

“Elaboración del diagnóstico del humedal de Acamixtla, recomendaciones y propuesta de acciones para su rehabilitación, en la localidad de Acamixtla municipio de Taxco de Alarcón, en el Estado de Guerrero”.

TC1621.3

Informe Final

COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA
SUBCOORDINACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



Jefe de proyecto: Dr. Armando Rivas Hernández

México, 2016

F.CO.2.03.01

Índice de contenido

Nomenclatura	viii
RESUMEN EJECUTIVO	1
1. OBJETIVO	4
2. ALCANCES.....	4
3. DEFINICIONES.....	4
4. DESARROLLO.....	6
4.1. Introducción.....	6
4.2. Antecedentes	7
4.3. Metodología	8
4.4 Resultados de campo y laboratorio	16
4.4.1 Análisis de resultados	20
4.4.1.1 Parámetros de campo	20
4.4.1.2 Parámetros de laboratorio	28
pH, Unidades de pH	20
Temperatura, °C	22
Oxígeno Disuelto, mg/L	24
Gasto, L/s	26
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/L	29
Demanda química de oxígeno, mg/L.....	33
Sólidos suspendidos totales, mg/L	36
Coliformes fecales, NMP/100mL	39
Huevos de helmintos, H/L.....	44
Grasas y aceites, mg/L	45
Nitrógeno total, mg/L	47
Fósforo total, mg/L.....	51

5. EVALUACIÓN DEL DISEÑO FÍSICO	56
6. CONCLUSIONES	79
7. RECOMENDACIONES	80
8. BIBLIOGRAFÍA	83
9. ANEXO.....	85

Índice de tablas

Tabla 4.1 Resultados de campo y laboratorio del primer muestreo (09 al 10-mayo-2016).....	17
Tabla 4.2 Resultados de campo y laboratorio del segundo muestreo (10 al 11-mayo-2016).	18
Tabla 4.3 Resultados de campo y laboratorio del tercer muestreo (11 al 12-mayo-2016).	19
Tabla 4.4 Valores típicos de valores y concentraciones de contaminantes de un agua residual típica municipal.	28
Tabla 4.5 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de la DBO ₅	32
Tabla 4.6 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de la DQO.	35
Tabla 4.7 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de SST.	39
Tabla 4.8 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de coliformes fecales.....	42
Tabla 4.9 Media y desviación estándar de grasas y aceites en los diversos procesos de tratamiento.	46
Tabla 4.10 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de nitrógeno total.....	49
Tabla 4.11 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de fósforo total.....	54
Tabla 4.12 Promedio de los tres muestreos de los metales en cada proceso del sistema.	56

Índice de figuras

Figura 4.1 Sistema de tratamiento de aguas residuales de Acamixtla.....	9
Figura 4.2 Ubicación de los sitios de muestreo.....	11
Figura 4.3 Variación de pH en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	21
Figura 4.4 Variación de temperatura en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	23
Figura 4.5 Variación de oxígeno disuelto en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	25
Figura 4.6 Variación de gasto en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	27
Figura 4.7 Remoción de DBO_5 con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	30
Figura 4.8 Eficiencia de remoción acumulada de DBO_5 , con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.....	31
Figura 4.9 Desviación estándar de la DBO_5 en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	31
Figura 4.10 Remoción de DQO con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del	

biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	34
Figura 4.11 Eficiencia de remoción acumulada de DQO, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.....	34
Figura 4.12 Desviación estándar de la DQO en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	36
Figura 4.13 Remoción de SST con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	37
Figura 4.14 Eficiencia de remoción acumulada de SST, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.....	38
Figura 4.15 Desviación estándar de SST en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	38
Figura 4.16 Remoción de CF con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	40
Figura 4.17 Eficiencia de remoción acumulada de CF, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	41
Figura 4.18 Desviación estándar de CF en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	43
Figura 4.19 Remoción de G y A con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del	

biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	45
Figura 4.20 Eficiencia de remoción acumulada de G y A, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.....	46
Figura 4.21 Desviación estándar de G y A en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	47
Figura 4.22 Remoción de NT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	48
Figura 4.23 Eficiencia de remoción acumulada de NT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	48
Figura 4.24 Desviación estándar de NT en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.....	50
Figura 4.25 Remoción de PT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua clarificada; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	52
Figura 4.26 Eficiencia de remoción acumulada de PT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua clarificada; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.	53
Figura 4.27 Remoción de metales con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.	55
Figura 5.1 Arreglo actual del biodigestor.....	62
Figura 5.2 Biodigestor con las modificaciones sugeridas.....	63

Figura 5.3 Modificaciones en la línea de purga de lodos.	63
---	----

Índice de fotos

Foto 4.1 a) Caudal de llegada al sistema y b) caudal de operación medido en el vertedor sutro a la salida del desarenador	12
Foto 4.2 Toma de muestras: a) nocturno, b) diurno	12
Foto 4.3 Mediciones de campo: a) caudal y b) pH.	13
Foto 4.4 a) Medición de oxígeno disuelto, b) Aspecto de las muestras.	13
Foto 4.5 Sensibilización y capacitación comunitaria.	14
Foto 4.6 Actividades de capacitación de los operadores.	15
Foto 4.7 Actividades de capacitación de personal de CAPASEG en aula y en campo.	16
Foto 5.1 Actividades de capacitación de personal de CAPASEG en aula y en campo.	57
Foto 5.2 Aspecto general del tanque de homogenización.....	58
Foto 5.3 Presencia de una malla previa a las rejillas y al canal desarenador.	58
Foto 5.4 Operación incorrecta de los canales del desarenador.	59
Foto 5.5 Caseta de vigilancia construida sobre el digestor.	60
Foto 5.6 Acumulación de sólidos: humedal lodos A, humedal lodos B.	61
Foto 5.7 Estanques denominados del lecho orgánico, cuyo medio de empaque está compuesto por grava.	65
Foto 5.8 Flujo superficial del agua en el tanque del lecho orgánico del módulo B.66	66
Foto 5.9 Presencia de sólidos en la superficie del humedal de lodos.	67
Foto 5.10 Acumulación de sólidos sobre la superficie del humedal de lodos del módulo B.	68
Foto 5.11 Presencia de canales superficiales sobre los humedales de tratamiento.	69
Foto 5.12 Diámetro pequeño de la granulometría existente la superficie del humedal de tratamiento.....	69
Foto 5.13 Incorrecta instalación de las mamparas en los humedales de tratamiento.	71
Foto 5.14 Inadecuada colocación de grava sobre los cabezales.	72
Foto 5.15 Mamparas instalada incorrectamente sobre el fondo de las lagunas... 72	72
Foto 5.16 Deficiencias en la instalación de la mampara en el humedal de pulimento.....	73

Foto 5.17 Presencia de basura sobre la superficie del humedal de pulimento.....	74
Foto 5.18 Presencia del suelo sobre la superficie del humedal de pulimento.	74
Foto 5.19 Deficiencias de los materiales de construcción.....	75
Foto 5.20 Áreas de disposición de los sólidos extraídos del sistema de tratamiento.	76
Foto 5.21 Cunetas para la protección del agua proveniente de lluvia.	77
Foto 5.22 Canal para el drenado de agua de lluvia instalado para la protección del sistema de tratamiento.	77
Foto 5.23 Medidor Parshall.	78

Nomenclatura

A.C.	Agua cruda
SoBd	Sobrenadante Biodigestor
L.O.A.	Lecho orgánico A
L.O.B-M	Lecho orgánico B-Mezcla
H.S.A	Humedal del sobrenadante A
H.S.B	Humedal del sobrenadante B
L.A	Laguna A
L.B	Laguna B
H.P.A	Humedal de pulimento A
H.P.B	Humedal de pulimento B

RESUMEN EJECUTIVO

Durante el mes de marzo de 2016, personal de la CAPASEG, CONAGUA del estado de Guerrero, Presidencia municipal de Taxco, Asociación Pueblo Sabio e IMTA, al término de una visita técnica al sistema de tratamiento de aguas residuales de la localidad de Acamixtla, Taxco, Guerrero, en la que se identificaron acciones de mejora relacionadas con el diseño físico, algunos aspectos constructivos y de la operación y mantenimiento, se acordó realizar el diagnóstico del sistema, que incluyera las eficiencias de remoción de contaminantes, recomendaciones y acciones de rehabilitación, así como dar capacitación técnica con tres alcances: personal de la CAPASEG, sensibilización y participación ciudadana, y capacitación a los operadores.

