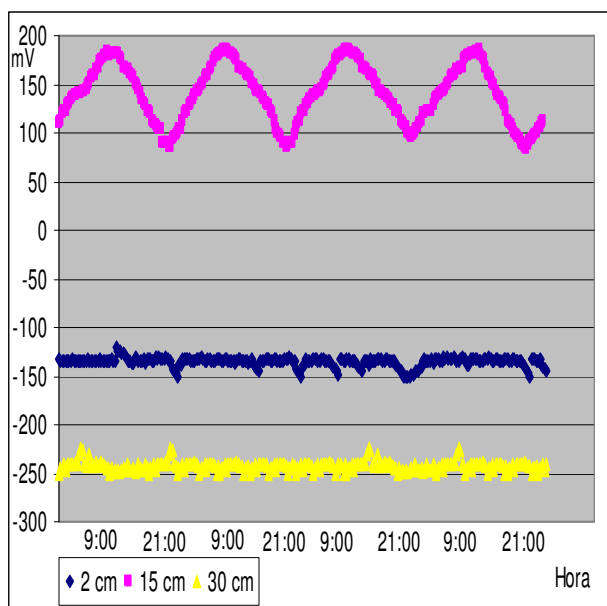


Figura 4.1 Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor con hidrofita RA₁, durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)

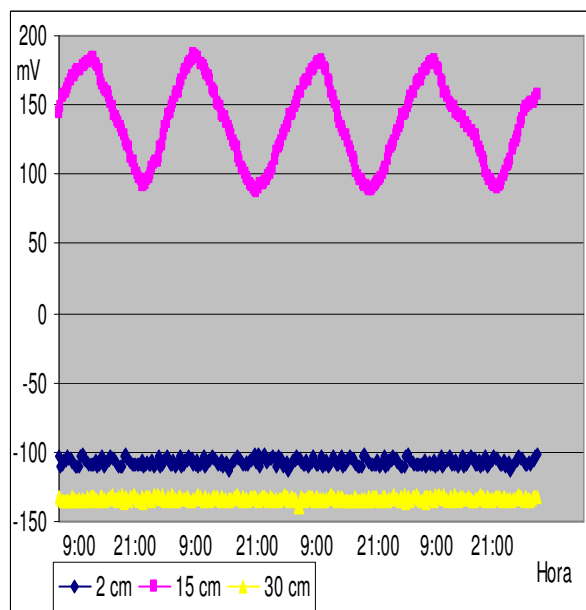


Figura 4.2 Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor con hidrofita RB₁, durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)

Como se muestra en las **Figuras 4.1 y 4.2** los valores del Eh en los reactores con hidrofita, RA₁ y RB₁, disminuyeron durante el periodo de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.). Esto se debe a que las plantas dejan de aportar oxígeno suficiente y, por el contrario, comienzan a respirar como cualquier ser aerobio en la oscuridad lo que provoca que los potenciales disminuyan. En el periodo de oscuridad los microorganismos facultativos no pueden utilizar oxígeno como aceptor final de electrones y toman este elemento de los iones libres como SO_4^- produciendo H_2S que hace que los potenciales rédox disminuyan (valores más negativos).

También se observa que los valores en los potenciales de óxido-reducción son más positivos en el reactor RB₁ (con hidrofita e inundado) durante los periodos de iluminación y de oscuridad a la profundidad de 15 cm, en comparación con el reactor RA₁ (con hidrofita e inundado) lo que implica que las condiciones del medio en esta zona son más oxidantes. Sin embargo, estos valores también permiten determinar que

la hidrofita del reactor RB₁ aporta mayor cantidad de oxígeno a la zona radicular por vía fotosintética en comparación con la hidrofita del reactor RA₁ y esto hace que los potenciales se incrementen durante el periodo de iluminación.

Los valores de potencial rédox en los reactores con hidrofita son negativos (a 2 cm de profundidad) y no homogéneos, lo que hace suponer que esta variación se debe al oxígeno que se difunde de la atmósfera y el que se encuentra disuelto en el influente. Mientras que los valores del pOR a 30 cm siguen siendo negativos y homogéneos, lo que indica las condiciones reductoras del medio y por ende, la presencia de microorganismos anaerobios que se encargan de la degradación de contaminantes disueltos en el agua residual sintética. La diferencia entre ambos reactores se podría deber a las dimensiones de la hidrofita.

En el **Anexo 6** se muestran fotografías de los reactores en donde se aprecian las diferencias de las dos hidrofitas. Aunque originalmente eran del mismo tamaño y tienen, teóricamente, el mismo origen genético y las mismas condiciones, con el paso del tiempo una de ellas se ha desarrollado ligeramente más que la otra (5 versus 9 mm de diámetro del tallo, aún cuando la altura es ligeramente mayor en la planta del RA₁ con respecto al RB₁, 1.05 versus 0.86 m, respectivamente), lo que hace que las características de Eh de ambos reactores sean ligeramente diferentes, especialmente en el fondo del reactor.

Algunos autores señalan que la difusión del oxígeno de la atmósfera por los tejidos de las plantas es por los mecanismos de difusión molecular (Guido-Zarate, 2006) que como su nombre lo indica es el movimiento molecular del oxígeno a través de los tejidos de las plantas siguiendo las concentraciones de este elemento y por convección que se presenta cuando el aire entra como tal hacia la planta y se difunde hacia la zona radicular, es posible que estos dos mecanismos hayan contribuido a la difusión del oxígeno y, por ende, a las variaciones del potencial rédox en la zona radicular. Sin embargo, el mayor aporte de oxígeno es el que la planta genera por vía fotosíntesis, como lo demuestran estos experimentos. Por tanto, la planta tiene un efecto benéfico en la generación y transporte de oxígeno a la zona radicular, mejorando la eficiencia de depuración.

Como se observa en los resultados, el potencial está muy influenciado por la presencia o ausencia de oxígeno molecular y de acuerdo a la discusión de resultados se afirma que un potencial negativo significa que el medio es reductor y, por ende, la concentración de oxígeno es baja. Un potencial positivo significa que el medio es oxidante y por tanto la concentración de oxígeno es alta.

En los reactores sin hidrofita RA₂ y su réplica RB₂, los potenciales de óxido-reducción son todos negativos a las diferentes profundidades, lo que indica las condiciones reductoras que hay en estas zonas. Los potenciales en la zona superficial (a 2 cm de profundidad) tienen valores menos negativos debido a que existe la presencia del oxígeno que el ARS absorbe al alimentarse y al oxígeno que se transfiere de la atmósfera. A la profundidad de 15 cm los potenciales son más negativos, lo que indica

de manera indirecta (con los potenciales rédox), que la concentración de oxígeno en la zona donde está el electrodo es menor. El mismo comportamiento se presenta a la profundidad de 30 cm, donde las concentraciones son más reductoras (potenciales más negativos) e indican que la concentración de oxígeno es aún menor, **figuras 4.3 y 4.4**.

En los reactores control sin planta, RA₂ y RB₂, se observa un comportamiento homogéneo. Se puede afirmar, de acuerdo con los resultados obtenidos, que los potenciales rédox van haciéndose más negativos a mayor profundidad.

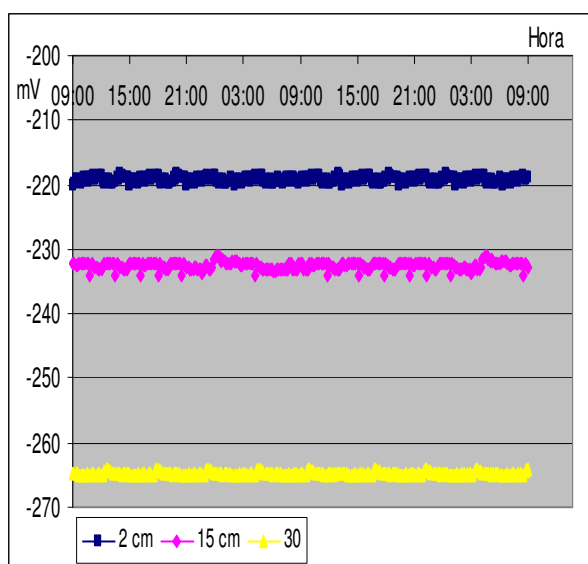


Figura 4.3 Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor sin hidrofita RA₂, durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)

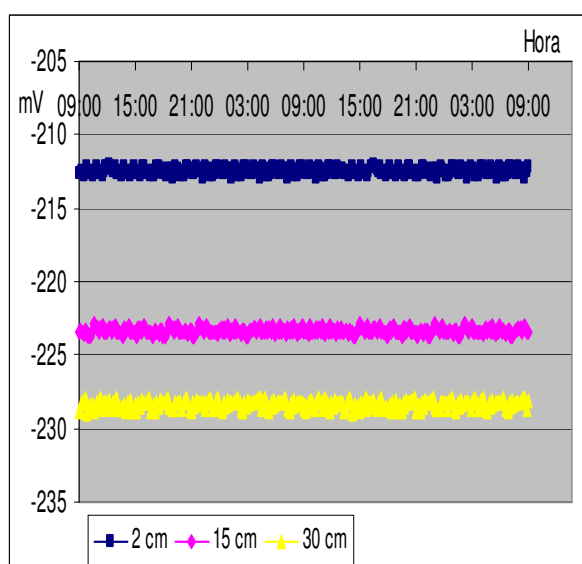


Figura 4.4 Variación del pOR a las diferentes alturas en que fueron colocados los electrodos (2, 15 y 30 cm) en el reactor sin hidrofita RB₂, durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.) y de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.)

La pequeña variación en los reactores sin hidrofita de los valores del pOR en los periodos de iluminación y de oscuridad, se debe a que no existe ninguna planta que pueda modificar las condiciones de óxido-reducción dentro del reactor.

La discusión también se sustenta con el análisis estadístico realizado, en donde se determinó que los factores: reactor (con planta y sin planta), profundidad (2, 15 y 40 cm) y estado lumínico (iluminación y oscuridad) tienen un efecto estadísticamente significativo en la variable de respuesta, potencial rédox, a un nivel de confianza del 99% (**Anexo 5**).

4.3 Remoción de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO)

La **Figura 4.5** presenta la variación de la DQO a la entrada y salida de cada reactor. Como se observa, hay una disminución en los valores de la DQO en todos los reactores; sin embargo, en los reactores con planta es mayor esta remoción. La remoción es realizada por medio de los microorganismos que proliferan como una biopelícula sobre el medio de soporte y sobre las raíces de las hidrofítas. Hay diferencia estadísticamente significativa entre los valores de la DQO promedio en los reactores con hidrofita y en los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 95%.

Los reactores que presentan mayor remoción son el RA₁ y RB₁ (reactores con planta, valor de salida de 41±3.5 y 35±3.6 mg O₂/L, respectivamente), lo que indica que la planta tiene un efecto importante en la remoción de la materia orgánica. Este efecto se debe a que la zona radicular sirve como soporte para las bacterias microbianas (Brix, 1997) que toman el oxígeno que éstas aportan acelerando la degradación. El reactor control RA₂ y RB₂ (sin planta) tienen una remoción de materia orgánica menor (valores de salida de 81.8±4.6 y 75±4 mg O₂/L, respectivamente).

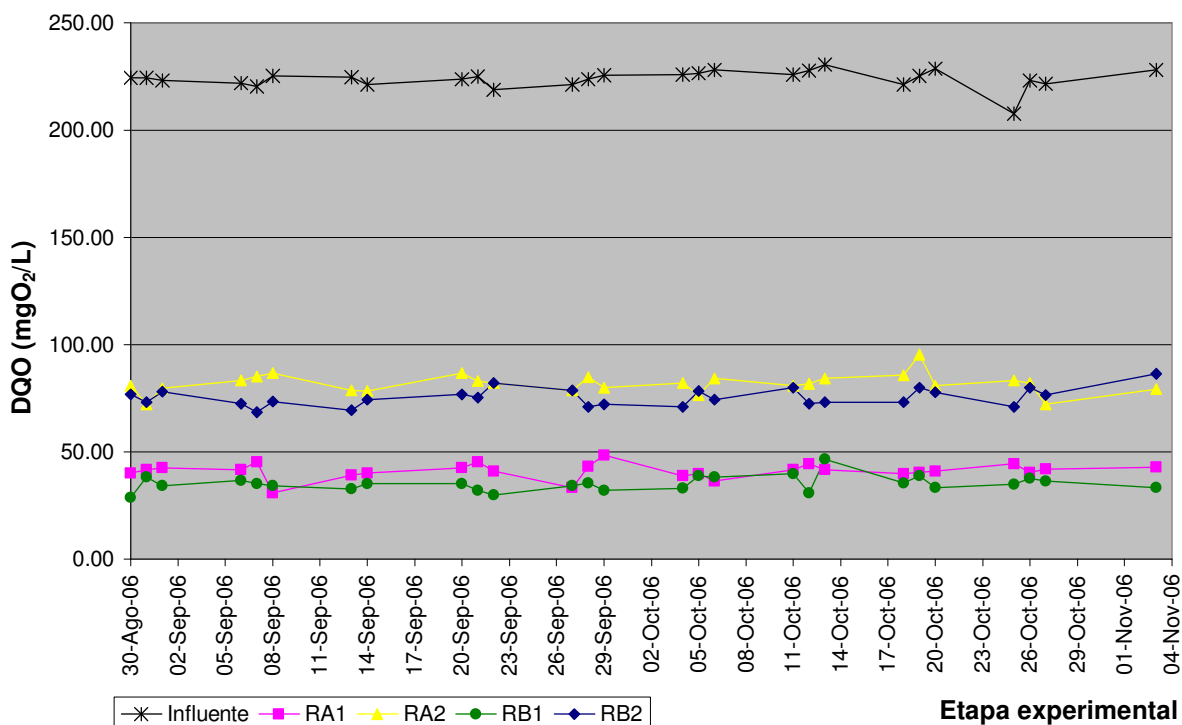


Figura 4.5 Variación de la DQO en el influente y a la salida de cada reactor

En los reactores RA₂ y RB₂ (reactores sin plantas) la remoción fue menor, en comparación con los reactores con planta, debido a que el único aporte de oxígeno es el que contiene el agua sintética en el influente, al gotear a la entrada del reactor. En este caso, los microorganismos adheridos al material de empaque que forman una

biopelícula, responsable de la mayor parte de la degradación de la materia biodegradable presentarían condiciones anaerobias.

Es la relación simbiótica que se establece entre ellas y los microorganismos lo que hace más eficiente un sistema con hidrofitas que uno sin ellas (Guido-Zárata, 2006). Como son generadoras “netas” de oxígeno durante la fotosíntesis, incrementan la degradación de materia orgánica y, por ello, en el caso de los reactores sin planta (RA₂ y RB₂), hay una remoción de la DQO ligeramente menor.

Hay que recordar que la raíz de la planta en el reactor, produce oxígeno y nutrientes que favorecen el desarrollo poblacional de los microorganismos (como se observa en los valores del pOR, **Anexo 4**) y estos durante su proliferación, consumen la materia orgánica del medio para suplir sus necesidades metabólicas disminuyendo la materia orgánica disuelta detectada como DQO y generan CO₂ que asimila planta. La respuesta en la remoción de contaminantes por parte del humedal con planta puede aumentar conforme la densidad poblacional de organismos aumente. Por otro lado, en los reactores sin hidrofita se tienen microorganismos anaerobios adheridos al material de empaque encargados de transformar los nutrientes (C, N, P) disueltos en el agua residual en CH₄ y CO₂.

4.4 Porcentaje de remoción de materia orgánica (promedio) durante la fase experimental

Los porcentajes de remoción se calcularon con los promedios de DQO, en mg O₂/L reportados en el **Anexo 4**, obtenidos en la fase experimental para cada uno de los cuatro reactores que conforman al sistema, RA₁ (reactor con planta) y RA₂ (reactor sin planta) y sus réplicas (RB₁, con planta y RB₂, sin planta). Para determinar la remoción de materia orgánica en forma porcentual, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Remoción} = \frac{(\text{DQO del influente} - \text{DQO del efluente})}{\text{DQO del influente}} \times 100 \quad (4-1)$$

La mayor remoción de materia orgánica, medida como DQO, se da en los reactores con hidrofita dando porcentajes de 81% para el reactor RA₁ y de 84% para el reactor RB₁, **Figura 4.6**. Para los reactores sin planta, la eficiencia de remoción de materia orgánica es menor, con un porcentaje de 63% para el reactor RA₂ y 66% para el reactor RB₂.

De acuerdo con los porcentajes de remoción para un reactor con planta y un reactor sin planta, se puede determinar que una sola hidrofita (está en su primera etapa de desarrollo, ya que el espesor de su tallo es de 9 mm que, comparado, con el que alcanzan al llegar a la edad adulta es de hasta 35 mm) contribuye con un 18% en la remoción de materia orgánica. Esto hace suponer que tanto el oxígeno fotosintético como los nutrientes que aporta la hidrofita, aumentan el desarrollo poblacional de los microorganismos aerobios promoviendo que se lleven a cabo reacciones más rápidas para la degradación de materia orgánica disuelta durante el día. Hay que recordar que

las plantas durante el día realizan la fotosíntesis, generando oxígeno y, por ello, su contribución coadyuva a aumentar el oxígeno presente, promoviendo la degradación aerobia de materia orgánica.

