

62



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ARRANQUE DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE FLUJO VERTICAL A ESCALA PILOTO DE TIPO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

29/03/2001

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
PEDRO LUIS ESPONDA AGUILAR



MEXICO, D. F.



EDMUNDO PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: Prof. María del Carmen Durán Domínguez  
Vocal: Prof. Rodolfo Torres Barrera  
Secretario: Prof. Hilda Elizabeth Calderón Villagómez  
Primer suplente: Prof. Landy Irene Ramírez Burgos  
Segundo suplente: Prof. Alfonso Durán Moreno

## **Sitio donde se desarrolló el tema**

Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental  
Laboratorio 301, Conjunto E, Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM

Sistema prototipo de humedal artificial de flujo vertical descendente  
Departamento de Supervisión y Control de Zona Cultural,  
Zona Administrativa Exterior, Ciudad Universitaria, UNAM

## **Asesor del tema**



Dra.-Ing. María del Carmen Durán Domínguez

## **Supervisor técnico**



IQ. Francisco Enrico Fenoglio Limón

## **Sustentante**



Pedro Luis Esponda Aguilar

Dedico esta obra como agradecimiento y homenaje a las personas que me han transmitido el ímpetu, la sensibilidad, la pasión y el conocimiento que me permitieron llegar hasta este punto con el deseo de seguir adelante.

A Paola, mi amor y mi segunda conciencia.

A mi Ma, mi Pa y mis hermas.

A mis primas y primos, a mi Abue y al resto de la Familia.

A mis amigos, que están cerca a pesar de la distancia o el tiempo.

A los circulinos, que han sido maestros y amigos.

A mis maestros a lo largo de la vida.

## **Agradecimientos**

A la Facultad de Química, y en especial, al Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQAYQA) por darme la posibilidad de sentirme útil a mí mismo y a mi planeta.

A la Dra. María del Carmen Durán de Bazúa y a Francisco Fenoglio por haberme guiado pacientemente y compartir sus experiencias conmigo.

Al CONACyT por el apoyo brindado a través de una beca en el marco del proyecto 00-06-016-V "Depuración de aguas residuales domésticas usando humedales artificiales".

A GTZ, en especial al Dr. Bertram Nagel por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo a través de una beca.

Al H. Jurado, por la retroalimentación ofrecida y por su comprensión.

Al personal de la Coordinación de Áreas Verdes y Forestación de la DGOyC, UNAM, especialmente al Biol. Javier Montoya por su cooperación oportuna y desinteresada.

Ai ing. Leonardo Ponce y al Ing. César Argumosa del Departamento de Supervisión y Control de Zona Cultural de la DGOyC, UNAM, por el interés mostrado a lo largo del proyecto.

A mis amigos y colaboradores del PIQAYQA que me ofrecieron consejo y orientación.

# Índice general

RESUMEN .....	1
1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 <b>Objetivos</b> .....	3
2 MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 El problema del agua en zonas rurales de México.....	4
2.2 Principios biológicos del tratamiento del agua residual .....	5
2.3 Generalidades sobre los humedales artificiales de flujo vertical.....	6
2.3.1 Elementos operativos y mecanismo de depuración de los contaminantes.....	8
2.3.2 El patrón de flujo de alimentación.....	8
2.3.3 El efecto de la obstrucción del lecho empacado .....	9
2.4 Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales a escala rural y suburbana en México .....	10
2.5 La planta piloto .....	10
2.5.1 Consideraciones para el arranque de un proceso a escala piloto .....	10
2.5.2 Planeación y programación de actividades.....	11
2.5.3 Recopilación de información.....	12
2.5.4 Fases principales en el arranque.....	12
2.5.5 Labores de mantenimiento .....	14
3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....	16
3.1 Utilidad de la planta piloto .....	16
3.2 Localización de la planta.....	17
3.2.1 Características del sitio.....	19
3.2.2 Condiciones climatológicas .....	19
3.3 Descripción general del proceso.....	22
3.3.1 Entrada de agua residual.....	24
3.3.2 Fosa séptica .....	24
3.3.3 Tanque sedimentador primario .....	25
3.3.4 Sistema de bombeo.....	26
3.3.5 Humedal artificial de flujo vertical descendente .....	27
3.3.6 Instrumentación del proceso.....	31
3.3.7 Diagrama de flujo de proceso .....	34
4 INICIO DE OPERACIONES .....	36
4.1 Planeación de las actividades de arranque.....	37
4.2 Preparativos y arranque.....	39

4.2.1	Revisión de especificaciones de seguridad e higiene .....	39
4.2.2	Riego de las plantas en el HAFVD .....	40
4.2.3	Limpieza del sitio y de los equipos .....	41
4.2.4	Verificación de los elementos de suministro y corte de corriente eléctrica	41
4.2.5	Prueba y ajuste de los dispositivos de control para arranque y paro de la bomba	42
4.2.6	Inundación total del HAFVD con agua tratada y arranque de la bomba...	42
4.3	Operación inicial en régimen dinámico .....	43
4.3.1	Operación, supervisión y control del sistema .....	44
4.3.2	Mantenimiento preventivo y programado .....	48
4.3.3	Mantenimiento correctivo .....	51
5	RESULTADOS Y OBSERVACIONES .....	54
5.1	Resultados fisicoquímicos .....	54
5.2	Eficiencia de remoción de materia orgánica .....	57
5.3	Observaciones .....	60
5.3.1	Detección y corrección de problemas operativos .....	60
5.3.2	El sistema de distribución de la alimentación al HAFVD .....	62
5.3.3	El patrón de flujo dentro del humedal .....	63
5.3.4	La adaptación de las plantas .....	63
5.3.5	El material de empaque como soporte inerte .....	65
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
6.1	Conclusiones .....	67
6.2	Recomendaciones .....	70
6.2.1	Corriente adicional que entra al sedimentador .....	70
6.2.2	Siembra de plantas en el HAFV .....	71
6.2.3	El sistema de alimentación al humedal .....	72
6.2.4	Segregación de funciones .....	72
6.2.5	Evaluación de parámetros .....	72
	BIBLIOGRAFÍA .....	74
	Manual de operación .....	78
	Objetivos del manual de operación: .....	78
	Sección 1 Generalidades .....	79
	Sección 2 Preparación .....	81
	Sección 3 Arranque .....	83
	Sección 4 Operación normal .....	84
	Sección 5 Paro .....	87
	Sección 6 Emergencias .....	88
	Sección 7 Consideraciones de seguridad .....	88

## Índice de figuras

Figura 3-1 Plano de la Ciudad Universitaria en la UNAM (México, D.F). Ubicación del PIQAYQA y de la planta prototipo de HAFVD .....	18
Figura 3-2 Plano aéreo del área de Conservación donde se ubica la planta piloto HAFVD.....	20
Figura 3-3 Distribución de climas en el Distrito Federal (INEGI, 2000) .....	22
Figura 3-4 Vista esquemática del tanque sedimentador y motobomba.....	27
Figura 3-5 Esquema del sistema de distribución de la alimentación sobre el HAFVD	30
Figura 3-6 Perfil del HAFVD con instalación de las sondas para tomar muestras de agua en el interior.....	31
Figura 3-7 Esquema de la instalación del medidor de flujo a la entrada del HAFVD...	33
Figura 3-8 Diagrama de flujo de proceso de la planta piloto tipo HAFVD. Tomado de las Bases de Diseño (Fenoglio, 2000).....	35
Figura 4-1 Cronograma original de actividades realizadas a lo largo del proyecto .....	38
Figura 5-1 Evolución de los parámetros fisicoquímicos en el HAFV .....	54
Figura 5-2 Evolución de mediciones de sólidos en el HAFVD .....	56
Figura 5-3 Evolución del por ciento de remoción de DQO en el HAFVD .....	58
Figura 5-4 Evolución de las mediciones de DQO durante la operación del HAFVD....	58



## Índice de tablas

Tabla 3-1 Datos meteorológicos en el Distrito Federal: Temperatura media mensual (1997-1998) (INEGI, 2000); Precipitación pluvial durante 1997 (Fenoglio, 2000)	21
Tabla 3-2 Humedad relativa durante 1997 (Fenoglio, 2000)	21
Tabla 3-3 Especificaciones de la planta piloto tipo humedal artificial de flujo vertical	28
Tabla 3-4 Resumen de características de la alimentación al humedal artificial	29
Tabla 3-5 Balance de materia por cada corriente de proceso (Fenoglio, 2000)	34
Tabla 4-1 Frecuencia y tipo de mantenimiento	49
Tabla 5-1 Parámetros fisicoquímicos registrados en la planta piloto HAVFD-ZC	53
Tabla 5-2 Sólidos totales y sólidos totales volátiles	55
Tabla 5-3 Demanda química de oxígeno total (DQO) en la entrada y salida del HAFVD	57
Tabla 5-4 Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFV instalada en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria en el sur de la Ciudad de México	65

## Glosario

aguas residuales	Corriente de agua, generalmente contaminada, proveniente de usos doméstico, municipal o industrial
arranque de operaciones	Etapa posterior a la construcción de un proceso comercial o experimental, en se leván a cabo las pruebas preliminares para comprobar la resistencia y funcionalidad del equipo
bases de diseño	Fundamentos teóricos en los cuales se justifica la forma o estructura de un sistema
biopelícula	Capa formada por microorganismos, mucosa y materiales orgánicos que se deposita sobre un sustrato inerte, y presenta actividad bioquímica sobre el medio
“composta”	Del latín <i>composita</i> , mezcla compuesta. Producto del proceso biológico de tratamiento de materiales sólidos o semisólidos de origen orgánico para transformarlos en humus o material orgánico estable, útil como mejorador de suelos
conductividad hidráulica	Capacidad de un lecho de transportar un fluido a través de sus poros
DBO <sub>5</sub>	Técnica experimental que simula los procesos microbiológicos naturales de degradación de materia orgánica y ofrece una medida indirecta de la cantidad de materia biodegradable presente en aguas residuales. Se mide en mg O <sub>2</sub> / L
descomposición bioquímica	Proceso de disgregación la materia ocasionado por la actividad de elementos microbiológicos
DGOySG	Dirección General de Obras y Servicios Generales de la UNAM (ahora llamada Dirección General de Obras y Conservación)
humedal artificial de flujo vertical descendente (HAFVD)	Sistemas complejos e integrados, en los que el agua, las plantas, animales, microorganismos y ambiente (sol, aire y suelo) interaccionan para tratar aguas contaminadas

lecho	Cama o sustrato inerte que sirve de base para soportar los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en el sistema de humedales
manual de operación	Colección de procedimientos y recomendaciones para llevar a cabo una tarea particular. En este caso se refiere a la etapa de arranque y operación de la planta piloto que ocupa el presente trabajo
pe	Population equivalent, término usado para señalar el equivalente en concentración de materia orgánica biodegradable generado por una persona
PIQAYQA	Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM
procesos aerobios	Mecanismos principalmente biológicos que requieren de la presencia de oxígeno para llevarse a cabo
procesos anaerobios	Mecanismos principalmente biológicos que se llevan a cabo en ausencia de oxígeno
régimen dinámico	Fase intermedia entre el arranque y la operación a régimen estable, llamada así por el comportamiento inconstante de las variables de salida (mediciones de parámetros fisicoquímicos)
zona de raíces o rizosfera	Región densamente poblada por raíces de plantas macrofitas que forman sistemas complejos, en los que el agua, microorganismos y ambiente (sol, aire y suelo) interaccionan para tratar aguas contaminadas

## Resumen

En esta investigación se terminó la construcción de una planta piloto tipo humedal artificial de flujo vertical descendente (HAFVD) de 15 m<sup>2</sup> de área superficial con 3 plantas sembradas por cada 1 m<sup>2</sup>. El humedal artificial, integrado a un tren de pretratamiento de aguas residuales de tipo sanitario, está ideado como una herramienta experimental para lograr dos objetivos primordiales: a) Observar la adaptación del sistema biológico a las condiciones climáticas de la zona del centro del país, así como para b) Evaluar la eficiencia de descomposición de los contaminantes orgánicos de un agua residual sanitaria por medio del sistema biológico de *zona de raíces* como tratamiento de tipo secundario. El *arranque* y la *observación del sistema en el régimen dinámico* son etapas críticas del proyecto de experimentación en la planta piloto debido a que las decisiones tomadas son cruciales para generar un contexto de seguridad en que se desarrolle el resto de la experimentación. Adicionalmente, las observaciones realizadas durante esta etapa ofrecen información útil para el desarrollo y conclusión exitosa del presente proyecto y para futuras experiencias relacionadas con los sistemas de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas contaminadas. Los resultados obtenidos en los primeros seis meses de la operación del sistema muestran que el HAFVD, como tratamiento secundario, se ha comportado de forma predominantemente dinámica y con actividad anaerobia. Este comportamiento se atribuye a la etapa de adaptación por la que atraviesa el sistema biológico después de iniciar operaciones, y a los diversos problemas que surgieron a lo largo de la operación y que se resolvieron con cambios al diseño y la construcción. No obstante estos problemas, las experiencias resultaron enriquecedoras para proponer modificaciones al diseño del sistema y recomendaciones para el éxito de futuros proyectos. Tales experiencias también se aprovecharon para elaborar un manual de procedimientos generales de operación, mantenimiento y evaluación de la planta piloto en estudio con el fin de evitar el deterioro del sistema y riesgos a los operadores. La siguiente etapa está dirigida hacia la evaluación de la estabilidad y la eficiencia depurativa del sistema bajo diferentes condiciones operativas que permitan corroborar si el comportamiento puede modelarse con herramientas matemáticas que permitan su escalamiento, así como evaluaciones de costo-beneficio y factibilidad del sistema.

## 1 Introducción

El estudio que se presenta a continuación forma parte de una línea de investigación del Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental (PIQAYQA) sobre el tratamiento de aguas residuales con sistemas biológicos de tipo humedal artificial. Tales sistemas son una tecnología competitiva en el ámbito rural y suburbano debido a su bajo costo de construcción y operación, considerando la aportación de mano de obra comunitaria y el uso de materiales de la región, así como por la simplicidad del mantenimiento y operación. El propósito de esta tesis es conocer el comportamiento de un sistema de características medibles, durante la etapa de *arranque* y de *régimen dinámico*, expuesto a las condiciones microbiológicas y de los minerales de esta región del país, así como a las condiciones climáticas durante la temporada de estiaje, comprendida entre los meses de septiembre de 2000 a mayo de 2001.

El trabajo está estructurado como un seguimiento al documento que reporta las *Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical* (Fenoglio, 2000). Como tal, la mayor parte de las descripciones del proceso están referidas a este documento, y se pretende que sean textos complementarios, evitando repeticiones innecesarias. En el capítulo 1 del presente documento se plantean las directrices que guiaron el trabajo práctico y experimental realizado. En el capítulo 2 se manifiestan los fundamentos teóricos que sustentan las decisiones tomadas a lo largo de la etapa de desarrollo del trabajo. Las características generales y especificaciones de los equipos se describen en el capítulo 3, señalando las modificaciones realizadas durante la construcción al diseño original. El capítulo 4 refiere el seguimiento al trabajo realizado alrededor del experimento, haciendo referencia a lo recomendado en las bases de diseño y en el capítulo 2. Las observaciones realizadas sobre la evolución del sistema en su etapa inicial y los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico y bioquímico del agua residual se exponen en el capítulo 5. Tales resultados y observaciones son discutidos en forma de conclusiones y recomendaciones en el capítulo final. Adicionalmente, se

anexa un manual de operación y mantenimiento de la planta piloto elaborado a partir de las bases teóricas y las experiencias recabadas en el experimento, que podrá ser utilizado como apoyo en futuras etapas del proyecto de investigación.

### 1.1 Objetivos

Los objetivos particulares de esta investigación son los que se exponen a continuación:

- Elaborar un plan de trabajo para la etapa de arranque de la planta piloto tipo HAFVD
- Proponer correcciones en el diseño y realizar las modificaciones necesarias a la planta prototipo para mejorar su operación y observación
- Ejecutar un programa monitorio para conocer la evolución dinámica del sistema prototipo
- Reportar el funcionamiento del HAFVD en términos de las principales variables de operación y de las condiciones meteorológicas predominantes
- Identificar las etapas críticas del sistema y traducirlas en recomendaciones para proyectos futuros
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento del sistema.

## 2 Marco teórico

### 2.1 El problema del agua en zonas rurales de México

De los recursos naturales en estado crítico, el agua tiene un carácter prioritario en varias regiones de México. La contaminación de los cuerpos de agua tiene consecuencias graves, tanto para el equilibrio ecológico, como para el desarrollo social. Paradójicamente, cada vez existe una mayor demanda de agua potable pero, al mismo tiempo, los efectos de la contaminación en los recursos hídricos limitan cada vez más su disponibilidad (Valek, 2000). Según el Índice de Calidad del Agua, evaluado en 515 estaciones de medición de agua superficial distribuidas en ríos, lagos, presas, estuarios y sitios de descargas residuales en 1998, el 17% del agua superficial disponible para los consumidores en los municipios y comunidades está calificada como *fuertemente contaminada*; el 76% del agua disponible se califica como *contaminada*, y sólo el 7% se considera *aceptable para consumo humano* (INEGI, 2000).

Es cierto que los recursos hídricos de México no son escasos, pero su distribución heterogénea y los patrones de uso exigen estrategias de consumo y de tratamiento más adecuadas a la realidad (CNA, 1999). Según cifras del INEGI, en 1990 existían 154,016 comunidades con una población inferior a 2,500 habitantes (población máxima para que una población se considere como rural). En 1995, aumentaron a 198,311, de las cuales, el 76% de las comunidades contaba con menos de 100 habitantes (INEGI, 2000). En ese mismo año, la cobertura en agua potable en las zonas rurales era de 61% y, en drenaje, era de 29.5%. Las principales causas que inciden en la baja cobertura observada en servicios de agua potable y drenaje, se encuentran no sólo la dispersión poblacional, sino también el hecho de que un considerable número de municipios, entidades responsables de la prestación de los servicios, no cuentan con los medios económicos, técnicos y operativos necesarios para dotar a sus comunidades de los servicios básicos. De hecho, de los 2,428

municipios del país, 848, es decir, el 34.9%, están catalogados con *muy alto* índice de marginalidad (Cruz-Majluf, 2001).

Muchas regiones suburbanas y rurales del país no cuentan con un sistema de alcantarillado y, mucho menos, con un sistema de tratamiento de aguas residuales. En algunas comunidades, las aguas residuales se dejan fluir por canales abiertos por varios kilómetros hasta fosas donde son captadas, y en algunas ocasiones se deja que el agua se infiltre hacia el subsuelo. Los efectos de estas prácticas han ocasionado el envenenamiento continuo de los acuíferos, el desgaste de los suelos y la consecuente disminución de la productividad agrícola y la intensificación de enfermedades gastrointestinales por el riego con aguas contaminadas de campos y cultivos (Cruz-Majluf, 2001). Ante tal perspectiva, es preciso proponer soluciones técnicamente factibles y económicamente viables que resuelvan de manera favorable esta situación, evitando así, problemas ambientales, sociales y económicos.

## **2.2 Principios biológicos del tratamiento del agua residual**

Una corriente natural sana, como un río o un lago, posee una capacidad limitada de auto-purificación. La capacidad de auto-purificación se debe a cantidades relativamente pequeñas de microorganismos presentes en el agua. Dichos organismos utilizan como alimento gran parte de la materia orgánica contaminante que llega al agua. Los microorganismos forman un microsistema ecológico de bacterias, hongos y algas que, a su vez, forma parte de una cadena trófica para otros organismos, como protozoarios, insectos, gusanos y peces. La presencia de dicha diversidad biológica en un cuerpo de agua es un indicador de su salud y equilibrio. En el proceso de purificación, la materia orgánica se descompone en compuestos simples como dióxido de carbono o metano, y los organismos aumentan en número. De este modo, los contaminantes orgánicos se eliminan de la corriente de agua, en parte por descomposición bioquímica y en parte por conversión en células microbianas, que a su vez, forman parte de cadenas tróficas. Si se destruye la población microbiana, los



solutos contaminantes que entran en el agua no se descompondrán y se acumularán hasta impedir la regeneración (Winkler, 1996).

Los procesos aerobios son bioquímicamente eficientes y rápidos y generan productos secundarios que casi siempre son químicamente simples y están altamente oxidados. De forma contraria, los procesos anaerobios son relativamente más lentos y dan origen a subproductos químicamente complejos y frecuentemente malolientes (Winkler, 1996). El oxígeno libre disuelto es el reactivo esencial para los procesos aerobios pues es consumido cuando los organismos aerobios utilizan los nutrientes orgánicos. Si no se repone el oxígeno disuelto, el crecimiento aerobio se detiene, y sólo pueden continuar los procesos anaerobios, más lentos (Manahan, 1993). La principal restricción que se presenta a la disponibilidad de oxígeno disuelto es su baja solubilidad en el agua (Gray, 1992).

El mayor número de microorganismos propicia una mayor descomposición de los nutrientes y el proceso se acelerará hasta que se agote el nutriente o el oxígeno disuelto (Gray, 1992). Éste es el principio básico de los procesos biológicos de tratamiento residual, en donde se utilizan técnicas de ingeniería para mantener un alto nivel de disponibilidad del oxígeno disuelto, de manera que se mantenga una muy alta población microbiana para una rápida descomposición aerobia de los nutrientes. La transferencia de oxígeno es la clave para los procesos biológicos aerobios de purificación, tanto naturales como industriales (Winkler, 1996).

### **2.3 Generalidades sobre los humedales artificiales de flujo vertical**

Se conocen casos de humedales naturales, adyacentes a campos de riego, industrias o comunidades, que reciben entradas de materia orgánica, nutrientes, metales y compuestos orgánicos tóxicos que, eventualmente, son capaces de atenuar la presencia de tales contaminantes (Reddy y D'Angelo, 1997). A pesar de que se sabe poco acerca de los diversos factores que determinan ese comportamiento, sistemas semejantes resultan muy atractivos para el tratamiento de aguas residuales

contaminadas debido a su conformación por diversos elementos bióticos, de manera que funcionan como un sistema natural integrado (Metcalf y Eddy, 1991).

Los sistemas naturales utilizan la energía disponible en el medio para llevar a cabo procesos físicos, químicos y biológicos cuando el agua, el sustrato, las plantas, microorganismos y la atmósfera interactúan. Además, tienen la característica de alcanzar la homeostasis, resistiendo cambios en las condiciones del medio, y recuperando la estabilidad global del sistema (Odum, 1972; Curtis y Barnes 1994). Los humedales artificiales o construidos (HA) ofrecen las características de los sistemas naturales, pero sin la limitación asociada a la descarga de contaminantes a un ecosistema natural. Son capaces de remover casi todos los constituyentes mayores y menores del agua residual que son considerados contaminantes, entre ellos: Sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, elementos-traza y microorganismos (Metcalf y Eddie, 1991; Cooper *et al*, 1999; Lantzke *et al*, 1998)). El diseño de los HA permite controlar las variables físicas, químicas y biológicas que determinan la eficiencia en la remoción de los contaminantes del agua.