Durante la visita se planteó que el principal problema era del tipo operativo, ya que el afluente presentó un caudal aproximado de 12 a 14 L/s, siendo que la capacidad de diseño es de 3 L/s, cuyas consecuencias estaban evidenciadas por acumulación excesiva de sólidos sobre la superficie de los humedales, presencia de flujos preferenciales superficiales, mal olor en algunas zonas; y de esperarse, una baja eficiencia de reducción de contaminantes (no obstante que el sistema inició operaciones en el año 2015). De igual modo se resaltó el hecho de la incorrecta ubicación de la caseta de vigilancia sobre el biodigestor, debido al riesgo de intoxicación del personal o de explosión, por los gases que ahí se pudieran acumular.

Para el diagnóstico del sistema se ejecutó una campaña de muestreo continuo durante tres días, se realizaron los análisis de laboratorio y se calcularon las eficiencias de laboratorio. Cabe señalar que durante el periodo de muestreo el caudal de operación no rebasó la capacidad de diseño, por lo que dentro de los resultados obtenidos se tiene que la concentración de DBO₅, SST, HH, GyA, PT, así como los valores de CF y metales pesados estuvo debajo del límite establecido en la norma; sin embargo la concentración de NT resultó ser superior que el de la norma, de hecho el agua tratada presenta valores mayores a los del agua cruda, por la acumulación que se ha tenido de este parámetro dentro del sistema. Por lo anterior, debido a al parámetro de nitrógeno total, se concluye que el agua tratada no cumple con la norma para un cuerpo receptor con protección de la vida acuática. La alta concentración de nitrógeno en el agua cruda es causada por los volúmenes

de ácido nítrico utilizados en la platería, para lo que se recomienda reunir los desechos en un solo sitio, confinarlos, estabilizarlos y caracterizarlos para identificar una alternativa específica de tratamiento, dado que las alternativas fisicoquímicas existentes (electrodialisis, intercambio iónico o el uso de catalizadores) son métodos costosos.

Las eficiencias de reducción de contaminantes fueron las necesarias para cumplir con la normativa, excepto, como fue citado, con el nitrógeno total, lo que significa que el sistema funciona correctamente, solamente que durante los periodos en que se ingresa un mayor caudal del de diseño, solamente pueda eliminarse la carga orgánica correspondiente a la de diseño, y el exceso de contaminantes simplemente pasan y son descargados junto con el agua tratada. De aquí surge la recomendación de mayor importancia de no operar el sistema para cargas mayores a las que fue diseñado. Con base en los resultados obtenidos y en experiencias citadas en la bibliografía se analiza el comportamiento de la reducción de contaminantes, así como los principales mecanismos de remoción.

Como parte de la evaluación física del sistema se identificaron 23 aspectos que pueden mejorarse, por lo que se generó igual número de recomendaciones para su solución, las de mayor relevancia son:

Modificar el pretratamiento (incrementar la capacidad del desarenador, colocar tuberías para limpieza de sólidos, instalar un estanque para sólidos y un deflector y rejillas adicionales, obtener control hermético de las compuertas del pretratamiento), modificar el comportamiento hidráulico del biodigestor (actualmente provoca acumulación excesiva de sólidos sobre el humedal de lodos A, sustituir el medio filtrante de los humedales (lecho orgánico, lodos y sobrenadante), realizar la limpieza de tuberías (distribución y recolección), colocar codos de 45° en los extremos de las tuberías para facilitar su limpieza, incrementar el bordo libre de las mamparas dentro de los humedales, desazolvar las lagunas, mejorar la estabilidad de los taludes, instalar un estanque para la colocación de los sólidos extraídos del sistema, adecuar los tubos de llegada al medidos Parshall para mejorar la medición de caudal, colocar una carpeta de asfalto sobre los taludes de tierra para prevenir el crecimiento de vegetación sobre los bordos.

Se impartió capacitación a 19 personas de la CAPASEG en curso teórico (aula) práctico (visita técnica al humedal de Acamixtla) con duración de dos días. Se impartieron cursos de sensibilización a representantes de las localidades de Acamixtla, La Quebradora, El cedrito, Juliantla, Huajojutla, Hueymatla y San Juan de Dios en la que se abordaron la estructura, funcionamiento y actividades rutinarias de la operación y mantenimiento de los humedales de tratamiento, las principales enfermedades de origen hídrico, estadísticas del agua y problemática ambiental. Se impartió capacitación a las tres personas encargadas de la operación, mantenimiento y resguardo de las instalaciones, para lo cual mediante explicaciones en sitio se les informó cuáles y el porqué de las acciones de operación y mantenimiento.

Se concluye la importancia de operar el sistema conforme a los parámetros del dimensionamiento (diseño teórico), de realizar las adecuaciones de mejora del sistema con objeto de prolongar su vida útil, de obtener las eficiencias esperadas de remoción de contaminantes con objeto de proteger la calidad del agua del río San Juan y la calidad de vida de los habitantes ribereños, la calidad del agua freática, así como de preservar el medio ambiente.

1. OBJETIVO

Diagnosticar el humedal de tratamiento de Acamixtla, y ejecutar capacitación comunitaria para su operación y mantenimiento.

2. ALCANCES

Obtener las eficiencias de tratamiento de cada uno de los procesos que conforman el tratamiento, así como la eficiencia global del sistema a partir de muestreos de mediciones y muestreos de campo.

Sensibilización y participación ciudadana a personal de las comunidades de Acamixtla, La Quebradora, El cedrito, Juliantla, Huajojutla, Hueymatla y San Juan de Dios.

Capacitación de los operadores. Esta actividad se propone realizar en dos tiempos: Bajo las condiciones actuales de operación y mantenimiento; condición futura, posterior a la etapa de rehabilitación.

Capacitación sobre humedales a CAPASEG en un periodo de tres días, que contemple: principios de la autopurificación; introducción a la tecnología de los humedales de tratamiento; casos de estudio de experiencias de evaluación; dimensionamiento (teoría y ejercicios de diseño; y diseño físico.

3. DEFINICIONES

Humedal. Sistema de tratamiento de aguas residuales. Se usa en este estudio el término de humedal como sinónimo de humedal de tratamiento para diferenciarlo de los humedales naturales. Consiste en el aprovechamiento de especies vegetales adaptadas a altas condiciones de humedad, sembradas sobre estanques impermeabilizados en los que se hace asar el agua residual para recuperar su calidad mediante la eliminación de contaminantes.

Humedales naturales. Las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas. Como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas donde el suelo es predominante hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos, originadas por descarga natural de acuíferos.

Aguas residuales. Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Carga contaminante. Cantidad de un contaminante expresado en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales.

Contaminantes básicos. Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a la Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/L de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

Contaminantes patógenos y parasitarios. Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto.

Cuerpo receptor. Son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos.

Descarga. Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación.

Embalse natural. Vaso de formación natural que es alimentado por uno o varios ríos o agua subterránea o pluvial.

4. DESARROLLO

4.1. Introducción

Los humedales han incrementado su importancia a nivel internacional, por la versatilidad de sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales, por sus bajos costos de tratamiento, por ser una tecnología que no requiere energía eléctrica para su funcionamiento cuando las condiciones topográficas del terreno lo permiten, y por ser un sistema que remueve nutrientes, lo que permite la protección de la vida acuática de los cuerpos receptores. Cuando son combinados con lagunas de maduración permiten obtener un agua tratada, que reduce la población de patógenos, hasta el cumplimiento de las normas mexicanas para diversos tipos de reúso, sin la necesidad de utilizar desinfectantes químicos, como es el uso de cloro, lo que beneficia en evitar la formación de trihalometanos, los que son recalcitrantes, cancerígenos y mutagénicos.