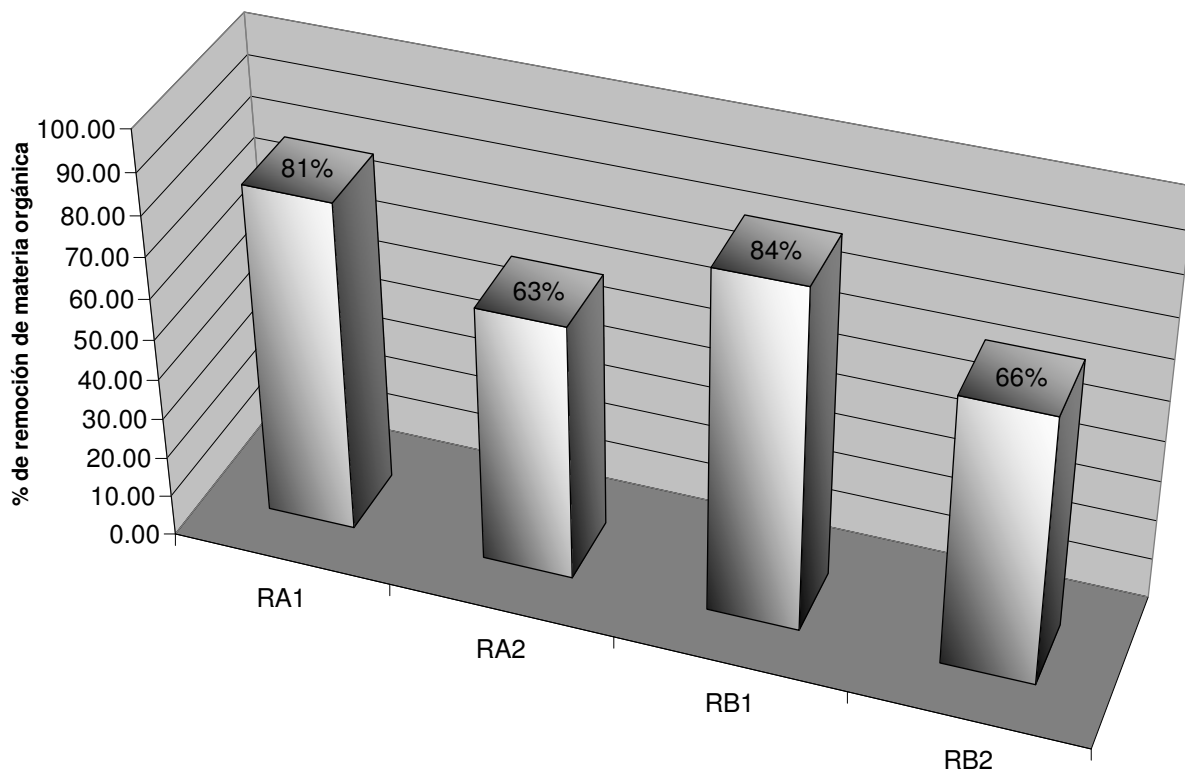


Figura 4.6 Gráfica comparativa de los porcentajes de remoción de materia orgánica en los reactores con hidrofita (RA₁ y RB₁) y sin hidrofita (RA₂ y RB₂)

Es importante señalar que la remoción de materia orgánica en los reactores sin hidrofita es considerable, dando porcentajes del 63% para el reactor RA₂ y de 66% para el reactor RB₂. Esto se debe a que se llevan a cabo reacciones microaerobias en la parte superior de los reactores y anaerobias en la parte inferior, donde los catalizadores de estas reacciones son los microorganismos anaerobios que proliferan sobre la superficie del empaque y que usan estos contaminantes como “alimento” y fuente de energía.

El material de empaque en ambos casos, con y sin hidrofita, sirve como filtro para muchos de los sólidos suspendidos que pudieran llegar con el agua residual (que no es el caso en estos experimentos, ya que el agua residual es sintética y no tiene material en suspensión). Generalmente, es deseable contar con un sedimentador primario que elimine por la parte superior grasas y aceites y otros materiales menos densos que el agua residual y por la parte inferior aquellos más pesados que el agua, ya que la “vida útil” del humedal artificial se prolonga más al mantener una adecuada hidrología del sistema sin sólidos que taponen los espacios porosos del material de soporte. En este punto es interesante mencionar que la biomasa microbiana que se genera durante el

día en los humedales artificiales, al llegar la noche muere por falta de oxígeno y los organismos anaerobios la consumen reduciendo su impacto en el taponamiento del material inerte, ya que los microorganismos anaerobios transforman prácticamente el 90% de sus fuentes de carbono (en este caso, la biomasa aerobia muerta y la fuente carbonosa del agua residual) en metano y CO₂ y solamente se reproducen con el 10% restante (que, de hecho, desaparece durante el día por la depredación de los organismos aerobios) (Durán-de-Bazúa y col., 2006).

4.5 Valores de pH

Los valores de pH en los reactores con planta (6.19±0.26 para el RA1 y 6.24±0.17 para el RB1), son ligeramente mayores que en los reactores sin planta (6.19±0.27 para el RA₂ y 6.18±0.25 para el RB₂). En los reactores sin planta se tienen condiciones más reductoras ya que en éstos no está presente el oxígeno fotosintético, **Figura 4.7**.

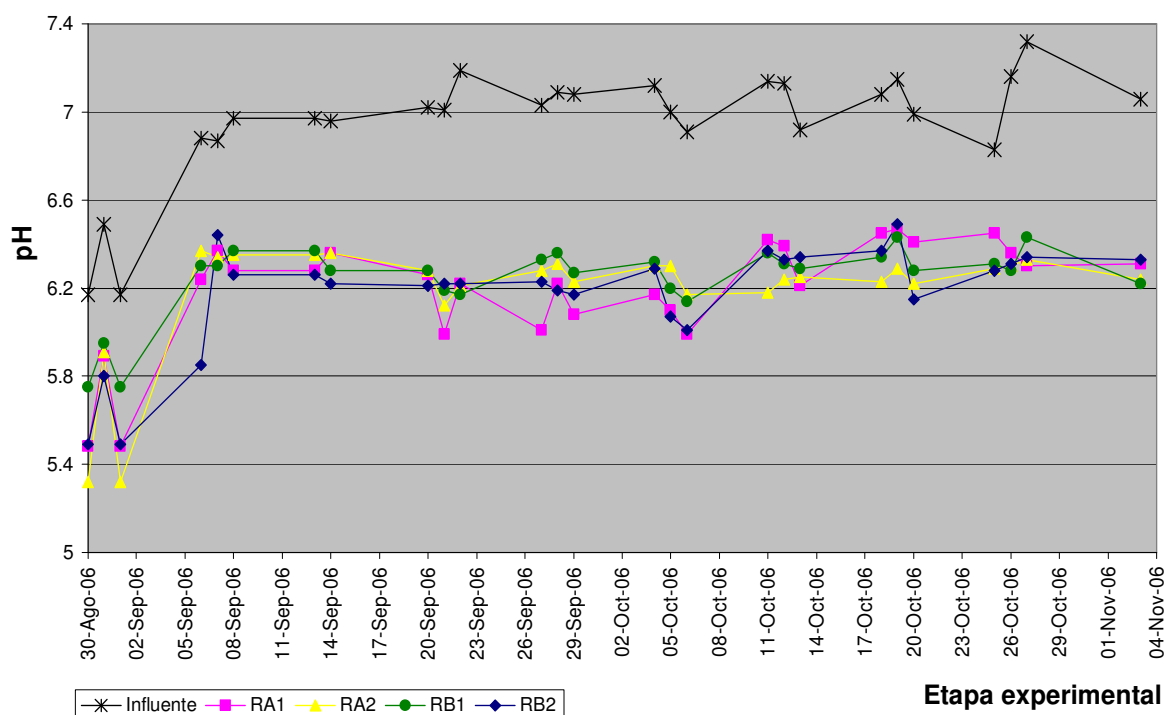


Figura 4.7 Variación del pH en el influente y a la salida de cada reactor

La tendencia del pH es ligeramente ácida debido a los fenómenos anaerobios de acidogénesis provocada por la presencia de microorganismos anaerobios. Esto se ve favorecido por las condiciones de inundación, lo que significa que las bacterias sulfato-reductoras (anaerobias estrictas) toman los sulfatos y los reducen, produciendo ácido sulfhídrico y con las fuentes de carbono las bacterias acidogénicas producen ácidos (Castro-González, 2004). Los valores de pH ácidos son normales en los humedales debido a los ciclos de crecimiento, muerte y descomposición de la materia orgánica (IWA, 2001).

Las bacterias que remueven los contaminantes en el agua residual proliferan dentro del intervalo de $4.0 < \text{pH} < 9.5$ (Metcalf y Eddy, 1991). El pH controla la parte química y biológica de los HA, también determinan gran cantidad de las reacciones químicas que ocurren dentro de los HA. Los valores de pH en los HA reportados en la literatura se mantienen cerca de la neutralidad o ligeramente ácidos (García-Arreola, 2006). Además, este variable tiene gran influencia en las especies de los compuestos presentes en el agua.

4.6 Valores de temperatura (°C)

Los valores de temperatura a la salida de los reactores fueron: RA_1 de 21.7 ± 1.16 °C, RB_1 de 21.65 ± 1.15 °C; RA_2 de 21.63 ± 1.18 °C y RB_2 de 21.57 ± 1.3 °C, **Figura 4.8**. Mientras que el perfil de temperatura del influente disminuye de 19.35 ± 1 °C.

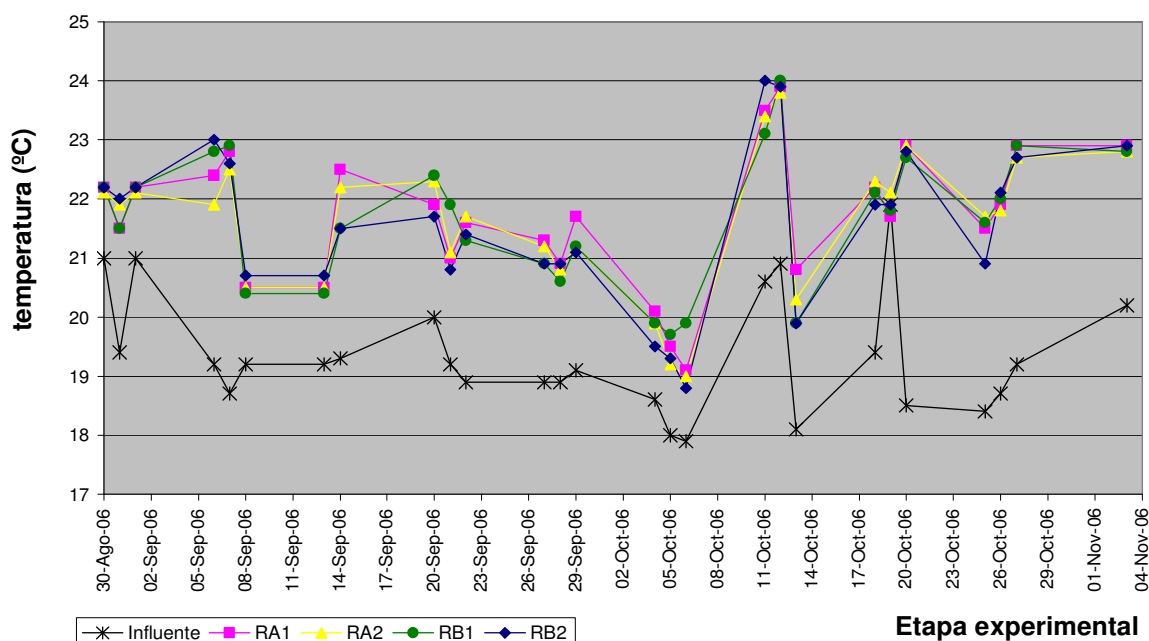


Figura 4.8 Variación de la temperatura en el influente y a la salida de cada reactor

Las temperaturas más bajas son las del influente (ARS de alimentación a los reactores), esto se debe a que es preparada con agua de la llave, cuya temperatura es similar a la del ambiente. Las temperaturas de salida de los reactores aumentaron debido al intercambio térmico que se da al pasar el flujo de agua de alimentación (ARS) por el material de empaque, la hidrofita y, principalmente, a las reacciones metabólicas que llevan a cabo los microorganismos anaerobios (en los reactores sin hidrofita) y aerobios dentro del HA (en el caso de los reactores con hidrofita se llevan a cabo reacciones exotérmicas de oxidación que se dan con el oxígeno fotosintético).

Las variaciones en la temperatura son de gran importancia ya que la mayoría de los procesos bioquímicos que tiene lugar estos sistemas son sensibles a la temperatura,

debido a que los microorganismos encargados de llevar a cabo la remoción de contaminantes tiene cierto rango de temperatura al cual están adaptados.

4.7 Comentarios finales

Esta investigación permitió corroborar, con resultados experimentales, que las hidrofitas sí tienen influencia en la eficiencia depurativa de los humedales artificiales, ya que hay la creencia generalizada de que son solamente ornamentales y que no contribuyen a la depuración de las aguas residuales (Anónimo, 2006). Estos experimentos realizados con una sola planta, muy joven, lograron un aumento en la eficiencia de remoción de los materiales disueltos en el agua, medidos como demanda química de oxígeno, de 18%, lo que indica que en los sistemas reales donde se tienen hidrofitas adultas y abundantes, su rol será aún más trascendente en la eliminación de contaminantes.

5.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos en esta investigación y con base en los objetivos planteados (estudiar la transferencia de oxígeno en forma indirecta midiendo los pOR a diferentes alturas del reactor y verificar la tasa de depuración del agua residual sintética en un sistema con hidrofita y uno sin ella), se puede concluir lo siguiente:

La hidrofita del sistema o reactor RB₁ presentó un mejor estado fisiológico, aún cuando tiene una altura ligeramente menor (5 versus 9 mm de diámetro del tallo y 1.05 versus 0.86 m, respectivamente), pues mostró valores de potencial rédox más positivos y una mayor remoción de materia orgánica en comparación con la hidrofita del reactor RA₁. Aunque las hidrofitas en los sistemas RA₁ y RB₁ originalmente eran del mismo tamaño y tienen, teóricamente, el mismo origen genético y las mismas condiciones, con el paso del tiempo la hidrofita del sistema RB₁ se desarrolló ligeramente más, lo que hace que las características de Eh de ambos reactores sean ligeramente diferentes especialmente en el fondo del reactor. El aporte de oxígeno fotosintético en los reactores con hidrofita, fue el suficiente para oxigenar la zona radicular del reactor (valores más positivos de potencial rédox) y por ende, llevarse a cabo una serie de reacciones bioquímicas aerobias.

El potencial rédox a 15 cm de profundidad, que corresponde a la zona radicular del reactor con hidrofita y su réplica, reactores RA₁ y RB₁, se muestra que los potenciales se ven afectados por el oxígeno que la planta aporta por fotosíntesis y al transporte del oxígeno molecular a través de las aerénquimas de la planta de carrizo. En la zona radicular del sistema se presentan condiciones oxidantes, mientras que los valores del pOR a 2 y 30 cm de profundidad indican las condiciones reductoras. Esto se debe a que la hidrofita durante el día es generadora “neta” de oxígeno y esto hace que los potenciales se incrementen durante el periodo de iluminación (9:00 a 1:00 a.m.), en tanto que, durante el periodo de oscuridad (1:00 a 9:00 a.m.) las plantas dejan de aportar oxígeno suficiente, y por el contrario, comienzan a respirar como cualquier ser aerobio en la oscuridad lo que provoca que los potenciales disminuyan como se muestra en el comportamiento en los valores de pOR a 2 y 30 cm de profundidad. De acuerdo con lo anterior y con el análisis estadístico realizado se establece que la principal contribución de oxígeno en los sistemas biológicos con hidrofita es por vía fotosintética. El análisis estadístico, permitió determinar que los factores: reactor (con hidrofita y sin hidrofita), profundidad (2, 15 y 30 cm) y estado lumínico (iluminación y oscuridad) tienen un efecto estadísticamente significativo en el potencial rédox, a un nivel de confianza del 99%. Además se afirma que la planta de carrizo sí tiene un efecto benéfico en la generación y transporte de oxígeno a la zona radicular, mejorando la eficiencia de depuración.

El estudio del potencial rédox es complejo ya que este parámetro, al verse modificado por el aporte de oxígeno de las plantas hacia la rizosfera, dependerá del estado

fisiológico de las mismas y de las características del influente utilizado, así como de las especies de microorganismos y de las propias plantas utilizadas, ya que plantas de diferentes especies pueden presentar patrones en el potencial rédox muy diferentes.

Por otro lado, en los reactores sin hidrofita, se tienen condiciones más reductoras ya que en éstas no está presente el oxígeno fotosintético y los valores de los potenciales son más negativos a mayor profundidad.

La mayor remoción de materia orgánica (medida como demanda química de oxígeno) la presentaron los reactores con hidrofita, RA₁ y RB₁, de 81 y 84%, respectivamente, en comparación con 63 y 66% de remoción en los reactores que no tienen hidrofita. De acuerdo con los porcentajes de remoción, se puede determinar que una sola hidrofita (hidrofita joven con un espesor de tallo de 9 mm y 0.86 m de altura) contribuye en un 18% en promedio a la remoción de materia orgánica, lo que hace suponer que, tanto el oxígeno fotosintético como los nutrientes que aporta la hidrofita, aumentan el desarrollo poblacional de los microorganismos aerobios promoviendo que se lleven a cabo la degradación aerobia de materia orgánica durante el día y dando, globalmente, estas eficiencias de remoción.

Otras variables de medición importantes en el estudio de los humedales artificiales son los valores de pH y temperatura. En estos sistemas, los valores de pH ácidos son normales debido a los ciclos de crecimiento, muerte y descomposición de la materia orgánica. El pH controla la parte química y biológica de los humedales y determina gran cantidad de las reacciones químicas que ocurren dentro estos sistemas. La otra variable es la temperatura, la variación de esta variable en los humedales son de gran importancia ya que la mayoría de los procesos bioquímicos que tienen lugar dentro de los humedales son sensibles a esta variable, debido a que los microorganismos encargados de llevar a cabo la remoción de contaminantes tienen intervalos de temperatura a los cuales están adaptados.

5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y con objeto de avanzar en el estudio de los potenciales rédox que simulan un humedal artificial a escala de laboratorio, se hacen las siguientes recomendaciones para que los sistemas experimentales funcionen mejor:

- ◆ Se debe realizar diariamente la limpieza de las mangueras que alimentan a los reactores para evitar que se tapen e impidan la alimentación continua a los mismos.
- ◆ Se debe cambiar el ARS diariamente (se recomienda que sea a la misma hora, todos los días) para evitar variaciones en los resultados experimentales por la descomposición en el tanque de almacenamiento.
- ◆ Verificar la inundación de los reactores para asegurarse que los electrodos están captando los valores reales de potenciales rédox registrados en la computadora.

- ◆ Como un paso importante para el estudio de los potenciales rédox sería recomendable que se utilicen sistemas de mayor tamaño donde sea posible la medición e instalación de equipo de medición. En estos sistemas sería posible incrementar la densidad de plantas de tal manera que se puedan registrar variaciones de este parámetro en la zona radicular.
- ◆ Verifican periódicamente los valores de potencial rédox registrados en la computadora, así como el buen funcionamiento del programa, pues muchas veces es interrumpido por fallas eléctricas, que impiden el buen funcionamiento de la computadora y de la tarjeta en donde están conectados los electrodos. Se deberá instalar un sistema de protección eléctrica para evitar este problema (“no break”, en inglés).
- ◆ Si se utilizan sistemas prototipo, es muy recomendable que éste se encuentre recibiendo luz natural en condiciones reales de tal manera que se pueda registrar las variaciones del potencial rédox en el día y por la noche, pero bajo condiciones más realistas. Esto podría llevarse a cabo en un invernadero.