El uso de los humedales artificiales como sistemas de tratamiento se ha desarrollado gradualmente, sobre todo en los últimos 20 años. Inicialmente, el interés principal se enfocaba en los humedales artificiales de flujo horizontal (HAFH) debido a que mostraron ser sencillos y de bajo costo de construcción y operación, además de obtener resultados satisfactorios para estándares de DBO<sub>5</sub> y SST. Sin embargo, ha habido un creciente interés en lograr aguas efluentes completamente nitrificadas, para lo cual, los sistemas HAFH no permiten conseguirlo completamente debido a su limitada capacidad de transferencia de oxígeno (Laber *et al*, 1997) Lo anterior ha provocado un mayor interés en los últimos 10 años por los sistemas de flujo vertical (HAFV) por dos razones principalmente: a) Tienen una mayor capacidad de transferencia de oxígeno, y b) Son considerablemente más pequeños (entre 1 y 2 m<sup>2</sup>/pe) que los sistemas HAFH (entre 5 y 10 m<sup>2</sup>/pe, para tratamiento secundario) (Cooper, 1999).

### 2.3.1 Elementos operativos y mecanismo de depuración de los contaminantes

Los HA reúnen las propiedades de filtración producida por el lecho, la actividad bioquímica de los microorganismos presentes, el aporte de oxígeno y el mantenimiento de la capacidad de conducción hidráulica, inducida por el crecimiento de las plantas vasculares emergentes (Luna-Pabello *et al.*, 1997). Las plantas hidrófilas típicas de humedales tienen características únicas de adaptación a condiciones anaerobias del material de soporte y, además desarrollan espacios internos (parénquima) para transportar oxígeno por difusión molecular a través de un sistema continuo de conductos de aire hacia la zona de raíces (Reddy y D'Angelo, 1997; Curtis y Barnes, 1994, Daubenmire, 1982). A medida de que la difusión de oxígeno por las plantas se reduce, los microorganismos de actividad anaerobia son los responsables de la depuración de los compuestos contaminantes (Luna-Pabello *et al.*, 1997). Adicionalmente, las plantas requieren de nutrientes nitrogenados y fosforados para crecer y los toman a través de sus sistemas de raíces (Brix, 1997).

Con respecto al funcionamiento del lecho, éste sirve como soporte para las plantas y permite la proliferación de los microorganismos depuradores. La zona de la rizosfera constituye un espacio entre las raíces y el material de soporte circundante en el cual se lleva a cabo la transformación aerobia y anaerobia de los contaminantes orgánicos disueltos. Se tienen identificados mecanismos fisicoquímicos de depuración de nutrientes nitrogenados y fosforados al adsorberse sobre la superficie del material de soporte (Gray *et al.*, 2000). Mientras las raíces y los rizomas mueren, van dejando poros tubulares y canales que, según se ha observado, favorecen y estabilizan la conductividad hidráulica del lecho. Los mismos tejidos muertos proporcionan una superficie enorme para el desarrollo de biopelículas (Gumbricht, 1993, Brix, 1997).

### 2.3.2 El patrón de flujo de alimentación

En un HAFVD, el escurrimiento del líquido a través del lecho que se encuentra seco y aireado ocasiona una mejor capacidad de transferencia de oxígeno al agua y, en

consecuencia, se favorece la actividad aerobia de los microorganismos. Este mecanismo se logra, principalmente, gracias a la alimentación al sistema en forma intermitente. Las variables que son susceptibles de modificarse en cuanto a la alimentación son: La frecuencia de alimentación, el volumen alimentado en cada ciclo, la duración de cada alimentación y el nivel de inundación (Giovannini y Da-Motta-Marques, 1999). Este patrón de flujo dentro del humedal permite la aireación continua del lecho que sostiene la biomasa, favorece la actividad aerobia y disminuye la posibilidad de taponamiento de los canales de infiltración dentro del HAFVD (Breen, 1997).

### **2.3.3 El efecto de la obstrucción del lecho empacado**

La eficiencia de purificación de un HAFVD depende de una aireación eficiente del lecho. Ésta se logra por medio de la carga intermitente de la alimentación sobre la superficie, suministrando una oxigenación por difusión másica. Esta capacidad de transporte de oxígeno sólo ocurre mientras los estratos más altos del lecho tengan capacidad de drenado (Blazejewski y Murat-Blazejewska, 1997). Por lo anterior, la eficiencia de depuración decae significativamente cuando ocurre la obstrucción del lecho y un estancamiento frecuente. Los principales mecanismos que reducen la tasa de infiltración son los siguientes (Platzer y Mauch, 1997):

- a) La deposición de sólidos orgánicos o inorgánicos en la superficie desarrollando una capa que obstruye el paso del líquido;
- b) La producción de biomasa y excreciones sobre los poros del material de empaque, debido a un suministro constante de nutrientes en el agua residual.

Es importante mencionar que para mantener el funcionamiento de un HAFVD en el largo plazo, debe existir un equilibrio entre la generación y la mineralización de biomasa.

## **2.4 Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales a escala rural y suburbana en México**

En comunidades de tipo rural, la instalación de sistemas convencionales para tratamiento biológico o químico es incosteable. Aún cuando son instaladas, trabajan con bajas eficiencias de remoción de contaminantes o bien son abandonadas por la falta de conocimientos técnicos para su operación. Dadas las características del clima, biodiversidad, disponibilidad de terreno en áreas rurales y materiales de construcción en el país, los sistemas de tratamiento basados en humedales artificiales son una alternativa viable para aplicarse en pequeñas y medianas comunidades (Luna-Pabello *et al* 1997; Haberl, 1999). Especialmente en tierras áridas, ofrecen beneficios significativos pues, el agua tratada por el humedal puede usarse para el riego de cultivos, para la piscicultura o descargarse directamente a cuerpos acuíferos, una vez que alcancen la calidad deseada y marcada por la normatividad (Miranda, 2000; Haberl, 1999).

## **2.5 La planta piloto**

Una planta piloto es una herramienta ideada para permitir la investigación de un proceso general o un problema específico en una escala manejable, en un contexto realista y de modo oportuno (Palluzi, 1992). Como escala manejable debe entenderse una cantidad limitada de tiempo, dinero y recursos destinada a obtener un resultado y, para ello, debe definirse con anticipación la meta que desea alcanzarse. El diseño en escala realista permite incluir efectos que puedan ser de importancia para el proceso en cuestión, de manera que los resultados aún sean susceptibles de extrapolarse a otros niveles.

### **2.5.1 Consideraciones para el arranque de un proceso a escala piloto**

El hecho de que el tamaño de los equipos sean menores puede aligerar algunos problemas, pero usualmente crea otros. Esto, aunado a la novedad del tipo de

proceso y las muchas incógnitas en su comportamiento puede favorecer que se desarrollen de imprevisto muchas áreas problemáticas. El arranque de una planta piloto puede tomar más tiempo que el de un proceso mayor. Lo anterior puede deberse a la limitación de los recursos y personal involucrado, a la novedad de la operación y falta de experiencia, y a la gran cantidad de pruebas, calibraciones y ensayos requeridos. La clave para una etapa de arranque exitosa y eficiente en la escala piloto es una planeación y organización adecuada y anticipada (Gans *et al*, 1983).

Aunque la etapa de arranque se entiende usualmente como la que se realiza después de la construcción, ésta puede iniciarse algún tiempo antes (Palluzi, 1992). El diseño propuesto debe revisarse antes y durante la construcción con una visión asertiva para evitar y resolver los problemas (a través de modificaciones al diseño) que puedan presentarse en el arranque y la operación. Algunas áreas problemáticas que pueden resolverse anticipadamente incluyen las siguientes:

- Contar con válvulas de aislamiento o "bypass" que permitan desmontar para realizar una calibración o mantenimiento sin necesidad de drenado o purgado de la unidad completa.
- Contar con las herramientas, conexiones y válvulas necesarias para la purga y el lavado del equipo.

### **2.5.2 Planeación y programación de actividades**

La secuencia de arranque debe usarse para desarrollar una lista de los recursos necesarios y, debe también desarrollarse un itinerario con respecto a los recursos disponibles, incluyendo un cierto nivel de contingencia. Cualquier secuencia llegará a cubrir sólo los problemas previstos; los problemas reales siempre estarán escondidos. Una vez identificadas las tareas y actividades involucradas, deben clasificarse éstas y hacerse una segregación de funciones. De esta forma, pueden identificarse los recursos materiales y humanos para llevarlas a cabo (Landau, 1966). Las principales

funciones que se requieren para el arranque se enlistan a continuación:

- Administración de la planta: Procuración de materiales y equipos, y trabajo de gestión para servicios de apoyo; Planeación y organización de actividades.
- Operación técnica: Supervisión de funcionamiento y control del proceso.
- Mantenimiento: Atención a posibles fallas (reparaciones o modificaciones) de los equipos
- Trabajo de laboratorio: Muestreo y análisis periódico de las variables de salida.

La secuencia de actividades debe marcar tareas diarias desde el día en que termine la construcción hasta el término de la primera semana de operaciones. Debido a las incertidumbres intrínsecas al arranque, particularmente en una planta de tipo de proceso novedoso, la programación posterior al arranque inicial, debe hacerse diariamente o, por lo menos, varias veces a la semana, con revisiones tan frecuentes como lo marquen las circunstancias (Landau, 1966). Es recomendable colaborar con el responsable de la construcción en la planeación de las actividades del arranque para realizar las pruebas pre-operativas en los equipos tan pronto como se termine su instalación (Palluzi, 1992).

### **2.5.3 Recopilación de información**

Debe contarse con una base de datos siempre disponible que incluya los siguientes puntos: Los criterios de diseño, la descripción del proceso, las hojas de datos de equipos, los planos de la disposición física de la planta y diagramas de tuberías, las instrucciones de operación, los procedimientos analíticos y los procedimientos de cálculo para evaluar el desempeño de la planta (Palluzi, 1992).

### **2.5.4 Fases principales en el arranque**

Las actividades de preparación tendrán como objetivo comprobar que la planta esté

totalmente terminada y que en su construcción se haya cumplido con todas las especificaciones del proyecto. Antes de iniciar, los operadores, así como el personal de mantenimiento, deben estar completamente familiarizados con el proceso, el equipo de procesamiento, los instrumentos y los procedimientos establecidos (Gans *et al*, 1983). Las actividades que se describen a continuación deben llevarse a cabo durante el arranque de operaciones

### **Limpieza**

Antes de iniciar las operaciones, se deben eliminar toda clase de impurezas de las tuberías, tanques y recipientes. Deben retirarse residuos de varillas de soldadura, pernos, guantes, pedazos de cable, estopa y otros materiales empleados en la construcción. Generalmente se recomienda el lavado o soplado con agua de tuberías y recipientes para eliminar residuos pequeños. Sin embargo, para el proceso que se estudia no se considera necesario el lavado, pues el material de proceso (agua residual), acarrea una cantidad mayor de impurezas y sólidos en suspensión.

### **Seguridad**

Los procedimientos son el método idóneo para describir la secuencia que permitirá la operación con máxima seguridad. Éstos deben incluir instrucciones específicas para cada tipo de trabajo. Es necesario conocer las características físicas y toxicológicas de los materiales que se manejan, así como de los equipos de seguridad necesarios para prevenir accidentes.

### **Pruebas hidrostáticas**

Tales pruebas se proponen con el fin de comprobar a resistencia de los materiales, soldaduras y juntas bridadas una vez que la construcción ha concluido. Debido a que el sistema en estudio no contempla la operación a altas presiones no será necesario llevar a cabo un ensayo muy riguroso al respecto. Sin embargo, esta prueba puede aprovecharse para detectar la presencia de fugas en las conexiones y juntas de líneas y equipos. Se recomienda el uso de la bomba propia del proceso, así como agua



fresca o tratada para evitar complicaciones en caso de alguna fuga o descompostura (Gans *et al*, 1983).

### Revisión del equipo

Debe cotejarse la ubicación de los equipos con el diagrama de ubicación del equipo y el diagrama de flujo de proceso. Cada equipo se estudiará en términos del documento de descripción del equipo. También debe verificarse que los instrumentos de medición y control estén instalados, calibrados y probados para una función adecuada.

### Arranque

En el caso del HA de flujo vertical, el arranque es una etapa que puede tomar más tiempo que en un sistema de flujo horizontal. Esto se debe a que las condiciones de operación de un HA de flujo horizontal no involucran la manipulación del nivel de inundación del sistema. En cambio, el HAFVD requiere una atención especial a lo largo del proceso de estabilización debido a que el nivel de inundación debe reducirse gradualmente para permitir el crecimiento de las raíces de las plantas y el desarrollo de biomasa sobre el material de soporte. La disminución de la inundación también obliga al crecimiento de las raíces.

### 2.5.5 Labores de mantenimiento

El tamaño reducido de una planta piloto, con respecto a procesos de escala mayor, además del carácter transitorio de una planta piloto, pueden sugerir que no se requiere mantenimiento alguno. Sin embargo, un buen plan de mantenimiento puede corregir muchos problemas existentes, ya sea por diseño o por construcción, mientras que un plan inexistente o malo puede transformar una planta piloto en una *unidad problema*.

En la etapa de construcción, el personal de mantenimiento debe realizar un listado confiable y completo del equipo y dispositivos de proceso. La continuidad de la

operación de la planta depende de la regularidad del mantenimiento. Es imprescindible que el programa de mantenimiento sea establecido en detalle antes de que el proceso arranque. Tales programas incluyen las pruebas, inspecciones y ajustes de rutina que deben realizarse en cada pieza del equipo mientras esté en uso. Estas actividades deben reportarse en la tarjeta de cada equipo o en la bitácora de la planta. También debe reportarse cualquier falla o problema observado (Landau, 1966). Existen cuatro tipos de mantenimiento: Preventivo, programado, de emergencia y correctivo. Sus beneficios particulares se expresan en la lista a continuación (Palluzi, 1992).

Preventivo	Está ideado para reducir la mayor cantidad de trabajo que sería realizada en el momento más inoportuno. Es uno de los mejores modos de reducir costos. Debe contarse con un inventario del equipo y componentes en la planta piloto; revisarse los manuales y hojas de datos, desarrollar una lista de actividades preventivas.
Programado	Implica el mantenimiento general que no está asociado con ningún equipo específico (eg. Limpieza general, pruebas de fugas, reposición de aditamentos, etc). Reduce el tiempo perdido y los costos de mantenimiento al eliminar tareas duplicadas. La principal diferencia con el mantenimiento preventivo consiste en que no se realiza bajo recomendación del fabricante del equipo.
Emergencia	Es el más conocido y más costoso tipo de mantenimiento, pues requiere una respuesta inmediata sin planeación previa. Puede llegar a requerir el paro de la planta piloto inesperadamente. Desafortunadamente, es el tipo más frecuente de mantenimiento que reciben las plantas piloto.
Correctivo	Es el más mantenimiento que más retribución genera debido a que elimina los problemas en lugar de sólo reducirlos o aliviarlos. Reduce el mantenimiento a largo plazo al sustituir o modificar elementos que requieran mantenimiento preventivo, programado o de emergencia frecuentemente.

### **3 Descripción del sistema**

La recopilación y manejo de la información necesaria para llevar a cabo un proyecto que implique construir, arrancar, operar y dar mantenimiento a una planta, ya sea de proceso, de tratamiento o de distribución de materiales, debe ser completa, profunda y con las características que se requieran para que, en el caso de que se presente cualquier complicación, sean revisados cuidadosamente los documentos correspondientes (Rase y Barrow, 1973). Las características detalladas y las especificaciones de diseño de la planta prototipo, objeto de esta investigación, están contenidos en los capítulos 5 y 6 del documento que reporta las bases de diseño (Fenoglio, 2000). A continuación se hace una descripción general de los elementos que integran el proceso, así como las modificaciones realizadas durante su instalación o construcción.

El desarrollo de la tecnología de humedales artificiales se ha realizado en distintos puntos del planeta, generando información muy útil en cuanto a la fenomenología básica del proceso (Miranda, 2000). Sin embargo, para su difusión en México a nivel municipal o rural, se requiere comprobar su eficiencia en la remoción de contaminantes a partir de la experimentación adicional en un equipo lo suficientemente grande como para producir resultados representativos. Puesto que se trata de un sistema biológico, para su escalamiento es necesario llevar a cabo pruebas de adaptación a las condiciones climáticas de la zona, además de evaluar su eficiencia en diversas condiciones de operación. Por tal motivo, fue construida la planta piloto de tipo HAFVD.

#### **3.1 Utilidad de la planta piloto**

La planta piloto tipo HAFVD, objeto de este estudio, consiste en un tren de tratamiento ideado como una herramienta experimental para la evaluación de la eficiencia de depuración de los contaminantes orgánicos de un agua residual sanitaria por medio del sistema de humedales como tratamiento de tipo secundario.

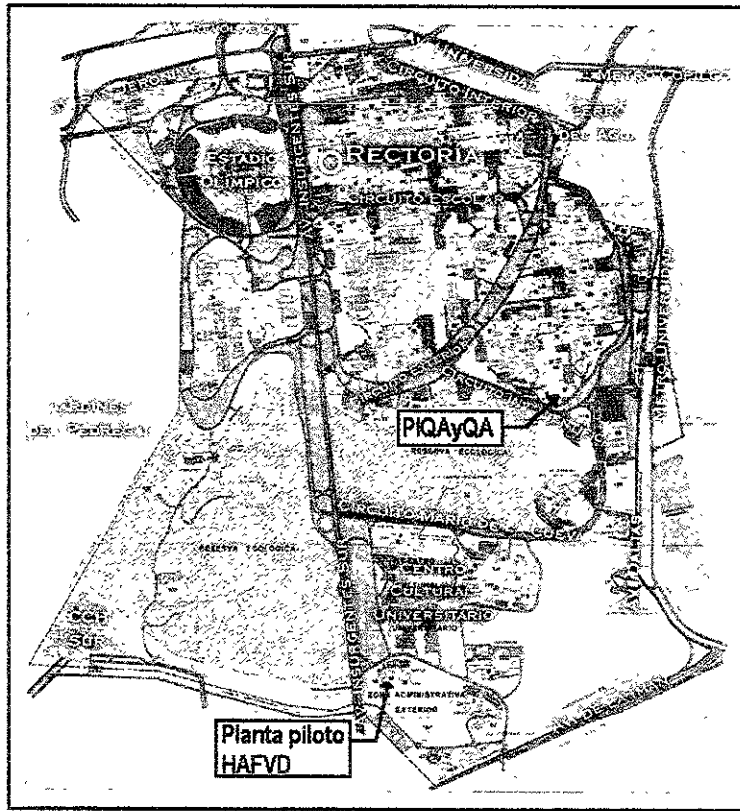
Adicionalmente, se obtiene un beneficio inmediato por la operación, pues el agua tratada por el HAFVD tiene una carga contaminante considerablemente menor que la inicial y, está disponible para ser usada en el proceso de elaboración de "composta", que tiene lugar en un sitio contiguo a la planta piloto HAFVD (Fenoglio, 2000).

A lo largo de este trabajo, serán definidos los procedimientos de operación más adecuados para el arranque, mantenimiento y evaluación de un HAFVD de dimensiones reales, con el fin de evitar el deterioro del sistema, así como riesgos a los operadores. En el futuro, podrán abrirse diversas líneas de investigación sobre un proceso general o un problema específico en una escala manejable, en un contexto realista y de modo oportuno. La información obtenida a partir de la operación de la planta piloto, al manipular variables de interés, podrá utilizarse en la construcción y operación de sistemas a mayor escala, además de evaluar su comportamiento y adaptación a las características y requerimientos de diversas zonas rurales y semi-urbanas del país (Fenoglio, 2000). Si se desea, y las condiciones propuestas para los experimentos no son extremosas al grado de deteriorar el sistema, será posible llevar el estudio al largo plazo para estimar su vida media de utilidad.

### **3.2 Localización de la planta**

La planta prototipo HAFVD está ubicada al sur de la Cuenca del Valle de México, dentro de Ciudad Universitaria, en la Delegación Coyoacán. En la Figura 3-1 se muestra un plano de la Ciudad Universitaria señalando el sitio de ubicación de la planta piloto tipo HAFVD. La flecha que aparece en la figura señala la Zona Administrativa Exterior, donde se encuentra el edificio de los Talleres de Conservación de la Zona Cultural, así como de la planta piloto. En conjunto con la Dirección General de Obras y Conservación (DGOySG) de la UNAM (ahora llamada Dirección General de Obras y Conservación, DGOyC), se decidió construir la planta prototipo aprovechando la infraestructura del edificio que alberga las oficinas del Departamento de Supervisión y Control de Zona Cultural de la DGOyC, así como los Talleres de

Conservación de Áreas Verdes de la misma dependencia.



**Figura 3-1 Plano de la Ciudad Universitaria en la UNAM (México, D.F).**

**Ubicación del PIQAYQA y de la planta prototipo de HAFVD**

El sitio de construcción de la planta piloto fue elegido en función de las condiciones óptimas para un sistema experimental a escala prototipo. Entre los beneficios que presenta el sitio de la Zona Cultural se encuentran los siguientes:

- El HAFV está expuesto a condiciones climáticas reales (zona sur de la Cuenca del Valle de México)
- Se cuenta con tres corrientes de aguas residuales de tipo sanitario provenientes del Taller de Conservación
- Por la cercanía del sitio a las instalaciones del PIQAYQA puede tenerse un adecuado control monitorio de su comportamiento

- El agua residual tratada por la planta piloto está disponible para la preparación de la “composta”
- El acceso al lugar está restringido a personal autorizado por la DGOyC, lo cual reduce: a) El riesgo de infección a personas ajenas por contacto con el agua contaminada y, b) La posibilidad de deterioro por vandalismo.