Las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales generalmente presentan costos mayores de tratamiento, particularmente los costos de operación y mantenimiento, aspecto que sumado a los insuficientes recursos económicos disponibles para su operación por lo regular se traduce en su abandono o en su ineficiente operación. Otro punto de gran interés es que la mayoría de estos sistemas no incluyen la eliminación de nutrientes, con lo que no se contribuye para la protección de la calidad del agua del cuerpo receptor, y de su vida acuática.

Se tiene por lo tanto la necesidad de incorporar tecnologías de bajo costo de tratamiento, que su operación sea sencilla y que esté realmente al alcance de los organismos operadores y que el agua tratada cumpla con todos los requerimientos existentes en la Normativa Mexicana para la protección de la vida acuática.

La combinación de humedales de tratamiento y lagunas de maduración forman parte del sistema de tratamiento de aguas residuales en la localidad de Acamixtla, Taxco, Guerrero, sin embargo, el sistema presenta problemas de malos olores, además de que el agua tratada tiene la apariencia de no cubrir con los límites establecidos en la Norma para fines de protección de la vida acuática. Esta problemática pudiera tener como causas deficiencias de diseño, de construcción o de operación y mantenimiento, por lo que se requiere realizar su diagnóstico, con el fin de generar las recomendaciones necesarias que permitan restablecer su capacidad de tratamiento, conforme al dimensionamiento original, para una capacidad de 3 L/s.

4.2. Antecedentes

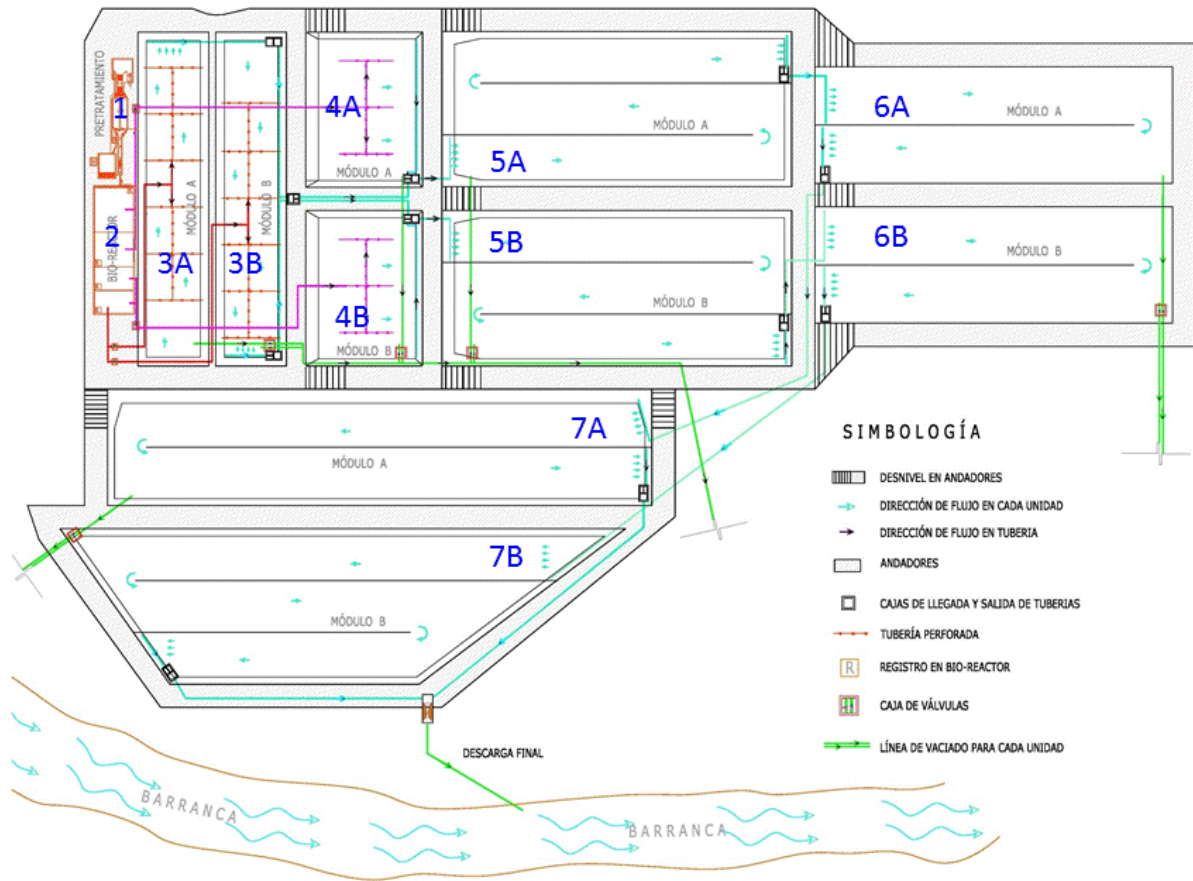
La planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en la localidad de Acamixtla, Taxco, Guerrero fue terminada de construir e inició su operación en el año 2015. A escasos dos meses de la puesta en marcha ya presentaba problemas de taponamiento y acumulación excesiva de sólidos, por lo que se ha requerido de su extracción de una manera frecuente. La acumulación de sólidos y el taponamiento del medio filtrante han provocado la generación de malos olores y la apariencia del agua tratada con alta turbiedad y mal olor. Ante esta situación, integrantes de la asociación denominada “Pueblo Sabio” solicitaron a la CAPASEG su intervención para dar solución a esta problemática. Durante el mes de marzo de 2016 se realizó un recorrido al sistema de tratamiento para verificar en campo el estado de las instalaciones. En el recorrido participaron personal de la CAPASEG, CONAGUA del estado de Guerrero, Presidencia municipal de Taxco, Asociación Pueblo Sabio e IMTA. Al término de la visita se efectuó una reunión en la que se acordó realizar: 1) la evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales (consistente en la combinación de biodigestor, humedales y lagunas de estabilización); 2) acciones de capacitación y sensibilización comunitaria dentro de la microcuenca, en relación con el saneamiento y problemática ambiental; 3) capacitación de los operadores del sistema de tratamiento y; 4) capacitación sobre la tecnología de humedales a personal de la CAPASEG.

La capacidad de tratamiento de la planta, conforme al diseño, es de 3.0 L/s; sin embargo, el caudal de operación varía entre los 12 y 16 L/s, caudal que se incrementa considerablemente durante la temporada de lluvias. Con base en

información proporcionada por los operadores del sistema se tiene que dos poblaciones, ubicadas aguas arriba, conectaron sus sistemas de alcantarillado al colector principal, para “aprovechar” la existencia de la planta de tratamiento, y de ese modo tratar sus aguas residuales.

4.3. Metodología

La planta de tratamiento de aguas residuales está integrada por Pretratamiento (rejillas y desarenador), biodigestor, humedal de lecho orgánico, humedal de lodos, humedal del sobrenadante, laguna de maduración y humedal de pulimento.



1 Pretratamiento	2 Biodigestor
3a Lecho orgánico A	3b Lecho orgánico B
4a Humedal de lodos A	4b Humedal de lodos B
5a Humedal de sobrenadante A	5b Humedal de sobrenadante B
6a Laguna de maduración A	6b Laguna de maduración B
7a Humedal de pulimento A	7b Humedal de pulimento B

Figura 4.1 Sistema de tratamiento de aguas residuales de Acamixtla.

El proyecto contempla cuatro actividades: diagnóstico de la PTAR, sensibilización y participación ciudadana, capacitación de los operadores y capacitación de personal de CAPASEG, las que se desarrollaron como se describe en el presente capítulo.

1) Diagnóstico de la PTAR, que incluye muestreo, análisis de laboratorio, determinación de las eficiencias de remoción de contaminantes, revisión del diseño teórico (memoria de cálculo), identificación de deficiencias del diseño físico, reingeniería del sistema y recomendaciones de mejora del sistema de tratamiento.

Los parámetros medidos en campo fueron: caudal, temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto (OD).