A.1.1 Técnica usada para determinar el potencial óxido-reducción

Material y equipo

- Potenciómetro comercial
- 12 electrodos comerciales de Ag/AgCl-Pt.
- Tarjeta de adquisición de datos
- Computadora de escritorio
- 12 tubos de PVC de 2, 15 y 30 cm de longitud

Reactivos:

- Solución estándar de pH 4 y pH 7
- Quinhidrona

Procedimiento:

1. Se instalan tres tubos de PVC a las profundidades de 2, 15 y 30 cm en cada uno de los reactores, percatándose que el tubo que se encuentra a los 15 cm de profundidad abarque la parte radicular del reactor y que la instalación de los mismos no modifique las condiciones de operación en los reactores.
2. Se instalan los electrodos comerciales de Ag/AgCl-Pt, dentro de los tubos de PVC que sirven como soporte
3. Cada uno de los doce electrodos del sistema experimental, se conectan a la tarjeta de adquisición de datos (esta tarjeta tiene capacidad para conectar hasta 24 electrodos)
4. La tarjeta de adquisición de datos se acopla a la computadora para el registro de valores del potencial con la ayuda de un paquete de computación. Los valores del pOR son reportados en hojas de cálculo para su manipulación y análisis.
5. Una vez instalado el equipo necesario para la captura de valores del pOR, se calibra el sistema experimental. Para ello, se determinan valores de potencial con los electrodos adaptados al sistema experimental y con la ayuda de un potenciómetro comercial, esperando similitud en los valores. Los electrodos se calibran con soluciones estándar de pH 4 y 7 saturados con quinhidrona (5 mg de quinhidrona en 50 mL de solución estándar). La variación en los valores de potencial es debida a la calidad de la quinhidrona, así como a la temperatura a la que se realiza la medición (**Tabla A.4.3**)
6. Para empezar con el registro de valores del pOR es necesario que al correr el paquete de computación, el primer valor registrado del pOR, en voltios, en los cuatro reactores sea aproximadamente el mismo. Para evitar variaciones inesperadas, en los valores del pOR es necesario calibrar a los electrodos una vez por semana

A.1.2 Técnica usada para determinar el pH y la temperatura

Material y equipo de campo:

- Potenciómetro Corning MO-04
- Sensor para medir pH
- Piseta
- Probeta

Reactivos:

- Solución estándar de pH 4
- Agua destilada.

Procedimiento:

- 1.- Antes de tomar la muestra se debe enjuagar la probeta varias veces con agua destilada
- 2.- Se inserta el sensor de pH en el medidor
- 3.- Se enjuaga el sensor con agua destilada y seca con un trapo suave y seco
- 4.- Se presiona el botón MODE, READ, CAL para encender el medidor y calibrar el sensor de pH, con la solución estándar de pH conocido
- 5.- Se sumerge el sensor en la solución estándar de pH 4
- 6.- Hasta que se “congele” el valor en pantalla de pH 4, es cuando se ha calibrado el sensor y se procederá a la medición de las muestras
- 7.- Enjuagar el sensor con agua destilada, secar con un trapo suave y seco
- 8.- Sumergir el sensor en la muestra homogénea de agua a medir
- 9.- Presionar el botón READ para que el medidor empiece a arrojar valores de pH en la parte superior de la pantalla del medidor y los valores de temperatura (dados en grados centígrados) en la parte inferior
- 10.- La detección del punto final “congelará” el valor en pantalla cuando éste sea estable

A.1.3 Método para determinar la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales

Los métodos para la determinación de la DQO son validados por la APHA-AWWA-WPCF (1992). La demanda química de oxígeno, DQO, se utiliza como un indicador ambiental del contenido orgánico total de una muestra acuosa.

La DQO es una determinación química de la cantidad de sustancias fuertemente oxidantes requeridas para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible al dicromato o permanganato en medio ácido y, considerando que es una reacción equimolecular, se espera que esta cantidad sea equivalente a la materia orgánica oxidada. La Figura A.1.1 muestra el diagrama de bloques del método que se describe a continuación.

Material y equipo:

- Espectrofotómetro Spectronic 21D
- Horno de calentamiento para usar a 165°C (estufa de secado)
- Tubos de reacción
- Celda de cuarzo de 10 mm para espectrofotómetro

Reactivos

- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)
- Sulfato de mercurio ($HgSO_4$)
- Sulfato de plata (Ag_2SO_4)

Procedimiento:

Preparación de las soluciones de digestión

- Solución de digestión 0.21 N, solución de digestión A
Disolver en agua destilada 10.216 g de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), previamente secado a 103°C durante 2 horas, 167 mL de ácido sulfúrico concentrado y 33.3 g de sulfato de mercurio, aforar a un litro con agua destilada
- Reactivo ácido sulfúrico, solución de digestión B
Pesar 10.12 g de sulfato de plata y adicionar un litro de ácido sulfúrico concentrado (el sulfato de plata tarda de uno a dos días en disolverse)

Nota: Esta solución es estable hasta 3 meses cuando se mantiene a 4°C

Método a reflujo cerrado/ método espectrofotométrico

- 1.- Precalentar el horno para digerir la muestra a 165°C

2.- Tomar cuidadosamente 2 mL de muestra por triplicado previamente homogeneizada dentro de los tubos de reacción. Cerrar inmediatamente para evitar que se escapen los vapores, asegurarse de que están herméticamente cerrados

Nota: Las muestras se realizan por triplicado para asegurar que las mediciones son precisas, pues si dos valores son muy parecidos y el tercero no, este último se descarta

3.- Colocar en los tubos de reacción 1 mL de la disolución de digestión A

Nota. La disolución es fuertemente ácida y el tubo se calienta en este proceso, trabajar con guantes aislantes y bajo una campana de extracción

4.- Añadir cuidadosamente 3 mL de la disolución de digestión B

5.- Colocar 2 mL de agua des-ionizada por triplicado, en un tubo para la determinación del blanco de reactivos

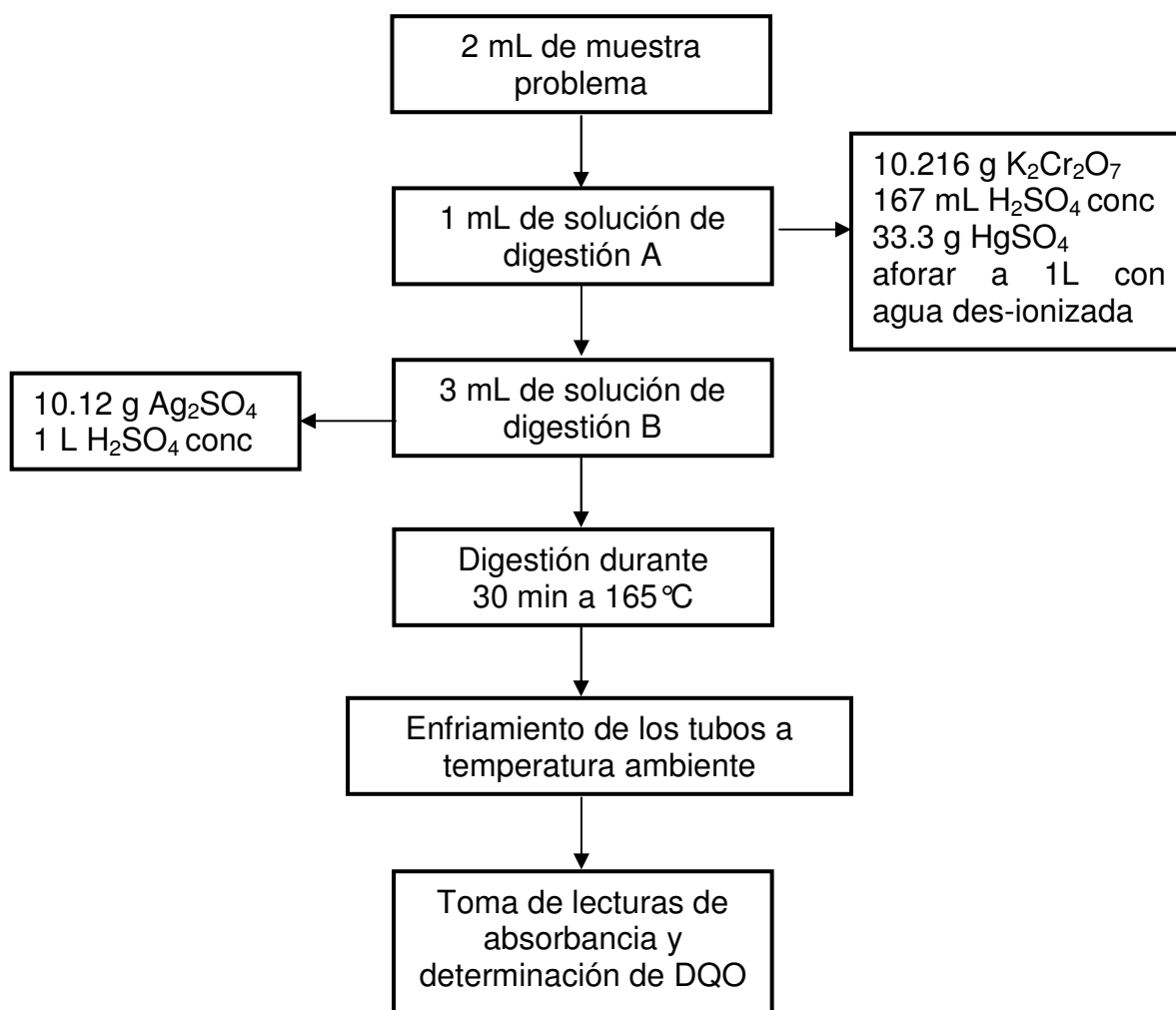
6.- Colocar todos los tubos en el horno previamente calentado a 165°C y reflujar por 30 min

7.- Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente

8.- Medir la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600nm y determinar la concentración de la muestra ($\text{mg O}_2/\text{L}$) con la curva de calibración

Figura A.1.1 Diagrama de flujo simplificado para determinar la DQO

método a reflujo cerrado/método espectrofotométrico



A.1.4 Técnica para obtener la curva de calibración de la DQO

Reactivos:

- Biftalato de potasio $C_8H_5KO_4$
- Agua destilada
- Solución de digestión A
- Solución de digestión B

Material y equipo:

- Espectrofotómetro Spectronic 21D
- Espátula
- Navecilla
- Piseta
- Doce matraces aforados de 50 mL
- Propipeta
- Micropipeta
- Pipeta de 10 mL
- Pipeta de 5 mL
- Pipeta de 1 mL

Procedimiento:

1. En una navecilla se pesan aproximadamente y con precisión 0.851 g de biftalato de potasio (se deshacen los grumos y se seca el biftalato de potasio a $120^{\circ}C$), se disuelve en agua en un matraz aforado y se aforar a 1L

Nota: Esta disolución de biftalato de potasio es estable hasta por 3 meses cuando se mantiene en refrigeración y si no se observa crecimiento biológico

2. En los matraces aforados de 50 mL se preparan las siguientes disoluciones, como se muestra en la **Tabla A.1.1**

3 Tomar cuidadosamente 2 mL de cada uno de los 10 matraces de $C_8H_5KO_4$ -agua destilada

Nota. Los 10 matraces que se preparan de $C_8H_5KO_4$ -agua destilada se realizan por triplicado para obtener valores promedios de absorbancia más precisos y exactos.

4.- Agregar a la cantidad de muestra anterior de $C_8H_5KO_4$ -agua destilada, 1 mL de la disolución de digestión A

5.- Añadir cuidadosamente 3 mL de la disolución de digestión B

6.- Colocar todos los tubos en el horno previamente calentado a $165^{\circ}C$ y reflujar por 30 min

7.- Retirar los tubos del digestor y dejar que los tubos se enfríen a temperatura ambiente, permitiendo que cualquier precipitado se sedimente

8.- Medir la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600nm y determinar la concentración de la muestra (mg O₂/L) con la curva de calibración

Tabla A.1.1 Preparación de disoluciones para la curva de calibración de la DQO

Matraz	Concentración mgO ₂ /L	mL (C ₈ H ₅ KO ₄)	mL agua destilada
1	0.00	0	50
2	50	3.12	46.88
3	80	5	45
4	100	6.25	43.75
5	200	12.5	37.5
6	300	18.75	31.25
7	400	25	25
8	500	31.25	18.75
9	600	37.5	12.5
10	800	50	0

A.1.5 Cálculos para determinar la curva de calibración

Para determinar la curva de calibración de DQO es necesario tabular los datos de absorbancia (obtenidas en el paso 6) y la concentración conocida de las muestras estándar en mg O₂/L. Con los datos obtenidos se grafica absorbancia vs DQO (**Tabla A.1.2**). La curva de calibración está representada por la ecuación 1, una recta con ordenada al origen, reportando los resultados en mg O₂/L (**Figura A.1.2**).

$$y = mx + b \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

x = DQO, mg O₂/L

y = absorbancia

por tanto: DQO (mg O₂/L) = (absorbancia - b) / m

Se obtuvieron dos curvas de calibración con las siguientes expresiones matemáticas:

- 1ra curva de calibración:

$$DQO(\text{mgO}_2 / \text{L}) = \frac{(\text{absorbancia} - 0.0134)}{0.0004}$$

- 2da curva de calibración:

$$DQO(\text{mgO}_2 / \text{L}) = \frac{(\text{absorbancia} - 0.0008773)}{0.0002914}$$

Tabla. A.1.2 Valores de absorbancia promedio para obtener la curva de calibración

Matraz	Concentración mg O ₂ /L	Valores promedio de absorbancia	
		1er curva	2da curva
1	0	0	0
2	50	0.041	0.0196
3	80	0.053	0.0236
4	100	0.051	0.027
5	200	0.097	0.061
6	300	0.132	0.083
7	400	0.172	0.1205
8	500	0.21	0.1465

Nota. Sólo se tomaron los valores de absorbancia promedio (se realizó por triplicado las muestras para cada matraz) para el cálculo de las curvas de calibración, hasta a una concentración de 500 mg O₂/L, los valores de concentración de 600 y 800 mg O₂/L no se tomaron en cuenta, ya que la concentración del agua residual domestica tiene una DQO de 250 mg O₂/L, promedio.

Curva de calibración

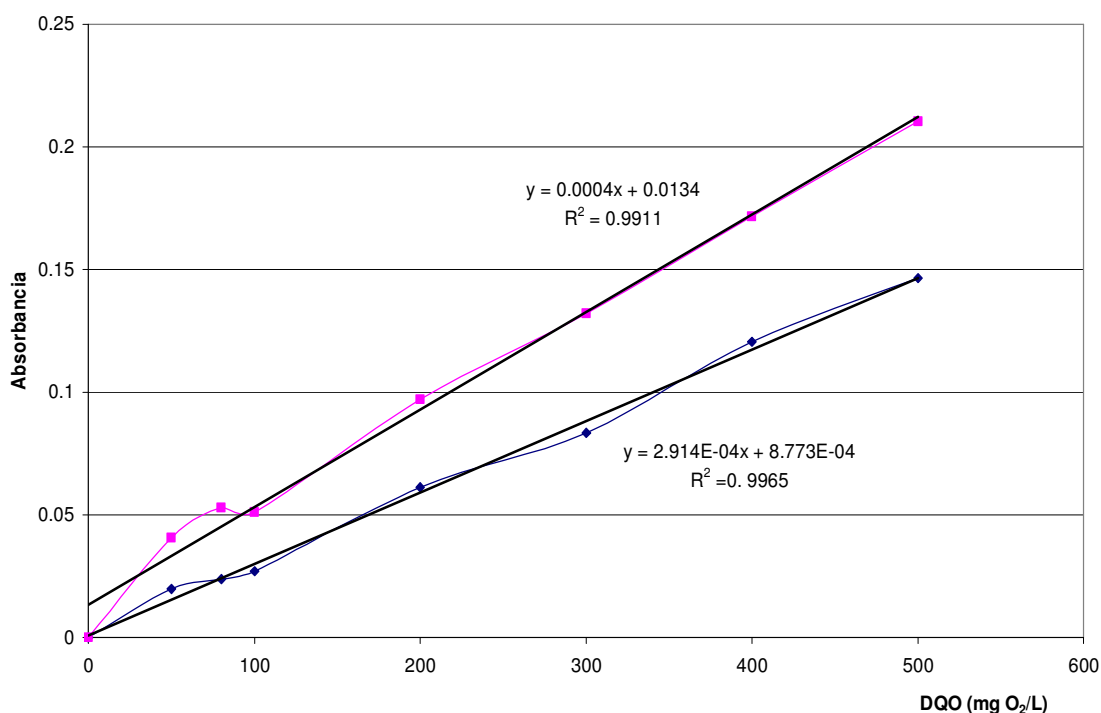


Figura A.1.2 Curvas de calibración obtenidas en la investigación

Anexo 2. Manejo, tratamiento y disposición de los residuos generados en esta investigación

Los residuos generados durante esta investigación son los residuos de la demanda química de oxígeno. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, dichos residuos son considerados como peligrosos por su contenido de plata, mercurio y cromo. El método seguido se desarrolló en los laboratorios del PIQAyQA (Ramírez-Burgos y col., 2006).