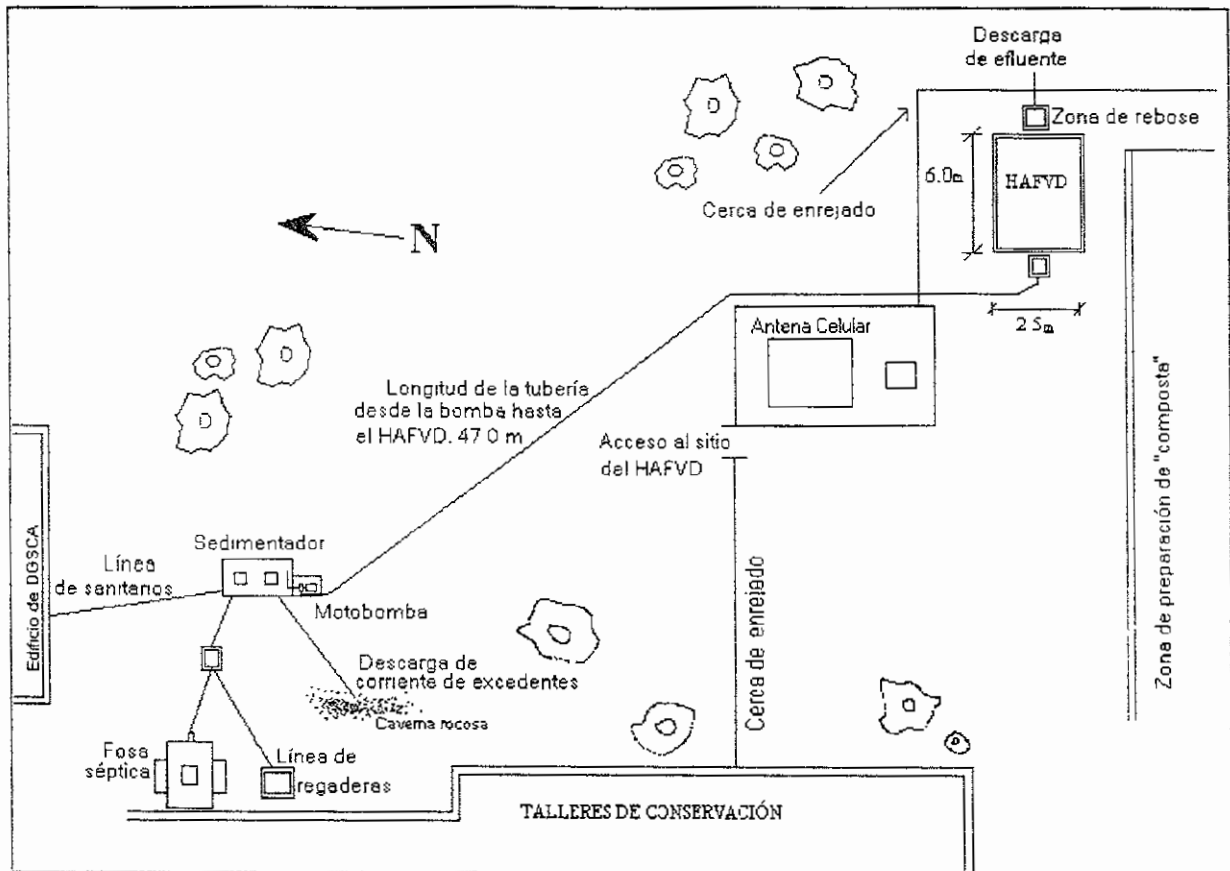
### 3.2.1 Características del sitio

El sitio se encuentra a una elevación sobre el nivel del mar aproximada de 2300 msnm, 19°20' latitud norte y 99°10' longitud oeste. En la parte posterior del Taller de Conservación se delimita un espacio de 500m<sup>2</sup>, aproximadamente, utilizado por la DGOyC para el procesamiento de los residuos orgánicos generados por la poda de las áreas jardinadas de la Ciudad Universitaria. Al producto de este proceso de degradación biológica se le conoce como “composta”. El HAFVD se construyó en el extremo del espacio de preparación de composta más cercano al Taller de Conservación (Figura 3-2).

Debido a la irregularidad del terreno del pedregal volcánico donde se encuentra el área de preparación de composta, previo a su construcción fue necesario hacer una nivelación con material de relleno (cascajo, tierra arcillosa y viruta de madera). El lecho del HAFV se encuentra excavado dentro del material de relleno, y el área circundante es de tipo pedregal de origen volcánico (basalto).

### 3.2.2 Condiciones climatológicas

El efecto de las condiciones ambientales y meteorológicas sobre el funcionamiento del HAFVD y su adaptación es un aspecto de mucho interés debido a que son variables no controlables, y en buena parte son las que determinan la rapidez de adaptación de



**Figura 3-2 Plano aéreo del área de Conservación  
donde se ubica la planta piloto HAFVD**

las plantas y el desarrollo de la biomasa interna que realiza la degradación de contaminantes (Kadlec, 1999; Breen, 1997).

En las tablas presentadas a continuación (Tabla 3-1 y Tabla 3-2) se encuentran estimados de las condiciones climatológicas de la Cuenca del Valle de México. Dado que los datos presentados son ponderados para una región y un período relativamente amplios, se recomienda usarlos sólo como referencia. Los parámetros fueron determinados en la estación del Sistema Meteorológico Nacional de Tacubaya,

en la delegación Miguel Hidalgo y la planta piloto de Zona Cultural se ubica en Coyoacán. En el plano de la distribución de climas en el Distrito Federal presentado en la Figura 3-3 puede observarse la similitud climática entre los dos sitios, de manera que se puedan correlacionar los parámetros meteorológicos. Los datos para precipitación pluvial y humedad relativa fueron tomados de las bases de diseño.

**Tabla 3-1 Datos meteorológicos en el Distrito Federal: Temperatura media mensual (1997-1998) (INEGI, 2000); Precipitación pluvial durante 1997 (Fenoglio, 2000)**

Mes	Temperatura (°C)	Precipitación pluvial (mm)
Enero	13	1.3
Febrero	14.5	1.7
Marzo	16.5	27.5
Abril	18	57.2
Mayo	18.5	63.0
Junio	17.5	84.3
Julio	16	204.9
Agosto	16	139.4
Septiembre	15.7	114.6
Octubre	15	52.7
Noviembre	14	15.4
Diciembre	13	12.1
Anual	Promedio: 15.6	Total: 774.1

**Tabla 3-2 Humedad relativa durante 1997 (Fenoglio, 2000)**

Media	62%
Mínima	49%
Máxima	100%





Figura 3-3 Distribución de climas en el Distrito Federal (INEGI, 2000)

### 3.3 Descripción general del proceso

A continuación se describen los aspectos más importantes de los equipos con que cuenta el tren de tratamiento. Es preciso resaltar que algunos equipos, así como la conexión de las tuberías no fueron construidos de acuerdo al diseño original, descrito en las bases de diseño del sistema (Fenoglio, 2000), aunque sí se respetaron los criterios fundamentales para la selección del tren de pretratamiento. Tales modificaciones en el diseño y su justificación serán explicados a lo largo de este

capítulo. Esta información debe considerarse cuando se tome cualquier decisión relativa a la operación o mantenimiento de dichos equipos.

La etapa principal del proceso es un sistema de tratamiento biológico secundario de tipo humedal artificial de flujo vertical, que basa su funcionamiento en un proceso de tratamiento biológico, degradando los contaminantes orgánicos presentes en el agua a través de la combinación de procesos aerobios, anaerobios, micro-aerobios y anóxicos.

El tren de tratamiento está integrado por tres etapas generales, que comprenden a los siguientes equipos:

- Pretratamiento: Fosa séptica
- Tratamiento primario: Tanque sedimentador y homogeneizador de corrientes de entrada
- Tratamiento secundario: Humedal artificial de flujo vertical descendente

Los criterios más importantes para la selección del tren de tratamiento fueron los siguientes (Fenoglio, 2000):

- Las características fisicoquímicas del agua que será tratada
- La calidad del agua que se desea obtener al final del tratamiento
- El estudio de los costos de inversión y la evaluación técnico económica
- La construcción y disposición de los sistemas y accesorios involucrados, con el fin de disminuir los costos de operación y mantenimiento
- Las condiciones climatológicas y topográficas de la zona seleccionada para la construcción del sistema
- La inclusión de puntos para la toma de muestra en los sitios de mayor interés del proceso

### 3.3.1 Entrada de agua residual

Las características del agua disponible fueron estimadas en función de la cantidad y tipo de equipos sanitarios en las instalaciones y la cantidad de empleados laborando en las oficinas administrativas y en el taller. Aunque las corrientes de entrada sufren variaciones en composición y gasto, debidas principalmente a las actividades y el número de los usuarios, el tanque sedimentador consigue amortiguar tales variaciones de contenido o composición del agua antes de entrar al HAFVD.

En el diseño original se presentan sólo dos corrientes de alimentación al sistema: Una de ellas, proveniente de regaderas y otra, de excusados. Una vez que fue construido el tanque sedimentador (S-02), se conectaron, además de las dos corrientes previstas, una más, proveniente los servicios sanitarios de un edificio contiguo, que alberga oficinas de la Dirección General de Cómputo Académico -Departamento de Cómputo Aplicado a la Investigación. Esta modificación se realizó con la justificación de evitar que tal corriente se vertiera directamente en una grieta del lugar. El diagrama de flujo de proceso actualizado puede encontrarse en la Figura 3-8.

Como se explicará más adelante, esa modificación ocasiona una reducción importante en la eficiencia de operación del tanque sedimentador, pues cambian las concentraciones y capacidad del diseño original. De continuar abierta esa corriente de entrada, aumentará la frecuencia de los servicios de purga de lodos del sedimentador. La conexión de esa línea al sedimentador sólo tiene como beneficio la reducción de la cantidad de contaminantes sedimentables que se vierten hacia el subsuelo al ser transferidos a la fase sólida en forma de purga de lodos del sedimentador.

### 3.3.2 Fosa séptica

La función principal de este equipo es retener del efluente líquido una parte de sólidos, tanto sedimentables como sobrenadantes, que pueden afectar el funcionamiento del resto del sistema. Adicionalmente, funciona como un reactor biológico de tipo

anaerobio y consigue una remoción de aproximadamente 10% de la materia orgánica disuelta y suspendida (Fenoglio, 2000). La corriente influente al tanque de la fosa séptica proviene de servicios sanitarios y la cocina del edificio de los talleres de conservación. El tanque tiene una capacidad aproximada de 20m<sup>3</sup>, con un tiempo de residencia de entre 2 y 6 días (Fenoglio, 2000).

Es importante aclarar que, desde que el tanque fue construido en 1981, junto con el resto del edificio, no se realizó ningún servicio de mantenimiento para retirar los sólidos acumulados. Por tal motivo, en la etapa de arranque fue necesario gestionar la limpieza del tanque, tarea que fue facilitada por personal de la Coordinación de Áreas Verdes y Forestación, Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM. Los resultados obtenidos de la limpieza del tanque serán discutidos más adelante.

### 3.3.3 Tanque sedimentador primario

La función de este equipo es retener 60% de los sólidos totales de las corrientes influentes para reducir la DBO en el efluente y prevenir la obstrucción del lecho del HAFVD por sólidos. Además, se consigue mezclar la composición corriente proveniente de la fosa séptica con la corriente de regaderas. El tanque cuenta con tres salidas:

- Corriente principal del proceso: Es la alimentación al HAFVD, bombeada intermitentemente cada cuatro horas.
- Corriente de desalajo de exceso: El volumen excedente que no es bombeado hacia el HAFV es desalajado por una tubería colocada en la parte lateral de la segunda cámara del sedimentador primario y se conduce hacia una grieta localizada a cinco metros de distancia. El nivel de inundación del tanque está controlado por la altura de la salida de esta corriente.
- Corriente de purga de lodos: En la parte inferior del tanque se encuentra una línea controlada por una válvula. Se utiliza sólo para realizar los servicios de

mantenimiento periódico.

El equipo consta de dos cámaras divididas entre sí con una mampara con luz de 30% en la parte inferior. La capacidad total del tanque es aproximadamente 2700 litros. La capacidad de operación se fijó al 50% de la capacidad total del tanque para evitar la succión de sólidos por la bomba. Esto significa que si se suspendiera la generación de agua residual (por fines de semana o vacaciones), y operando a la capacidad normal del HAFVD (650 L/día), se tiene un margen de operación de dos días, hasta que vuelva a restituirse la generación de agua en los edificios.

Es muy importante señalar que durante la construcción de la planta, este equipo sufrió una modificación importante en el diseño originalmente planeado, debido a la incompatibilidad con las características del sitio, y a los requerimientos. Las características fundamentales del equipo son las mismas que las descritas en las bases de diseño (Fenoglio, 2000, p. 61) pero, a diferencia del diseño original, que proponía construirlo a partir de un tinaco comercial, el tanque sedimentador fue construido con materiales de concreto armado y varilla y, las tuberías de entrada y salida de PVC de 5 pulgadas (12.7cm) de diámetro se insertan directamente en las paredes del tanque. La construcción estuvo a cargo del personal del Departamento de Supervisión y Control de la Zona Cultural. En la Figura 3-4 puede verse un esquema simplificado del tanque sedimentador que fue construido.

Más adelante, en los capítulos 5 y 6, se discutirá la importancia que tiene pretratamiento primario, y se describirá un problema importante que ocurrió debido a la incorrecta instalación del tubo de succión de la bomba dentro del tanque sedimentador.

### **3.3.4 Sistema de bombeo**

La función principal de la bomba es llevar el agua desde el tanque sedimentador hasta el HAFVD con el patrón de flujo adecuado (frecuencia y volumen de alimentación)

Existe un desnivel de 3.5 m de altura y 47m de distancia lineal desde un punto a otro. El bombeo tiene un beneficio adicional, que consiste en entregar el líquido con una presión suficiente para distribuirlo uniformemente sobre la superficie del humedal.

Se utiliza una motobomba monofásica con capacidad de 0.5 HP, con impulsor de canal abierto para evitar sea dañado por la posible presencia de sólidos en el agua (Fenoglio, 2000). Para resguardar la motobomba de la intemperie, el diseño constructivo del sedimentador incluye un gabinete anexo, donde se deposita también la acometida eléctrica y el dispositivo de control de arranque y paro de la bomba.

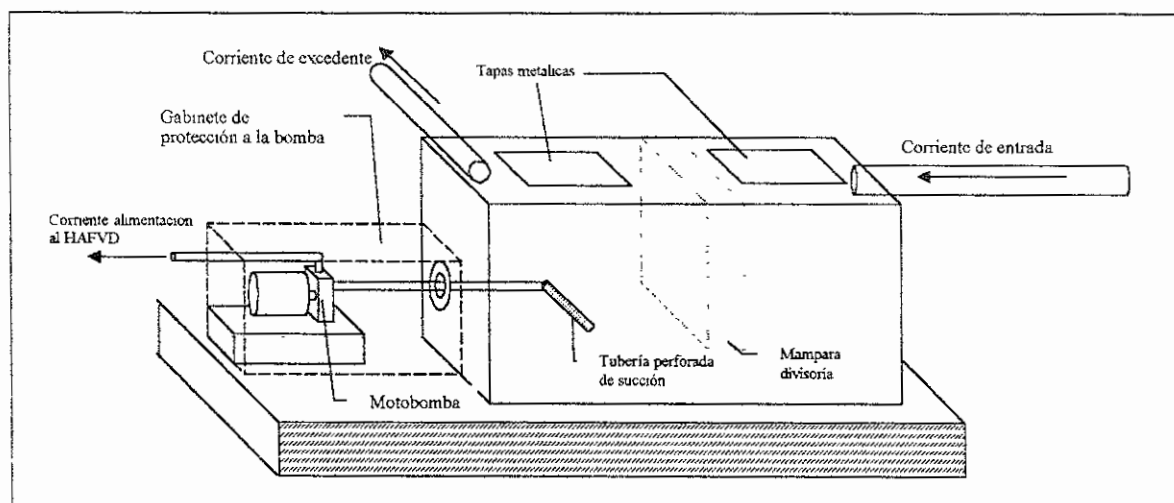


Figura 3-4 Vista esquemática del tanque sedimentador y motobomba

### 3.3.5 Humedal artificial de flujo vertical descendente

Las características del sistema de tratamiento secundario de tipo biológico fueron definidas por parámetros como: La carga orgánica, la presencia de nitrógeno y fósforo, el tiempo de residencia hidráulico y las condiciones requeridas de la descarga. A partir de estos se diseñó el HAFVD, cuyas características se resumen en la Tabla 3-3. Una descripción más detallada del HAFVD puede encontrarse en el capítulo 6 de las bases de diseño (Fenoglio, 2000).

Tabla 3-3 Especificaciones de la planta piloto tipo humedal artificial de flujo vertical

<b>Tipo de agua de influente</b>	Agua residual contaminada, tipo sanitaria proveniente de instalaciones tipo baños, regaderas y cocina
<b>Tipo de tratamiento primario</b>	Fosa séptica y sedimentador primario
<b>Tipo de tratamiento secundario</b>	Sistema biológico tipo humedales artificiales de flujo vertical descendente
<b>Dimensiones</b>	Largo: 6m Ancho: 2.5m Profundidad: 1.3m
<b>Material de empaque</b>	Escoria volcánica distribuida en estratos de diferente diámetro
<b>Porosidad promedio del material de empaque</b>	49%
<b>Tipo de plantas usadas</b>	La superficie del humedal se encuentra dividida en tres secciones de área equivalente. En cada sección se localiza un tipo de planta distinta: <i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Cyperus sp.</i>
<b>Densidad de plantas</b>	3 plantas / m <sup>2</sup>
<b>Promedio de concentración de reactivo (DQO del agua influente)</b>	706 mg O <sub>2</sub> / L
<b>Capacidad hidráulica normal</b>	650 L / día
<b>Capacidad hidráulica máxima</b>	800 L / día
<b>Capacidad hidráulica mínima</b>	400 L / día
<b>Tiempo de residencia hidráulico en nivel máximo de inundación con un gasto de 600L / día</b>	Zona <i>mojada</i> : 16 días
<b>Sistema de control de flujo de entrada al humedal</b>	Dispositivo cronométrico para arranque y paro de la bomba

### 3.3.5.1 Corriente de alimentación al humedal

Las características fisicoquímicas del agua de alimentación, posterior al pretratamiento primario, puede verificarse en la Tabla 3-4. Como se explicó en la sección 3.3.1, esta característica no es una variable que pueda controlarse o manipularse debido a que depende de las actividades en los servicios sanitarios y cocina de los edificios de Conservación.

**Tabla 3-4 Resumen de características de la alimentación al humedal artificial**

Parámetro	Abreviatura	Valor promedio a 6 meses	Unidades
Demanda química de oxígeno	DQO	740	mg O <sub>2</sub> / L
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO	360	mg O <sub>2</sub> / L
Potencial hidrógeno	pH	6.8	Unidades pH
Sólidos sedimentables	Sse	0.2	mL/L
Sólidos totales	STT	739	mg/L
Sólidos totales volátiles	STV	416	mg/L

### 3.3.5.2 Sistema de distribución de la alimentación en el humedal

El diseño original del humedal contemplaba sólo cuatro puntos de alimentación de agua sobre la superficie del humedal, del siguiente modo: El agua residual que era bombeada desde el sedimentador primario (S-1) se distribuía sobre la superficie del humedal por medio de una tubería dispuesta longitudinalmente por el centro del humedal con cuatro descargas. Esta disposición cumplía con la recomendación de la norma austriaca para el diseño de humedales en cuanto a la mínima distribución del agua por unidad de superficie (Fenoglio, 2000). Sin embargo, se observó que durante los meses más fríos y secos era necesaria una mejor distribución del agua para favorecer la adaptación de las plantas más jóvenes. La instalación que se diseñó e instaló en el mes de marzo, consiste en un tubo de 3.8cm (1½ pulg). que corre



longitudinalmente a lo largo de la superficie del HAFVD y se distribuye en seis ramas de 1.9cm ( $\frac{3}{4}$  pulg.) que salen lateralmente. Cada derivación tiene ocho orificios de 4mm de diámetro dispuestos de forma alternada en los costados del tubo por donde el agua entra al humedal. El sistema fue diseñado en función de la velocidad con que se desea que el agua salga por los orificios para evitar la obstrucción de sólidos, así como para lograr que el agua salpique y se favorezca la disolución de oxígeno en el agua. En la Figura 3-5 puede apreciarse un esquema simplificado del HAFVD con la tubería de distribución de agua sobre la superficie.