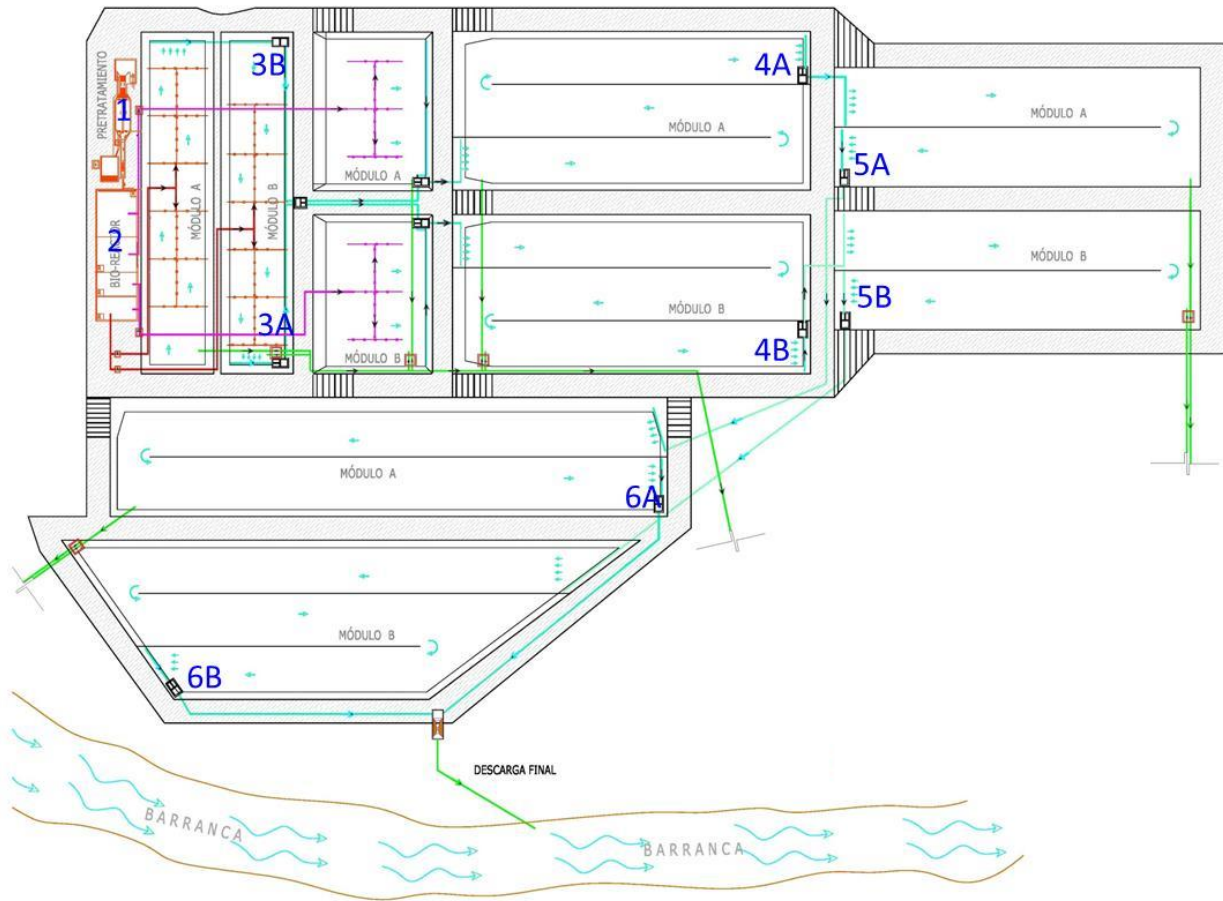
Los parámetros fisicoquímicos fueron: demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites; nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT).

Parámetros bacteriológicos: coliformes fecales (CF), coliformes totales (CT) y huevos de helmintos (HH).

La muestra del agua cruda se obtuvo justo antes del pretratamiento y posteriormente en cada una de las estructuras de salida da cada una de las unidades de tratamiento, con el fin de obtener sus eficiencias de tratamiento. La frecuencia de muestreo fue de cada cuatro horas para la elaboración de la muestra compuesta, los coliformes fecales fueron muestras simples y las GyA se obtuvieron como muestras únicas. El periodo de muestreo total fue de tres días (9, 10 y 11 de mayo de 2016).

Cabe señalar que durante el periodo de muestreo el caudal de operación no superó el caudal de diseño de 3 L/s, no obstante que estaban llegando del orden de 16 L/s (Foto 4.1). El caudal excedente fue derivado hacia el río. Este modo de operación ya tenía varios días, según lo comentaron los operadores.

En la Figura 4.2 se muestra la ubicación de los sitios de muestreo.



1 Pretratamiento	2 Salida del biodigestor
3a Lecho orgánico A	3b Lecho orgánico B
4a Humedal de sobrenadante A	4b Humedal de sobrenadante B
5a Laguna de maduración A	5b Laguna de maduración B
6a Humedal de pulimento A	6b Humedal de pulimento B

Figura 4.2 Ubicación de los sitios de muestreo.



Foto 4.1 a) Caudal de llegada al sistema y b) caudal de operación medido en el vertedor sutro a la salida del desarenador

En la Foto 4.2 se muestra acciones de toma de muestras en los horarios nocturno y diurno, en la Foto 4.3 las mediciones de campo (caudal y pH), y en la Foto 4.4 un detalle de la medición de oxígeno disuelto y del aspecto de las diversas muestras, en las que se observa como más sucia el agua cruda y la más transparente el agua tratada.



Foto 4.2 Toma de muestras: a) nocturno, b) diurno

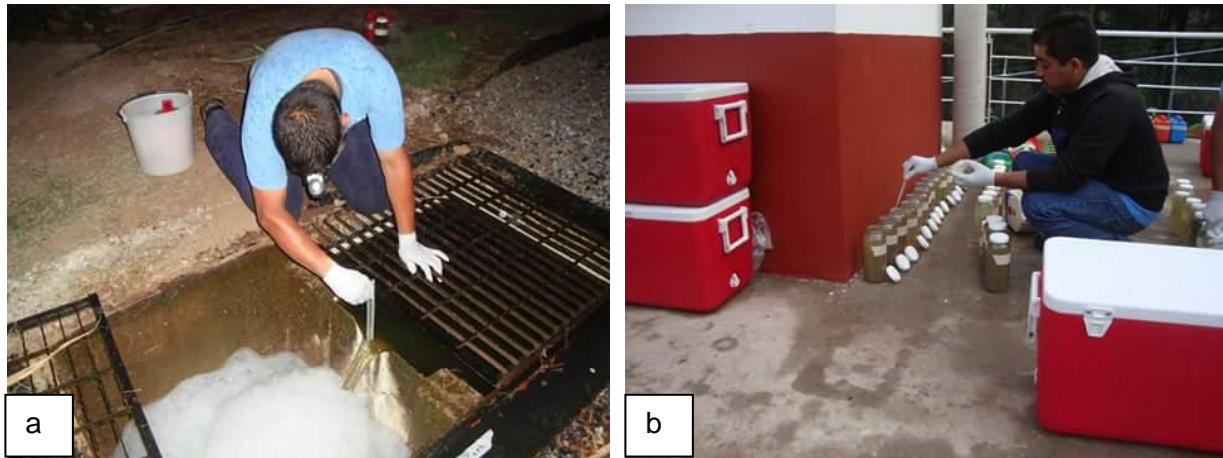


Foto 4.3 Mediciones de campo: a) caudal y b) pH.



Foto 4.4 a) Medición de oxígeno disuelto, b) Aspecto de las muestras.

2) Sensibilización y participación ciudadana. Originalmente se tenía contemplado realizar acciones de sensibilización y capacitación comunitaria en las comunidades conectadas al humedal (Acamixtla, La Quebradora y El Cedrito), comunidades con terrenos para humedales (Acamixtla - complementario al humedal existente-, Juliantla y Huajojutla) y otras comunidades de la microcuenca (Hueymatla y San Juan de Dios); sin embargo estas acciones fueron pospuestas debido a condiciones meteorológicas adversas (lluvias fuertes) que impidieron a las personas presentarse en los sitios de reunión, por lo que finalmente se realizó una sola presentación a las autoridades representantes

de las comunidades previamente citadas. En la Foto 4.5 se muestra parcialmente esta actividad.



Foto 4.5 Sensibilización y capacitación comunitaria.

3) Capacitación de los operadores. La capacitación de los operadores se ha ido realizando mediante diferentes visitas al humedal. Estas actividades se continuarán realizando una vez que se hayan ejecutado las acciones de rehabilitación del sistema de tratamiento. En la Foto 4.6 se muestran algunas acciones de capacitación en sitio.