Reactivos:

- Acido clorhídrico
- Hidróxido de sodio 8N (grado industrial)
- Sulfato ferroso amoniacal (grado industrial)
- Acido sulfúrico concentrado

Material y equipo:

- Vaso de precipitados de plástico de 4L
- Pipeta graduada de 10 mL
- Propipeta
- Agitador de vidrio
- Vidrio de reloj
- Espátula
- Vaso de precipitado de vidrio de 1L
- Vaso de precipitado de vidrio de 500 mL
- Vaso de precipitado de vidrio de 250 mL
- Piseta
- Embudo

Procedimiento:

- 1.- Utilizar bata de algodón, guantes de látex y lentes de proyección
- 2.- Colocar 1 L de residuo en un vaso de precipitado de plástico de 4L
- 3.- Agregar 20 mL de ácido clorhídrico 2N bajo la campana)
- 4.- Agitar durante 1 minuto por medio de un agitador de vidrio (bajo la campana)
- 5.- Centrifugar el residuo a 3500 rpm, -10°C , durante 5 minutos
- 6.- La fase líquida se coloca en un vaso de precipitado de plástico de 4L
- 7.- La fase sólida es colocada en un envase de plástico exclusivo para esto
- 8.- A la fase líquida obtenida en el paso 6 se le agregan 20 g de sulfato ferroso amoniacal (FAS) grado industrial y se agita durante algunos minutos por medio de un agitador de vidrio bajo la campana
- 9.- Agregar hidróxido de sodio y agitar constantemente mediante un agitador de vidrio, hasta un $\text{pH}=9.5$ (bajo la campana)

Nota: Para poder realizar el paso anterior adecuadamente se deben hacer las siguientes actividades:

- a. Agregar un volumen aproximado de 600 mL de hidróxido de sodio 8N, lentamente (bajo la campana) debido a que la reacción es muy exotérmica
- b. Dejar enfriar durante 45 minutos aproximadamente en la campana o el tiempo necesario para que alcance una temperatura de 25°C
- c. Una vez frío se lleva al potenciómetro, se mide el pH y se agrega (en caso de que el pH sea menor a 9.5) el hidróxido de sodio necesario para llegar a pH=9.5

10.- Una vez que el residuo tiene un pH=9.5 se centrifuga a 3500 rpm, -10 °C, durante 8 minutos

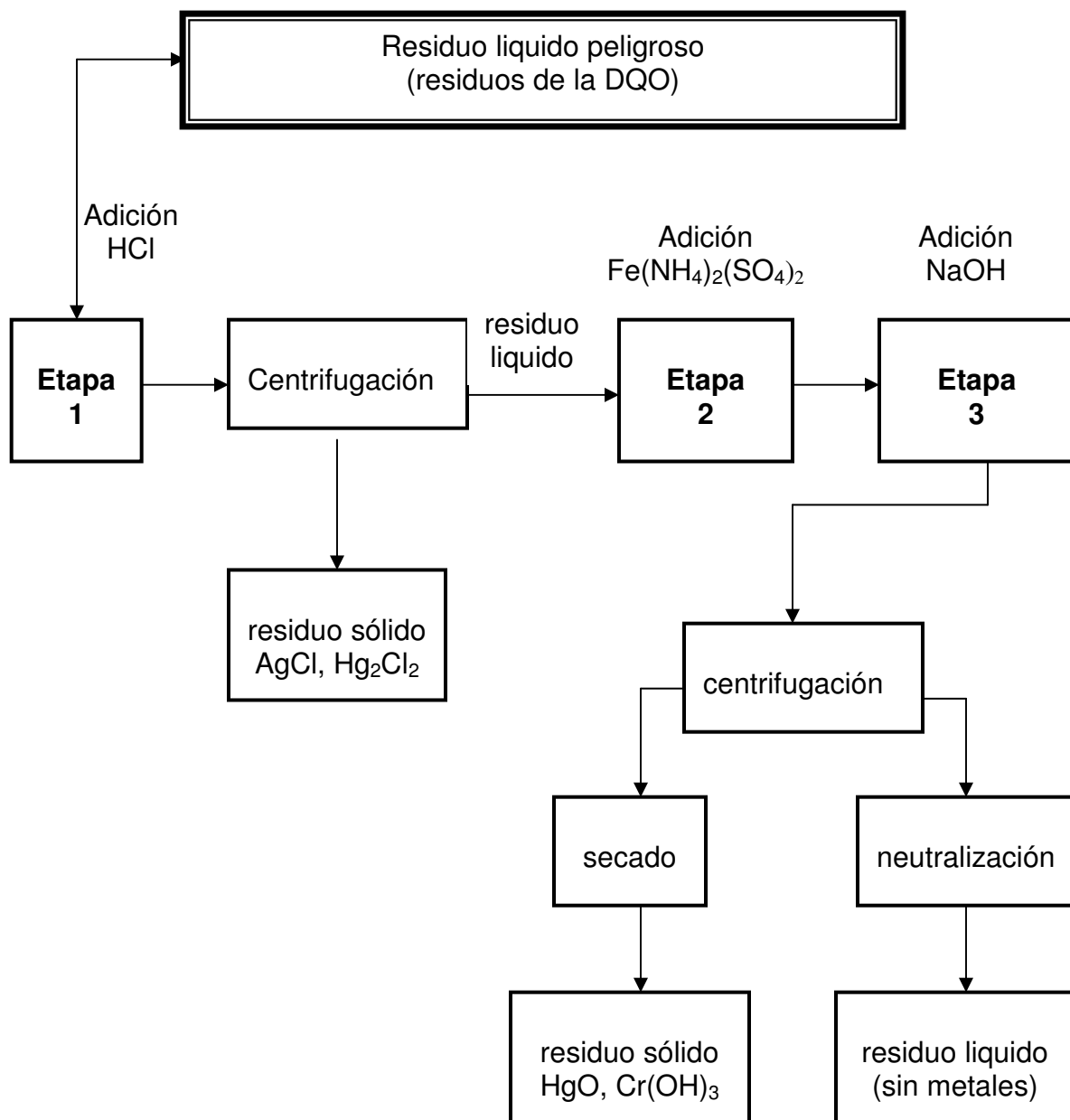
11.- El residuo líquido se coloca en un vaso de precipitados de plástico de 4L y se le agrega ácido sulfúrico hasta un pH=7 (el volumen aproximado que se requiere es de 3mL)

12.- Una vez neutralizado el residuo líquido puede verterse por el drenaje sin ningún problema

13.- El residuo sólido se coloca en una charola de metal y se pone a calentamiento a 75°C durante 24 horas para que el residuo se seque

14.- Una vez seco el residuo, se coloca en un recipiente exclusivo y se envía a recuperación de metales

Figura A.2.1 Diagrama de bloques simplificado del tratamiento de los residuos generados en esta investigación



Anexo 3. Preparación del agua residual sintética

Material y equipo:

- Balanza analítica
- Espátula
- Vidrio de reloj
- Recipiente de plástico de 40 L

Reactivos:

- Sacarosa, $C_{12}H_{22}O_{11}$ grado reactivo
- Sulfato de amonio, $(NH_4)_2 SO_4$
- Fosfato de sodio, $Na_3PO_4 \cdot 12 H_2O$
- Agua de la llave

Procedimiento:

Base de cálculo: 40 L de agua residual sintética para la etapa

- 1.-Pesar 9 g de sacarosa
- 2.-Pesar 1.2 g de sulfato de amonio
- 3.-Pesar 0.12 g de fosfato de sodio
- 4.-Disolver las tres sustancias en el recipiente de 40. La relación C:N:P del agua residual sintética es: 15:1:0.04

La composición resultante de esta solución se muestra en la **Tabla 3.3**.

Cálculo de la relación C:N:P:

Concentración de las sales para la preparación del agua residual sintética (ARS):

Sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$)= 225 mg/L

Sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$)= 30 mg/L

Fosfato de sodio ($Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$)= 3 mg/L

Peso molecular de las sales:

$C_{12}H_{22}O_{11} = 342 \text{ g mol}^{-1}$

$(NH_4)_2SO_4 = 132 \text{ g mol}^{-1}$

$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O = 380 \text{ g mol}^{-1}$

$$\frac{0.225 \text{ g sacarosa}}{L} \left(\frac{1 \text{ mol sacarosa}}{342 \text{ g sacarosa}} \right) \left(\frac{12 \text{ mol C}}{1 \text{ mol sacarosa}} \right) \left(\frac{12 \text{ g C}}{1 \text{ mol C}} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg C}}{1 \text{ g C}} \right) = 94.74 \frac{\text{mg C}}{L}$$

$$\frac{0.030 \text{ g } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4}{L} \left(\frac{1 \text{ mol } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4}{132 \text{ g } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4} \right) \left(\frac{2 \text{ mol } N}{1 \text{ mol } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4} \right) \left(\frac{14 \text{ g } N}{1 \text{ mol } N} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg } N}{1 \text{ g } N} \right) = 6.36 \frac{\text{mg } N}{L}$$

$$\frac{0.003 \text{ g } \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}}{L} \left(\frac{1 \text{ mol } \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}}{380 \text{ g } \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol } P}{1 \text{ mol } \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}} \right) \left(\frac{31 \text{ g } P}{1 \text{ mol } P} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg } P}{1 \text{ g } P} \right) = 0.24 \frac{\text{mg } P}{L}$$

La relación es con respecto al nitrógeno:

$$\frac{94.74}{6.36} = 14.89 \approx 15$$

$$\frac{6.36}{6.36} = 1$$

$$\frac{0.244}{6.36} = 0.04$$

La relación de C:N:P es de 15:1:0.04

Anexo 4. Datos experimentales

Los valores de las variables (pOR, DQO, pH y temperatura) que se reportan a continuación corresponden a la etapa experimental, cuando se llegó a régimen permanente.

Tabla A.4.1 Valores de Eh (potenciales rédox corregidos, en mV) a las diferentes profundidades en los sistemas con hidrofitas, RA₁ y RB₁ en el periodo de iluminación y de oscuridad

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
9:00	-131.76	109.23	-250.13	-103.282	144.56	-131.76
09:10	-134.07	111.54	-245.07	-110.69	149.21	-134.07
09:20	-135.44	119.41	-245.07	-109.26	155.34	-135.44
09:30	-135.69	121.45	-240.7	-105.57	157.41	-135.69
09:40	-135.44	123.45	-247.45	-106.13	159.34	-135.44
09:50	-135.63	128.56	-241.07	-103.57	161.38	-135.63
10:00	-135.38	131.23	-240.76	-105.01	165.45	-135.38
10:10	-135.26	133.89	-240.83	-104.38	168.34	-135.26
10:20	-131.76	136.78	-240.95	-107.88	171.23	-131.76
10:30	-134.07	138.89	-240.45	-108.51	171.23	-134.07
10:40	-135.44	138.89	-237.88	-109.94	173.45	-135.44
10:50	-135.44	140.58	-240.39	-110.32	174.5	-135.44
11:00	-134.44	140.87	-230.08	-110.32	174.5	-134.44
11:10	-135.44	141.34	-224.88	-103.57	175.34	-135.44
11:20	-135.63	142.21	-226.01	-101.76	177.34	-133.38
11:30	-135.38	143.32	-241.26	-104.07	178.45	-135.44
11:40	-135.26	144.34	-242.45	-105.44	180	-135.44
11:50	-131.76	149.21	-240.01	-107.69	180.31	-132.26
12:00	-134.07	151.23	-231.26	-109.44	181.21	-135.63
12:10	-135.44	156.34	-242.2	-109.63	182.45	-132.38
12:20	-135.44	158.34	-240.7	-109.38	183.23	-132.26
12:30	-135.63	159.45	-242.57	-109.26	183.23	-131.76
12:40	-135.38	165.253	-239.26	-106.2	180.23	-134.07
12:50	-135.26	167.56	-243.32	-110.07	177.49	-135.44
13:00	-131.76	172.5	-240.95	-109.63	175.58	-134.8
13:10	-134.07	175.34	-238.01	-107.38	167.34	-132.26
13:20	-135.44	177	-241.01	-103.82	165.34	-131.76
13:30	-135.44	179.753	-243.7	-110.69	161.34	-134.07
13:40	-135.63	182.691	-243.95	-109.26	160.36	-135.44
13:50	-135.38	182.503	-244.13	-105.57	158.34	-133.63
14:00	-135.26	179.816	-250.39	-106.13	156.34	-134.38
14:10	-131.76	182.316	-244.51	-103.57	151.23	-132.26
14:20	-134.07	182.503	-248.01	-105.01	149.21	-131.44
14:30	-135.44	182.566	-246.63	-104.38	143.32	-133.26
14:40	-121.3	182.566	-248.01	-107.88	141.34	-134.44

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
14:50	-125	181.941	-246.95	-108.51	138.89	-135.44
15:00	-125	177.45	-249.7	-109.94	136.78	-132.26
15:10	-127.5	175.56	-246.76	-110.32	133.89	-133.63
15:20	-127.5	167.32	-245.7	-110.32	131.23	-131.38
15:30	-129	167.43	-247.57	-103.57	128.56	-136.26
15:40	-131.76	165	-241.63	-101.76	123.45	-131.76
15:50	-134.07	164.4	-243.57	-104.07	121.45	-134.07
16:00	-135.44	160.36	-247.51	-105.44	119.41	-135.44
16:10	-136.56	159.45	-246.13	-107.69	111.54	-132.38
16:20	-136.89	156.34	-245.82	-109.44	109.23	-132.26
16:30	-131.26	151.23	-249.01	-109.63	109.21	-131.26
16:40	-132.76	149.21	-246.7	-109.38	103.76	-132.76
16:50	-134.07	144.34	-241.76	-109.26	100.23	-134.07
17:00	-135.44	141.34	-245.32	-109.38	97.12	-135.44
17:10	-135.44	133.89	-246.07	-109.26	96.23	-135.44
17:20	-132.26	131.23	-246.82	-106.2	92.34	-132.26
17:30	-137.3	128.56	-240.89	-110.07	92.34	-137.3
17:40	-132.38	123.45	-245.2	-109.63	93.67	-132.38
17:50	-132.26	121.45	-250.13	-107.38	95.67	-132.26
18:00	-131.76	119.41	-245.07	-109.38	97.12	-131.76
18:10	-134.07	111.54	-245.07	-109.26	100.23	-134.07
18:20	-135.44	109.23	-240.7	-106.2	105.32	-135.44
18:30	-131.38	108.34	-247.45	-110.07	108.34	-131.38
18:40	-132.26	105.32	-241.07	-109.63	109.21	-132.26
18:50	-131.38	104.79	-240.76	-107.38	109.23	-131.38
19:00	-133.26	103.76	-240.83	-103.82	111.54	-132.76
19:10	-133.63	90.2	-240.95	-110.69	119.41	-133.38
19:20	-132.38	90.2	-240.45	-109.26	121.45	-131.26
19:30	-131.26	89.34	-237.88	-105.57	128.56	-134.44
19:40	-131.76	89.34	-240.39	-106.13	133.89	-135.44
19:50	-134.07	86.1	-230.08	-103.57	136.78	-133.26
20:00	-135.44	85.12	-224.88	-105.01	142.21	-132.63
20:10	-142.565	93.67	-226.01	-109.38	144.34	-135.38
20:20	-145.34	95.67	-241.26	-109.26	149.21	-131.26
20:30	-147.67	97.12	-242.45	-106.2	151.23	-131.76
20:40	-151.24	100.23	-250.13	-110.07	156.34	-134.07
20:50	-139.38	103.76	-245.07	-109.63	158.34	-135.44
21:00	-139.26	104.51	-245.07	-107.38	159.45	-132.38
21:10	-131.76	111.54	-240.7	-103.82	165.253	-132.26
21:20	-132.38	119.41	-247.45	-110.69	167.56	-133.63
21:30	-132.26	121.45	-241.07	-109.26	172.5	-133.38
21:40	-131.76	123.45	-240.76	-105.57	175.34	-134.26
21:50	-132.76	128.56	-240.83	-106.13	177	-132.76
22:00	-134.07	131.23	-240.95	-103.57	179.753	-134.07
22:10	-135.44	133.89	-240.45	-105.01	180.45	-135.44

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
22:20	-135.44	138.89	-237.88	-104.38	182.23	-135.44
22:30	-133.26	142.21	-240.39	-109.38	187.34	-133.26
22:40	-133.63	143.32	-242.45	-109.26	185.67	-133.63
22:50	-132.38	144.34	-250.13	-106.2	184.34	-132.38
23:00	-131.26	149.21	-245.07	-110.07	184	-131.26
23:10	-131.76	151.23	-245.07	-109.63	180	-131.76
23:20	-134.07	156.34	-240.7	-107.38	179.23	-134.07
23:30	-135.44	158.34	-247.45	-103.82	178.12	-135.44
23:40	-132.38	159.45	-241.07	-110.69	175.23	-132.38
23:50	-133.26	165.253	-240.76	-109.26	171.67	-133.26
00:00	-134.38	167.56	-240.83	-105.57	170.67	-134.38
00:10	-135.44	172.5	-240.95	-106.13	167.34	-135.44
00:20	-134.26	177	-242.45	-103.57	161.23	-134.26
00:30	-132.63	179.753	-250.13	-105.01	160.78	-132.63
00:40	-132.38	180.45	-242.45	-104.38	158.89	-132.38
00:50	-131.76	182.23	-250.13	-107.88	151.23	-131.76
01:00	-134.07	183.89	-245.07	-109.38	149.576	-134.07
01:10	-135.44	186.23	-245.07	-109.26	148.34	-135.44
01:20	-132.38	186.23	-240.7	-106.2	142.21	-132.38
01:30	-133.26	185.67	-247.45	-110.07	141.34	-133.26
01:40	-134.38	183.45	-241.07	-109.63	140.87	-134.38
01:50	-135.44	181.34	-240.76	-107.38	136.78	-135.44
02:00	-134.26	181.23	-240.83	-113.82	133.89	-134.26
02:10	-135.44	180.34	-240.95	-110.69	131.23	-135.44
02:20	-136.78	177.45	-240.45	-109.26	128.56	-133.26
02:30	-135.44	175.56	-237.88	-105.57	123.45	-133.63
02:40	-132.38	167.32	-240.39	-106.13	121.45	-132.38
02:50	-133.26	167.43	-242.45	-103.57	119.41	-131.26
03:00	-134.38	166.32	-242.45	-105.01	111.54	-131.76
03:10	-135.44	165.67	-250.13	-104.38	109.23	-134.07
03:20	-134.26	160.36	-245.07	-107.88	104.51	-135.44
03:30	-135.44	159.45	-245.07	-109.13	103.76	-132.38
03:40	-136.78	158.34	-242.45	-108.69	100.23	-133.26
03:50	-135.44	156.34	-250.13	-107.94	97.12	-134.38
04:00	-132.38	151.23	-245.07	-108.38	96.7	-135.44
04:10	-138.56	149.21	-245.07	-106.51	93.67	-134.26
04:20	-140.23	144.34	-240.7	-106.19	91.45	-132.63
04:30	-142.34	143.32	-247.45	-103.82	90.12	-132.38
04:40	-144.34	142.21	-241.07	-102.19	88.41	-131.76
04:50	-135.35	141.34	-240.76	-107.88	87.34	-134.07
05:00	-135.44	136.78	-240.83	-102.01	89.89	-135.44
05:10	-134.26	133.89	-240.95	-110.94	92.87	-134.26
05:20	-132.63	131.23	-240.45	-104.07	93.1	-132.63
05:30	-132.38	128.56	-242.45	-103.51	93.45	-132.38
05:40	-131.76	128.56	-250.13	-101.44	94.56	-131.76

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
05:50	-134.07	123.45	-245.07	-107.13	96.56	-134.07
06:00	-135.44	119.41	-245.07	-105.94	98.87	-135.44
06:10	-132.38	111.54	-240.7	-105.19	100.87	-132.38
06:20	-133.26	104.51	-247.45	-104.44	103.23	-133.26
06:30	-134.38	100.23	-241.07	-102.82	104.12	-134.38
06:40	-135.44	97.12	-240.76	-104.69	111.12	-135.44
06:50	-134.26	95.67	-240.83	-110.45	116.34	-134.26
07:00	-135.44	90.2	-240.95	-103.57	119.41	-135.44
07:10	-133.26	89.34	-240.45	-105.01	121.45	-133.26
07:20	-133.63	85.12	-242.45	-104.38	123.45	-133.63
07:30	-132.38	88.23	-250.13	-110.07	128.56	-132.38
07:40	-131.26	89.34	-245.07	-109.63	131.23	-131.26
07:50	-131.76	89.34	-245.07	-107.38	133.89	-131.76
08:00	-134.07	90.2	-240.7	-113.82	136.78	-134.07
08:10	-135.44	97.12	-242.45	-110.69	142.21	-135.44
08:20	-142.565	105.23	-250.13	-109.26	143.32	-132.38
08:30	-145.34	109.21	-245.07	-105.57	144.34	-133.26
08:40	-147.67	111.54	-245.07	-106.13	149.21	-134.38
08:50	-151.24	119.41	-240.7	-103.57	151.23	-135.44
09:00	-139.38	121.45	-247.45	-105.01	156.34	-139.38
09:10	-139.26	123.45	-241.07	-104.38	158.34	-139.26
09:20	-131.76	128.56	-240.76	-107.88	159.45	-131.76
09:30	-134.07	131.23	-240.83	-109.38	165.253	-134.07
09:40	-135.44	133.89	-240.95	-109.26	166.45	-135.44
09:50	-134.26	136.78	-242.45	-106.2	167.45	-134.26
10:00	-132.63	138.89	-250.13	-110.07	167.56	-132.63
10:10	-132.38	138.89	-245.07	-109.63	172.5	-132.38
10:20	-131.76	141.34	-245.07	-107.38	175.34	-131.76
10:30	-134.07	142.21	-240.7	-103.82	175.34	-134.07
10:40	-135.44	143.32	-247.45	-106.07	177	-135.44
10:50	-132.38	144.34	-241.07	-108.63	179.753	-132.38
11:00	-133.26	149.21	-240.76	-109.57	180.45	-133.26
11:10	-134.38	151.23	-240.83	-106.07	181.21	-134.38
11:20	-135.44	156.34	-240.95	-103.282	181.89	-135.44
11:30	-134.26	159.45	-240.45	-110.69	179.753	-134.26
11:40	-135.44	160.36	-237.88	-109.26	177	-135.44
11:50	-139.78	165.67	-240.39	-106.2	175.34	-133.26
12:00	-141.34	167.43	-242.45	-110.07	167.45	-133.63
12:10	-143.56	175.56	-250.13	-109.63	166.45	-132.38
12:20	-144.45	177.45	-245.07	-107.38	159.45	-131.26
12:30	-149.34	180.34	-240.83	-103.82	156.34	-131.76
12:40	-132.38	180.45	-240.95	-106.07	151.23	-134.07
12:50	-131.76	182.23	-242.45	-108.63	148.34	-135.44
13:00	-134.07	183.45	-250.13	-109.57	140.87	-132.38
13:10	-135.44	185.67	-240.95	-106.07	136.78	-134.07