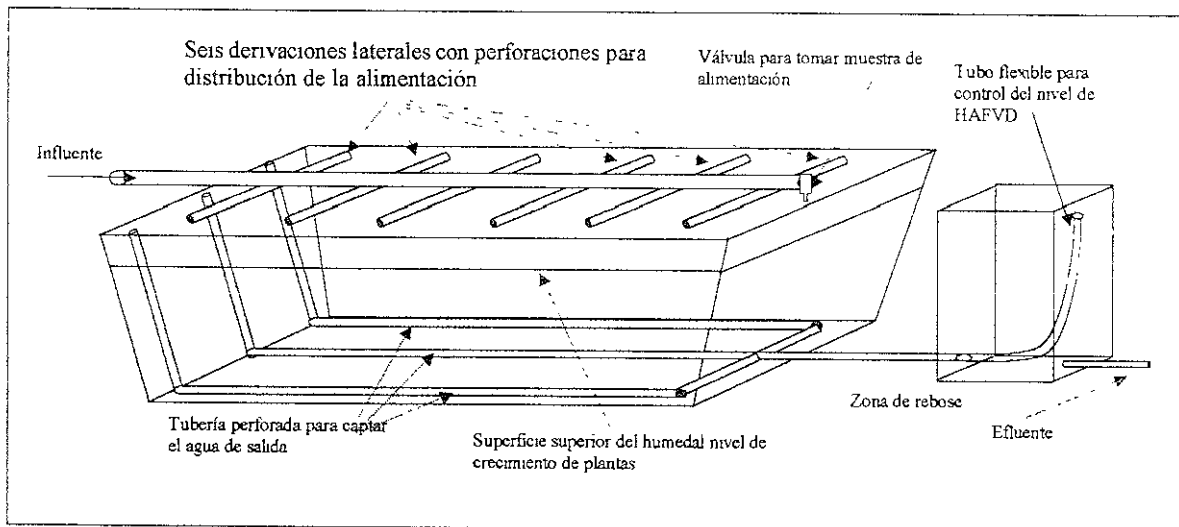


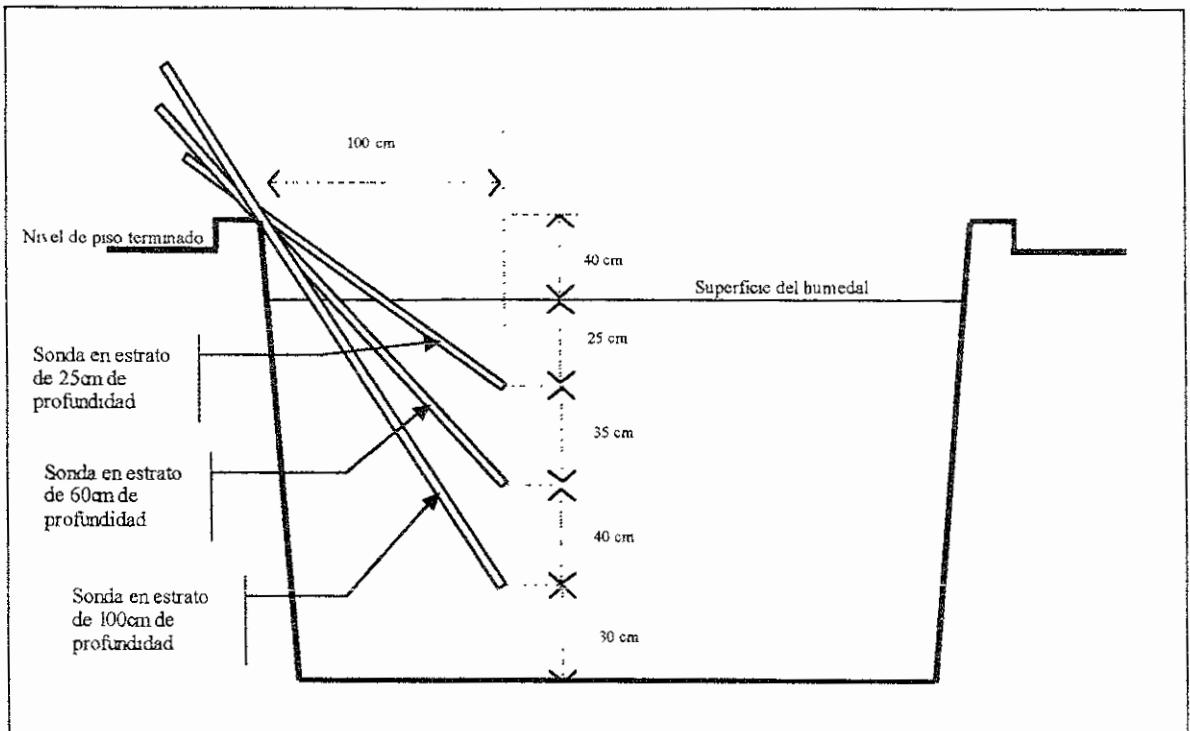
Figura 3-5 Esquema del sistema de distribución de la alimentación sobre el HAFVD

### 3.3.5.3 Siembra de plantas

La superficie del humedal se dividió en tres secciones de área equivalente para la siembra de plantas. En cada sección fue colocada un tipo de planta botánicamente distinta: *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Cyperus sp.* Para la siembra inicial de las plantas en el humedal, se recomienda una densidad de 3 planta/m<sup>2</sup>. Es importante mencionar que de acuerdo a lo planeado en las bases de diseño, esta etapa sería llevada a cabo en la temporada de lluvias, sin embargo por razones de fuerza mayor, la siembra de plantas se realizó en diciembre de 2000. El clima seco y las temperaturas extremosas, obligaron a aumentar la densidad de plantas en la superficie de HAFVD, de forma que se sembraron 17 plantas para 5 m<sup>2</sup>.

### 3.3.5.4 Sistema de muestreo por sondas en el interior del humedal

Puesto que no existe una forma directa de conocer el mecanismo de depuración de contaminantes en la zona no inundada, se diseñó un sistema de muestreo por sondas al interior del humedal. Tales sondas permiten tomar un pequeño volumen en tres puntos ubicados sobre la misma vertical en diferentes estratos de la zona aerobia cuando el agua se alimenta y escurre hacia la zona inundada.



**Figura 3-6 Perfil del HAFVD con instalación de las sondas para tomar muestras de agua en el interior**

### 3.3.6 Instrumentación del proceso

Una parte importante de la operación de un HAFV consiste en un adecuado manejo del flujo de entrada y de salida. Estas variables tienen influencia directa sobre el tiempo de residencia y, por consiguiente, en la eficiencia de depuración del agua. A continuación se describen los dispositivos que permiten regular tales variables.

### **3.3.6.1 Control de protección a la bomba**

Se cuenta con un controlador de nivel de tipo mecánico (flotador) dentro del tanque sedimentador S-1 para evitar que la bomba funcione cuando no haya generación de aguas residuales en los servicios sanitarios de los edificios. El equipo es de tipo mecánico, integrado por un flotador y un “contactor” que cierra el circuito de la bomba. Este sistema está acoplado directamente al circuito eléctrico del control de tiempo descrito anteriormente.

El equipo de control instalado presenta una desventaja importante, pues es un sistema mecánico, y por lo tanto está en contacto directo con el agua residual, dentro de la cámara del S-1. Al estar en contacto con los gases producidos por la degradación anaerobia dentro del sistema, probablemente se presentarán problemas de corrosión y ensuciamiento importantes. Esto deberá ser considerado en los planes de mantenimiento y prevención.

### **3.3.6.2 Control de tiempo para flujo de alimentación al HAFV**

Dado que la alimentación al HAFV debe hacerse de forma intermitente, es necesario contar con un control suficientemente flexible de arranque y paro para controlar la operación de la bomba variando el volumen y la frecuencia de alimentación. Se compró e instaló un dispositivo de control cronométrico de doble función (arranque y paro) con intervalo de operación de 1s a 10 h. El circuito de la bomba está cortado por el sub-circuito del cronómetro y éste a su vez está cortado por el sub-circuito de paro de emergencia (flotador dentro del sedimentador). Como se explicará más adelante, la frecuencia de las alimentaciones y el tiempo de bombeo están predeterminados por las condiciones de operación que se establezcan para la experimentación.

### **3.3.6.3 Medidor de flujo de entrada al HAFVD**

El sistema cuenta con un medidor de flujo en la tubería de entrada al humedal

artificial. La instalación del medidor se realizó previendo el riesgo de atascamiento del mecanismo interno del equipo por la presencia de sólidos suspendidos en el agua proveniente del sedimentador primario. En la sección 2.5.1 se vio que es posible evitar problemas posteriores si se cuenta con una instalación para dar mantenimiento a los equipos. En este sentido, puede verificarse la recomendación hecha en el documento que describe la operación de la planta piloto tipo HA de flujo horizontal, ubicada en el Vivero Forestal de Coyoacán (Millán, 1999), relativa a la instalación de un medidor de flujo en la corriente influente. Por lo anterior, se dispuso un arreglo del tipo *by-pass* o derivación con válvulas (ver Figura 3-7). para controlar el flujo del líquido ya sea hacia un tramo de tubo libre, o bien, hacia el tramo de tubo que sostiene el medidor de flujo. De esta forma, el medidor de flujo sólo se utilizará por tiempos limitados, cuando se fijen las condiciones de operación.

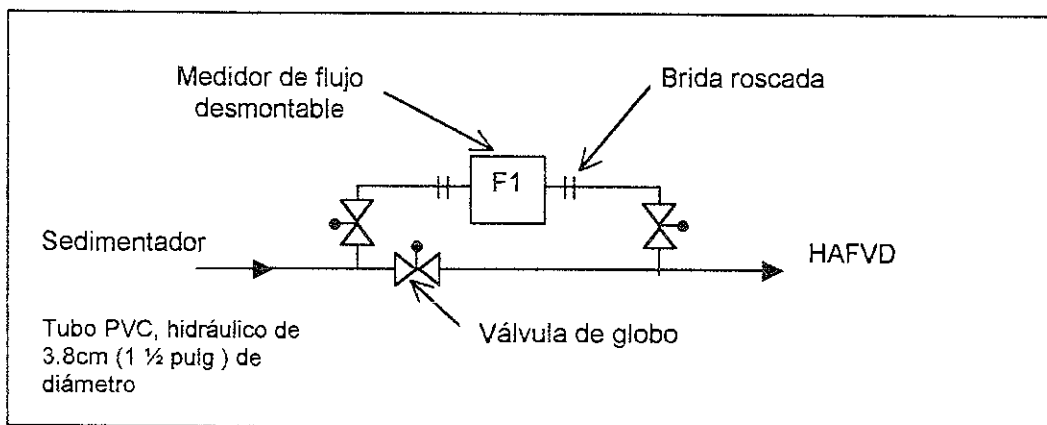


Figura 3-7 Esquema de la instalación del medidor de flujo a la entrada del HAFVD

### 3.3.6.4 Control de nivel de inundación del HAFV

La inundación de agua dentro del lecho del HAFV es una variable de diseño importante pues determina el espacio de contacto que el líquido tendrá con la biomasa de microorganismos que realizan la asimilación de los contaminantes orgánicos. Puesto que se trata de una planta piloto experimental, el nivel de inundación debe ser una variable susceptible de manipularse para realizar experimentos en distintas condiciones de operación.

Se adaptó un tubo flexible al colector de descarga del humedal de manera que el nivel de inundación esté controlado por la altura de descarga del tubo flexible. Este tubo se ajusta por medio de una cadena de control, y puede manipularse de forma muy práctica. Para mejor control del nivel de inundación, se marcó la cadena a distintas longitudes con etiquetas de acuerdo con el porcentaje de inundación deseado.

### 3.3.7 Diagrama de flujo de proceso

La disposición básica de los equipos y las conexiones se muestran en el diagrama de flujo de proceso, en la Figura 3-8. La Tabla 3-5 muestra las corrientes de entrada y salida al sistema en estudio. Los valores de los parámetros DBO y STT para las corrientes 7 y 8, correspondientes a la salida del HAFVD, se alcanzarán cuando el sistema desarrolle su capacidad máxima en el régimen estable.

**Tabla 3-5 Balance de materia por cada corriente de proceso (Fenoglio, 2000)**

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujo (L/día)	2400	3000	2400	650	5	4700	650	650
DBO (mg/L)	980	80	787	320	-----	320	15	15
STT (mg/L)	1400	20	650	140	5000	140	70	70

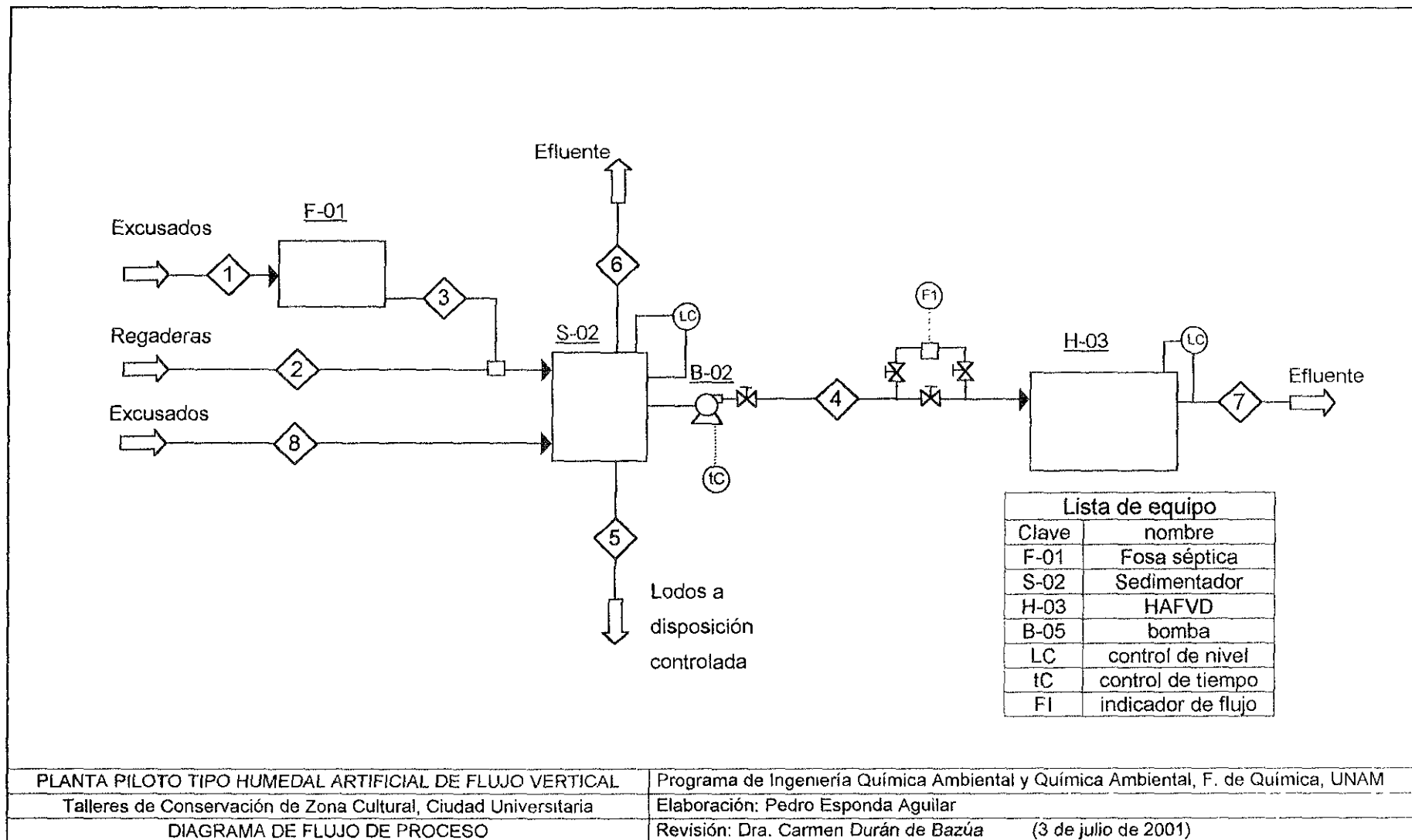


Figura 3-8 Diagrama de flujo de proceso de la planta piloto tipo HAFVD

## 4 Inicio de operaciones

Por las razones que se explicaron en la sección 2.5.1, el arranque de la planta piloto comenzó antes de concluir la construcción e instalación de servicios periféricos. Algunos problemas de la operación fueron resueltos, virtualmente, antes de iniciado el arranque, como en el caso de la instalación de un equipo de protección al medidor de flujo para prevenir su obstrucción por la presencia de sólidos suspendidos. De forma contraria, la etapa llegó a prolongarse algún tiempo más, aún después de iniciar la operación del sistema. Esto se debe a que, para alcanzar el régimen *estable*, deben modificarse las condiciones de operación de forma gradual, y en el transcurso de este proceso, se presentaron problemas importantes que obligaron a alargar la etapa intermedia.

Las condiciones de operación para el régimen *estable* se establecieron en términos de los parámetros de diseño, como se mencionó en la sección 3.3. La operación en régimen estable se alcanza cuando la variable de salida, evaluada como un parámetro, o bien, como un conjunto de parámetros fisicoquímicos, permanezca moderadamente constante ( $\pm 10\%$  de variación). Se sugiere que al período que atraviesa entre la puesta en marcha del sistema y la operación a régimen estable se le llame operación a régimen dinámico. Con esto se entiende un período en que las variaciones en el patrón de alimentación y en las condiciones externas, entendidas como perturbaciones, generan discontinuidad en las variables de salida.

El sistema tipo HAFVD es una tecnología relativamente novedosa y, normalmente no ha sido estudiada con el enfoque de ingeniería de proyectos, por lo que deben conocerse los mecanismos biológicos, microbiológicos y fisicoquímicos que ocurren en el sistema para implementar soluciones exitosas. Especialmente en lo relativo a la calendarización de las actividades de la etapa de arranque, como se mencionó en la sección 2.5.2, la estimación de los tiempos es incierta pues, en buena parte, depende de los imprevistos que vayan surgiendo y de la adaptación del sistema biológico en

estudio. Las actividades de organización y algunas pruebas de pre-arranque fueron llevadas a cabo de forma simultánea con las últimas etapas de la construcción del sistema, lo que favoreció el intercambio de ideas con el responsable de dicha etapa y facilitó el pase de mando. Tal acción fue recomendada anteriormente en la sección 2.5.2.

#### **4.1 Planeación de las actividades de arranque**

Antes de iniciar las tareas de arranque, se realizó una planeación preliminar. En esta planeación, sólo se consideraron las fases principales del arranque hasta la operación a régimen estable, pero sin definir las tareas particulares por los motivos que fueron explicados anteriormente. Los principales puntos que se realizaron para completar el arranque de operaciones se presentan en el cronograma de actividades (Figura 4-1) y serán descritas a lo largo de este capítulo.

Debido a que las actividades para llevar a cabo el arranque y la operación de la planta son numerosas y diversas, fue necesario determinar el tipo de tareas que se realizarían para segregar las funciones, es decir, asignar tiempos y lugares a cada tipo de actividad. Las cuatro funciones generales que fueron introducidas en la sección 2.5.2, se utilizaron como base para distribuir las actividades. Es recomendable contemplar funciones no sólo como complementarias, sino como base para el desarrollo exitoso de la totalidad del proyecto. A continuación se explican brevemente las operaciones relativas a cada función.

Las actividades administrativas se llevaron a cabo desde el laboratorio 301 del conjunto E de la Facultad de Química. Tales actividades incluyen las siguientes: Planeación y organización de labores; procuración de materiales y equipos; gestión para recibir servicios de apoyo; elaboración de reportes de avance del proyecto. En cuanto a la operación técnica y mantenimiento de la planta prototipo, las actividades se distribuyeron de la siguiente forma: Supervisión y control del proceso; interpretación de resultados del laboratorio y de problemas en la operación;



actividades de mantenimiento preventivo y correctivo. El análisis de las muestras tomadas de las corrientes de entrada y salida del proceso se realizó, tanto en el laboratorio del PIQAYQA, como en el mismo sitio de la planta. Puesto que se determinaban múltiples parámetros para cada muestra, las actividades se distribuían a lo largo de la semana.

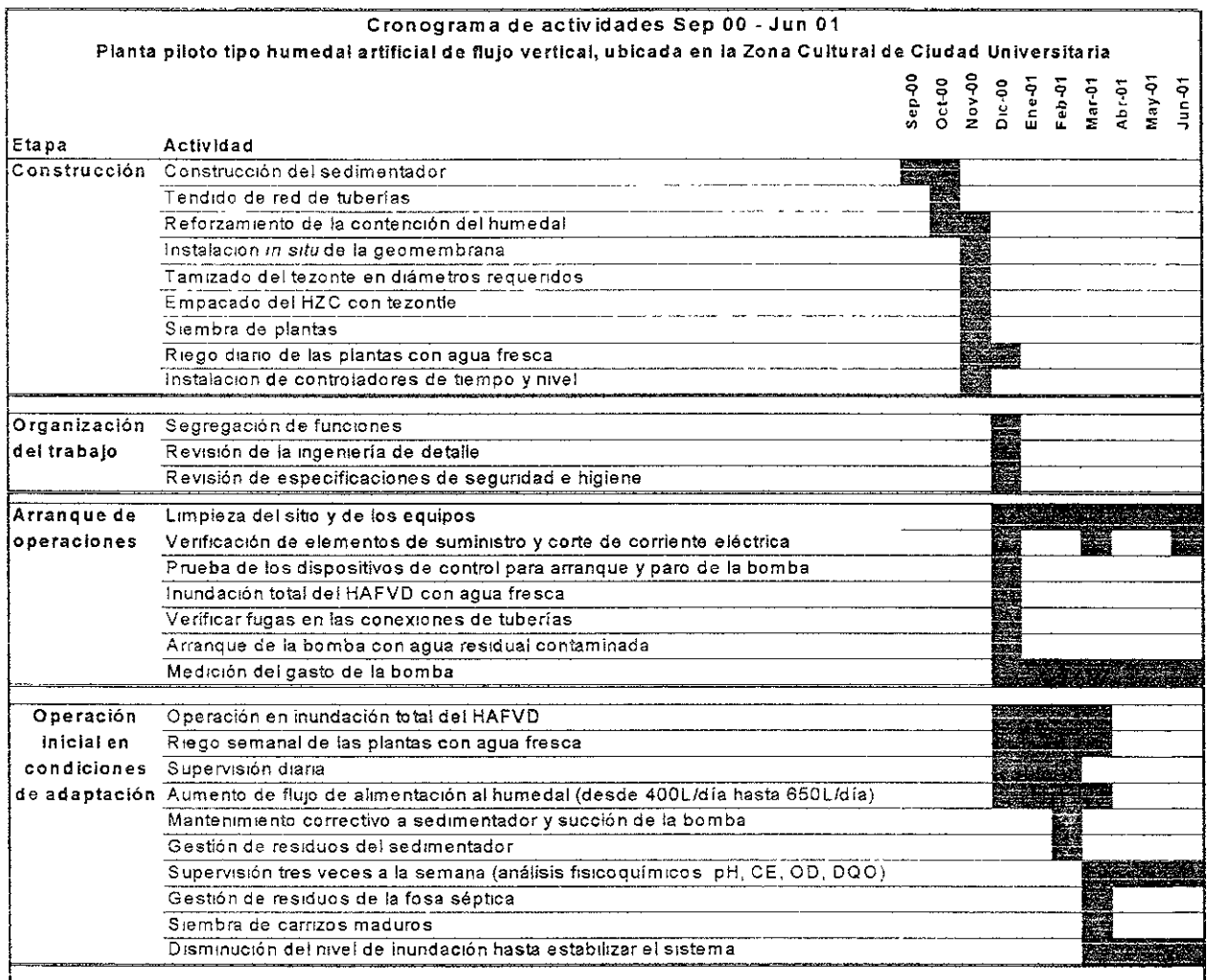


Figura 4-1 Cronograma original de actividades realizadas a lo largo del proyecto

## 4.2 Preparativos y arranque

En la sección 2.5.4 se habló sobre la importancia de la etapa de organización y planeación como la clave para una etapa de arranque exitosa y eficiente en la escala

piloto puesto que, en esta etapa, pueden evitarse una gran cantidad de problemas en etapas posteriores del proyecto (Gans *et al*, 1983). Para respaldar la toma de decisiones y la atención a emergencias, se reunieron los documentos descriptivos del tren de tratamiento: Especificación de condiciones de operación, diagramas y tablas de especificación de los equipos, información relativa a toxicidad y riesgos en el manejo de las sustancias del proceso y equipos. Se revisaron los documentos de las bases de diseño de la planta, se detectaron las discrepancias entre el diseño original y la disposición y características físicas de la planta, de la instalación de equipos, dispositivos y tuberías y se efectuó la actualización del diagrama de flujo de proceso (Figura 3-8).

#### **4.2.1 Revisión de especificaciones de seguridad e higiene**

Antes de iniciar el arranque de operaciones debe reconocerse el riesgo potencial para definir las prácticas y condiciones de trabajo seguras. A partir de las características del proceso y el tipo de actividades a realizar, se definieron los procedimientos básicos en el manejo de los equipos y las muestras de aguas residuales. Las filosofías básicas de seguridad son:

- Portar siempre el equipo de protección adecuado y limpio cuando se trabaje en la planta piloto;
- Transportar las muestras en recipientes perfectamente cerrados; no ingerir ningún alimento mientras se esté en el sitio;
- Avisar a alguien en el PIQAYQA cada vez que se haga una visita (de preferencia en horarios hábiles) a la planta;
- Usar equipo de protección para esfuerzos físicos y para trabajos con electricidad;
- Transportar los materiales, herramientas y equipos de trabajo siempre en recipientes con manija para cargar.