Foto 4.6 Actividades de capacitación de los operadores.

- 4) Capacitación sobre humedales a personal de CAPASEG. En un periodo de dos días se abordaron los temas siguientes: principios de la autopurificación; introducción a la tecnología de los humedales de tratamiento; casos de estudio de experiencias de evaluación; dimensionamiento (teoría y ejercicios de diseño; y diseño físico. En la Foto 4.7 se presentan algunos momentos durante la capacitación en el aula y en campo.



Foto 4.7 Actividades de capacitación de personal de CAPASEG en aula y en campo.

4.4 Resultados de campo y laboratorio

Los resultados correspondientes a los tres muestreos se presentan las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**4.1, 4.2 y 4.3. Se incluyen los valores obtenidos de laboratorio y de campo.

Los datos se analizaron de manera comparativa. Se observa la remoción por contaminantes, conjuntamente de su eficiencia de remoción. Igualmente se incluyen tablas y figuras reportando las desviaciones estándar en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema.

Tabla 4.1 Resultados de campo y laboratorio del primer muestreo (09 al 10-mayo-2016)

PARÁMETROS		SITIOS DE MUESTREO									
		1	2	3a	3bm	4a	4b	5a	5b	6a	6b
		A.C.	SoBd	L.O.A.	L.O.B.M	H.S.A.	H.S.B.	L.A.	L.B.	H.P.A.	H.P.B.
CAMPO	T. del agua (°C)	25.60	25.62	25.22	25.48	25.45	25.95	24.62	25.07	26.03	24.75
	pH (unidades pH)	7.84	7.06	7.41	7.45	7.41	7.39	8.03	8.02	7.72	7.70
	OD (mg/L)	0.30	0.35	0.38	0.37	0.32	0.33	0.43	0.72	0.39	0.19
	Gasto (L/s)	1.90	-	1.46	0.38	0.60	0.63	0.33	1.36	0.30	0.74
LABORATORIO	DBO ₅ (mg/L)	518	461	270	276	30	26	26	39	15	17
	DQO (mg/L)	1131	962	949	792	244	240	320	307	95	190
	SST (mg/L)	240	170	160	130	23	18	30	14	10	20
	CF (NMP/100 mL)	9,300	2,300	43,000	15,000	40	40	4,300	3	40	150
	CT (NMP/100 mL)	2,100,000	2,400,000	11,000,000	4,500,000	240,000	150	1,500,000	70	930	46,000
	H.H. (No. De H/L)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	G y A (mg/L)	116.0	62.1	69.7	8.6	16.1	13.3	8.9	11.9	8.6	12.4
	NT (mg/L)	134	144	133	148	135	136	243	117	138	220
	PT (mg/L)	17.7	15.2	16.5	15.9	8.9	10.5	9.2	9.6	2.2	5.6

Tabla 4.2 Resultados de campo y laboratorio del segundo muestreo (10 al 11-mayo-2016).

PARÁMETROS		SITIOS DE MUESTREO									
		1	2	3a	3bm	4a	4b	5a	5b	6a	6b
		A.C.	SoBd	L.O.A.	L.O.B.M	H.S.A.	H.S.B.	L.A.	L.B.	H.P.A.	H.P.B.
CAMPO	T. del agua (°C)	25.42	25.78	26.15	25.78	25.78	26.87	24.50	25.52	26.55	25.27
	pH (unidades pH)	7.87	7.05	7.36	7.43	7.47	7.40	7.95	7.96	7.72	7.69
	OD (mg/L)	0.09	0.10	0.09	0.07	0.10	0.04	0.67	0.96	0.04	0.08
	Gasto (L/s)	1.92	-	2.34	0.79	0.79	0.88	0.35	1.17	0.30	0.72
LABORATORIO	DBO ₅ (mg/L)	560	503	358	370	16	31	14	26	12	36
	DQO (mg/L)	1545	1073	917	937	266	269	379	286	93	238
	SST (mg/ L)	320	165	110	125	26	16	38	20	10	16
	CF (NMP/100 mL)	11,000,000	200	75,000	930,000	150,000	40	3	3	750	70
	CT (NMP/100 mL)	11,000,000	930,000	11,000,000	24,000,000	1,500,000	2,100	2,100	210	930	15,000
	H.H. (No. De H/L)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G y A (mg/L)	127.0	68.4	8.6	25.9	10.3	10.0	10.9	17.2	9.0	21.5
	NT (mg/L)	165	153	149	155	119	131	148	140	267	177
PT (mg/L)	17.5	17.2	16.1	17.3	10.0	10.2	10.8	9.2	2.7	5.5	

Tabla 4.3 Resultados de campo y laboratorio del tercer muestreo (11 al 12-mayo-2016).

PARÁMETROS		SITIOS DE MUESTREO									
		1	2	3a	3bm	4a	4b	5a	5b	6a	6b
		A.C.	SoBd	L.O.A.	L.O.B.M	H.S.A.	H.S.B.	L.A.	L.B.	H.P.A.	H.P.B.
CAMPO	T. del agua (°C)	25.98	26.00	28.05	28.23	26.30	26.83	26.88	25.78	27.05	25.48
	pH (unidades pH)	7.71	6.94	7.38	7.42	7.46	7.55	8.14	7.89	7.61	7.74
	OD (mg/L)	0.26	0.04	0.09	0.04	0.02	0.02	1.00	1.11	0.15	0.23
	Gasto (L/s)	2.38	-	2.10	1.05	1.00	1.16	0.45	2.01	0.45	0.75
LABORATORIO	DBO ₅ (mg/L)	490	543	384	410	56	36	11	29	7	29
	DQO (mg/L)	1277	1222	987	949	294	245	268	349	87	217
	SST (mg/ L)	320	215	130	165	28	14	18	18	9	9
	CF (NMP/100 mL)	150,000	430,000	9,300	460,000	120,000	120,000	1,500	28,000	40	40
	CT (NMP/100 mL)	4,500,000	1,500,000	11,000,000	11,000,000	2,100,000	11,000,000	23,000	2,100,000	2,100	93,000
	H.H. (No. De H/L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G y A (mg/L)	74.7	55.6	22.5	43.6	9.8	8.6	11.5	20.6	8.6	10.2
	NT (mg/L)	109	154	150	155	134	192	210	127	191	116
PT (mg/L)	15.7	14.1	18.9	17.8	10.1	10.1	9.4	9.0	2.2	5.3	

4.4.1 Análisis de resultados

4.4.1.1 Parámetros de campo

pH, Unidades de pH

Se requiere de un pH de 6.5 a 8.5, para una actividad biológica óptima en el tratamiento de aguas residuales con procesos biológicos (Ramalho *et al.*, 1996). En el sistema evaluado se obtuvo un valor mínimo de pH de 6.94, que corresponde al sobrenadante del biodigestor, obtenido durante el tercer muestreo, mientras que el valor máximo se obtuvo en el tercer muestreo con un valor de 8.14 en la laguna del módulo A.

Los valores medios del pH de las tres campañas estudiadas fueron: A.C., 7.81; SoBd, 7.01; L.O.A., 7.38; H.S.A, 7.44; L.A., 8.04; H.P.A., 7.64; L.O.B-M, 7.43; H.S.B., 7.45; L.B. 7.95 y H.P.B., 7.71.

En la

4.3 se observa que el pH promedio del agua cruda es del orden de 7.7, el cual en el efluente del biodigestor reduce su valor, cercano al neutro, lo que se debe a que en este procesos se producen ácidos orgánicos por las condiciones anaerobias que ahí se desarrollan. En contraste, el mayor valor de pH se obtiene en el efluente de las lagunas, lo que de acuerdo con Goldman *et al.*, (1974) esta condición se debe a que la velocidad de asimilación de CO₂ por parte de las algas para realizar la fotosíntesis, es mayor que la de su producción, dejando libres los iones oxhidrilos, los que al acumularse aumentan el pH. Este mayor pH obtenido en las lagunas de maduración contribuye de manera significativa a la reducción de la población de coliformes, de tal modo que se realiza la desinfección mediante este proceso natural, lo que se observa en los valores obtenidos de coliformes fecales. Este comportamiento se desarrolla en los dos módulos, durante los tres muestreos.