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
13:20	-132.38	186.23	-250.13	-103.28	133.89	-131.76
13:30	-133.26	186.23	-245.07	-110.69	131.23	-134.07
13:40	-134.38	183.45	-245.07	-109.26	128.56	-135.44
13:50	-135.44	182.23	-240.70	-105.57	128.56	-135.69
14:00	-134.26	181.34	-247.45	-106.13	123.45	-135.44
14:10	-135.44	181.23	-241.07	-103.57	119.41	-135.63
14:20	-139.78	180.45	-240.76	-105.01	116.34	-135.38
14:30	-141.34	177.45	-240.83	-104.38	111.54	-135.26
14:40	-143.56	175.56	-240.95	-107.88	108.56	-131.76
14:50	-144.45	167.43	-240.45	-108.51	102.12	-134.07
15:00	-135.44	167.32	-237.88	-109.94	98.23	-135.44
15:10	-135.44	166.32	-240.39	-110.32	95.32	-135.44
15:20	-134.44	165.67	-230.08	-110.32	95.32	-134.44
15:30	-139.26	160.36	-224.88	-103.57	93.67	-135.44
15:40	-131.76	159.45	-226.01	-101.76	92.21	-133.38
15:50	-134.07	158.34	-241.26	-104.07	91.45	-135.44
16:00	-135.44	156.34	-242.45	-105.44	90.56	-135.44
16:10	-134.26	151.23	-240.01	-107.69	88.93	-132.26
16:20	-132.63	149.21	-231.26	-109.44	88.34	-135.63
16:30	-132.38	143.32	-242.2	-109.63	90.23	-132.38
16:40	-131.76	142.21	-240.7	-109.38	91.2	-132.26
16:50	-134.07	141.34	-242.57	-109.26	92.56	-131.76
17:00	-135.44	138.89	-239.26	-106.2	94.33	-134.07
17:10	-132.38	138.89	-243.32	-110.07	96.45	-135.44
17:20	-133.26	136.78	-240.95	-109.63	97.21	-134.8
17:30	-134.38	133.89	-238.01	-107.38	100.87	-132.26
17:40	-135.44	131.23	-241.01	-103.82	103.23	-131.76
17:50	-134.26	128.56	-243.7	-110.69	104.12	-134.07
18:00	-135.44	128.56	-243.95	-109.26	111.12	-135.44
18:10	-139.78	123.45	-244.13	-105.57	116.34	-133.63
18:20	-141.34	121.45	-250.39	-106.13	119.41	-134.38
18:30	-143.56	119.41	-244.51	-103.57	121.45	-132.26
18:40	-144.45	111.54	-248.01	-105.01	123.45	-131.44
18:50	-149.34	109.23	-246.63	-104.38	128.56	-133.26
19:00	-150.34	108.34	-248.01	-107.88	131.23	-134.44
19:10	-150.45	105.32	-246.95	-108.51	133.89	-135.44
19:20	-150.56	100.23	-249.7	-109.94	136.78	-132.26
19:30	-150.78	97.12	-246.76	-110.32	142.21	-133.63
19:40	-148.76	95.67	-245.7	-110.32	143.32	-131.38
19:50	-148.07	97.12	-247.57	-103.57	144.34	-136.26
20:00	-147.44	100.23	-241.63	-101.76	149.21	-131.76
20:10	-145.69	103.76	-243.57	-104.07	151.23	-134.07
20:20	-145.44	105.32	-247.51	-105.44	156.34	-135.44
20:30	-142.63	109.21	-246.13	-107.69	158.34	-132.38
20:40	-140.38	111.54	-245.82	-109.44	159.45	-132.26

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
20:50	-135.26	119.41	-249.01	-109.63	165.253	-131.26
21:00	-131.76	119.41	-246.7	-109.38	166.45	-132.76
21:10	-134.07	121.45	-241.76	-109.26	167.45	-134.07
21:30	-135.44	123.45	-246.07	-109.26	172.5	-135.44
21:40	-132.26	123.45	-246.82	-106.2	175.34	-132.26
21:50	-137.3	128.56	-240.89	-110.07	175.34	-137.3
22:00	-132.38	133.89	-245.2	-109.63	177	-132.38
22:10	-132.26	136.78	-250.13	-107.38	179.753	-132.26
22:20	-131.76	138.89	-245.07	-109.38	180.45	-131.76
22:30	-134.07	141.34	-245.07	-109.26	181.21	-134.07
22:40	-135.44	142.21	-240.7	-106.2	181.89	-135.44
22:50	-131.38	143.32	-247.45	-110.07	179.753	-131.38
23:00	-132.26	144.34	-241.07	-109.63	177	-132.26
23:10	-131.38	149.21	-240.76	-107.38	175.34	-131.38
23:20	-133.26	151.23	-240.83	-103.82	167.45	-132.76
23:30	-133.63	156.34	-240.95	-110.69	166.45	-133.38
23:40	-132.38	158.34	-240.45	-109.26	159.45	-131.26
23:50	-131.26	159.45	-237.88	-105.57	158.34	-134.44
00:00	-131.76	160.36	-240.39	-106.13	156.34	-135.44
00:10	-134.07	165.67	-230.08	-103.57	151.23	-133.26
00:20	-135.44	166.32	-224.88	-105.01	149.576	-132.63
00:30	-132.26	167.32	-226.01	-109.38	149.21	-135.38
00:40	-131.38	167.43	-241.26	-109.26	148.34	-131.26
00:50	-133.26	175.56	-242.45	-106.2	144.43	-131.76
01:00	-133.63	177.45	-250.13	-110.07	143.32	-134.07
01:10	-139.38	180.34	-245.07	-109.63	142.21	-135.44
01:20	-139.26	180.45	-245.07	-107.38	141.34	-132.38
01:30	-131.76	181.23	-240.7	-103.82	140.87	-132.26
01:40	-132.38	181.34	-247.45	-110.69	136.78	-133.63
01:50	-132.26	182.23	-241.07	-109.26	136.78	-133.38
02:00	-131.76	183.45	-240.76	-105.57	133.89	-134.26
02:10	-132.76	183.89	-240.83	-106.13	133.89	-132.76
02:20	-134.07	186.23	-240.95	-103.57	131.23	-134.07
02:30	-135.44	180.45	-240.45	-105.01	131.23	-135.44
02:40	-135.44	177.45	-237.88	-104.38	128.56	-135.44
02:50	-133.26	175.56	-240.39	-109.38	128.56	-133.26
03:00	-133.63	167.43	-242.45	-109.26	123.45	-133.63
03:10	-132.38	160.36	-250.13	-106.2	119.41	-132.38
03:20	-131.26	159.45	-245.07	-110.07	116.34	-131.26
03:30	-131.76	156.34	-245.07	-109.63	111.54	-131.76
03:40	-134.07	151.23	-240.7	-107.38	108.56	-134.07
03:50	-135.44	149.21	-247.45	-103.82	102.12	-135.44
04:00	-132.38	143.32	-241.07	-110.69	98.23	-132.38
04:10	-133.26	138.89	-240.76	-109.26	95.32	-133.26
04:20	-134.38	136.78	-240.83	-105.57	95.32	-134.38

Hora/profundidad	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
04:30	-135.44	133.89	-240.95	-106.13	93.67	-135.44
04:40	-134.26	131.23	-242.45	-103.57	92.21	-134.26
04:50	-132.63	128.56	-250.13	-105.01	91.45	-132.63
05:00	-132.38	123.45	-242.45	-104.38	90.56	-132.38
05:10	-131.76	111.54	-250.13	-107.88	92.23	-131.76
05:20	-134.07	109.23	-245.07	-109.38	93.34	-134.07
05:30	-135.44	108.34	-245.07	-109.26	95.45	-135.44
05:40	-132.38	103.76	-240.7	-106.2	98.56	-132.38
05:50	-133.26	100.23	-247.45	-110.07	102.34	-133.26
06:00	-134.38	97.12	-241.07	-109.63	105.81	-134.38
06:10	-135.44	95.67	-240.76	-107.38	108.23	-135.44
06:20	-134.26	93.67	-240.83	-113.82	111.23	-134.26
06:30	-135.44	90.2	-240.95	-110.69	118.23	-135.44
06:40	-136.78	88.23	-240.45	-109.26	121.23	-133.26
06:50	-140.45	86.1	-237.88	-105.57	123.23	-133.63
07:00	-142.56	84.56	-240.39	-106.13	126.76	-132.38
07:10	-146.45	87.23	-242.45	-103.57	131.41	-131.26
07:20	-150.34	91.23	-242.45	-105.01	136.81	-131.76
07:30	-132.63	94.34	-250.13	-104.38	140.23	-134.07
07:40	-132.38	96.12	-245.07	-107.88	145.34	-135.44
07:50	-131.76	97.12	-245.07	-109.13	148.67	-132.38
08:00	-134.07	100.23	-242.45	-108.69	148.45	-133.26
08:10	-135.44	103.76	-250.13	-107.94	150.34	-134.38
08:20	-132.38	105.32	-245.07	-108.38	151.23	-135.44
08:30	-138.56	109.21	-245.07	-106.51	152.34	-134.26
08:40	-140.23	111.54	-240.7	-106.19	152.4	-132.63
08:50	-142.34	119.41	-247.45	-103.82	155.23	-132.38
09:00	-144.34	123.45	-241.07	-102.19	157.45	-131.76

Tabla A.4.2 Valores de Eh (potenciales rédox corregidos, en mV) a las diferentes profundidades en los sistemas sin hidrofitas, RA₂ y RB₂ en el periodo de iluminación y de oscuridad

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
09:00	-220.07	-232.2	-264.64	-212.7	-223.4	-228.78
09:10	-219.76	-232.26	-264.76	-212.63	-223.34	-228.63
09:20	-219.07	-232.38	-264.82	-212.51	-223.51	-228.26
09:30	-219.26	-232.38	-264.64	-212.76	-223.57	-228.13
09:40	-219.57	-232.2	-264.95	-212.51	-223.32	-228.01
09:50	-219.82	-232.2	-264.92	-212.26	-223.4	-228.98
10:00	-219.63	-232.13	-264.97	-212.7	-223.7	-228.63
10:10	-218.88	-232.07	-264.95	-212.63	-223.76	-228.34
10:20	-219.07	-232.2	-265.07	-212.51	-223.45	-228.63
10:30	-218.76	-232.32	-264.81	-212.76	-223.26	-228.37

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
10:40	-219.38	-232.32	-264.97	-212.51	-222.88	-228.83
10:50	-218.76	-234.2	-264.92	-212.26	-223.13	-228.23
11:00	-218.88	-232.32	-264.87	-212.7	-223.13	-228.56
11:10	-218.57	-232.63	-264.86	-212.63	-223.38	-228.13
11:20	-219.32	-232.82	-264.89	-212.51	-223.13	-228.01
11:30	-218.88	-232.88	-264.95	-212.76	-223.01	-228.67
11:40	-218.88	-233.2	-264.87	-212.51	-223.38	-228.2
11:50	-218.63	-233.2	-264.77	-212.26	-223.38	-228.32
12:00	-218.57	-233.01	-264.96	-212.2	-223.51	-228.26
12:10	-219.45	-232.38	-264.95	-212.07	-223.13	-228.13
12:20	-219.82	-232.2	-264.32	-212.2	-223.13	-228.56
12:30	-219.2	-232.2	-264.26	-212.38	-223.38	-228.63
12:40	-219.45	-232.13	-264.26	-212.45	-223.13	-228.26
12:50	-219.13	-232.07	-264.32	-212.26	-223.01	-228.13
13:00	-219.95	-232.2	-264.39	-212.7	-223.38	-228.01
13:10	-219.76	-232.32	-264.64	-212.63	-223.38	-228.5
13:20	-219.38	-232.32	-264.76	-212.51	-223.51	-228.63
13:30	-219.63	-234.2	-264.64	-212.76	-223.45	-228.56
13:40	-219.01	-232.32	-264.76	-212.51	-223.82	-228.63
13:50	-219.07	-232.63	-264.82	-212.26	-223.13	-228.57
14:00	-218.32	-232.82	-264.64	-212.7	-223.38	-228.83
14:10	-218.45	-232.88	-264.95	-212.63	-223.13	-228.63
14:20	-218.88	-233.2	-264.64	-212.51	-223.01	-228.56
14:30	-219.01	-233.2	-264.76	-212.76	-223.38	-228.13
14:40	-218.88	-233.01	-264.82	-212.51	-223.38	-228.78
14:50	-219.01	-232.38	-264.64	-212.26	-223.51	-228.63
15:00	-220.07	-232.2	-264.95	-212.7	-223.45	-228.57
15:10	-219.76	-232.2	-264.92	-212.63	-223.82	-228.83
15:20	-219.07	-232.13	-264.97	-212.51	-223.13	-228.63
15:30	-219.26	-232.07	-264.95	-212.76	-223.13	-228.56
15:40	-219.57	-232.2	-265.07	-212.51	-223.38	-228.13
15:50	-219.82	-232.32	-264.81	-212.26	-223.13	-228.2
16:00	-219.63	-232.32	-264.97	-212.13	-223.01	-228.32
16:10	-218.88	-234.2	-264.92	-212.7	-223.38	-228.26
16:20	-219.07	-232.32	-264.87	-212.63	-223.38	-228.13
16:30	-218.76	-232.63	-264.86	-212.51	-223.51	-228.01
16:40	-219.38	-232.38	-264.89	-212.76	-223.45	-228.78
16:50	-218.76	-232.2	-264.95	-212.51	-223.82	-228.63
17:00	-218.88	-232.2	-264.87	-212.82	-223.4	-228.57
17:10	-218.57	-232.13	-264.77	-212.7	-223.34	-228.83
17:20	-219.32	-232.07	-264.96	-212.26	-223.51	-228.63
17:30	-218.88	-232.2	-264.95	-212.2	-223.57	-228.56
17:40	-218.88	-232.32	-264.32	-212.57	-223.32	-228.13
17:50	-218.63	-232.32	-264.26	-212.3	-223.26	-228.2
18:00	-218.57	-234.2	-264.26	-212.7	-223.7	-228.32

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
18:10	-219.45	-232.32	-264.32	-212.7	-223.76	-228.26
18:20	-219.82	-232.63	-264.39	-212.8	-223.45	-228.13
18:30	-219.2	-232.82	-264.64	-212.3	-223.26	-228.01
18:40	-219.45	-232.88	-264.76	-212.57	-222.88	-228.56
18:50	-219.13	-233.2	-264.64	-212.4	-223.13	-228.63
19:00	-219.95	-233.2	-264.76	-212.95	-223.13	-228.67
19:10	-219.76	-232.38	-264.82	-212.56	-223.38	-228.63
19:20	-219.38	-232.2	-264.64	-212.26	-223.13	-228.26
19:30	-219.63	-232.2	-264.95	-212.32	-223.01	-228.2
19:40	-219.01	-232.13	-264.64	-212.53	-223.38	-228.32
19:50	-219.07	-232.07	-264.76	-212.76	-223.38	-228.31
20:00	-218.32	-232.2	-264.82	-212.51	-223.51	-228.63
20:10	-218.45	-232.32	-264.64	-212.82	-223.4	-228.26
20:20	-218.88	-232.32	-264.95	-212.7	-223.34	-228.13
20:30	-219.01	-234.2	-264.92	-212.26	-223.51	-228.01
20:40	-218.88	-232.32	-264.97	-212.2	-223.57	-228.19
20:50	-219.01	-232.63	-264.95	-212.57	-223.32	-228.63
21:00	-220.07	-232.82	-265.07	-212.3	-223.26	-228.83
21:10	-219.76	-232.88	-264.81	-212.7	-223.7	-228.63
21:20	-219.07	-233.2	-264.97	-212.7	-223.76	-228.56
21:30	-219.26	-233.2	-264.92	-212.13	-223.45	-228.13
21:40	-219.57	-233.01	-264.87	-212.3	-223.26	-228.45
21:50	-219.82	-232.82	-264.86	-212.57	-222.88	-228.26
22:00	-219.63	-232.88	-264.89	-212.4	-223.13	-228.2
22:10	-218.88	-233.2	-264.95	-212.95	-223.13	-228.32
22:20	-219.07	-233.2	-264.87	-212.56	-223.38	-228.31
22:30	-218.76	-233.01	-264.77	-212.26	-223.13	-228.63
22:40	-219.38	-233.76	-264.96	-212.32	-223.01	-228.26
22:50	-218.76	-233.13	-264.95	-212.4	-223.38	-228.13
23:00	-218.88	-232.51	-264.32	-212.76	-223.38	-228.01
23:10	-218.57	-232.57	-264.26	-212.51	-223.51	-228.19
23:20	-219.32	-233.07	-264.26	-212.82	-223.38	-228.63
23:30	-218.88	-233.01	-264.32	-212.7	-223.45	-228.63
23:40	-218.88	-232.88	-264.39	-212.26	-223.51	-228.13
23:50	-218.63	-231.51	-264.64	-212.2	-223.57	-228.01
00:00	-218.57	-231.38	-264.76	-212.57	-223.32	-228.19
00:10	-219.45	-231.01	-264.64	-212.3	-223.2	-228.63
00:20	-219.82	-231.07	-264.76	-212.7	-223.38	-228.83
00:30	-219.2	-231.63	-264.82	-212.7	-223.2	-228.63
00:40	-219.45	-231.95	-264.64	-212.13	-223.51	-228.56
00:50	-219.13	-231.51	-264.95	-212.3	-223.07	-228.13
01:00	-219.95	-231.88	-264.64	-212.57	-223.45	-228.45
01:10	-219.76	-232.07	-264.76	-212.4	-223.57	-228.26
01:20	-219.38	-232.07	-264.82	-212.95	-223.26	-228.2
01:30	-219.63	-232.26	-264.64	-212.56	-223.38	-228.32