El tipo de equipo de seguridad que se utilizó para realizar el trabajo de campo se enuncia a continuación:

- guantes de hule y de carnaza
- lentes protectores
- cubrebocas
- bata larga y ropa de algodón
- agua destilada o potable para lavarse en caso de emergencia
- sombrero para evitar una probable insolación;
- zapatos cerrados con suela resistente a la abrasión (provocada por el tipo de terreno basáltico del sitio)
- recipientes adecuados para transportar las muestras, el material y la herramienta

#### 4.2.2 Riego de las plantas en el HAFVD

Una vez que son sembradas las plantas dentro del HAFVD es necesario regarlas diario con agua fresca o tratada para evitar que decaigan y también para que comiencen a desarrollar raíces antes de alimentar agua contaminada. En el sitio se cuenta con una fuente de agua tratada a una distancia aproximada de 50m del HAFVD. Se utilizó una manguera de polietileno de 50m para conducir el agua. Se fijó el control de nivel del HAFVD (consistente en un tubo flexible conectado al colector de descarga del humedal) en su posición más alta para asegurarse de que el agua de riego se almacene dentro del lecho del HAFVD. La conexión del tubo se selló con silicón para evitar fugas y se aseguró con una abrazadera mecánica para evitar que se saliera de su posición por los movimientos al tubo.

Como se mencionó anteriormente, el riego fue indispensable en esta etapa debido a que las condiciones climáticas del invierno no son las más adecuadas para la siembra de las plantas, por lo que se continuó regando hasta el término del invierno. Para futuros proyectos, se recomienda programar la siembra y arranque de la planta a mediados de primavera, durante el inicio de la temporada de lluvias para disminuir la tarea de riego.

### **4.2.3 Limpieza del sitio y de los equipos**

La ubicación de la planta favorece la presencia de materiales de desecho y basura acarreados por el viento desde las pilas de composta , así como el crecimiento de arbustos y hierbas en la periferia de los equipos, e incluso dentro de la superficie del HAFVD. Es conveniente mantener limpio el sitio por varios motivos: Mejora el aspecto general del lugar de trabajo, evita accidentes ocasionados por materiales que obstaculicen las actividades, evita problemas de funcionamiento del HAFVD, sugiere la idea de actividad en el sitio y evita la presencia de personas ajenas. Esta actividad se incluye dentro de las tareas de mantenimiento programado (ver la sección 2.5.1.3).

### **4.2.4 Verificación de los elementos de suministro y corte de corriente eléctrica**

Una vez terminada la instalación, se verificó el estado de las conexiones con un multímetro para comprobar la intensidad de corriente y el voltaje, tanto del suministro eléctrico, como de los circuitos de baja tensión. Se verificó también la conexión a tierra de la bomba y del tablero de control. Esta actividad asegura el correcto funcionamiento de la bomba y el control temporizador y evita un posible daño a los equipos así como el riesgo de accidente por electrización. Esta actividad debe incluirse en las labores de mantenimiento preventivo. Se debe portar equipo de protección como guantes de carnaza y zapatos con suela de hule y ropa de algodón para realizar estas actividades.

### **4.2.5 Prueba y ajuste de los dispositivos de control para arranque y paro de la bomba**

Para el diseño de este HAFV, se considera la alimentación de agua residual debe hacerse seis veces al día, lo cual implica que el reloj temporizador debe ajustarse para accionar la bomba cada cuatro horas. Antes de realizar la instalación del sistema de

arranque y paro (control cronométrico) y el control de paro de emergencia (flotador) de la bomba, se probó el circuito en el laboratorio, con corriente de baja tensión en dispositivos de luz. Una vez instalados los controles en un tablero dentro del gabinete de la bomba, se ajustan los tiempos de encendido y paro de la bomba en el reloj de acuerdo con el cálculo teórico siguiente:

El flujo de alimentación diario para el arranque se estableció como 600L/día, distribuido en seis ciclos de 100 litros, cada uno. La capacidad teórica de la bomba, de acuerdo con su hoja de datos (Fenoglio, 2000), es de  $1.34\text{m}^3/\text{h}$ , o bien,  $0.3722\text{ L/s}$ . Con base en este valor, se fijó el ciclo de funcionamiento de la bomba en 268 segundos de operación por cada cuatro horas de paro. Hasta ese momento no se conocía el gasto real de la bomba puesto que no se había tenido oportunidad de hacerla funcionar, pero una vez iniciada la alimentación al HAFVD}, se verificó el gasto real, aspecto que será comentado más adelante.

#### **4.2.6 Inundación total del HAFVD con agua tratada y arranque de la bomba**

Aprovechando el agua de riego de las plantas se llenó el interior del humedal hasta observar el agua en la superficie, inundación al 100 por ciento. La capacidad aproximada del humedal es de 10,000 L, y debido a que la fuente de agua tratada tiene un gasto muy limitado, llegar a la máxima inundación tomó siete días, en alimentaciones de 4 horas cada día.

A lo largo del proceso de inundación del lecho del HAFVD, se verificó el estado de la conexión al tubo de descarga, y se selló con silicón y la presión mecánica de una abrazadera. Éste es uno de los puntos críticos del sistema, pues la conexión es un poco inestable por la naturaleza del tubo flexible y los movimientos constantes que sufre. Adicionalmente, la conexión soporta una carga hidrostática de 1.3m cuando se encuentra en inundación al 100%. Como se verá más adelante, esta conexión requiere de un mantenimiento preventivo constante, por lo que se sugiere buscar algún diseño alternativo que sea más resistente y estable. Para facilidad del control

del nivel de inundación dentro del HAFVD, se calibró y etiquetó la cadena de control del tubo flexible en las longitudes en que debe ajustarse la boca del tubo flexible, para fijar el nivel de inundación en 100% (máxima inundación), 75%, 50% y 30%.

Una vez que se sellaron las fugas en la conexión, fue posible iniciar el funcionamiento del sistema completo. Cabe mencionar que la etapa de pre-tratamiento comenzó a funcionar desde el mes de octubre, es decir, un mes y medio antes que el HAFVD. Como se comentará más adelante, esto aceleró el proceso de acumulación de sólidos en el sedimentador.

### **4.3 Operación inicial en régimen dinámico**

El proceso de estabilización del sistema implica un cambio gradual en las variables de operación para llevar el sistema a un régimen estable de operación, tal que permita en una etapa futura del proyecto, realizar el estudio y seguimiento de cierto parámetro para correlacionarlo con el desempeño del sistema. Por esta razón, es necesario considerar una fase intermedia entre el arranque y la operación a régimen estable. Por el comportamiento inconstante de las variables de salida (mediciones de parámetros fisicoquímicos), esta fase ya se ha definido anteriormente como *régimen dinámico*. A continuación se describen las fases cubiertas durante esta etapa.

#### **4.3.1 Operación, supervisión y control del sistema**

De acuerdo con lo explicado en la sección anterior, se realizó el seguimiento detallado del funcionamiento de la planta y los equipos, para tener control sobre cualquier falla imprevista.

##### **4.3.1.1 Manejo de las variables de control**

Las características de diseño del equipo permiten el manejo y control de ciertas

variables que afectan al funcionamiento del HAFVD. Para llevar el sistema biológico hasta la etapa de régimen estable, es necesario modificar las condiciones de operación. Las variables que son susceptibles de manipularse en la operación de este sistema en particular, son el nivel de inundación dentro del sistema y la forma de la alimentación (frecuencia y volumen por cada ciclo).

Como fue explicado anteriormente, las características de composición y concentración de contaminantes en el agua de alimentación al HAFVD, dependen del tipo y frecuencia de actividad en el sitio de generación. Estas variables no son susceptibles de manipularse con exactitud con el equipo del que se dispone, por lo que en este estudio son consideradas como fuente de perturbación intrínseca al sistema. Las variables de operación del sistema, así como la forma en que fueron ajustadas, se definen a continuación.

#### **4.3.1.1.1 Gasto de alimentación**

Esta variable representa el volumen alimentado diariamente al sistema. Afecta el tiempo de residencia del agua dentro del HAFVD y, por lo tanto, la capacidad depurativa global. Se controla con el dispositivo de control cronológico de arranque y paro de la bomba. Para evitar un cambio tan fuerte en la composición dentro del HAFVD, se decidió alimentar el agua comenzando con gastos pequeños, y luego ir aumentando. Durante las primeras cuatro semanas de operación, se fijó el gasto de la bomba para alimentar 300L diarios, correspondiente a la mitad del gasto normal de alimentación. En la quinta semana de operación se aumentó el gasto a 400L por día, y se operó de esa forma durante dos semanas más. Se fue aumentando el gasto a razón de 100L cada semana hasta alcanzar un gasto diario de 600L. Como se comentará más adelante, se presentaron algunos problemas en la succión de la bomba, lo que obligó a realizar una modificación al equipo que, a su vez, afectó la capacidad de bombeo.

Una vez en operación la bomba, fue posible medir la capacidad hidráulica real,

obteniendo un valor de 1.83 L/s. La medición fue realizada con una técnica volumétrica debido a que no se había instalado el medidor de flujo. El valor obtenido es casi cinco veces mayor al reportado en la hoja de datos de la bomba, situación que será discutida en el capítulo próximo. Conociendo la capacidad de la bomba, fue posible ajustar el ciclo de arranque y paro, por medio de un procedimiento semejante al descrito en la sección 4.2.5, para fijar la alimentación de acuerdo a la capacidad del HAFVD.

#### **4.3.1.1.2 Patrón de alimentación**

Por los motivos expuestos en la sección 2.3.2, es de vital importancia para la operación y experimentación en el HAFVD, el manejo del patrón de alimentación: La frecuencia de alimentación, el volumen alimentado en cada ciclo, la duración de cada alimentación y el nivel de inundación. Esta variable determina la forma en que el agua se alimenta al sistema y, por lo tanto, tiene influencia sobre a los siguientes aspectos: La transferencia de oxígeno al interior del sistema, la actividad microbiológica de degradación de los contaminantes y la adaptación de las plantas, entre otros.

En cuanto a la frecuencia de los ciclos de alimentación, se decidió modificar el patrón establecido por las bases de diseño como ciclos de seis horas, es decir, cuatro veces al día (Fenoglio, 2000). El patrón que se estableció durante la etapa inicial de operaciones fue de ciclos de 4 horas, distribuyendo en seis ciclos el flujo diario de alimentación. Esta decisión quedó fundamentada en dos razones. La primera, es que el tiempo de residencia hidráulico en la zona aireada (de escurrimiento) es menor a una hora, lo que permite período de aireación suficiente de tres horas, completando así, un ciclo de cuatro horas. La segunda razón es que durante los meses de otoño e invierno las temperaturas son extremosas (caluroso al mediodía y helado en las madrugadas) y la humedad relativa del ambiente es muy baja, factor que afecta de manera muy negativa la adaptación de las plantas. Al aumentar la frecuencia de las alimentaciones, se favorecen condiciones más propias para un sistema de tipo



humedal.

#### **4.3.1.1.3 Inundación del lecho**

Para la operación del sistema en el régimen estable debe tenerse una inundación del lecho al 50%, es decir, 65 cm por debajo de la superficie. Las plantas utilizadas en el HAFVD son de tipo hidrófitas, por lo que tienen grandes requerimientos de agua. Por esta razón y para favorecer el desarrollo del rizoma y tallo de las plantas, durante los primeros cuatro meses de la etapa inicial de operación, se mantuvo el lecho totalmente inundado (Giovannini y Da-Motta-Marques, 1999). Posteriormente se fue disminuyendo gradualmente el nivel de inundación a razón de 5cm cada semana, hasta alcanzar el nivel predeterminado para su operación normal. Al iniciar el proceso de disminución del nivel se presentaron algunos problemas relacionados con las plantas, aspecto que será discutido más adelante.

#### **4.3.1.2 Evaluación del comportamiento del sistema**

Como se ha mencionado antes, uno de los principales objetivos planteados para esta investigación es conocer la evolución dinámica del HAFVD en escala prototipo en las condiciones establecidas por las variables de operación. En la sección anterior se definieron estas variables de control u operación del sistema. Se propuso un programa monitorio basado principalmente en parámetros fisicoquímicos.

De antemano se sabe que la etapa que se evalúa presentará una fluctuación importante, por lo que se requiere especialmente de un ojo crítico para interpretar los resultados obtenidos. Para esta etapa, en que sólo se desea conocer la evolución del sistema hasta llegar al régimen estable, sólo se establecieron dos puntos de muestreo ubicados en la corriente de entrada al HAFVD (proveniente del sedimentador) y en la de salida del HAFVD.

#### 4.3.1.2.1 Parámetros estudiados

La determinación de la demanda química de oxígeno total (DQO) se realizó de acuerdo con el principio espectrofotométrico planteado en el manual de *métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual* (APHA, 1999) y usando la técnica rápida de reflujo cerrado en microescala (Oaxaca, 1997). La medición de DQO se estableció como el parámetro principal para la evaluación y control de la planta piloto. El análisis se realizó en el laboratorio del PIQAYQA; el manejo de las muestras y la frecuencia de análisis se describirán más adelante.

Otros parámetros fisicoquímicos y bioquímicos se utilizaron como indicadores secundarios del estado del sistema. La determinación los siguientes parámetros fisicoquímicos fue realizada en el sitio de la planta piloto con un equipo de electrodos para análisis en campo (Corning): Valores de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura. Los sólidos totales, sedimentables, s. volátiles, s. suspendidos, s. disueltos y parámetros bioquímicos como demanda bioquímica de oxígeno y la observación de muestras al microscopio se realizaron en el laboratorio del PIQAYQA. Los parámetros indicadores de fósforo y nitrógeno (orgánico y amoniacal) no se determinaron en esta fase debido a que se sabe de antemano que durante la etapa inicial no se ha desarrollado plenamente la capacidad para remover los nutrientes.

En etapas posteriores del proyecto, será muy útil conducir la evaluación de una batería más completa de pruebas fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas. También deberán incluirse mediciones hidráulicas para realizar el balance de agua del sistema: Flujo de agua influente y efluente, contribución por precipitación pluvial, infiltración neta y pérdidas por evapotranspiración, entre otros (Millán, 1999).

En esta etapa inicial, se fijó otro tipo de parámetro, relativo a las plantas vasculares del humedal. Debido a que las plantas se encuentran en crecimiento y adaptación, se realizó la observación de su evolución y crecimiento. Las características que fueron evaluadas periódicamente, para cada especie, incluyen a las siguientes: Diámetro y

firmeza del tallo; color, longitud y apariencia de las hojas; número de tallos nuevos; altura promedio de las plantas. El seguimiento que se dio a estas características fue más esporádico, debido a que puede pasar largo tiempo para percibir un cambio cualitativo.

#### **4.3.1.2.2 Programa de muestreo**

No se consideró necesario hacer un seguimiento detallado de los parámetros durante las primeras etapas de operación debido a que las condiciones fueron muy variables. Sin embargo, sí fueron registradas las observaciones cualitativas sobre el estado y funcionamiento de los equipos para poder referirse a ellas en la evaluación final de esta etapa del proyecto. A partir de la tercera semana de operación del sistema se inició el programa de evaluación de parámetros. Se tomaron muestras en la corriente de entrada y salida del HAFVD por triplicado para su posterior análisis en el laboratorio. La frecuencia de medición de los parámetros se vio afectada por los paros de emergencia (debido a problemas operativos) y a algunas actividades de mantenimiento. Lo anterior podrá evitarse en futuros proyectos ya que se cuenta ahora con un grupo de trabajo más completo para hacer frente a los problemas imprevistos.

### **4.3.2 Mantenimiento preventivo y programado**

De acuerdo con lo mencionado en la sección 2.5.4 de este documento, el mantenimiento preventivo puede contribuir a un avance en la operación libre de contingencias. Se desea que la planta piloto trabaje permanentemente, por lo que se programó el mantenimiento conforme con las especificaciones y características de cada equipo para evitar problemas imprevistos

#### **4.3.2.1 Funcionamiento de los equipos de pre-tratamiento**

En el caso de los equipos de tratamiento primario, se realizaron servicios de

desazolve y retiro de la acumulación sólidos. Para el tanque sedimentador, el diseño permite realizar la purga de lodos de forma relativamente práctica. Sin embargo, la fosa séptica no permite la misma facilidad. Este equipo fue construido al mismo tiempo que el sistema de drenaje del edificio de las oficinas del Departamento de Supervisión y Control de Zona Cultural y de los Talleres de Conservación, en 1981. Desde entonces, no se había realizado ningún mantenimiento para retirar la acumulación de lodos (biomasa anaerobia generada por la conversión de la materia orgánica e inorgánica) dentro del tanque. Lo anterior provocó la reducción casi total de la eficiencia del equipo, afectando el funcionamiento del resto de los equipos (Droste, 1997). Se gestionó con el Coordinador de Áreas Verdes y Forestación de la DGOyC de la UNAM la limpieza del tanque usando un equipo de desazolve de drenajes. Una vez que se retiró el exceso de lodos acumulados en la fosa séptica y en el tanque de sedimentación, la cantidad de sólidos y, por consiguiente, la materia orgánica de la corriente de entrada al humedal disminuyó notablemente. A continuación, se presentan en la Tabla 4-1 las actividades de mantenimiento y la frecuencia con que deben realizarse en la planta piloto de la Zona Cultural.

**Tabla 4-1 Frecuencia y tipo de mantenimiento**

Periodicidad	Actividad
Semanal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza general (basura depositada en el sitio)</li> <li>• Retiro de vegetación extraña y elementos ajenos en la superficie del HAFVD</li> </ul>
Mensual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retiro y poda de matas y pastos en el derredor del HAFVD y a lo largo de las rutas de acceso</li> <li>• Medición y calibración del flujo de alimentación al HAFVD</li> <li>• Limpieza del medidor de flujo</li> </ul>

**Continuación Tabla 4-1 Frecuencia y tipo de mantenimiento**

<p>Trimestral</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poda de plantas y retiro de hojas y tallos muertos del HAFVD</li> <li>• Purga de lodos de tanque sedimentador (depende de la medición de sólidos sedimentables en la entrada del HAFVD)</li> <li>• Limpieza de la zona de rebose del HAFVD: Retirar acumulación de sedimentos y pintar las paredes del registro</li> <li>• Revisión del estado general y mantenimiento de la instalación eléctrica y conexiones (incluye <i>tierra</i>)</li> <li>• Limpieza de la tubería de distribución del influente (posibles orificios obstruidos)</li> </ul>
<p>Anual</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Purga de lodos y desazolve de la fosa séptica</li> <li>• Desmontaje y desarmado del “contactor” del flotador dentro del tanque sedimentador para retirar la corrosión sobre los circuitos</li> <li>• Limpieza de los tres tubos de drenado por dentro del HAFVD, a través de los <i>respiraderos</i> superficiales, inyectando agua limpia con una manguera</li> <li>• Barniz o pintura de la escalera dentro de la zona de rebose del HAFVD</li> </ul>
<p>Bianual</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raspado y pintura de las tapas del sedimentador y registros de entrada y salida del HAFVD</li> <li>• Revisión detallada de cada equipo y sus partes y reemplazo o corrección de los defectuosos</li> <li>• Mantenimiento mecánico-eléctrico a la motobomba</li> <li>• Evaluación de la resistencia de la geomembrana y reparación de los posibles daños</li> </ul>

### 4.3.3 Mantenimiento correctivo

Durante la etapa de operación inicial se detectaron problemas asociados a diversas causas. A continuación se describen los que afectaron de manera importante la operación del sistema y se refiere la acción realizada para resolverlos.

#### 4.3.3.1 Funcionamiento de la bomba

Durante los primeros dos meses de operación del sistema, el flujo de alimentación al humedal fue disminuyendo lentamente, hasta suprimirse totalmente. El funcionamiento mecánico de la bomba era correcto, por lo que se hizo una revisión de la válvula de retención (conocida como "pichancha") previa a la bomba. La válvula se encontraba totalmente obstruida por sólidos en suspensión. Lo anterior se debió a que en la construcción del sedimentador primario, realizada por personal del Departamento de Supervisión y Control de Zona Cultural de la DGOyC, se instaló la tubería de succión de la bomba dentro del tanque, a la altura de la zona de acumulación de lodos. Para evitar que el problema se presentara nuevamente, se desmontó permanentemente la pichancha debido a que no es indispensable para el funcionamiento del sistema. El resultado de esta acción correctiva será discutido más adelante.

#### 4.3.3.2 Sustitución de plantas dañadas

Como se ha mencionado antes, las condiciones climáticas durante los primeros meses de la operación, fueron extremosas en cuanto a temperatura y humedad. El efecto que esto tuvo sobre las plantas fue de una difícil adaptación, incluso llegando a afectar de manera fatal la totalidad del grupo de 15 plantas de la especie *Phragmites australis*, que fueron sembradas originalmente. Fue necesario reponer las plantas muertas por otro lote de nueve tallos de *Phragmites* que se tuvieron en germinación por un mes. Sin embargo, una vez más perecieron los tallos que se sembraron. Observando la evolución de las plantas, se llegó a la conclusión de que, para su adaptación a condiciones tan extremosas, las plantas requieren de un tamaño mayor, así como de una cantidad considerable de raíz. Por tal motivo, se tomaron diez grupos de tallos maduros provenientes del humedal artificial de flujo horizontal operado por el PIQAYQA, que se tiene instalado en el Vivero Forestal de Coyoacán. Estas macrofitas tienen una madurez de 4 años y se encuentran perfectamente adaptadas a las

condiciones del agua del río Magdalena, contaminada con descargas de tipo sanitario. Los grupos de plantas estaban constituidas en promedio por cinco tallos de entre 20 y 80 cm de altura y contaban con un rizoma bien formado. La adaptación de estas plantas fue exitosa, superando las condiciones del invierno. Más adelante se dan más detalles al respecto de la evolución y adaptación de las plantas.

## 5 Resultados y observaciones

La información recopilada durante el experimento se presenta en dos apartados. El primero incluye las evaluaciones cuantitativas de los parámetros fisicoquímicos y bioquímicos, y en el segundo se presentan las observaciones cualitativas practicadas.

### 5.1 Resultados fisicoquímicos

En la Tabla 5-1 se presentan los resultados de las mediciones de oxígeno disuelto (OD), potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y temperatura (T), realizadas en las corrientes influente y efluente durante la operación en régimen dinámico del HAFVD. En la Figura 5-1 se presentan los resultados en forma gráfica.