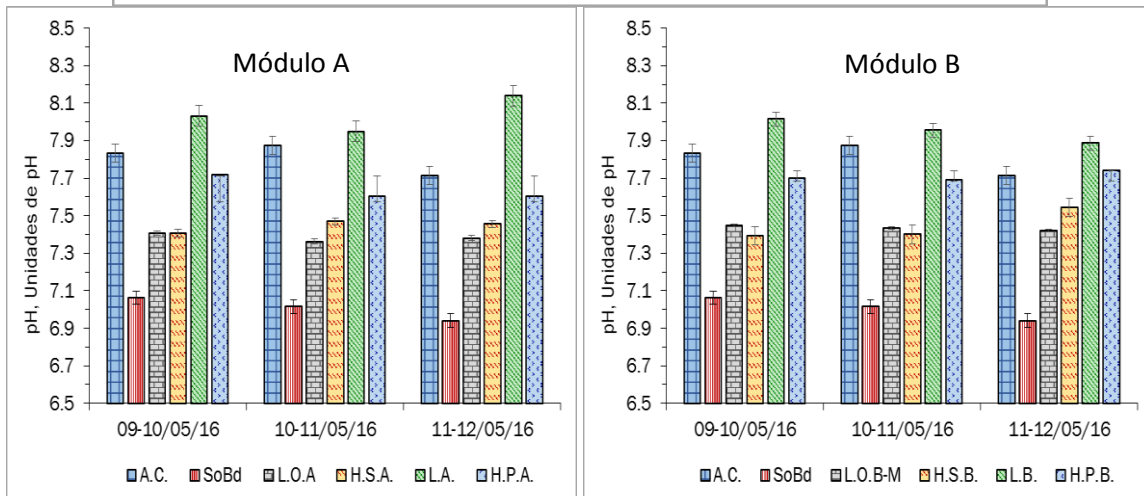
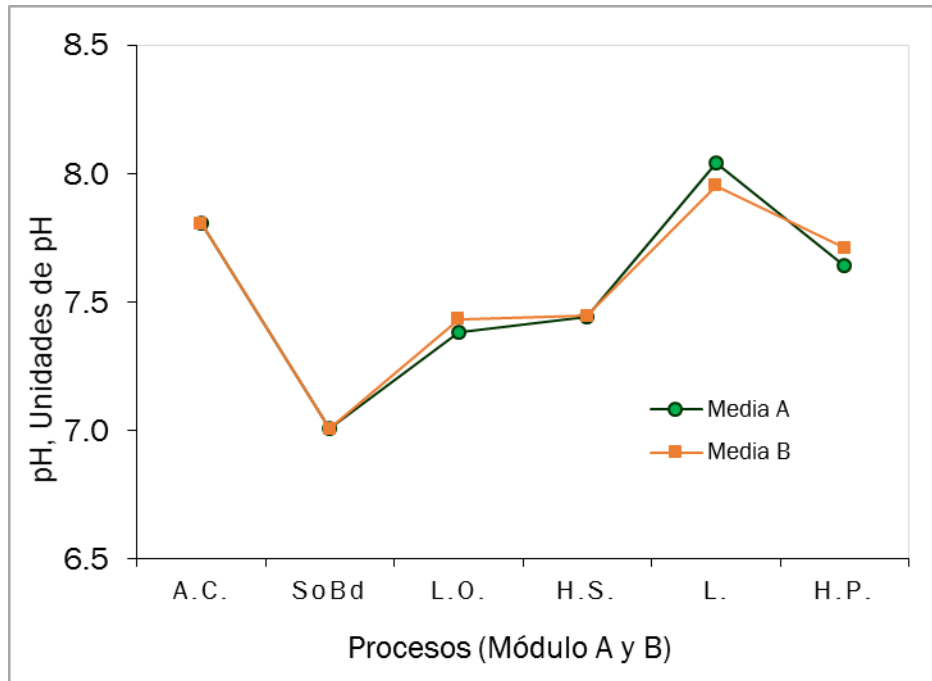


Figura 4.3 Variación de pH en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Temperatura, °C

Los procesos biológicos dependen de la temperatura, influye en las reacciones químicas y velocidades de reacción. El rango óptimo para el desarrollo de la actividad bacteriana se encuentra entre 25°C a 35°C (Delgadillo *et al.*, 2010).

Las temperaturas promedio del agua durante las tres campañas de muestreo fueron: 25.38°C (09-10 de mayo de 2016), 25.76°C (10-11 de mayo de 2016) y 26.66°C (11-12 de mayo de 2016).

La temperatura del agua cruda varió entre 25.42 y 25.98°C, con una desviación estándar de 0.23, mientras que los efluentes de los humedales de pulimento A y B, que serían el efluente del sistema osciló entre 26.06 y 27.0°C (Módulo A) y 24.75 y 25.48°C (Módulo B), la desviación estándar varió entre 0.42 y 0.30 respectivamente).

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**4.4 se grafican los valores de temperatura obtenidos en los muestreos y el promedio por módulos. Se observa que la temperatura en el sistema se encuentra en un intervalo de 24.50 a 28.23°C, y la temperatura promedio es de 25.9°C.

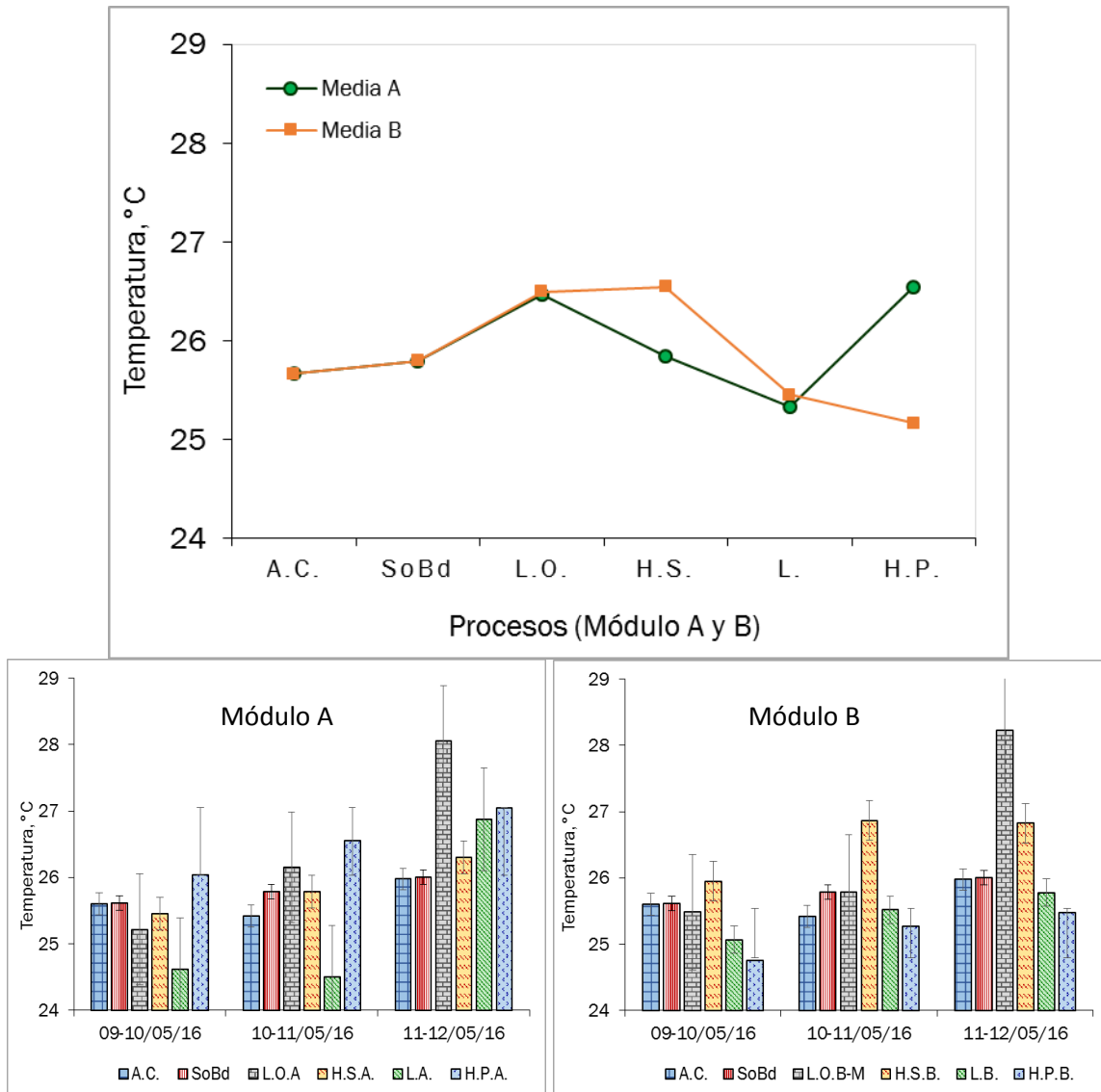


Figura 4.4 Variación de temperatura en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Oxígeno Disuelto, mg/L