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
01:40	-219.01	-232.26	-264.95	-212.26	-223.01	-228.31
01:50	-219.07	-231.82	-264.92	-212.32	-223.4	-228.13
02:00	-220.07	-231.76	-264.97	-212.76	-223.34	-228.01
02:10	-219.76	-231.88	-264.95	-212.51	-223.51	-228.19
02:20	-219.07	-232.01	-265.07	-212.82	-223.57	-228.63
02:30	-219.26	-232.26	-264.81	-212.7	-223.32	-228.83
02:40	-219.57	-232.38	-264.97	-212.26	-223.26	-228.63
02:50	-219.82	-232.38	-264.92	-212.2	-223.7	-228.56
03:00	-219.63	-232.2	-264.87	-212.57	-223.76	-228.13
03:10	-218.88	-232.2	-264.86	-212.3	-223.45	-228.45
03:20	-219.07	-232.13	-264.89	-212.7	-223.26	-228.26
03:30	-218.76	-232.07	-264.95	-212.7	-223.3	-228.2
03:40	-219.38	-232.2	-264.87	-212.13	-223.13	-228.32
03:50	-218.76	-232.32	-264.77	-212.3	-223.13	-228.31
04:00	-218.88	-232.32	-264.96	-212.57	-223.38	-228.13
04:10	-218.57	-234.2	-264.95	-212.4	-223.13	-228.01
04:20	-219.32	-232.32	-264.32	-212.95	-223.01	-228.01
04:30	-218.88	-232.63	-264.26	-212.56	-223.38	-228.63
04:40	-218.88	-232.82	-264.26	-212.26	-223.38	-228.13
04:50	-218.63	-232.88	-264.32	-212.32	-223.51	-228.01
05:00	-218.57	-233.2	-264.39	-212.76	-223.2	-228.19
05:10	-219.45	-233.2	-264.64	-212.51	-223.38	-228.63
05:20	-219.82	-233.01	-264.76	-212.82	-223.2	-228.83
05:30	-219.2	-233.07	-264.64	-212.7	-223.51	-228.23
05:40	-219.45	-233.01	-264.76	-212.26	-223.07	-228.56
05:50	-219.13	-233.01	-264.82	-212.2	-223.45	-228.13
06:00	-219.95	-233.2	-264.64	-212.57	-223.57	-228.45
06:10	-219.76	-233.32	-264.95	-212.3	-223.26	-228.26
06:20	-219.38	-233.32	-264.64	-212.7	-223.38	-228.2
06:30	-219.63	-233.2	-264.76	-212.7	-223.01	-228.32
06:40	-219.01	-233.2	-264.82	-212.13	-223.4	-228.31
06:50	-219.07	-233.01	-264.64	-212.3	-223.34	-228.13
07:00	-219.57	-233.2	-264.95	-212.57	-223.51	-228.01
07:10	-219.82	-233.2	-264.92	-212.4	-223.57	-228.19
07:20	-219.63	-233.2	-264.97	-212.95	-223.2	-228.63
07:30	-218.88	-233.01	-264.95	-212.56	-223.38	-228.83
07:40	-219.07	-233.2	-265.07	-212.26	-223.2	-228.23
07:50	-218.76	-232.2	-264.81	-212.32	-223.51	-228.56
08:00	-219.38	-232.26	-264.97	-212.76	-223.07	-228.13
08:10	-218.76	-233.2	-264.92	-212.51	-223.45	-228.45
08:20	-218.88	-233.2	-264.87	-212.82	-223.57	-228.26
08:30	-219.26	-233.01	-264.86	-212.7	-223.26	-228.2
08:40	-219.57	-233.2	-264.89	-212.26	-223.38	-228.32
08:50	-219.82	-232.2	-264.95	-212.2	-223.01	-228.31
09:00	-219.63	-232.26	-264.87	-212.57	-223.4	-228.63

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
09:10	-218.88	-232.26	-264.77	-212.3	-223.34	-228.37
09:20	-219.07	-233.2	-264.96	-212.7	-223.51	-228.83
09:30	-218.76	-233.2	-264.95	-212.7	-223.57	-228.26
09:40	-219.38	-233.01	-264.32	-212.13	-223.01	-228.56
09:50	-218.76	-233.2	-264.26	-212.3	-223.38	-228.13
10:00	-218.88	-232.2	-264.26	-212.57	-223.38	-228.2
10:10	-218.57	-232.26	-264.32	-212.4	-223.51	-228.63
10:20	-219.32	-232.38	-264.39	-212.95	-223.2	-228.26
10:30	-218.88	-232.38	-264.64	-212.56	-223.38	-228.13
10:40	-218.88	-232.2	-264.76	-212.26	-223.2	-228.01
10:50	-218.63	-232.2	-264.64	-212.32	-223.51	-228.2
11:00	-218.57	-232.13	-264.76	-212.76	-223.07	-228.63
11:10	-219.45	-232.07	-264.82	-212.51	-223.45	-228.13
11:20	-219.82	-232.2	-264.64	-212.82	-223.57	-228.01
11:30	-219.2	-232.32	-264.95	-212.7	-223.26	-228.19
11:40	-219.45	-232.32	-264.89	-212.26	-223.38	-228.63
11:50	-219.13	-234.2	-264.89	-212.2	-223.01	-228.83
12:00	-219.95	-232.32	-264.76	-212.57	-223.4	-228.26
12:10	-219.76	-232.63	-264.76	-212.3	-223.34	-228.56
12:20	-219.38	-232.82	-264.64	-212.7	-223.51	-228.13
12:30	-219.63	-232.88	-264.89	-212.7	-223.57	-228.45
12:40	-219.01	-233.2	-264.76	-212.13	-223.2	-228.26
12:50	-219.07	-233.2	-264.64	-212.3	-223.38	-228.2
13:00	-218.32	-233.01	-264.64	-212.57	-223.2	-228.32
13:10	-218.45	-233.2	-264.76	-212.4	-223.51	-228.31
13:20	-220.07	-232.20	-264.64	-212.70	-223.40	-228.78
13:30	-219.76	-232.26	-264.76	-212.63	-223.34	-228.63
13:40	-219.07	-232.38	-264.82	-212.51	-223.51	-228.26
13:50	-219.26	-232.38	-264.64	-212.76	-223.57	-228.13
14:00	-219.57	-232.2	-264.95	-212.51	-223.32	-228.01
14:10	-219.82	-232.2	-264.92	-212.26	-223.4	-228.98
14:20	-219.63	-232.13	-264.97	-212.7	-223.7	-228.63
14:30	-218.88	-232.07	-264.95	-212.63	-223.76	-228.34
14:40	-219.07	-232.2	-265.07	-212.51	-223.45	-228.63
14:50	-218.76	-232.32	-264.81	-212.76	-223.26	-228.35
15:00	-219.38	-232.32	-264.97	-212.51	-222.88	-228.83
15:10	-218.76	-234.2	-264.92	-212.26	-223.13	-228.26
15:20	-218.88	-232.32	-264.87	-212.7	-223.13	-228.56
15:30	-218.57	-232.63	-264.86	-212.63	-223.38	-228.13
15:40	-219.32	-232.82	-264.89	-212.51	-223.13	-228.01
15:50	-218.88	-232.88	-264.95	-212.76	-223.01	-228.67
16:00	-218.88	-233.2	-264.87	-212.51	-223.38	-228.2
16:10	-218.63	-233.2	-264.77	-212.26	-223.38	-228.32
16:20	-218.57	-233.01	-264.96	-212.2	-223.51	-228.26
16:30	-219.45	-232.38	-264.95	-212.07	-223.13	-228.13

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
16:40	-219.82	-232.2	-264.32	-212.2	-223.13	-228.56
16:50	-219.2	-232.2	-264.26	-212.38	-223.38	-228.63
17:00	-219.45	-232.13	-264.26	-212.45	-223.13	-228.26
17:10	-219.13	-232.07	-264.32	-212.26	-223.01	-228.13
17:20	-219.95	-232.2	-264.39	-212.7	-223.38	-228.01
17:30	-219.76	-232.32	-264.64	-212.63	-223.38	-228.5
17:40	-219.38	-232.32	-264.76	-212.51	-223.51	-228.63
17:50	-219.63	-234.2	-264.64	-212.76	-223.45	-228.56
18:00	-219.01	-232.32	-264.76	-212.51	-223.82	-228.63
18:10	-219.07	-232.63	-264.82	-212.26	-223.13	-228.35
18:20	-218.32	-232.82	-264.64	-212.7	-223.38	-228.83
18:30	-218.45	-232.88	-264.95	-212.63	-223.13	-228.26
18:40	-218.88	-233.2	-264.64	-212.51	-223.01	-228.56
18:50	-219.01	-233.2	-264.76	-212.76	-223.38	-228.13
19:00	-218.88	-233.01	-264.82	-212.51	-223.38	-228.78
19:10	-219.01	-232.38	-264.64	-212.26	-223.51	-228.63
19:20	-220.07	-232.2	-264.95	-212.7	-223.45	-228.35
19:30	-219.76	-232.2	-264.92	-212.63	-223.82	-228.83
19:40	-219.07	-232.13	-264.97	-212.51	-223.13	-228.26
19:50	-219.26	-232.07	-264.95	-212.76	-223.13	-228.56
20:00	-219.57	-232.2	-265.07	-212.51	-223.38	-228.13
20:10	-219.82	-232.32	-264.81	-212.26	-223.13	-228.2
20:20	-219.63	-232.32	-264.97	-212.13	-223.01	-228.32
20:30	-218.88	-234.2	-264.92	-212.7	-223.38	-228.26
20:40	-219.07	-232.32	-264.87	-212.63	-223.38	-228.13
20:50	-218.76	-232.63	-264.86	-212.51	-223.51	-228.01
21:00	-219.38	-232.38	-264.89	-212.76	-223.45	-228.78
21:10	-218.76	-232.2	-264.95	-212.51	-223.82	-228.63
21:20	-218.88	-232.2	-264.87	-212.82	-223.4	-228.35
21:30	-218.57	-232.13	-264.77	-212.7	-223.34	-228.83
21:40	-219.32	-232.07	-264.96	-212.26	-223.51	-228.26
21:50	-218.88	-232.2	-264.95	-212.2	-223.57	-228.56
22:00	-218.88	-232.32	-264.32	-212.57	-223.32	-228.13
22:10	-218.63	-232.32	-264.26	-212.3	-223.26	-228.2
22:20	-218.57	-234.2	-264.26	-212.7	-223.7	-228.32
22:30	-219.45	-232.32	-264.32	-212.7	-223.76	-228.26
22:40	-219.82	-232.63	-264.39	-212.8	-223.45	-228.13
22:50	-219.2	-232.82	-264.64	-212.3	-223.26	-228.01
23:00	-219.45	-232.88	-264.76	-212.57	-222.88	-228.56
23:10	-219.13	-233.2	-264.64	-212.4	-223.13	-228.63
23:20	-219.95	-233.2	-264.76	-212.95	-223.13	-228.67
23:30	-219.76	-232.38	-264.82	-212.56	-223.38	-228.63
23:40	-219.38	-232.2	-264.64	-212.26	-223.13	-228.26
23:50	-219.63	-232.2	-264.95	-212.32	-223.01	-228.2
00:00	-219.01	-232.13	-264.64	-212.53	-223.38	-228.32

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
00:10	-219.07	-232.07	-264.76	-212.76	-223.38	-228.31
00:20	-218.32	-232.2	-264.82	-212.51	-223.51	-228.63
00:30	-218.45	-232.32	-264.64	-212.82	-223.4	-228.26
00:40	-218.88	-232.32	-264.95	-212.7	-223.34	-228.13
00:50	-219.01	-234.2	-264.92	-212.26	-223.51	-228.01
01:00	-218.88	-232.32	-264.97	-212.2	-223.57	-228.19
01:10	-219.01	-232.63	-264.95	-212.57	-223.32	-228.63
01:20	-220.07	-232.82	-265.07	-212.3	-223.26	-228.83
01:30	-219.76	-232.88	-264.81	-212.7	-223.7	-228.23
01:40	-219.07	-233.2	-264.97	-212.7	-223.76	-228.56
01:50	-219.26	-233.2	-264.92	-212.13	-223.45	-228.13
02:00	-219.57	-233.01	-264.87	-212.3	-223.26	-228.45
02:10	-219.82	-232.82	-264.86	-212.57	-222.88	-228.26
02:20	-219.63	-232.88	-264.89	-212.4	-223.13	-228.2
02:30	-218.88	-233.2	-264.95	-212.95	-223.13	-228.32
02:40	-219.07	-233.2	-264.87	-212.56	-223.38	-228.31
02:50	-218.76	-233.01	-264.77	-212.26	-223.13	-228.63
03:00	-219.38	-233.76	-264.96	-212.32	-223.01	-228.26
03:10	-218.76	-233.13	-264.95	-212.4	-223.38	-228.13
03:20	-218.88	-232.51	-264.32	-212.76	-223.38	-228.01
03:30	-218.57	-232.57	-264.26	-212.51	-223.51	-228.19
03:40	-219.32	-233.07	-264.26	-212.82	-223.38	-228.63
03:50	-218.88	-233.01	-264.32	-212.7	-223.45	-228.63
04:00	-218.88	-232.88	-264.39	-212.26	-223.51	-228.13
04:10	-218.63	-231.51	-264.64	-212.2	-223.57	-228.01
04:20	-218.57	-231.38	-264.76	-212.57	-223.32	-228.19
04:30	-219.45	-231.01	-264.64	-212.3	-223.2	-228.63
04:40	-219.82	-231.07	-264.76	-212.7	-223.38	-228.83
04:50	-219.2	-231.63	-264.82	-212.7	-223.2	-228.63
05:00	-219.45	-231.95	-264.64	-212.13	-223.51	-228.56
05:10	-219.13	-231.51	-264.95	-212.3	-223.07	-228.13
05:20	-219.95	-231.88	-264.64	-212.57	-223.45	-228.45
05:30	-219.76	-232.07	-264.76	-212.4	-223.57	-228.26
05:40	-219.38	-232.07	-264.82	-212.95	-223.26	-228.2
05:50	-219.63	-232.26	-264.64	-212.56	-223.38	-228.32
06:00	-219.01	-232.26	-264.95	-212.26	-223.01	-228.31
06:10	-219.07	-231.82	-264.92	-212.32	-223.4	-228.13
06:20	-220.07	-231.76	-264.97	-212.76	-223.34	-228.01
06:30	-219.76	-231.88	-264.95	-212.51	-223.51	-228.19
06:40	-219.07	-232.01	-265.07	-212.82	-223.57	-228.63
06:50	-219.26	-232.26	-264.81	-212.7	-223.32	-228.83
07:00	-219.57	-232.38	-264.97	-212.26	-223.26	-228.63
07:10	-219.82	-232.38	-264.92	-212.2	-223.7	-228.56
07:20	-219.63	-232.2	-264.87	-212.57	-223.76	-228.13
07:30	-218.88	-232.2	-264.86	-212.3	-223.45	-228.45

Hora/profundidad	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
07:40	-219.07	-232.13	-264.89	-212.7	-223.26	-228.26
07:50	-218.76	-232.07	-264.95	-212.7	-223.3	-228.2
08:00	-219.38	-232.2	-264.87	-212.13	-223.13	-228.32
08:10	-218.76	-232.32	-264.77	-212.3	-223.13	-228.31
08:20	-218.88	-232.32	-264.96	-212.57	-223.38	-228.13
08:30	-218.57	-234.2	-264.95	-212.4	-223.13	-228.01
08:40	-219.32	-232.32	-264.32	-212.95	-223.01	-228.01
08:50	-218.88	-232.63	-264.26	-212.56	-223.38	-228.63
09:00	-218.88	-232.82	-264.26	-212.26	-223.38	-228.13

Tabla A.4.3 Valores del potencial óxido-reducción, pOR o E_h , en mV, del sistema experimental y del potenciómetro comercial utilizando una solución estándar pH=4 saturado con quinhidrona, $E_{h-20^\circ\text{C}} = 259.3$ mV

Posición del electrodo en el reactor y a una profundidad	Potenciómetro comercial, promedios	Sistema experimental, promedios
RA1 _{2 cm}	233.43	239.5
RA1 _{15 cm}	234.56	241.33
RA1 _{30 cm}	232.86	238.55
RA2 _{2 cm}	235.55	239.42
RA2 _{15 cm}	234.21	243.11
RA2 _{30 cm}	237.33	238.56
RB1 _{2 cm}	236.43	240.11
RB1 _{15 cm}	235.42	241.53
RB1 _{30 cm}	236.21	242.33
RB2 _{2 cm}	235.54	240.44
RB2 _{15 cm}	235.11	243.11
RB2 _{30 cm}	235.4	241.5

Nota: los valores de E_h promedio fueron calculados realizando tres mediciones de cada electrodo con la solución estándar recién preparada. Las variaciones en los valores tabulados se deben a la temperatura a la cual se hizo la medición ($T=24^\circ\text{C}$) y a la calidad de la

quinhidrona, por lo que se considera que la variación de estos respecto al valor estándar es menor.