**Tabla 5-1 Parámetros fisicoquímicos registrados en la planta piloto HAVFD-ZC**

fecha	hora	OD (mg /L)		pH		CE (uS)		T (°C)	
		influyente	efluente	influyente	efluente	influyente	efluente	influyente	efluente
13-Mar	16:00	0	0	6.53	6.78	1409	1122	31.7	18.1
16-Mar	14:00	0.2	0	6.72	6.79	1083	1134	38.3	17.7
19-Mar	14:45	0	0	6.53	6.6	1250	1086	22.5	19.0
20-Mar	14:00			6.22	6.51	1091	1112	19.0	17.4
22-Mar	09:30			6.65	6.57	1183	1081	20.0	17.7
23-Mar	16:10	0.1	0	6.49	6.51	980	1070	25.9	18.1
27-Mar	17:10	0.1	0	6.11	6.65	1007	1084	21.8	17.6
30-Mar	14:45	0.3	0	6.24	6.41	1258	1029	25.8	17.7
05-Abr	09:30	0.3	0	6.9	7.09	1216	1142	22.2	17.7
26-Abr	11:40	0.9	2.2	7.34	7.39	920	686	21.4	21.2
02-May	14:30	0.2	0.6	7.09	7.14	1089	789	21.5	20.0
04-May	12:00	0.4	0.1	6.93	7.03	1221	729	22.3	20.3
08-May	15:00	0.2	1.1	6.93	7.04	1189	769	22.6	20.9
16-May	12:00	0	0	6.98	7.01	1018	949	24.9	21.6
18-May	10:40	0.1	0.2	7.27	7.05	1224	920	23.6	23.8
23-May	14:30	0	0	7.14	7.01	870	789	22.9	22.1
25-May	14:00	0.9	0.6	6.97	6.97	1110	855	23.5	21.4
29-May	12:20	0	0.3	6.85	7.08	1289	858	25.8	22.2
01-Jun	13:00	0.1	0	7.01	7.2	1198	860	28.9	22.8
promedio	13:26	0.2	0.3	6.8	6.9	1137	951	24.4	19.8



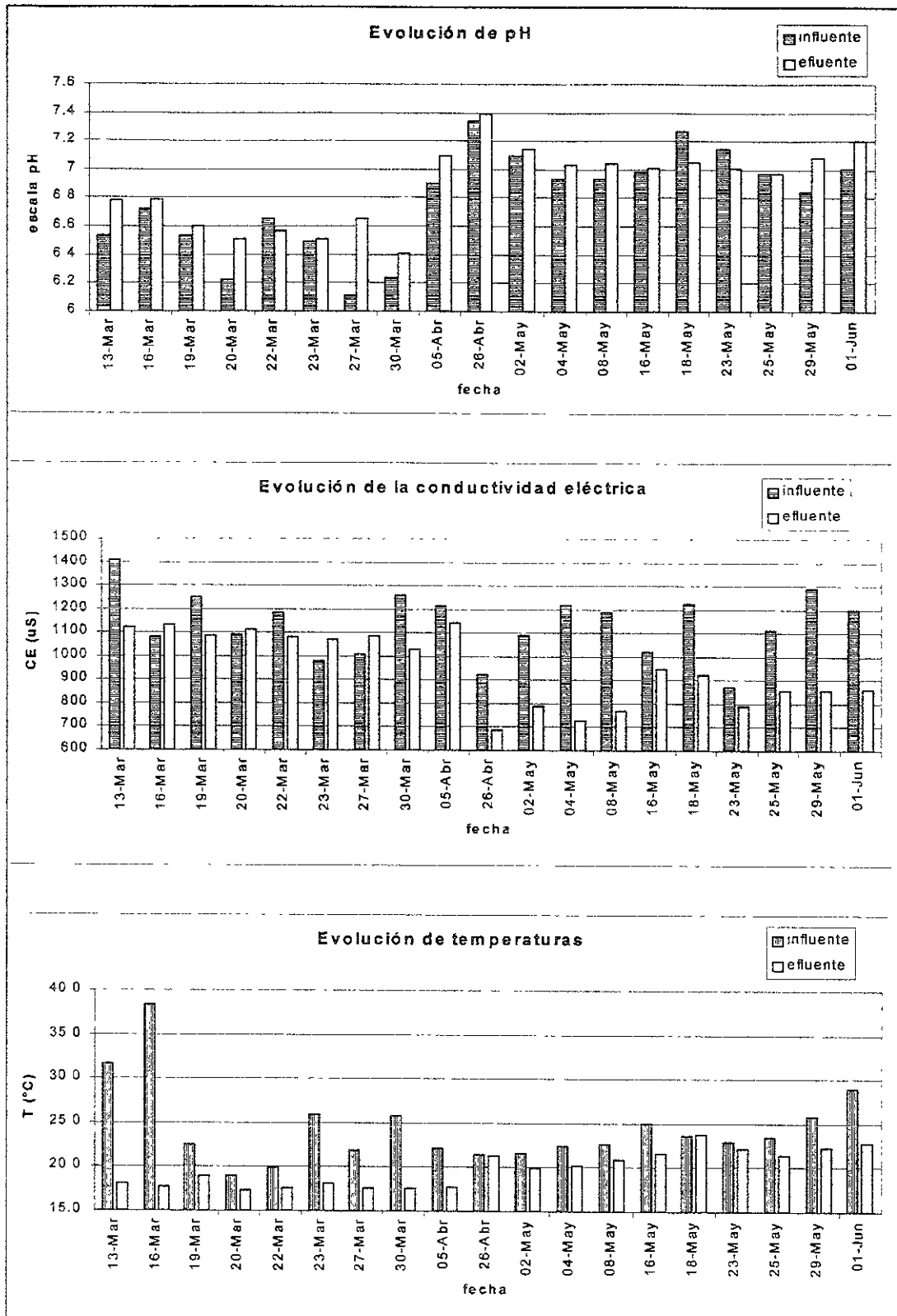


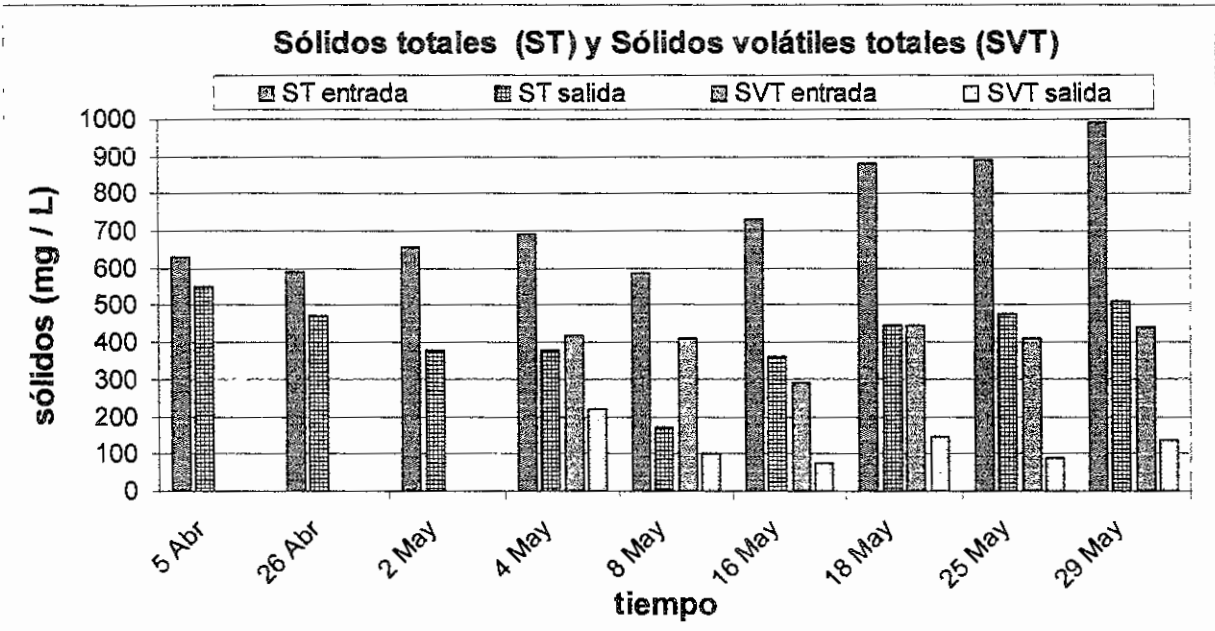
Figura 5-1 Evolución de los parámetros fisicoquímicos en el HAFV

Debido a que el sistema ha sufrido importantes perturbaciones a lo largo de la operación, es difícil hacer una interpretación rigurosa de los resultados. Sin embargo, sí es posible verificar la tendencia de los parámetros medidos. El valor de pH mostró un aumento y un comportamiento relativamente estable durante la última parte del experimento. También se observa a lo largo del tiempo, que el pH a la entrada es menor que en la salida del humedal. En cuanto a la conductividad eléctrica, puede observarse una clara diferencia (cercana al 30%) entre la entrada y la salida, sobre todo en las mediciones de los últimos dos meses.

La Tabla 5-2 muestra los resultados de las mediciones de sólidos totales y sólidos totales volátiles en el influente y el efluente del HAFVD. Se presenta el porcentaje de remoción de sólidos en el HAFVD, que se mantiene alrededor de 50% para sólidos totales y cerca de 73% para sólidos volátiles. También se incluye la relación entre volátiles y totales (% SV/ST), valor que aproxima la cantidad de materia orgánica en los sólidos totales. Puede notarse que la cantidad de materia orgánica presente en los sólidos a la entrada es mayor que a la salida, lo que indica que una parte de los sólidos retenidos en el HAFVD son de naturaleza orgánica.

**Tabla 5-2 Sólidos totales y sólidos totales volátiles**

		sólidos totales y volátiles									
		5 Abr	26 Abr	2 May	4 May	8 May	16 May	18 May	25 May	29 May	Promedio
S Totales (mg/L)	entrada	632	589	657	690	588	733	882	890	992	739
	salida	552	470	380	381	173	361	443	477	510	416
% remoción		13%	20%	42%	45%	71%	51%	50%	46%	49%	43%
S Volátiles (mg/L)	entrada				420	410	292	445	410	440	403
	salida				219	102	76	143	88	135	127
% remoción					48%	75%	74%	68%	78%	69%	69%
% SV/ST (mat. org.)	entrada				61%	70%	40%	50%	46%	44%	52%
	salida				57%	59%	21%	32%	19%	26%	36%



**Figura 5-2 Evolución de mediciones de sólidos en el HAFVD**

**5.2 Eficiencia de remoción de materia orgánica**

El parámetro usado para evaluar el comportamiento del sistema, en términos de depuración de materia orgánica contaminante fue la demanda química de oxígeno total (DQO). Este parámetro fue medido en las corrientes de entrada y salida del HAFVD (ver Tabla 5-3), y la relación entre los dos valores indica el por ciento de remoción, o bien, la conversión de materia orgánica contaminante en biomasa y biogás (ver la Figura 5-3).

En las Figuras 5-3 y 5-4, que aparecen más adelante, puede observarse la evolución de las mediciones de carga contaminante durante los seis meses que lleva operando el HAFVD. Puede observarse en el porcentaje de remoción una tendencia del sistema a recuperar la estabilidad alrededor de 80% después de las perturbaciones que ocurrieron en la corriente de entrada. Estas perturbaciones ocurrieron principalmente por las siguientes razones: La succión de materia orgánica suspendida y sólidos sedimentables por la colocación poco adecuada del tubo de la bomba dentro del

sedimentador; los servicios de mantenimiento que se hicieron a la fosa séptica y al tanque sedimentador.

**Tabla 5-3 Demanda química de oxígeno total (DQO) en la entrada y salida del HAFVD**

Fecha	DQO entrada promedio	valor máx	valor min	DQO salida promedio	valor máx	valor min	por ciento remoción
11-Ene	616	662	569	121	145	97	80%
22-Ene	700	700	700	127	127	127	82%
31-Ene	381	381	381	61	61	61	84%
15-Feb	961	1015	907	72	95	49	93%
21-Feb	1059	1113	1006	179	202	156	83%
07-Mar	985	1113	791	316	508	95	68%
13-Mar	344	447	240	103	145	60	70%
20-Mar	986	1192	779	272	336	209	72%
22-Mar	447	470	424	127	145	110	71%
30-Mar	1276	1457	1021	448	657	160	65%
05-Abr	822	837	807	202	202	202	75%
02-May	632	648	619	147	164	125	77%
04-May	818	887	780	83	114	37	90%
08-May	739	764	726	338	393	290	54%
16-May	750	776	719	253	382	183	66%
18-May	735	784	707	152	194	110	79%
23-May	647	673	600	148	179	133	77%
25-May	978	1147	872	164	1040	164	83%
28-May	924	952	883	116	129	102	87%
29-May	868	910	826	187	221	152	78%
01-Jun	654	673	634	118	125	110	82%
Promedio	777	838	714	178	265	130	77%

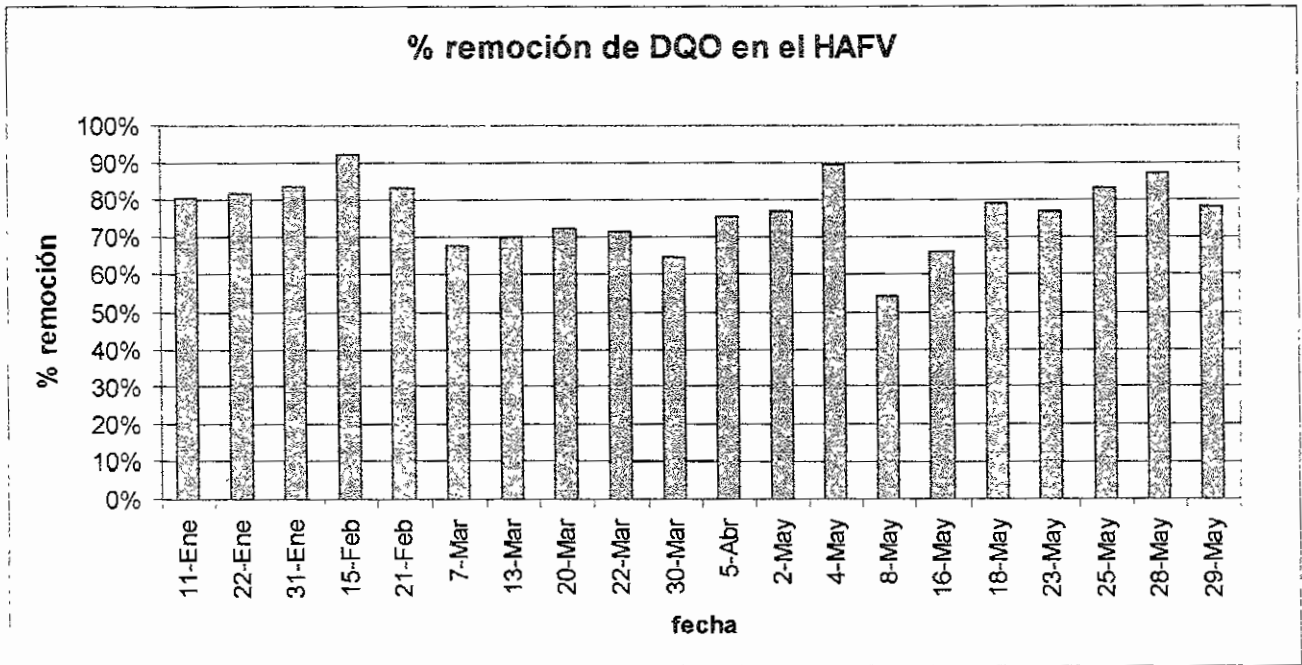


Figura 5-3 Evolución del por ciento de remoción de DQO en el HAFVD

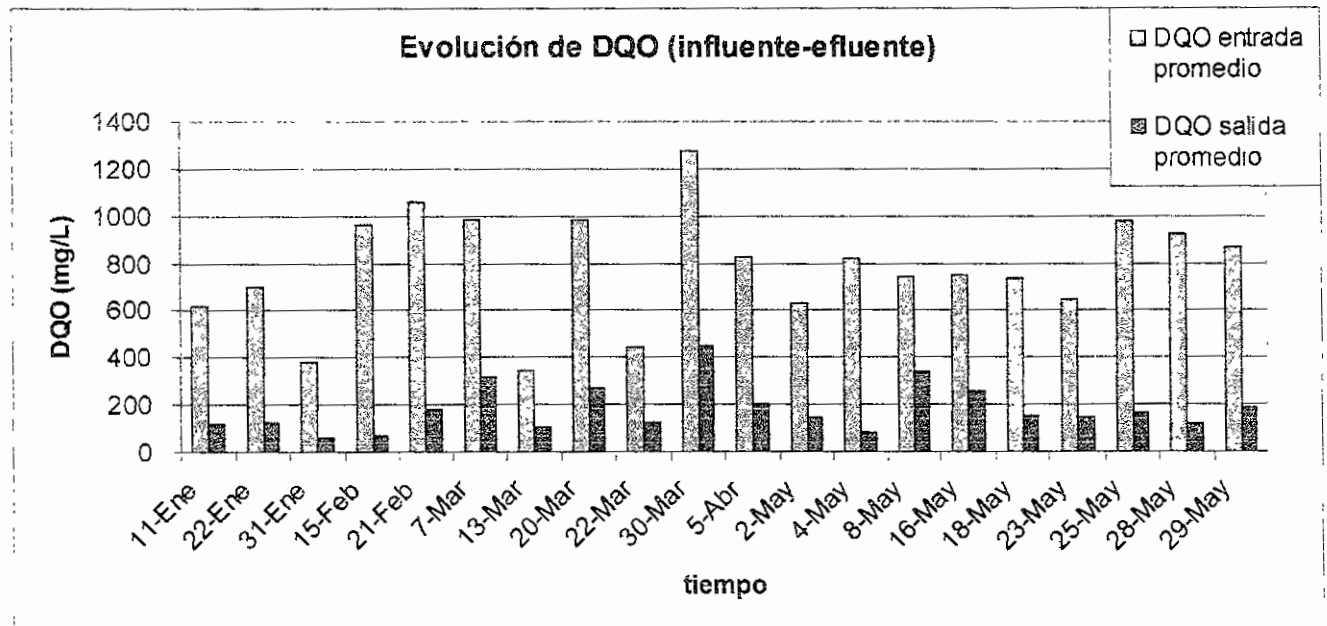


Figura 5-4 Evolución de las mediciones de DQO durante la operación del HAFVD

## 5.3 Observaciones

### 5.3.1 Detección y corrección de problemas operativos

En la sección 4.3.1.1.1 se mencionó que existe una diferencia significativa entre la capacidad real y teórica de la bomba. En la hoja de especificaciones de la bomba (Fenoglio, 2000) se reporta una capacidad 1.34 m<sup>3</sup>/h, mientras que la capacidad medida resultó aproximadamente 6.6 m<sup>3</sup>/h. La capacidad real es cinco veces mayor a la capacidad teórica. Esto puede explicarse en términos de las condiciones en que se haya determinado la capacidad teórica, es decir, que se haya considerado una cabeza de succión negativa (el nivel del agua en la succión esté varios metros por debajo del nivel de la bomba). En la planta piloto, la bomba está instalada por debajo del nivel normal del agua, con lo que se logra una cabeza positiva en la succión, y esto provoca un aumento en el gasto.

#### 5.3.1.1 El tanque sedimentador

La construcción del equipo de sedimentación estuvo a cargo del personal de la DGOyC, y por razones de disponibilidad de recursos, se modificó el diseño originalmente propuesto en las bases de diseño. El equipo parecía no tener problemas, sin embargo, una vez iniciada la operación de la bomba y del HAFVD, se presentó un problema ocasionado por la instalación inadecuada del tubo de succión de la bomba. Como fue descrito anteriormente, el tubo de succión de la bomba se insertó directamente en la segunda cámara del tanque, y por un error de diseño, se colocó la válvula de retención (pichancha) del tubo de succión justo en la zona de acumulación de los sólidos sedimentables. Esto provocó la oclusión de la válvula, al grado de detener la succión de la bomba. Adicionalmente, durante el período que estuvo operando el sistema en esas condiciones, se introdujo una gran cantidad de sólidos al HAFVD, con las consecuencias indeseables que esto representa, como fue explicado en la sección 2.3.3. Para remediar el problema fue necesario retirar la válvula de retención y cambiar la disposición de la tubería de succión, de forma que

no se genere turbulencia dentro del tanque y, consecuentemente, que no aumente la cantidad de sólidos en la corriente de alimentación al HAFVD. Al retirar la válvula de retención, disminuyó la pérdida de cabeza de succión de la bomba, de forma que aumentó el gasto de la bomba y, consecuentemente, aumentó el flujo diario de alimentación al sistema. Debido a lo anterior, fue necesario ajustar nuevamente el control cronométrico de la bomba.

### **5.3.1.2 La persistencia de sólidos en la alimentación al humedal**

El dimensionamiento del tren de tratamiento considera que el agua residual a la entrada del HAFVD, debe tener un contenido de DQO total entre 500 y 600 mg/L. Sin embargo, los valores medidos durante la experimentación muestran que el valor ponderado de DQO (a lo largo de seis meses) del agua de entrada al humedal es de 780mg/L, que es un valor muy superior al de diseño (casi 50% mayor).

Esto se debe a que la fosa séptica no recibió ningún tipo de mantenimiento durante los 20 años que lleva operando. Como se mencionó en el capítulo 4, en el mes de mayo, se logró conseguir el apoyo de la DGOyC para realizar las labores de desazolve de la fosa séptica. El efecto que tuvo sobre la concentración de sólidos sedimentables en la salida del sedimentador primario fue notable, pues se redujeron desde 1mL/L hasta 0.25mL/L, valor aceptable con respecto a las bases de diseño. Adicionalmente, con los servicios de mantenimiento al tanque sedimentador, se logró controlar este valor durante los siguientes meses.

### **5.3.1.3 El control del nivel de inundación**

El nivel de inundación, como variable de operación, debe ser fácilmente manipulable. Por esta razón se diseñó la zona de rebose usando un tubo flexible. Sin embargo, la conexión al tubo de descarga del humedal resultó muy inestable. Fue necesario sellar la conexión con silicón más de una vez, además de darle mantenimiento y ajustes ocasionales para evitar que se generaran fugas. Como se mencionó anteriormente,

durante los primeros meses de operación se mantuvo el nivel máximo para favorecer la adaptación del sistema. Sin embargo, esto sólo fue necesario durante los meses de clima más seco, pues una vez que comenzaron las lluvias, fue posible disminuir el nivel.