Los valores medios del OD de las tres campañas estudiadas fueron: A.C., 0.22; SoBd, 0.16; L.O.A., 0.18; H.S.A, 0.15; L.A., 0.70; H.P.A., 0.19; L.O.B-M, 0.16; H.S.B., 0.13; L.B. 0.93 y H.P.B., 0.17.

En la

4.5 se observa que el OD, tanto del agua cruda, lecho orgánico y en los humedales es de manera general menor que el que se presentó en las lagunas, mientras que el obtenido en los estanques sin plantas, es decir en las lagunas A y B se desarrollaron los valores más altos. Usualmente la concentración de oxígeno del efluente de una alguna de maduración varía entre 8 y 9 mg/L; sin embargo los valores aquí son con mucho diferentes, menores a 1.0 mg/L, lo que denota que la laguna presenta ya una condición anaerobia, por lo que se requiere vaciarla y no hacerle ingresar un caudal mayor al de diseño.

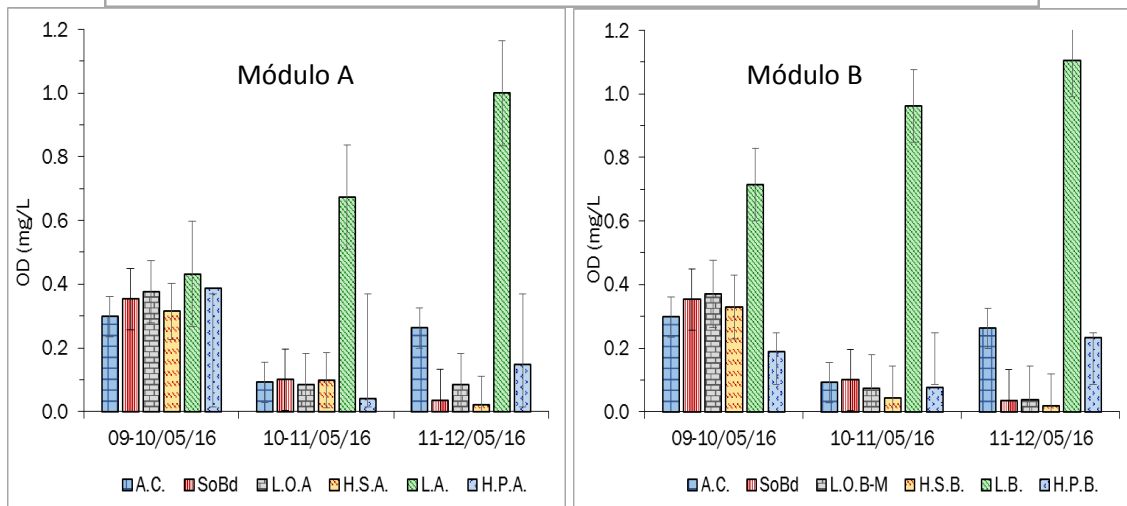
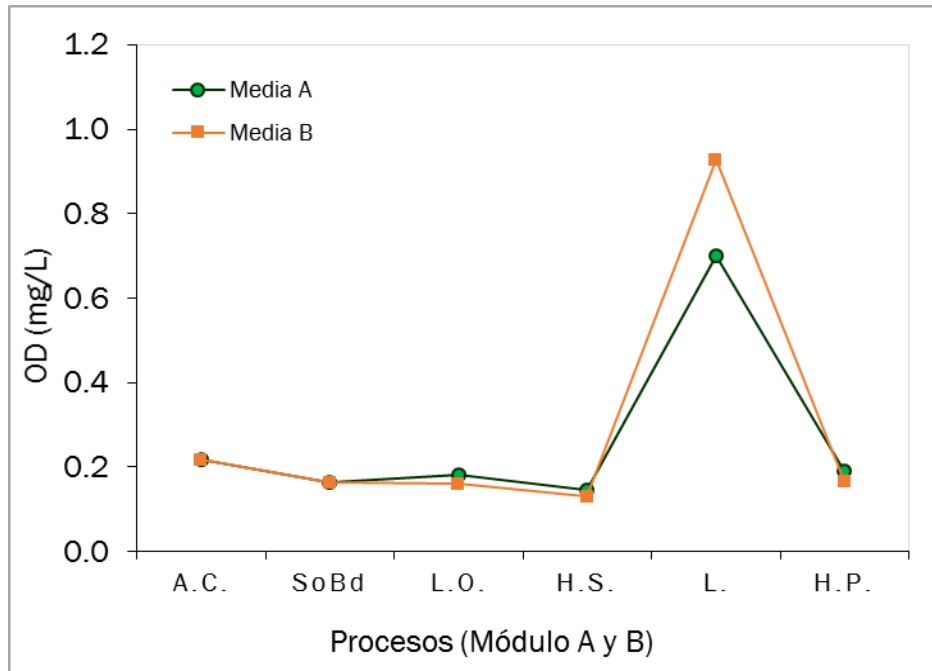


Figura 4.5 Variación de oxígeno disuelto en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Gasto, L/s

Los valores medios del gasto de las tres campañas estudiadas fueron: A.C., 2.07; L.O.A., 1.97; H.S.A, 0.80; L.A., 0.38; H.P.A., 0.35; L.O.B-M, 0.74; H.S.B., 0.89; L.B. 1.51 y H.P.B., 0.74.

En la

4.6 se observa que el gasto en el agua cruda o influente del sistema es mayor al de los humedales de pulimento o efluente del sistema, esto se debe a que el influente es dividido en dos partes para ser llevados a cada uno de los módulos de tratamiento, a la evapotranspiración por las plantas y a la evaporación en las lagunas. Las pérdidas en su conjunto son de aproximadamente entre el 25 y 30%, debido al pequeño caudal que ingresa al sistema y la cantidad evaporada es independiente del caudal de operación.