Tabla A.4.4 Valores de la DQO (mg O₂/L) en el influente y a la salida de cada reactor

FECHA	DQO (mg O ₂ /L)				
	ARS	RA ₁	RA ₂	RB ₁	RB ₂
30-Ago-06	224.5	40.2	80.7	28.6	76.7
31-Ago-06	224.5	41.7	72.1	38.3	73.0
01-Sep-06	223.3	42.5	79.5	34.1	78.0
06-Sep-06	221.7	41.7	83.2	36.8	72.5
07-Sep-06	220.2	45.4	85.2	35.1	77.6
08-Sep-06	225.3	30.9	86.7	34.2	109.8
13-Sep-06	224.7	39.2	78.8	32.7	93.2
14-Sep-06	221.2	40.2	78.5	35.1	33.2
20-Sep-06	223.8	42.6	86.8	35.1	22.6
21-Sep-06	225	45.4	99.8	32.1	129.8
22-Sep-06	218.7	41.0	82.1	29.8	114.3
27-Sep-06	221.2	33.2	88.7	34.3	84.3
28-Sep-06	223.7	43.2	85.0	35.4	51
29-Sep-06	225.6	48.3	79.8	32.1	122.1
04-Oct-06	225.7	38.7	82.1	32.8	51
05-Oct-06	226.6	39.8	76.5	38.7	48.7
06-Oct-06	228	36.5	84.3	38.3	82.1
11-Oct-06	225.7	41.7	81.0	39.8	95.4
12-Oct-06	227.6	44.3	87.6	31.0	26.8
13-Oct-06	230	41.5	84.3	46.5	34.3
18-Oct-06	221.2	39.6	88.7	35.4	49.5
19-Oct-06	225.4	40.4	95.4	38.7	23.4
20-Oct-06	228.7	41.0	81.0	33.2	28.5
25-Oct-06	207.6	44.3	83.2	35.0	20.5
26-Oct-06	223.2	40.5	82.1	37.6	18.0
27-Oct-06	221.6	41.8	72.1	36.5	23.0
3-Nov-06	228	42.8	79.3	33.2	46.7

Tabla A.4.5 Valores de pH en el influente y a la salida de cada reactor

FECHA	pH				
	Influente (ARS)	RA ₁	RA ₂	RB ₁	RB ₂
30-Ago-06	6.17	5.48	5.32	5.75	5.49
31-Ago-06	6.49	5.89	5.91	5.95	5.8
01-Sep-06	6.17	5.48	5.32	5.75	5.49
06-Sep-06	6.88	6.24	6.37	6.3	5.85
07-Sep-06	6.87	6.37	6.34	6.3	6.44
08-Sep-06	6.97	6.28	6.35	6.37	6.26
13-Sep-06	6.97	6.28	6.35	6.37	6.26
14-Sep-06	6.96	6.36	6.36	6.28	6.22
20-Sep-06	7.02	6.26	6.28	6.28	6.21
21-Sep-06	7.01	5.99	6.12	6.19	6.22
22-Sep-06	7.19	6.22	6.21	6.17	6.22
27-Sep-06	7.03	6.01	6.28	6.33	6.23
28-Sep-06	7.09	6.22	6.31	6.36	6.19
29-Sep-06	7.08	6.08	6.23	6.27	6.17
04-Oct-06	7.12	6.17	6.3	6.32	6.29
05-Oct-06	7	6.1	6.3	6.2	6.07
06-Oct-06	6.91	5.99	6.17	6.14	6.01
11-Oct-06	7.14	6.42	6.18	6.36	6.37
12-Oct-06	7.13	6.39	6.24	6.31	6.33
13-Oct-06	6.92	6.21	6.25	6.29	6.34
18-Oct-06	7.08	6.45	6.23	6.34	6.37
19-Oct-06	7.15	6.47	6.29	6.43	6.49
20-Oct-06	6.99	6.41	6.22	6.28	6.15
25-Oct-06	6.83	6.45	6.29	6.31	6.28
26-Oct-06	7.16	6.36	6.3	6.28	6.31
27-Oct-06	7.32	6.3	6.33	6.43	6.34
3-Nov-06	7.06	6.31	6.24	6.22	6.33

Tabla A.4.6 Valores de temperatura (°C) en el influente y a la salida de cada reactor

FECHA	Temperatura (°C)				
	Influente (ARS)	RA ₁	RA ₂	RB ₁	RB ₂
30-Ago-06	20.2	22.9	22.8	22.8	22.9
31-Ago-06	19.2	22.9	22.7	22.9	22.7
01-Sep-06	18.7	21.9	21.8	22	22.1
06-Sep-06	18.4	21.5	21.7	21.6	20.9
07-Sep-06	18.5	22.9	22.9	22.7	22.8
08-Sep-06	21.9	21.7	22.1	21.8	21.9
13-Sep-06	19.4	22.2	22.3	22.1	21.9
14-Sep-06	18.1	20.8	20.3	19.9	19.9
20-Sep-06	20.9	23.9	23.8	24	23.9
21-Sep-06	20.6	23.5	23.4	23.1	24
22-Sep-06	17.9	19.1	19	19.7	18.8
27-Sep-06	18	19.5	19.2	19.7	19.3
28-Sep-06	18.6	21	19.9	19.9	19.5
29-Sep-06	19.1	21.7	21.2	21.2	21.1
04-Oct-06	18.9	20.9	20.8	20.6	20.9
05-Oct-06	18.9	21.30	21.20	20.90	20.90
06-Oct-06	18.9	21.6	21.7	21.3	21.4
11-Oct-06	19.2	21	21.1	21.9	20.8
12-Oct-06	20	21.9	22.3	22.4	21.7
13-Oct-06	19.3	22.5	22.2	21.5	21.5
18-Oct-06	19.2	20.5	20.5	20.4	20.7
19-Oct-06	19.2	20.5	20.5	20.4	20.7
20-Oct-06	18.7	22.8	22.5	22.9	22.6
25-Oct-06	19.2	22.4	21.9	22.8	23
26-Oct-06	21	22.2	22.1	22.2	22.2
27-Oct-06	19.4	21.5	21.9	21.5	22
3-Nov-06	21	22.2	22.1	22.2	22.2

Anexo 5. Análisis estadístico

A continuación se resume el análisis estadístico necesario para asegurar que los resultados obtenidos de la parte experimental son estadísticamente significativos. Se manejó el programa Statgraphics Plus para realizar el análisis de varianza (ANDEVA) donde los factores considerados fueron: reactor (reactores con planta, RA₁ y RB₁, y reactores sin planta, RA₂ y RB₂), estado lumínico (iluminación y oscuridad) y profundidad (2,15 y 30 cm); considerando como variables de respuesta al potencial rédox, DQO y al porcentaje de remoción de materia orgánica (medida como DQO), pH y temperatura. Este análisis permitió determinar el efecto estadísticamente significativo que tienen los factores en la variable de respuesta a un nivel de confianza del 95% y 99%. Además se utilizó una hoja de Excel para el cálculo de las funciones: promedio, desviación estándar, el máximo y mínimo valor de la serie de datos obtenidos en las mediciones analíticas que se realizaron durante la investigación.

Análisis multifactorial de varianza del potencial rédox a un nivel de confianza del 95% y 99%

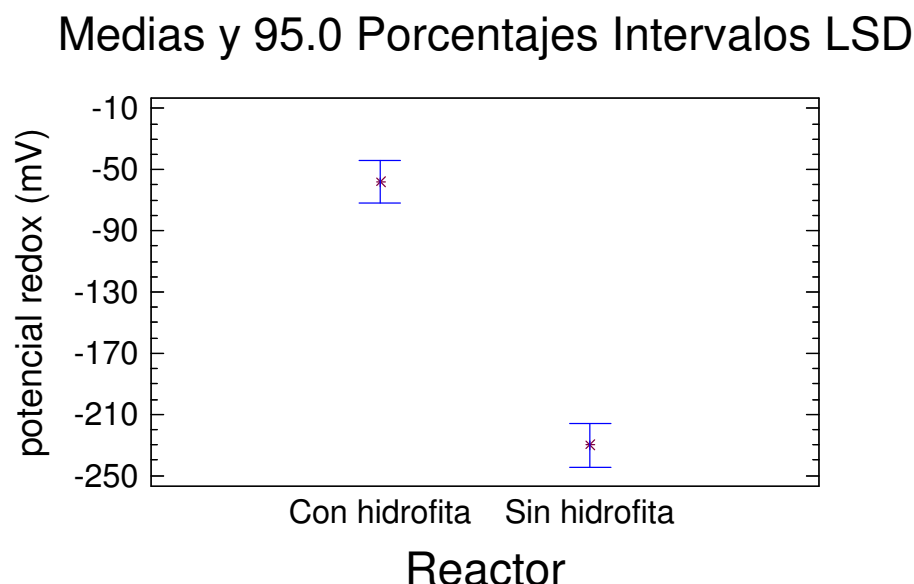
Tabla A.5.1 Tabla ANDEVA del potencial rédox a un nivel de confianza del 95%

Análisis de la Varianza parapotencial redox - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Reactor	177711.0	1	177711.0	172.72	0.0000
B:Profundidad	124439.0	2	62219.4	60.47	0.0000
C:estado lumínico	62.578	1	62.578	0.06	0.0088
INTERACCIONES					
AB	111179.0	2	55589.4	54.03	0.0000
AC	62.4462	1	62.4462	0.06	0.8090
BC	119.508	2	59.7539	0.06	0.9438
RESIDUOS	14404.1	14	1028.87		
TOTAL (CORREGIDO)	427977.0	23			

La tabla ANDEVA descompone la variabilidad del potencial rédox en las contribuciones debidas a los factores: reactor (con hidrofita o sin hidrofita), profundidad (2, 15 y 30 cm) y estado lumínico (iluminación u oscuridad). Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. **Dado que los 3 p-valores son inferiores a 0.05 estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en el potencial rédox para un nivel de confianza del 95%.**

Figura A.5.1 Gráfica de medias del potencial rédox a un nivel de confianza del 95%



Estos intervalos determinan que las medias son significativamente diferentes unas de otras a un nivel de confianza del 95%.

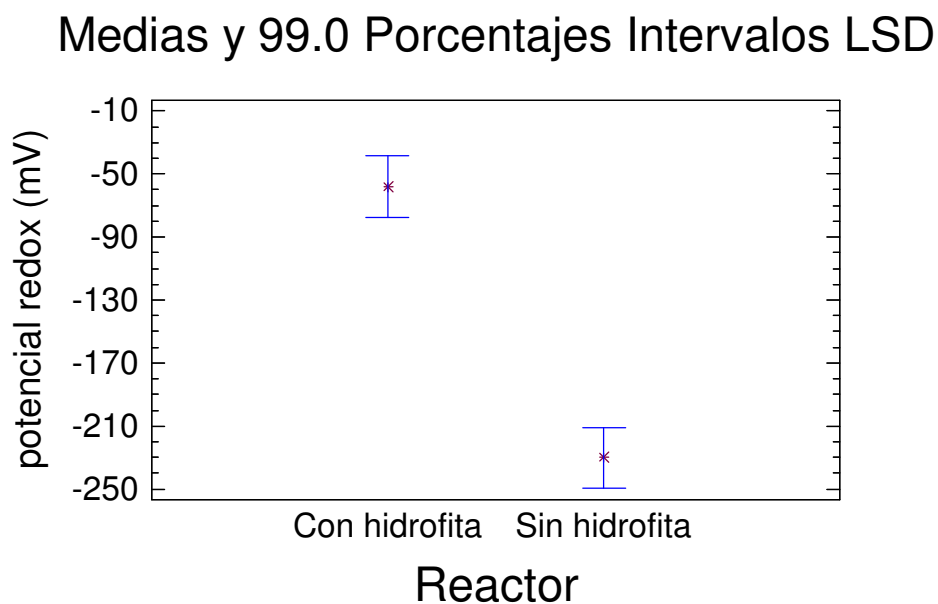
Tabla A.5.2 Tabla ANDEVA del potencial rédox a un nivel de confianza del 99%

Análisis de la Varianza para potencial redox - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Reactor	177711.0	1	177711.0	172.72	0.0000
B:Profundidad	124439.0	2	62219.4	60.47	0.0000
C:estado lumínico	62.578	1	62.578	0.06	0.0088
INTERACCIONES					
AB	111179.0	2	55589.4	54.03	0.0000
AC	62.4462	1	62.4462	0.06	0.8090
BC	119.508	2	59.7539	0.06	0.9438
RESIDUOS	14404.1	14	1028.87		
TOTAL (CORREGIDO)	427977.0	23			

La tabla ANDEVA descompone la variabilidad del potencial rédox en las contribuciones debidas a los factores: reactor (con hidrofita o sin hidrofita), profundidad (2, 15 y 30 cm) y estado lumínico (iluminación u oscuridad). Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. **Dado que los 3 p-valores son inferiores a 0.01 estos factores tienen efecto estadísticamente significativa en el potencial rédox para un nivel de confianza del 99%.**

Figura A.5.2 Gráfica de medias del potencial rédox a un nivel de confianza del 99%



Estos intervalos determinan que las medias son significativamente diferentes unas de otras a un nivel de confianza del 99%.

Tabla A.5.3 Funciones estadísticas para la serie de valores de pOR, en mV, de los reactores con hidrofitas, RA₁ y RB₁, a las profundidades de 2, 15 y 30 cm, en el periodo de iluminación y oscuridad

	RA ₁			RB ₁		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
promedio	-133.62	146.71	-242.78	-107.90	167.07	-133.69
desviación estándar	±8.26	±23.06	±4.58	±4.17	±18.17	±1.56
máximo	-110.00	176.50	-224.88	-101.44	198.30	-131.26
mínimo	-158.78	87.89	-250.39	-127.19	125.06	-139.38

Tabla A.5.4 Funciones estadísticas para la serie de valores de pOR, en mV, de los reactores sin hidrofitas, RA₂ y RB₂, a las profundidades de 2, 15 y 30 cm, en el periodo de iluminación y oscuridad

	RA ₂			RB ₂		
	2 cm	15 cm	30 cm	2 cm	15 cm	30 cm
promedio	-219.19	-232.60	-264.76	-212.51	-223.35	-228.36
desviación estándar	±0.44	±0.59	±0.22	±0.22	±0.20	±0.24
máximo	-218.32	-231.01	-264.26	-212.07	-222.88	-228.01
mínimo	-220.07	-234.20	-265.07	-212.95	-223.82	-228.98

Análisis de varianza simple de la DQO en el efluente a un nivel de confianza del 95% y 99%

Tabla A.5.5 Tabla ANDEVA de la DQO a un nivel de confianza del 95%

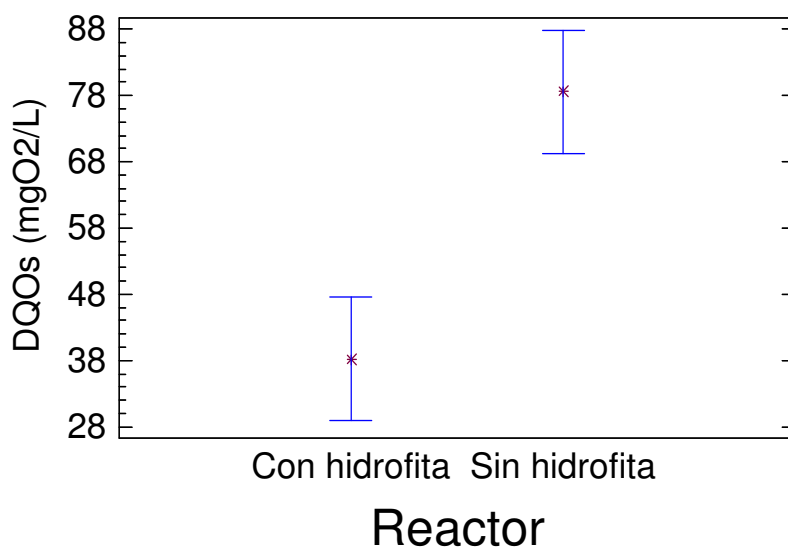
Tabla ANOVA para DQOs según Reactor

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	G1	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1637.01	1	1637.01	87.24	0.0113
Intra grupos	37.5273	2	18.7637		
Total (Corr.)	1674.54	3			

La tabla ANDEVA descompone la varianza de DQO en dos componentes: un componente entre grupos (reactor con hidrofita RA₁ y sin hidrofita RA₂) y un componente dentro de los grupos (replica de los reactores con hidrofita y sin hidrofita, RB₁ y RB₂). El F-ratio, que en este caso es igual a 87.24, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. **Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0.05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las DQO promedio en los reactores con hidrofita y los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 95%.**

Figura A.5.3 Gráfica de medias de la DQO a un nivel de confianza del 95%

Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD



Estos intervalos determinan que las medias son significativamente diferentes una de otra a un nivel de confianza del 95%.

Tabla A.5.6 Tabla ANDEVA de la DQO a un nivel de confianza del 99%

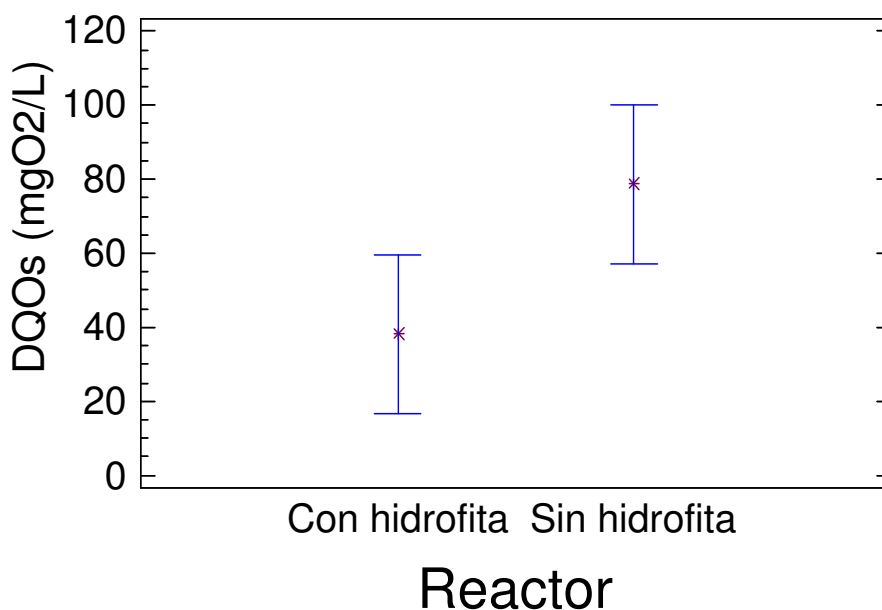
Tabla ANOVA para DQOs según Reactor

Análisis de la Varianza						
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor	
Entre grupos	1637.01	1	1637.01	87.24	0.0113	
Intra grupos	37.5273	2	18.7637			
Total (Corr.)	1674.54	3				

La tabla ANDEVA descompone la varianza de DQO en dos componentes: un componente entre grupos (reactor con hidrofita RA₁ y sin hidrofita RA₂) y un componente dentro de los grupos (replica de los reactores con hidrofita y sin hidrofita, RB₁ y RB₂). El F-ratio, que en este caso es igual a 87.24, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. **Puesto que el p-valor del test F es mayor a 0.01, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las DQO promedio en los reactores con hidrofita y los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 99%.**

Figura A.5.4 Gráfica de medias de la DQO a un nivel de confianza del 99%

Medias y 99.0 Porcentajes Intervalos LSC



Estos intervalos determinan que las medias no son significativamente diferentes una de otra a un nivel de confianza del 99%.