### 5.3.2 El sistema de distribución de la alimentación al HAFVD

Se observó que la disposición original de la alimentación (cuatro entradas dispuestas en un eje longitudinal), a pesar de que cumple con las recomendaciones de diseño de la norma austríaca (Fenoglio, 2000), no facilitan la distribución uniforme sobre la superficie del HAFVD. La modificación que se realizó al sistema de distribución de la alimentación sobre el humedal tuvo diversos beneficios importantes. Por una parte, favoreció el crecimiento de las plantas durante la fase en que se inició la disminución del nivel de inundación y, además, consiguió una distribución más uniforme del agua sobre la superficie. Durante los primeros meses de operación, se mantuvo la inundación en su nivel máximo, lo que favoreció el desarrollo de las plantas.

### 5.3.3 El patrón de flujo dentro del humedal

La velocidad de infiltración ( $v_i$ ) es una variable de diseño muy importante pues determina el tiempo en que el agua se expone a la zona aerobia de raíces, especialmente durante la fotosíntesis de las macrofitas. Esta variable se calculó como el tiempo que transcurre entre el inicio del flujo de alimentación y el inicio de flujo en el tubo de salida del humedal en condiciones de 25% de inundación (1m de zona de escurrimiento).

En otras palabras, es el tiempo que tarda el agua en escurrir desde la superficie exterior hasta el nivel de inundación. El valor calculado de la  $v_i$  es de 50cm/min. Lo anterior se logra usando material de empaque de diámetro relativamente pequeño (0.5 mm) en la mayor parte del volumen empacado del humedal, diámetro que provoca una disminución en la velocidad de escurrimiento del agua y obliga a una distribución



más uniforme del flujo descendente y mayor tiempo de contacto con la sección aireada del humedal.

### 5.3.4 La adaptación de las plantas

Durante los primeros tres meses después de haber sembrado las plantas dentro del humedal (Noviembre 2000-Febrero 2001), se observó que el clima extremoso y el ambiente seco no favorecieron el crecimiento y adaptación de las macrofitas. Las plantas de *Typha* que se colocaron inicialmente ya eran maduras y tenían suficiente raíz. Durante los meses de noviembre y diciembre, las hojas de *Typha* se secaron y contrajeron notablemente. Aparentemente, las plantas habían muerto, pero al hacer una exploración de la raíz, se observaron rizomas nuevos. Lo anterior se explica como una contracción de las hojas maduras para no perder humedad, mientras el bulbo y las raíces se adaptan al nuevo medio.

El lote de plantas de carrizo (*Phragmites*) que fue sembrado originalmente estuvo constituido por once tallos germinados por tres semanas. Como se explicó anteriormente, las condiciones de baja humedad en el ambiente y las temperaturas extremadamente bajas a lo largo de los días de noviembre provocaron que todas las plantas de carrizo murieran en las primeras tres semanas. Posteriormente, se plantó otro lote de nueve tallos de carrizo, usando plantas un poco más maduras. El resultado fue el mismo, excepto por un tallo que sobrevivió, aunque presentó un crecimiento sumamente lento. Consecuentemente, se tomaron grupos de tallos maduros provenientes del humedal artificial de flujo horizontal de la UNAM ubicado en el Vivero Forestal de Coyoacán. Estas macrofitas tienen una madurez de 4 años y se encuentran perfectamente adaptadas a las condiciones del agua del río Magdalena contaminada con descargas de tipo sanitario. Los grupos de plantas estaban constituidas en promedio por cinco tallos de entre 20 y 80 cm de altura y contaban con un rizoma bien formado. La adaptación de estas plantas fue exitosa, a 50 días de haberse sembrado. En las primeras tres semanas, las plantas presentaron contracción y color amarillento de las hojas; se mantuvieron de esa forma por dos semanas más y,

a la quinta semana, ya presentaban nuevos brotes a lo largo de los tallos y surgiendo desde el rizoma.

Por el contrario, el crecimiento del zacaltule (*Cyperus*), fue mucho más estable. Los primeros dos meses después de su colocación no se observó ningún crecimiento, pero en los meses subsecuentes, fue la especie que mostró mejor adaptación, además de que no ha perdido el tono verde oscuro de sus hojas. Actualmente, las plantas de zacaltule presentan una altura superior al de las otras especies.

Cada especie de planta tiene una etiología particular debido a su morfología. Se observa que la especie que mejor y más rápida adaptación tuvo en las condiciones climáticas extremas del invierno fue el zacaltule (*Cyperus*), que presenta hojas en forma de espigas delgadas (1cm de ancho) y abundantes, creciendo desde el suelo (Ades y Benítez, 1996).

La planta que le sigue en adaptación es el tule (*Typha*), que presenta hojas ligeramente esponjosas, también en forma de espiga lineal, y creciendo a desde el nivel del suelo. Las hojas son menos abundantes que en el caso del zacaltule, factor que provoca que las hojas estén más expuestas a los rayos directos del sol, y pierdan más agua por transpiración.

### **5.3.5 El material de empaque como soporte inerte**

El efecto de la porosidad del material de soporte es una variable determinante en el funcionamiento del humedal artificial. El crecimiento de la raíz dentro del suelo puede medirse indirectamente en el crecimiento de la planta. Otro aspecto importante sobre la textura del material de soporte es que en un ambiente seco, se facilita la evaporación del agua. Si no se tiene un adecuado control del bombeo del agua residual hacia el humedal, se corre el riesgo de perder la humedad que requieren las plantas en crecimiento. De cualquier forma, durante la etapa posterior a la colocación de las macrofitas, es preferible tener un nivel de inundación superior al de la base de

la planta.

La porosidad del suelo también contribuye a la aeración del sistema, es decir, proporciona la estructura para que el agua que escurre de forma intermitente hacia el interior del humedal, alcance cierta turbulencia y tome parte del oxígeno presente en el aire que es desplazado hacia el exterior (Daubenmire, 1982).

Debe observarse que durante el período de estabilización del humedal, las plantas desarrollan sus raíces, y gracias a la textura del material (grava gruesa, arriba de 5mm, y semigruesa, entre 2 y 5 mm), el material presenta poca resistencia y las raíces se expanden y se ramifican fácilmente, efecto que se refleja directamente en el tamaño de la planta.

**Tabla 5-4 Índice de problemas más comunes o probables en la operación de la planta piloto tipo HAFV instalada en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria en el sur de la Ciudad de México**

<b>Situación observada</b>	<b>Problema real</b>	<b>Acción correctiva</b>	<b>Resultado</b>	<b>Sugerencias</b>
El gasto de entrada al humedal disminuyó paulatinamente hasta suspenderse	Obstrucción de válvula de retención dentro del S-I, debido a que la succión estaba ubicada en la zona de acumulación de sólidos.	Desmontar la válvula y operar la bomba sin ella	El gasto de la bomba se normalizó	En un equipo de sedimentación, una válvula de retención debe colocarse por arriba del nivel de acumulación de los sólidos sedimentados
El contenido de sólidos sedimentables en el influente del humedal aumentó	La toma del tubo de succión de la bomba se encuentra a la altura de la zona de acumulación de sólidos en el S-1	Cambiar la dirección del tubo, hacia la región intermedia del tanque sedimentador, libre de sólidos sedimentados o sobrenadantes	El contenido de sólidos en el influente del humedal disminuyó hasta valores aceptables	El tubo de descarga del un sedimentador primario debe ubicarse en una zona libre de acumulación de sólidos
La acumulación de sólidos sedimentables dentro del sedimentador primario ha sido mayor al valor de diseño	La fosa séptica no está funcionando óptimamente debido a acumulación excesiva de sólidos	Se retiraron los sólidos de la fosa séptica y el sedimentador primario con un equipo de desazolve de drenajes solicitado a la DGOyC de la UNAM	La fosa séptica puede retener una cantidad importante de sólidos, según el objetivo de diseño	Verificar continuamente el estado de los equipos de retención de sólidos, así como la cantidad de sólidos sedimentables en sus efluentes
Las plantas tienen color amarillento	Las plantas son muy jóvenes y sus raíces no alcanzan el nivel de agua El clima es muy seco durante el invierno	Elevar el nivel de inundación del humedal Mejorar el sistema de riego dentro del humedal Riego con agua fresca periódicamente	Las plantas han superado la etapa de adaptación y siguen creciendo	Se recomienda iniciar la siembra de plantas durante la estación húmeda del año.

## 6 Conclusiones y recomendaciones

A continuación se hace una recapitulación de las principales observaciones realizadas a lo largo de este documento para ofrecer conclusiones y recomendaciones, tales que sean de utilidad en el seguimiento de la investigación sobre humedales artificiales del PIQAYQA. Asimismo se pretende que esta información beneficie a otras entidades dedicadas a la investigación o a la aplicación de sistemas tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas contaminadas.

### 6.1 Conclusiones

Durante el arranque y la operación en régimen dinámico del tren de tratamiento de aguas residuales usando el sistema de humedales artificiales de flujo vertical se enfrentaron diversos problemas técnicos o metodológicos que fueron documentados para evitar la repetición de estas fallas en futuros proyectos. Las acciones tomadas para resolver problemas particulares durante la operación del sistema piloto pueden observarse en la Tabla 5-4, de forma que sirva como un índice de problemas más comunes en la operación de sistemas equivalentes. Se recomienda poner especial atención en la fase previa al arranque en cuanto a la instalación adecuada y conforme a la ingeniería de detalle de todos los equipos, conexiones y dispositivos de la planta de tratamiento, para evitar labores excesivas de mantenimiento correctivo, preventivo y de emergencia.

El funcionamiento del sistema no ha alcanzado la estabilidad operativa debido, principalmente, a las dificultades enfrentadas durante la fase inicial y a que no se han alcanzado las condiciones finales de operación (nivel de inundación al 50%). A diferencia de un HA de flujo horizontal, donde el flujo de alimentación es continuo y el nivel de inundación permanece al 100% desde el inicio (Ramírez, 1998; Jiménez, 1999), el sistema tipo HAFVD en estudio requiere mayor atención durante el arranque. Lo anterior se debe a que el nivel de inundación debe disminuirse paulatinamente mientras las plantas desarrollan su sistema radicular, proceso que toma seis meses

hasta llegar a las condiciones normales preestablecidas.

El efecto de las perturbaciones ocasionadas por los problemas antes mencionados puede verificarse en las Figuras 5-3 y 5-4. Durante los primeros cuatro meses de operación existieron variaciones importantes en la concentración de DQO en la corriente de alimentación y, consecuentemente, en el porcentaje de remoción de DQO en el HAFVD. En las mediciones correspondientes al mes de mayo, se observa estabilidad (alrededor de 80% de remoción), frente a las perturbaciones ocasionadas por el inicio de la temporada de lluvias, a la variación del nivel de inundación y a las variaciones en la concentración de la corriente de alimentación. Puede suponerse que la actividad al interior del HAFVD ha sido principalmente anaerobia, puesto que el tiempo de residencia ha sido cercano a 15 días y, las raíces de las plantas no tienen el tamaño suficiente como para aportar oxígeno hacia el interior del sistema. Estos resultados indican una buena capacidad del HAFVD a resistir cambios significativos en la carga de contaminantes sin sufrir desequilibrios serios, como ocurriría en otros digestores de tipo anaerobio (Fenoglio, 2000).

La mayor parte de la materia orgánica que entra al HAFVD proviene de la fosa séptica, donde se llevan a cabo procesos incompletos (por el tiempo de residencia corto) de degradación anaerobia, generando ácidos grasos volátiles como subproductos (Metcalf y Eddy, 1991). El aumento de pH en el HAFVD puede atribuirse a la remoción tales ácidos grasos. Asimismo se verifica en la Tabla 5-2 que el porcentaje de sólidos volátiles en el efluente es mucho menor que en el influente, lo que corrobora la depuración de materia orgánica en el HAFVD.

En cuanto a las mediciones de conductividad eléctrica se observa durante el último mes una remoción cercana al 35%. Esto puede interpretarse como una fijación en el HAFVD de sólidos inorgánicos (sales) suspendidos y disueltos, aspecto que puede corroborarse con porcentaje de remoción de sólidos totales (alrededor de 50%).

Se observa un aumento en la concentración de sólidos totales a la entrada del sistema

a partir de mayo, lo que se atribuye a la acumulación de sólidos en el sedimentador primario. La purga de lodos en el sedimentador se llevó a cabo en marzo, lo que indica que deberá realizarse mensualmente para evitar la entrada de sólidos al HAFVD. La concentración de sólidos totales en la corriente de salida permanece relativamente estable (cerca de 416 mg/L), mientras que se observa un aumento en la concentración de entrada. Puede concluirse que el aumento en sólidos en la entrada se debe a partículas de mayor tamaño, que son retenidas en el lecho del HAFVD, mientras que las partículas más pequeñas, probablemente sales disueltas, no son retenidas.

Debido a la restricción de un sistema tipo humedal artificial (HA) en la capacidad para degradar bioquímicamente sólidos suspendidos y sedimentables, así como los efectos perjudiciales de tales partículas en su funcionamiento (ver sección 2.3.3), se considera que la etapa limitante en una planta de tratamiento donde se utilicen HA es la fase de pretratamiento. A partir de las experiencias recabadas en la operación tanto de la planta piloto de tipo HA de flujo horizontal, a cargo de tesis de Millán (1999; Jiménez, 1999), como en la operación de la planta piloto, objeto de este ensayo, puede concluirse que la principal fuente de problemas durante la operación ha sido la etapa de tratamiento primario. Las causas de tales problemas se encuentran tanto en los parámetros de diseño o de imprevistos durante la operación. Puede concluirse que se ha dado más atención a la tecnología de HA como tratamiento secundario, que al desarrollo de alternativas para el pretratamiento. Si se desea ofrecer una tecnología integral, de aplicación viable para comunidades rurales, debe darse igual importancia al diseño de todos los elementos que involucre una planta de tratamiento para evitar dificultades posteriores en la operación y el mantenimiento.

Los problemas ocurridos durante la operación no permitieron el avance tan rápido como se tuvo para el caso del sistema de flujo horizontal que se encuentra operando en el Vivero Forestal de Coyoacán. Debe considerarse que este último se arrancó en el mes de marzo, lo que permitió que las lluvias ayudaran a las macrofitas a desarrollarse con gran vigor, especialmente porque el agua del Río Magdalena

tiene un caudal mayor de agua limpia -de lluvia- y una concentración menor de contaminantes, lo que promueve el crecimiento de las plantas (Millán, 1999).

Al elegir la ubicación del sistema, se observó que el agua tratada podría emplearse para humidificar las pilas de "composta". Para tales aplicaciones del agua tratada como lo es el riego de campos de cultivo y, más aún, el riego de la "composta" (material usado como mejorador de suelo), se desea un cierto contenido de nutrientes nitrogenados y fosforados. La decisión de construir un HA de flujo vertical (que presenta mejor capacidad de remoción de nutrientes) en lugar de un HA de flujo horizontal se contrapone con la aplicación que se le da al agua residual tratada. Sin embargo, como ya se ha mencionado, la principal finalidad del sistema piloto actual, no es el uso del agua, sino la experimentación y evaluación del sistema per se.

## **6.2 Recomendaciones**

### **6.2.1 Corriente adicional que entra al sedimentador**

De acuerdo con lo explicado en la sección 3.3.1, la instalación de una corriente de agua residual sanitaria como alimentación adicional al sedimentador primario provoca problemas en la operación del equipo. El sistema fue diseñado para funcionar sólo con las dos entradas del edificio de Talleres de Conservación. La operación en estas condiciones provoca una mayor acumulación de lodos en el sedimentador, aumenta la frecuencia de mantenimiento del equipo, además de reducir la calidad de la corriente de salida del sedimentador y entrada al HAFVD. Debido a que la principal finalidad de la planta piloto es realizar investigación, no debiera incluirse tal corriente en el tren de tratamiento. Sin embargo, se recomienda no retirar la conexión, sino instalar una válvula para regular el flujo hacia el sedimentador o hacia su sumidero, de forma que la corriente pueda aprovecharse para modificar las condiciones de operación cuando se desee.



La planeación del crecimiento de la Ciudad Universitaria no previó la dificultad para instalar una red de alcantarillado adecuada, de forma que muchos edificios o, al menos, los de la Zona Administrativa Exterior, evacuan sus drenajes hacia las grietas y sumideros del pedregal volcánico, en algunos casos, sin un tratamiento adecuado. Para resolver este problema, podría realizarse el trabajo conjunto entre dependencias de la UNAM, aprovechando el trabajo de tesis y prestadores de servicio social, que representan una fuerza de trabajo de calidad. Tales instituciones pueden ser: El Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA), la Facultad de Química (FQ), la Facultad de Ingeniería (FI), la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU) y la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC), entre otros.

### **6.2.2 Siembra de plantas en el HAFV**

La construcción de un humedal artificial debe planearse de forma que el momento de la siembra de las plantas coincida con la temporada de lluvias. Con esto se logra disminuir notablemente el tiempo y el esfuerzo dedicado al riego y mantenimiento de las plantas, además de que se acelera y asegura su adaptación. Se recomienda que las plantas sean colocadas en grupos de tallos asociados por una misma raíz, ya que con esto se asegura una mejor supervivencia de las plantas. Las raíces deben tener una profundidad no mayor a 25cm, de forma que las fibras originales no resten espacio activo a los nuevos rizomas que se desarrollen. Si la siembra inicial de las plantas en el humedal se hace en temporada de lluvias, se recomienda una densidad de 2 planta/m<sup>2</sup>. Por la experiencia que se tuvo en este trabajo, se recomienda una densidad de 3 planta/m<sup>2</sup> si es que se construye el HAFVD y se pone en marcha en la temporada de secas.

### **6.2.3 El sistema de alimentación al humedal**

Durante la etapa inicial de operaciones se modificó el sistema de distribución de la

alimentación al HAFVD. La principal justificación fue el mejorar la adaptación y crecimiento de las plantas durante la temporada de sequía. Además, se propone un beneficio adicional, que es aumentar la transferencia de oxígeno hacia el agua. Lo anterior será necesario corroborarlo mediante alguna técnica experimental, de manera que pueda proponerse como una recomendación generalizada a otros sistemas de HAFVD.

#### **6.2.4 Segregación de funciones**

La operación de una planta piloto involucra actividades y funciones muy diversas para conseguir resultados valiosos (una descripción más detallada se encuentra en el capítulo 2). Los tiempos asignados para cada actividad y la duración de las etapas, dependen de la disponibilidad de personal para su realización. Mientras más completo sea el equipo de trabajo podrá tenerse mayor control sobre los imprevistos, y la operación se tornará mucho más organizada y eficiente. Se recomienda que la etapa de arranque de una planta piloto se lleve a cabo por el mismo equipo de trabajo que se encargue del diseño y la construcción o que exista una continuidad entre ellos.

#### **6.2.5 Evaluación de parámetros**

Una vez que se fijen las condiciones de operación normal y se llegue al régimen estable, será muy útil conducir la evaluación de una batería más completa de pruebas fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas. También deberán incluirse mediciones hidráulicas para realizar el balance de agua del sistema: flujo de agua influente y efluente, contribución por precipitación pluvial, infiltración neta, pérdidas por evapotranspiración (Millán, 1999).

Una vez que el sistema alcance el régimen estable, podrá evaluarse la eficiencia operativa en comparación con otras tecnologías equivalentes, específicamente, sistemas de lecho fijo de actividad aerobia. Esto permitirá corroborar la bondad

técnica y económica de la tecnología basada en HA, como una alternativa de bajo costo económico, social y ambiental para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales y semi-urbanas de diversas zonas de la República Mexicana.

## Bibliografía

1. Ades, J. y Benítez, S. (1996) Manual de plantas fanerogámicas de interés económico o más comunes de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, D.F., México
2. APHA. (1999) Standard methods for the examination of water and wastewater analysis. American Public Health Association, American Waste Water Association y Water Pollution Control Federation, EUA.
3. Blazejewski, R. y Murat-Blazejewska, S. (1997) Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow. *Wat. Sci. Technol.* 35(5): 183-188.
4. Breen, P. (1997). The performance of vertical flow experimental wetland under a range of operational formats and environmental conditions. *Wat. Sci. Technol.*, 35(5), p. 167-174.
5. Brix, H. (1997) Do macrophytes pay a role in constructed treatment wetlands? *Wat Sci Technol* 35(5): 11-17
6. CNA. (1999) Compendio básico del agua en México. Comisión Nacional del Agua, Semarnap, México.
7. Cooper, P. (1999) A Review of the Design and Performance of Vertical-Flow and Hybrid Reed Bed Treatment Systems. *Wat. Sci. Technol.*, 40(3): 1-9.
8. Cooper, P., Griffin, P., Humphries, S. y Pound, A. (1999) Design of a hybrid reed bed system to achieve nitrification and denitrification of a domestic sewage. *Wat. Sci. Technol.*, 40(3): 283-289.
9. Cruz-Majluf, S. (2001) Programa para la sostenibilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en comunidades rurales. *Tláloc*, Asociación Mexicana de Hidráulica. VII(21): 28-32.
10. Curtis, H, y Barnes, N. (1994) Biología. Médica Panamericana, Buenos Aires.
11. Daubenmire (1982) Ecología vegetal; Tratado de autoecología de las plantas. Limusa, D.F. México.
12. Droste, R. (1997) Theory and practice of water and wastewater treatment. John Wiley & Sons, Nueva York, EUA
13. Durán, M.C. (1994) Tratamiento biológico de aguas de la industria química y de proceso. Pub. Facultad de Química, UNAM, D.F., México.
14. Fenoglio, F. (2000) Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical. Tesis

de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, D.F. México

15. Gans, M, Kiorpes, S. y Fitzgerald, F. (1983). Plant startup -step by step. *Chemical Engineering* (Oct. 3, 1983): 74.
16. Giovannini, S. y Da-Motta-Marques, D. (1999). Establishment of three emergent macrophytes under different water regimes. *Wat.Sci.Technol.*, 40(3): 233-240.
17. Gray, N. (1992) *Biology of wastewater treatment* Oxford University Press, Oxford, Gran Bretaña.
18. Gray, S., Kinross, J, Read, P, y Marland, A. (2000) The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland system for waste treatment. *Wat.Res.*, 34(8): 2183-2190.
19. Gumbricht, T. (1993) Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems. *Ecol.Eng.* En: Brix, H. (1997) Do macrophytes pay a role in constructed treatment wetlands? *Wat.Sci.Technol.* 35(5) p.11-17.
20. Haberl, R. (1999) Constructed Wetlands: A chance to solve wastewater problems in developing countries. *Wat.Sci.Technol.*, 40(3): 11
21. INEGI (2000 a) Estadísticas sociodemográficas, ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx))
22. INEGI (2000 b) Medio ambiente y recursos naturales ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx))
23. Jiménez, J. (1999) Construcción y arranque de un sistema de tratamiento de agua residual tipo humedal de flujo horizontal. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, UNAM, D.F., México.
24. Kadlec, R. (1999) Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands. *Wat.Sci.Technol.*, 40(3): 37-43.
25. Laber, J., Perfler, R. y Haberl, R. (1997). Two strategies for advanced nitrogen elimination in vertical-flow constructed wetlands. *Wat.Sci.Technol.*, 35(5), p.71-77.
26. Landau, R. (1966) *The chemical plant. From process selection to commercial operation.* Reinhold Publishing Corp. EUA.
27. Lantzke, I., Heritage, G., Pistillo, G. y Mitchell, D. (1998) Phosphorus removal rates in bucket size planted wetlands with a vertical hydraulic flow. *Wat.Res.* 32(4): 1280-1286
28. Luna-Pabello, V.; Durán de Bazúa, C.; Ramírez-Carrillo, H.; Fenoglio-Limón, F. y Sánchez-García, H. (1997) Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química. Argentina. Pp. 50-56.

29. Manahan, S. (1993) *Environmental Chemistry*. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA.
30. Metcalf y Eddy Inc. (1991) *Wastewater engineering. Treatment, disposal, and Reuse*. McGraw-Hill, EUA.
31. Millán, S. (1999) Operación de una planta piloto tipo humedal artificial de flujo horizontal para tratamiento de aguas residuales y su reuso para riego. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, D.F., México.
32. Miranda, M. (2000) Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Trabajo monográfico de actualización. Facultad de Química, UNAM, D.F., México.
33. Odum, E. (1972) *Ecología*. Interamericana, D.F., México.
34. Oaxaca, M. (1997) Estudio comparativo para la determinación de la demanda química de oxígeno entre el método estándar de reflujo abierto y el método colorimétrico (rápido) de reflujo cerrado. Tesis profesional. Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Ver, México
35. Palluzi, R. (1992) *Pilot plant design, construction and operation*. McGraw Hill, Nueva York, EUA.
36. Perfler, R. y Haberl, R. (1994) Actual experiences with the use of reed bed systems for wastewater treatment in single households. *Wat.Sci.Technol.* 28(10): 141-148.
37. Platzer, Ch. y Mauch, K. (1997) Soil Clogging in Vertical Flow Reed Beds – Mechanisms, Parameters, Consequences and.... Solutions? *Wat.Sci.Technol.* 35(5) p.175-181.
38. Ramírez, H. (1998) Desarrollo de la ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal artificial de flujo horizontal. Facultad de Química, UNAM.
39. Rase, F y Barrow, H. (1973) *Ingeniería de proyectos para plantas de proceso*. CECSA. D.F., México. Pp. 12-44.
40. Reddy, K. y D'Angelo, E. (1997) Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. *Wat.Sci.Technol.*, 35(5), p.1-10.
41. Valek, G. (2000). Agua, reflejo de un valle en el tiempo. Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM, D.F., México.
42. Winkler, Michael (1996) *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Limusa, D.F., México.

## Literatura complementaria

1. Douglas, J. (1988) *Conceptual Design of Chemical Processes*, McGraw-Hill, Nueva York, EUA.
2. Johnstone, R. (1957) *Pilot plants, models and scale-up methods in chemical engineering*. McGraw Hill, Nueva York, EUA.
3. Jordan, D. (1955) *Chemical pilot plant practice*. Interscience Publishers, Chicago, EUA.
4. Levenspiel, O. (1991) *Ingeniería de las reacciones químicas*. Reverté. D.F., México. pp 280-350.
5. Ley Federal del Trabajo. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. En Lechuga, S. (editor) (2000) *Agenda Laboral*, Ediciones fiscales. D.F., México
6. Norma Oficial Mexicana (1996) NOM-001-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Enero 6 de 1997. D.F., México.
7. Norma Oficial Mexicana (1997) NOM-003-ECOL-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos. Diario Oficial de la Federación. Septiembre 21 de 1998. D.F., México.
8. Palluzi, R. (1991) Understand your pilot plant options. *Chem.Eng.*, (Enero. 1991): 21.
9. Palluzi, R. (1994) *Pilot plant and laboratory safety*. McGraw Hill, Nueva York, EUA.
10. Reeve, R. (1994) *Environmental Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, Gran Bretaña.
11. Reglamento federal de seguridad higiene y medio ambiente. Por decreto del Presidente de los Estados Unidos Mexicanos. En Lechuga, S. (editor) (2000) *Agenda Laboral*, Ediciones fiscales. D.F., México.
12. Sanders, R., y Wood, J. (1991) Don't leave plant safety to chance. *Chem.Eng.* (Feb.): p. 110.
13. Scott, R. (1992) *Process Design, Case Studies*. Institution of Chemical Engineers, Gran Bretaña. pp. 92
14. Schaller, P. (1998) *Planning, construction and investigation of a constructed wetland for the secondary treatment of domestic wastewater in Mexico City*. Tesis de licenciatura, Universidad Agronómica de Viena, Austria.
15. Smith, J. (1993) *Ingeniería de la cinética química*. CECSA. D.F., México.

## Anexo

### Manual de operación

El Manual de Operación de la Planta Piloto de tipo humedal artificial de flujo vertical descendente (HAFVD), es un documento complementario únicamente para referencia rápida. Los contenidos relativos a la ingeniería básica y de detalle a los que se hace referencia en el presente manual, deberán verificarse en los siguientes documentos:

Fenoglio, F. (2000) *Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical*. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, D.F., México.

Esponda, P. (2001) *Arranque de un sistema experimental a escala piloto de tipo humedal artificial de flujo vertical descendente para el tratamiento de aguas residuales*. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, D.F., México.

### Objetivos del manual de operación:

El seguimiento del presente documento como guía para realizar las actividades en la planta piloto permitirá:

- Simplificar y facilitar las labores de operación y mantenimiento de los equipos de la planta piloto
- Evitar contingencias que provoquen el paro de la planta y que generen perturbaciones en el sistema biológico del HAFVD durante la operación y la conducción de la experimentación
- Minimizar el riesgo de accidentes al operador provocados por condiciones inseguras en el lugar de trabajo y por prácticas inseguras en el manejo de muestras o la operación de los equipos



## Sección 1 Generalidades

### 1.1 Función de la planta piloto

La planta piloto tipo HAFVD consiste en un tren de tratamiento ideado como una herramienta experimental para la evaluación de la eficiencia de descomposición de los contaminantes orgánicos de un agua residual.

### 1.2 Tipo de proceso

El tren de tratamiento está integrado por tres etapas generales, integradas por los siguientes equipos:

- Pretratamiento: Fosa séptica
- Tratamiento primario: Tanque sedimentador y homogeneizador de corrientes de entrada
- Tratamiento secundario: Humedal artificial de flujo vertical descendente

La etapa principal del proceso es el sistema de tipo HAFVD, que basa su funcionamiento en mecanismos biológicos, removiendo los contaminantes orgánicos presentes en el agua a través de la combinación de procesos aerobios, anaerobios, micro-aerobios y anóxicos.

### 1.3 Descripción del proceso

Se explican a continuación las características más importantes de los equipos del tren de tratamiento.

#### Fosa séptica

Función: Retener parte de sólidos y materia orgánica

Capacidad: 20 m<sup>3</sup>

Origen del influente: Servicios sanitarios de oficinas de Departameto de Supervisión y

Control de Zona Cultural (DSCZC)

Flujo promedio: 2.4 m<sup>3</sup> / día

### **Tanque sedimentador primario**

Función: Retener 60% de sólidos totales

Capacidad: 2.7 m<sup>3</sup>

Origen del influente: Fosa séptica y sanitarios

Flujo promedio: 5.4 m<sup>3</sup> / día

### **Sistema de bombeo**

Función: Alimentar agua al HAFVD en el patrón de flujo adecuado

Características de la bomba:

Tipo: Electrobomba Autocebante

Marca: Barnes Barmesa modelo SP5

Capacidad: 1.8 L/s

Potencia: ½ HP

Voltaje: 115/220 V

Tipo de control:

De protección: Flotador dentro de sedimentador

De arranque y paro: Cronómetro de doble función

Patrón de actividad normal:

Ciclo de actividad: 6 ciclos diarios (650 L / día)

Arranque: 83 segundos (108 L / ciclo)

Paro: 4 horas

Ubicación: Dentro del gabinete anexo al tanque sedimentador.

Tablero de control: Se localiza dentro de un gabinete metálico. Incluye el interruptor

ESTA PÁGINA NO DEBE SER REPRODUCIDA SIN EL CONSENTIMIENTO DE LA AUTORIDAD

principal, arrancador y el contactor para cortar la corriente a la bomba

### Humedal artificial de flujo vertical descendente

Las características más importantes del sistema de tratamiento secundario se resumen en la Tabla B que se muestra a continuación. Las características de la corriente de alimentación al HAFVD se presentan en la Tabla A, a continuación.

**Tabla A Resumen de características de la alimentación al humedal artificial**

Parámetro	Abreviatura	Valor promedio a 6 meses	Unidades
Demanda química de oxígeno	DQO	740	mg O <sub>2</sub> / L
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO	360	mg O <sub>2</sub> / L
Potencial hidrógeno	pH	6.8	Unidades pH
Sólidos sedimentables	Sse	0.2	mL/L
Sólidos totales	ST	739	mg/L
Sólidos totales volátiles	STV	416	mg/L

## Sección 2 Preparación

El responsable de la operación de la planta piloto debe conocer las características particulares de cada equipo y dispositivo del proceso antes de iniciar las actividades y el funcionamiento general de la planta. Debe estudiar el documento que reúne las bases de diseño y, de preferencia revisar la bibliografía (tesis previas; artículos; normatividad y reglamentación oficial vigente) relacionada con los temas sobre tratamiento de aguas residuales, sistemas biológicos, sistemas de humedales artificiales, higiene y seguridad.

Tabla B Especificaciones de la planta piloto tipo humedal artificial de flujo vertical

<b>Tipo de agua de influente</b>	Agua residual contaminada, tipo sanitaria proveniente de instalaciones tipo baños, regaderas y cocina
<b>Tipo de tratamiento primario</b>	Fosa séptica y sedimentador primario
<b>Tipo de tratamiento secundario</b>	Sistema biológico tipo humedales artificiales de flujo vertical descendente
<b>Dimensiones</b>	Largo: 6m Ancho: 2.5m Profundidad: 1.3m
<b>Material de empaque</b>	Escoria volcánica distribuida en estratos de diferente diámetro
<b>Porosidad promedio del material de empaque</b>	49%
<b>Tipo de plantas usadas</b>	La superficie del humedal se encuentra dividida en tres secciones de área equivalente. En cada sección se localiza un tipo de planta distinta: <i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Cyperus sp.</i>
<b>Concentración promedio de contaminante orgánico (DQO) en el agua influente</b>	700 mg O <sub>2</sub> / L
<b>Capacidad hidráulica normal</b>	650 L / día
<b>Capacidad hidráulica máxima</b>	800 L / día
<b>Capacidad hidráulica mínima</b>	400 L / día
<b>Tiempo de residencia hidráulico en nivel máximo de inundación con un gasto de 600L / día</b>	Zona <i>mojada</i> : 16 días
<b>Sistema de control de flujo de entrada al humedal</b>	Dispositivo cronométrico para arranque y paro de la bomba

## Sección 3 Arranque

### 3.1 Procedimiento de pre- arranque

1. Recopilar la información disponible relativa al diseño constructivo del sistema, incluyendo las posibles modificaciones.
2. Verificar la concordancia de los diagramas generales y particulares de equipos, identificando los dispositivos de control y accesorios como medidor de flujo, válvulas, etc.
3. Revisar las especificaciones de seguridad e higiene, incluyendo las características toxicológicas y biológico infecciosas del agua residual. Debe contarse permanentemente con los equipos de seguridad y herramientas necesarias para el manejo de muestras y para el mantenimiento en la planta (los materiales básicos se describen en la sección 7)

### 3.2 Procedimiento de arranque

1. Verificar los elementos de suministro y corte de la corriente eléctrica: Utilizar un multímetro o un verificador de corriente.
2. Probar y ajustar los dispositivos de control para arranque y paro de la bomba: Se recomienda verificar el tiempo de encendido del cronómetro contra otro reloj.
3. Alimentar agua limpia o tratada al humedal hasta inundación al 50%. Puede usarse una fuente de agua tratada que se ubica a 50m de distancia del HAFVD, a un costado del edificio de los Talleres de Conservación.
4. Verificar la ausencia de fugas en las tuberías y conexiones.
5. Arrancar la bomba con agua residual contaminada y alimentar al humedal. Basta con activar el interruptor para iniciar el ciclo del control cronométrico de arranque y paro de la bomba.
6. Fijar nivel de inundación dentro del humedal de acuerdo con el protocolo de la investigación particular. El nivel de inundación se controla por medio de la altura de

la boca del tubo flexible en la zona de rebose.

## **Sección 4 Operación normal**

La operación normal puede considerarse a partir de la primera semana después de iniciada la operación en que no exista ningún imprevisto que obligue a detener el funcionamiento. Dependiendo de lo establecido por el protocolo de la investigación que se conduzca en el momento, se fijarán las condiciones operativas.

### **4.1 Procedimiento de operación**

Las actividades durante esta etapa se limitan a llevar a cabo la inspección de los equipos y dispositivos, y la evaluación del funcionamiento de la planta piloto. Algunas actividades de la operación también involucran los procedimientos de mantenimiento. Todas las actividades y observaciones realizadas deben quedar registradas en la bitácora de la planta piloto, incluyendo fecha, horario, responsable, actividad realizada, observaciones. Los puntos principales que deben verificarse durante la operación de la planta, que pueden resultar en tareas de mantenimiento, se describen a continuación:

- Continuidad del flujo diario de entrada al sedimentador. En caso de que se suspenda el flujo, debe investigarse la razón y encontrar una solución.
- Calidad del agua a la entrada; concentración de sólidos flotantes o sobrenadantes en ambas cámaras del sedimentador. En caso de que la concentración aumente y se sature la superficie del agua, debe retirarse el exceso de sólidos.
- Verificar el gasto volumétrico de alimentación al HAFVD instalando el medidor de flujo una vez al mes. La medición debe realizarse por tres días como mínimo. Una vez utilizado el medidor, debe retirarse y limpiarse debidamente.
- Uniformidad en la distribución del agua en la tubería de alimentación al HAFVD. Mantener los orificios de salida del agua libres de obstrucción.

- Estado general del humedal y salud de las plantas.

#### 4.2 Mantenimiento preventivo

Se desea que la planta piloto trabaje permanentemente, por lo que se programó el mantenimiento conforme con las especificaciones y características de cada equipo para evitar problemas imprevistos. El mantenimiento programado puede contribuir a un avance en la operación libre de contingencias. Los puntos que se mencionaron en la sección anterior (4.1) pueden indicar la necesidad de tareas de mantenimiento preventivo o correctivo. A continuación se presenta la Tabla C, que indica las actividades de mantenimiento en la planta piloto de la Zona Cultural y la frecuencia con que deben realizarse.

**Tabla C Mantenimiento programado**

Periodicidad	Actividad
Semanal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza general (basura depositada en el sitio)</li> <li>• Retiro de vegetación extraña y elementos ajenos en la superficie del HAFVD</li> </ul>
Mensual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retiro y poda de matas y pastos en el rededor del HAFVD y a lo largo de las rutas de acceso</li> <li>• Medición y calibración del flujo de alimentación al HAFVD. Se mide con el medidor de flujo y se calibra en el control cronométrico de arranque y paro</li> <li>• Limpieza del medidor de flujo</li> </ul>
Trimestral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poda de plantas y retiro de hojas y tallos muertos en el HAFVD</li> <li>• Purga de lodos de tanque sedimentador (depende de la medición de Sólidos Sedimentables en la entrada del HAFVD). La purga se realiza conectando una manguera al tubo ubicado en la parte posterior del tanque sedimentador</li> <li>• Limpieza de la tubería de distribución del influente (orificios obstruidos)</li> </ul>

## Continuación Tabla C Mantenimiento programado

Trimestral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza de la zona de rebose del HAFVD: Retirar acumulación de sedimentos y pintar las paredes del registro Revisión del estado general y mantenimiento de la instalación eléctrica y conexiones (incluye conexión a <i>tierra</i>). Debe observarse que las conexiones estén libres de óxido, y que los cables no presenten mordeduras</li> </ul>
Anual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Purga de lodos y desazolve de la fosa séptica</li> <li>• Desmontar y desarmar el contactor del flotador dentro del tanque sedimentador para retirar la corrosión sobre los circuitos</li> <li>• Limpieza de los tres tubos de drenado por dentro del HAFVD, a través de los <i>respiraderos</i> superficiales, inyectando agua limpia con una manguera</li> <li>• Barniz o pintura de la escalera dentro de la zona de rebose del HAFVD</li> </ul>
Bianual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raspado y pintura de las tapas del sedimentador y registros de entrada y salida del HAFVD</li> <li>• Revisión detallada de cada equipo y sus partes, y reemplazar o corregir los defectuosos</li> <li>• Mantenimiento mecánico-eléctrico a la motobomba</li> <li>• Evaluar la resistencia de la geomembrana y reparar los daños</li> </ul>

### 4.3 Procedimiento de muestreo y análisis

La toma de muestra, su transporte y manipulación debe realizarse como lo dicta el manual de métodos normalizados (APHA, 1999) o la norma correspondiente al tipo de análisis que se practicará. Para el transporte de muestras se recomienda utilizar recipientes de plástico de boca angosta con tapa de rosca. En todo caso, la toma y la manipulación de la muestra debe realizarse con el equipo completo de protección: Guantes de hule, bata, lentes de seguridad, y cubrebocas.

Para el análisis *in situ* (usando electrodos, por ejemplo), debe tomarse una muestra en un recipiente de boca ancha, y tenerse las mismas disposiciones que para el



transporte de muestras.

#### 4.4 Procedimiento de cálculo del desempeño

Una vez que se tienen resultados analíticos del laboratorio puede determinarse la eficiencia de remoción de materia contaminante del agua. El cálculo se realiza utilizando un solo parámetro (principalmente DQO) o una combinación de varios. Por lo general se calcula el porcentaje de diferencia entre la corriente de salida contra la de entrada. Para condiciones normales de operación, una vez alcanzado el régimen estable, podrá alcanzarse un valor cercano al 95% de remoción de materia orgánica biodegradable (DBO<sub>5</sub>). Otros parámetros deben ser usados para determinar si el sistema de pretratamiento está operando correctamente: Sólidos sedimentables y sólidos totales. El valor de sólidos sedimentables a la salida del HAFVD debe mantenerse por debajo de 0.5 mL/L; el caso contrario es un indicador de la necesidad de realizar el servicio de purga de lodos del sedimentador. Es recomendable tomar en cuenta las características de las plantas para la evaluación del sistema.

### Sección 5 Paro

El tipo de flujo que se presenta en el HAFVD permite realizar paros programados y sin necesidad de un procedimiento complicado. En el caso de tener que realizar un paro forzoso durante la operación de la bomba, puede desactivarse el arrancador de la bomba. Debe preverse que al momento de reestablecer la corriente eléctrica, iniciará un nuevo ciclo del control cronométrico y la bomba arrancará automáticamente. Los pasos principales a realizar durante el paro de operación se describe a continuación en los siguientes dos casos:

En caso de que la operación se suspenda por más de cinco días, realizar lo siguiente:

1. Fijar el tubo flexible de control de inundación por medio de la cadena en el nivel de inundación indicado: 80% en temporada de lluvias, 90% en temporada de estiaje.

2. Alimentar agua al HAFVD hasta alcanzar el nivel de inundación deseado
3. Poner el interruptor de arranque de la bomba en la posición de apagado (OFF), y suspender el suministro de energía en el interruptor principal (ambos interruptores dentro del gabinete de la bomba)

## **Sección 6 Emergencias**

En caso de algún accidente debe realizarse los siguientes puntos:

- Identificar el origen del accidente
- Alejarse de la fuente de riesgo
- Acudir por ayuda inmediatamente; si es posible, resolver el problema con las herramientas que se tengan a la mano
- Después de superada la emergencia, averiguar las causas que la provocaron para desarrollar una estrategia de prevención.

## **Sección 7 Consideraciones de seguridad**

### **7.1 Materiales**

En la Tabla D a continuación, se enlistan las herramientas y materiales recomendadas para realizar el manejo de muestras y para el mantenimiento en la planta. Antes de realizar las actividades debe programarse cada jornada de trabajo, incluyendo los equipos que serán necesarios. De preferencia mantener todo el equipo limpio y preparado para ser utilizado.

### **7.2 Filosofías de seguridad**

Es necesario hacer énfasis en los aspectos de seguridad e higiene debido a que en la operación de la planta piloto de la Zona Cultural, existe un riesgo importante de

**Tabla D. Herramientas y materiales para las tareas de muestreo y mantenimiento**

Mantenimiento	Seguridad	Emergencia
Cepillo, escoba, cubeta	Guantes de hule y de carnaza	Agua potable o destilada
Pala, machete, tijeras de jardín, bieldo, rastrillo	Lentes de seguridad y cubrebocas	Botiquín de primeros auxilios con: Gasa, alcohol, agua oxigenada,...
Llave de perico, llave steelson, pinzas de mecánico juego de desarmadores, martillo, múltímetro (o verificador de corriente)	Ropa de algodón que cubra todo el cuerpo (bata), adecuada para trabajo	Tarjeta de teléfono o teléfono celular
Manguera para conducir agua limpia	Zapatos cerrados herméticos al agua; de preferencia botas de hule	
Recipientes para cargar los materiales y herramientas que sean distintos del recipiente para transportar las muestras de agua residual.	Solución de hipoclorito de sodio al 5% para enjuagarse las manos y el material después de usarse	

accidente o emergencia. Se plantean los siguientes puntos como principios fundamentales de seguridad:

- Todos los accidentes, enfermedades e incidentes que puedan afectar al operador pueden y deben evitarse.
- La razón más importante en la prevención de accidentes es la salud e integridad de las personas que realicen prácticas en la planta piloto.
- La seguridad es una responsabilidad individual
- Todas las deficiencias deben corregirse de inmediato

Además de las observaciones expuestas anteriormente, por encontrarse el sitio de la planta piloto en una zona relativamente alejada y apartada, se recomienda tomar las

siguientes precauciones mientras se esté en el lugar:

- Estar acompañado (preferentemente)
- Informar en el PIQAYQA o en algún otro sitio sobre la visita que se hará a la planta, y el tiempo que permanecerá en el lugar
- Tener identificados los puntos más cercanos para: Solicitar ayuda directa. Llamar por teléfono (PIQAYQA: 56225300 al 04), o activar los postes de Auxilio-UNAM
- Mantenerse alerta
- Permanecer el menor tiempo posible
- Tener siempre a la mano los objetos de su propiedad para retirarse rápidamente del lugar en caso de emergencia
- No portar objetos de valor consigo
- No portar ropa llamativa u ostentosa