Tabla A.5.7 Funciones estadísticas para la serie de valores de la DQO en mg O₂/L

	promedio	desviación estándar	máximo	mínimo	% eficiencia de remoción
Influente (ARS)	223.8	±4.2	230.4	207.6	-
RA₁	41.1	±3.5	48.3	30.9	81
RA₂	81.8	±4.6	99.8	72.1	63
RB₁	35.2	±3.6	46.5	28.6	84
RB₂	75.4	±4.1	86.5	68.5	66

Análisis de varianza simple del porcentaje de remoción de materia orgánica (medida como DQO) a un nivel de confianza del 95% y 99%

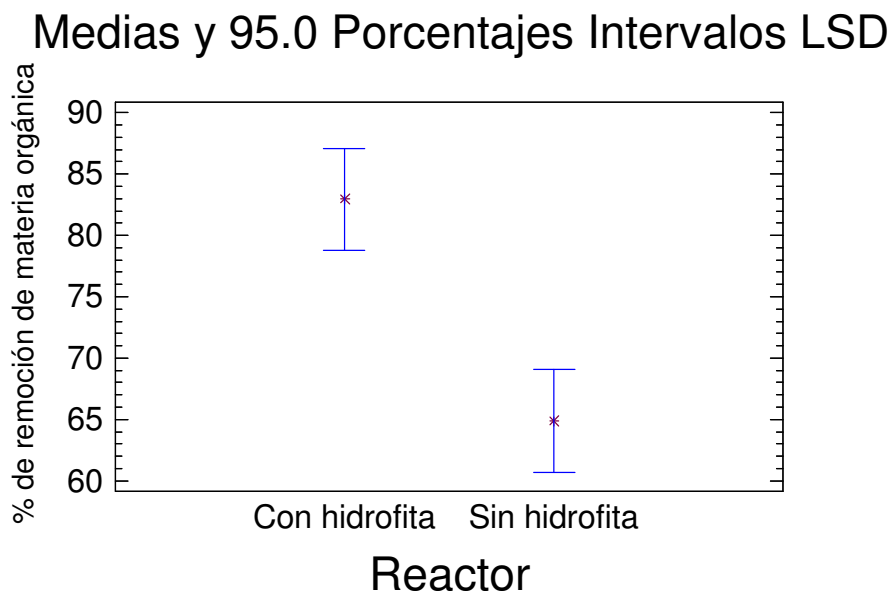
Tabla A.5.8 Tabla ANDEVA del porcentaje de remoción materia orgánica a un nivel de confianza del 95%

Tabla ANOVA para % remoción de materia orgánica según Reactor

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	326.706	1	326.706	87.20	0.0113
Intra grupos	7.49345	2	3.74672		
Total (Corr.)	334.199	3			

La tabla ANDEVA descompone la varianza del % de remoción materia orgánica en dos componentes: un componente entre grupos (reactor con hidrofita RA₁ y sin hidrofita RA₂) y un componente dentro de los grupos (replica de los reactores con hidrofita y sin hidrofita, RB₁ y RB₂). El F-ratio, que en este caso es igual a 87.20, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. **Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0.05, hay diferencia estadísticamente significativa entre el % de remoción de materia orgánica promedio en los reactores con hidrofita y los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 95%.**

Figura A.5.5 Gráfica de medias del porcentaje de remoción de materia orgánica a un nivel de confianza del 95%



Estos intervalos determinan que las medias son significativamente diferentes una de otra a un nivel de confianza del 95%.

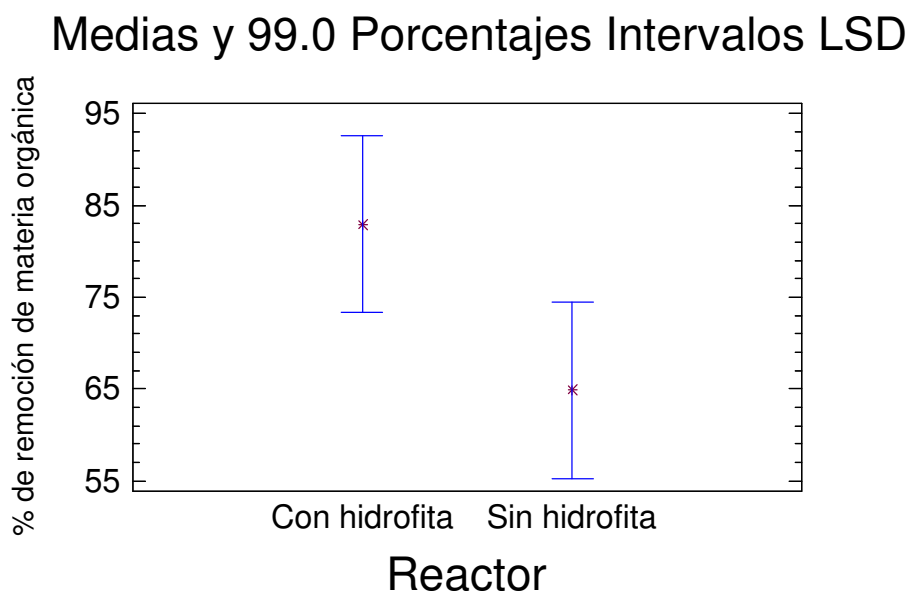
Tabla A.5.9 Tabla ANDEVA del porcentaje de remoción materia orgánica a un nivel de confianza del 99%

Tabla ANOVA para % remoción de materia orgánica según Reactor

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	326.706	1	326.706	87.20	0.0113
Intra grupos	7.49345	2	3.74672		
Total (Corr.)	334.199	3			

La tabla ANDEVA descompone la varianza del porcentaje de remoción de materia orgánica (medida como DQO) en dos componentes: un componente entre grupos (reactor con hidrofita RA₁ y sin hidrofita RA₂) y un componente dentro de los grupos (replica de los reactores con hidrofita y sin hidrofita, RB₁ y RB₂). El F-ratio, que en este caso es igual a 87.20, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. **Puesto que el p-valor del test F es mayor a 0.01, no hay diferencia estadísticamente significativa entre el % de remoción de materia orgánica promedio en los reactores con hidrofita y los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 99%.**

Figura A.5.6 Gráfica de medias del porcentaje de remoción de materia orgánica a un nivel de confianza del 99%



Estos intervalos determinan que las medias no son significativamente diferentes una de otra a un nivel de confianza del 99%.

Análisis de varianza simple del pH a un nivel de confianza del 95% y 99%

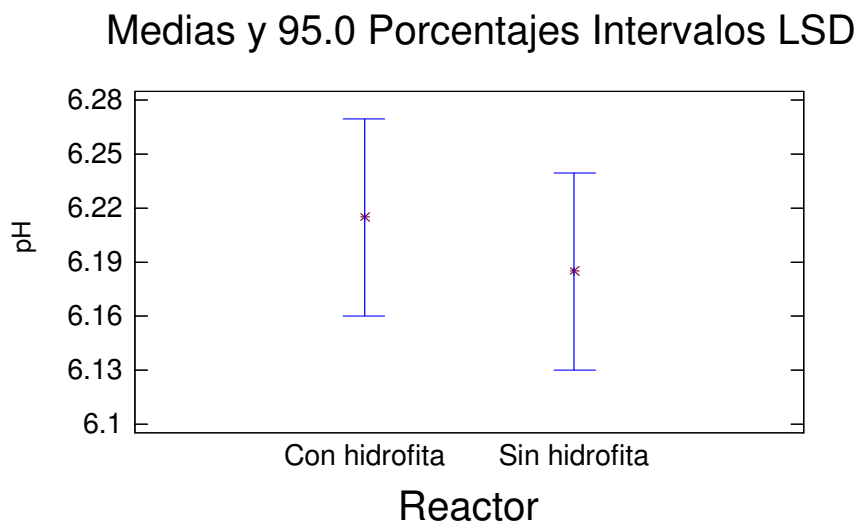
Tabla A.5.10 Tabla ANDEVA del pH a un nivel de confianza del 95% y 99%

Tabla ANOVA para pH según Reactor

Análisis de la Varianza						
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor	
Entre grupos	0.0009	1	0.0009	1.38	0.3604	
Intra grupos	0.0013	2	0.00065			
Total (Corr.)	0.0022	3				

La tabla ANDEVA descompone la varianza del pH en dos componentes: un componente entre grupos (reactor con hidrofita RA₁ y sin hidrofita RA₂) y un componente dentro de los grupos (replica de los reactores con hidrofita y sin hidrofita, RB₁ y RB₂). El F-ratio, que en este caso es igual a 1.38, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. **Puesto que el p-valor del test F es mayor a 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre el pH en los reactores con hidrofita y los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 95%. Por tanto, es de esperarse que no hay una diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 99%, puesto que el p-valor es mayor a 0.01.**

Figura A.5.7 Gráfica de medias del pH a un nivel de confianza del 95%



Estos intervalos determinan que las medias no son significativamente diferentes una de otra a un nivel de confianza del 95%.

Tabla A.5.11 Funciones estadísticas para la serie de valores de pH

	promedio	desviación estándar	máximo	mínimo
Influente (ARS)	6.95	± 0.27	7.32	6.17
RA₁	6.19	± 0.26	6.47	5.48
RA₂	6.19	± 0.27	6.37	5.32
RB₁	6.24	± 0.17	6.43	5.75
RB₂	6.18	± 0.25	6.49	5.49

Análisis de varianza simple de la temperatura a un nivel de confianza del 95% y 99%

Tabla A.5.12 Tabla ANDEVA de la temperatura a un nivel de confianza del 95% y 99%

Tabla ANOVA para temperatura según Reactor

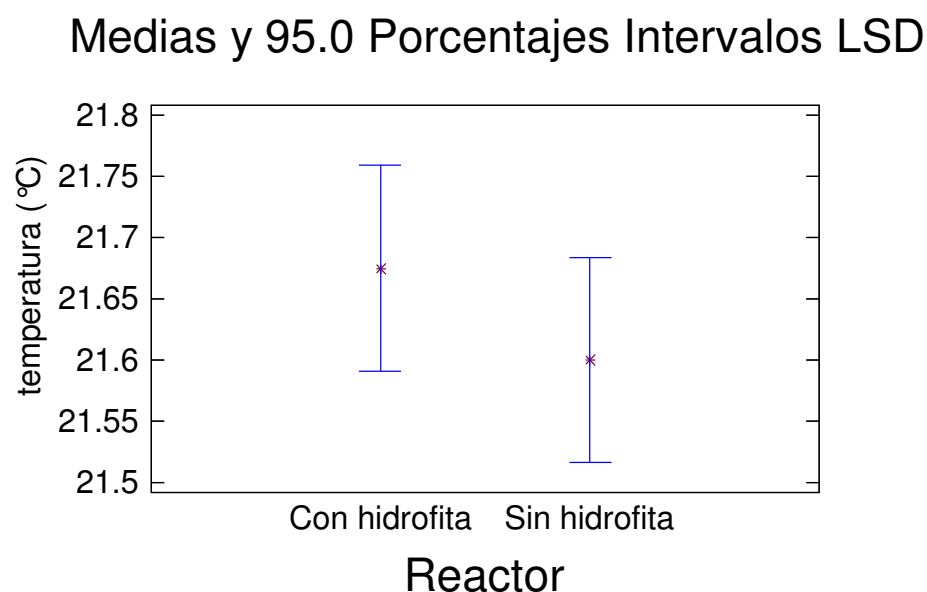
Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	0.005625	1	0.005625	3.69	0.1948
Intra grupos	0.00305	2	0.001525		
Total (Corr.)	0.008675	3			

La tabla ANDEVA descompone la varianza de la temperatura en dos componentes:

un componente entre grupos (reactor con hidrofita RA₁ y sin hidrofita RA₂) y un componente dentro de los grupos (replica de los reactores con hidrofita y sin hidrofita, RB₁ y RB₂). El F-ratio, que en este caso es igual a 3.69, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. **Puesto que el p-valor del test F es mayor a 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre la temperatura del efluente en los reactores con hidrofita y los reactores sin hidrofita, a un nivel de confianza del 95%. Por tanto, es de esperarse que no hay una diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 99%, puesto que el p-valor es mayor a 0.01.**

Figura A.5.8 Gráfica de medias de la temperatura a un nivel de confianza del 95%



Estos intervalos determinan que las medias no son significativamente diferentes una de otra a un nivel de confianza del 95%.

Tabla A.5.13 Funciones estadísticas para la serie de valores de temperatura (°C)

	promedio	desviación estándar	máximo	mínimo
Influente ARS	19.3	± 1.0	21.9	17.9
RA₁	21.7	± 1.1	23.9	19.1
RA₂	21.6	± 1.1	23.8	19
RB₁	21.6	± 1.1	24	19.7
RB₂	21.5	± 1.3	24	18.8



Figura A.6.1 Sistema experimental al inicio de los experimentos, con los brotes de las hidrofítas de menos de 8 cm de altura



Figura A.6.2 Sistema experimental en la etapa intermedia de los experimentos, con los brotes de las hidrofítas de menos de 50 cm de altura



Figura A.6.3 Sistema experimental en la etapa final de los experimentos, con los brotes de las hidrofitas (RA₁: 1.05 m de altura y 5 mm de diámetro; RB₁: 0.86 m de altura y 9 mm de diámetro y más follaje que RA₁)

Anónimo. 2006. Comentario a la presentación de la conferencia "Behavior of redox potentials in artificial wetlands models: a tool for controlling its efficiency", presentada en el 7th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems (Autores: Alejandro Guido-Zárata, Petia Mijaylova-Nacheva, Germán Buitrón, Carmen Durán-de-Bazúa). Marzo 8-10, 2006. México D.F. México.

APHA-AWWA-WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos. Madrid. España.

Bernal-González, A.I. y Martínez-González, S.A. 1995. Medición de contaminantes en aguas residuales usando la técnica del potencial redox. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Borrero-Lara, J.A., 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.

Brix, H. 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*. 29(4):71-78.

Brix, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*. 35(5):11-16.

Cooper, P.F. 1993. *Constructed wetlands for water quality improvement*. Ed. CRC Press Inc. Florida EEUA.

Dahab, M.F. y Surampalli, R.Y. 2000. Subsurface-flow constructed wetlands treatment in the plants: Five years of experience. En 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Pp. 987-993. Florida, EEUA.

Durán-de-Bazúa, C. (responsable), Haberl, R., Kreiner, I., Krishnan-Ranjani, Luna-Pabello, V.M., Ramírez-Burgos, L.I. (Profesores); Bernal-González, M., Esponda-Aguilar, P.L., Fenoglio-Limón, F.E., García-Gómez, R.S., García-Vázquez, L., Guzmán-Aguirre, S., Guzmán-López, P., Juárez-Méndez, C.H., Kneidinger, Ch., Millán-Hernández, S.E., Miranda-Ríos, M., Ramírez-Carrillo, H.F., Mejía-Chávez, A.G., Padrón-López, R.M., Ramírez-Burgos, L.I., Rodríguez-Cruz, A., Rodríguez-Monroy, J., Salinas-Castillo, N.V., Schaller, P., Soto-Esquivel, M.G., Varela-Montellano, E. (Estudiantes). 1999. Humedales artificiales en México: Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales. VOL. 6, SERIE: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. y Quim. Amb. ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química, UNAM. 185 pags. 200 ejemplares, 1a. Ed. (1999), 194 pags. 500 ejemplares, 2a. Ed. (2001), 205 pags. 500 ejemplares, 3a. Ed. (2006). En prensa (Versión corregida y aumentada). México D.F. México.

Durán-de-Bazúa, C. y Luna-Pabello, V.M. 1998. Humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. Patente Núm. 210924. Solicitud de Registro: Diciembre 15, 1998. Otorgada el 21 de octubre de 2002. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Dirección Divisional de Patentes. México D.F. México.

Durán-de-Bazúa, C. 1994. Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria de proceso. 5a. Ed. Pub. UNAM, Facultad de Química, PIQAYQA. México D.F. México.

Esponda-Aguilar, P.L. 2001. Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales. Tesis profesional (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM. México, D.F. México.

Fenoglio-Limón, F.E. 2003. Fenómenos de transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columnas empacadas. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas (Orientación: Química Ambiental). UNAM. México, D.F. México.

Fenoglio-Limón, F.E. 2000. Bases para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical. Tesis Profesional (Ingeniería Química), Facultad de Química, UNAM. México, D.F. México.

Gaitán-Zamora, N.A. 2007. Evaluación ecotoxicológica de 'composta' producida con residuos vegetales de humedales artificiales y lodos primarios a escala laboratorio. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental), UNAM. México D.F. México.

García-Arreola, S. L. 2006. Remoción de materia orgánica en un humedal artificial de flujo horizontal a escala prototipo ubicada en el Vivero Forestal de Coyocán. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Cuautitlán Izcalli. Edo. de México. México.

Guido-Zárate, A. 2006. Estudio de los potenciales de óxido-reducción en reactores biológicos que simulan un humedal artificial. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental), UNAM. México D.F. México.

Guido-Zárate, A., Mijaylova-Nacheva, P., Buitrón, G, Durán-de-Bazúa, C. 2006. Behavior of redox potentials in artificial wetlands models: A tool for controlling its efficiency. Presentado en la 7th Specialized Conference on Small Water and Wastewater Treatment Plants (7ª Conferencia Especializada sobre Sistemas Pequeños de Tratamiento de Agua y Aguas Residuales). IWA. Marzo 8-10, 2006. México D.F. México.

Guzmán-Aguirre, S. 2004. Evaluación de sistemas de humedales artificiales como depuradores de aguas residuales mediante la eliminación de microorganismos patógenos. Tesis de Licenciatura en Química de Alimentos. Facultad de Química. UNAM. México, D.F. México.

Hiley, D.D. 1995. The reality of sewage treatment using wetlands. *Water Sci. Technol.* 32(2). Pp 329-338.

Huanosta-Gutiérrez, T. 2006. Estudio de la dinámica y remoción de especies de nitrógeno en humedales artificiales de flujo vertical a escala de laboratorio. Tesis de Licenciatura en Química. Facultad de Química. UNAM. México, D.F. México.

IWA. 2001. Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water in Water Pollution Control.

Scientific and Technical Report Series. International Water Association, IWA Pub. Londres, Inglaterra.

Miranda-Ríos, M. 2000. Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM. México, D.F.

NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Norma Mexicana. Secretaría de Economía, Poder Ejecutivo Federal. México D.F: México. Tomada de las redes internacionales: <http://www.economia.gob.mx>.

Padrón-López, R. M. 2005. Depuración de aguas residuales domesticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas. Tesis de maestría en ciencias ambientales. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. México.

Ramírez-Burgos, L.I., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C., García-Fernández, J.A., Montuy-Hernández, R., Oaxaca-Grande, M.A. 2006. Estabilización de residuos peligrosos derivados de la medición de contaminantes como demanda química de oxígeno y estudio comparativo del método oficial como un micrométodo para minimizar sus residuos. Serie: Química ambiental de las sustancias y los residuos peligrosos. Vol. 1. Pub. PIQAYQA-FQ-UNAM. México D.F. México.

Reed, C.S., Crites, R.W. y Joe-Middlebrooks, E. 1995. Natural systems for waste management and treatment. McGraw-Hill, Inc. EEUUA.

Reyes-Luz, M. I. 2006. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM. México, D.F. México.

Rodríguez-Monroy, J. 2004. Estudio de la remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM. México, D.F.

SEMARNAT. 2006. Página de redes internacionales. www.semarnat.gob.mx

Shutes, R.B.E. 2001. Artificial wetlands and water quality improvement. Environment International. 26:441-447

Soto-Esquivel, M.G. 2003. Efecto de la generación de oxígeno fotosintético en un sistema sólido-líquido-gas. Tesis de Maestría en Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental). UNAM. México D.F. México.

Torres-Esquivel, J. N. 2005. Eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y bacterias en un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. México D.F. México.