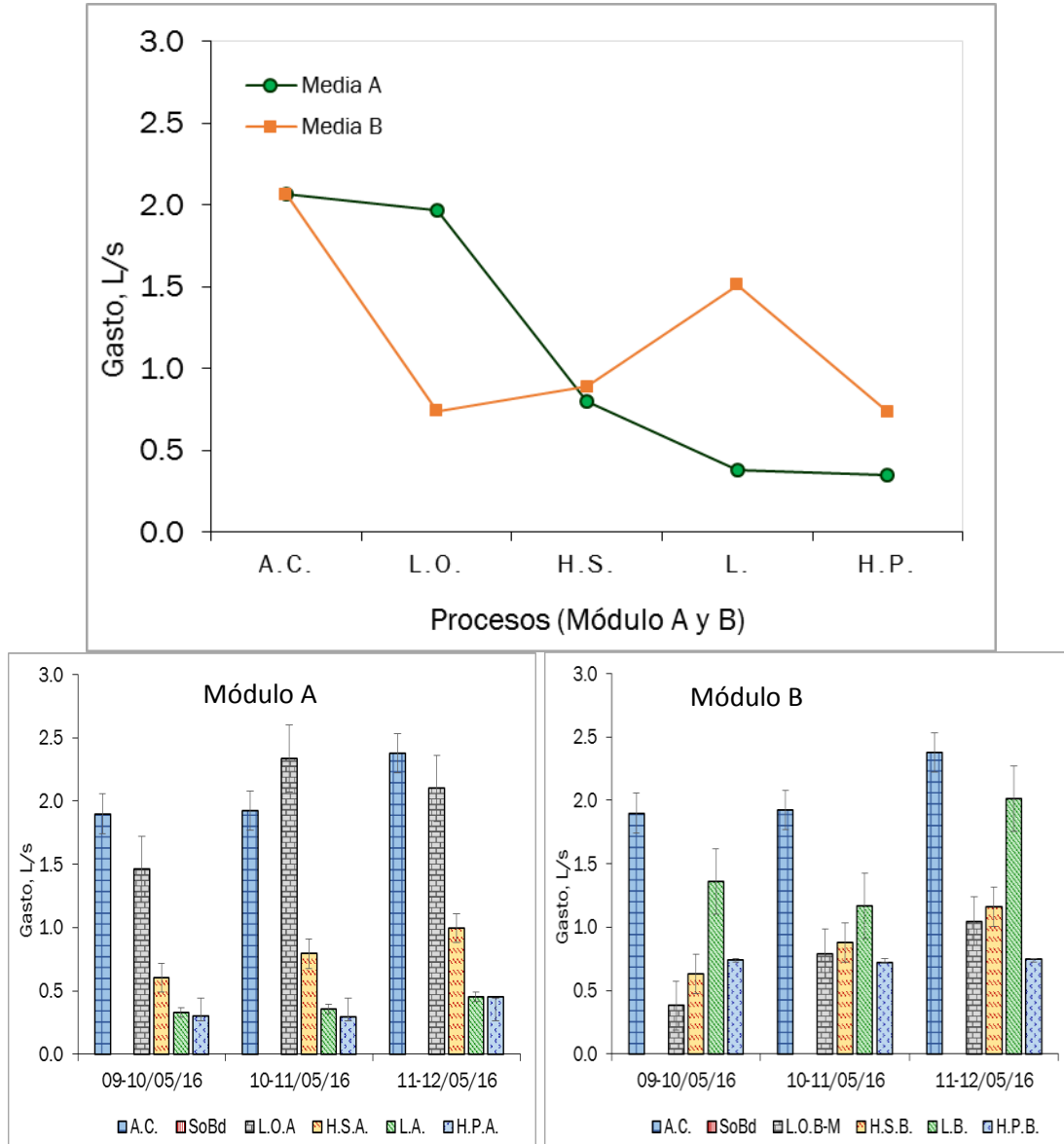


Figura 4.6 Variación de gasto en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

4.4.1.2 Parámetros de laboratorio

Se presenta la Tabla 4.4 con objeto de mostrar una referencia bibliográfica que facilite el análisis de los resultados obtenidos (Fuente: Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 4.4 Valores típicos de valores y concentraciones de contaminantes de un agua residual típica municipal.

Valores típicos de DBO, N y P	Conc. Baja	Conc. media	Conc. alta
DBO	110	190	350
DQO	250	430	800
NT	20	40	70
NT KJELDHAL (orgánico + amoniacal)	20	40	70
N orgánico	8	15	25
N amoniacal	12	25	45
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
PT	4	7	12
P Orgánico	1	2	4
P inorgánico	3	5	8
SST	100	220	350
CF	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁵ -10 ⁸
CT	10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ¹⁰

Los resultados de laboratorio se graficaron, indicando el límite máximo permisible por contaminante de la norma objetivo NOM-001-SEMARNAT-1996, para descargas tipo C (protección de vida acuática), con la finalidad de mostrar que el sistema de tratamiento cumple incluso con esta norma.

Cabe señalar que el efluente del tren de tratamiento corresponde a la salida de los humedales de pulimento A y B. El agua tratada es descargada al río San Juan.

Demanda bioquímica de oxígeno, mg/L

Se presenta en la Figura 4.7 el comportamiento de la DBO₅ a lo largo del sistema de tratamiento, y en la Figura 4.8 se grafican las eficiencias de remoción. Los registros de los tres muestreos y en promedio por módulo presentan un comportamiento de reducción similar.

En el primer muestreo, la DBO₅ del agua cruda en el sistema fue de 518 mg/L, posteriormente en el sobrenadante del biodigestor se obtuvo 461 mg/L, consiguiendo un 11% de eficiencia de remoción. Después, el sistema se divide en dos módulos A y B con la misma combinación de procesos, siendo el lecho orgánico el siguiente proceso con una concentración de 270 y 276 mg/L y una eficiencia de remoción acumulada de 48 y 47% respectivamente. En los humedales del sobrenadante se obtuvieron 30 y 26 mg/L con 94 y 95% de ERA, en la salida de las lagunas se obtuvo 26 y 39 mg/L, presentando un ligero aumento de DBO₅ en la laguna B, debido al desarrollo de algas que ahí se presenta; mientras que en los humedales de pulimento se obtuvieron 15 y 17 mg/L con una eficiencia de remoción acumulada de 97% para los dos módulos.

La concentración de DBO₅ en el agua cruda fue de 518 mg/L en el primer muestreo, 560mg/L en el segundo y 490 mg/L en el tercero, con una desviación estándar de 29 y la concentración media fue de 523 mg/L, menor que la DBO₅ de diseño (600 mg/L).

La concentración de DBO₅, en la salida de los humedales de pulimento A y B o efluentes del sistema fueron de 15 y 17 mg/L en el primer muestreo, 12 y 36 mg/L en el segundo y 7 y 29 mg/L en el tercer muestreo, estos valores a excepción del segundo muestreo en el módulo B, se encuentran por debajo del límite establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, que es de 30 mg/L.

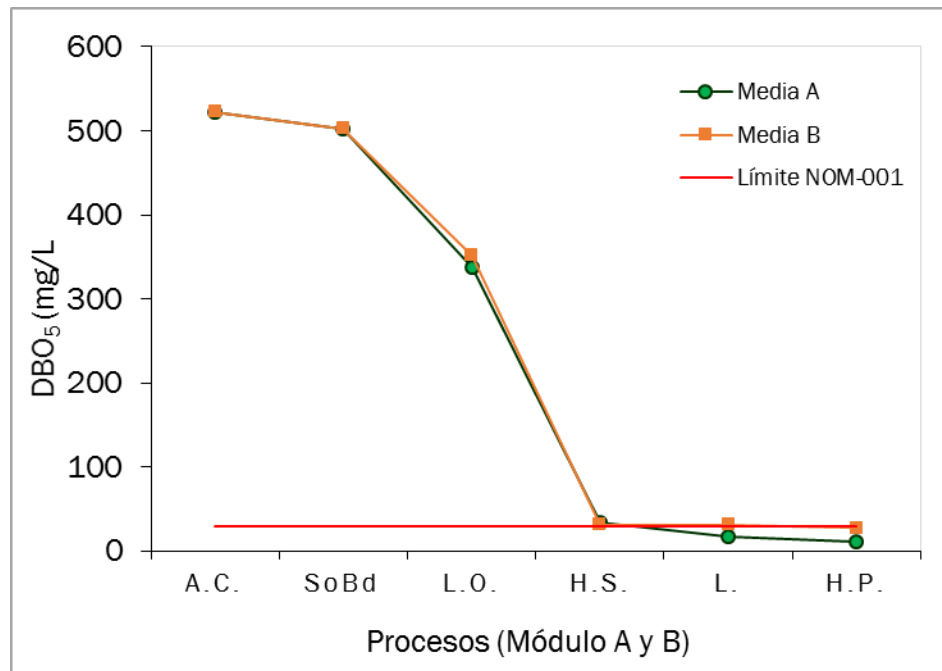


Figura 4.7 Remoción de DBO_5 con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**4.5 se presenta la media, desviación estándar (Figura 4.9) y los porcentajes de remoción por proceso y acumulada, siendo el 98 y 95% la eficiencia promedio de remoción de los tres muestreos en el módulo A y B respectivamente. Al comparar la eficiencia de remoción en los procesos de lagunas y humedales, se observa que se logra una mayor remoción de DBO_5 en los humedales, esto debido a que las lagunas de maduración están diseñadas principalmente para remover bacterias fecales (Mara, 2003) y además se genera una DBO_5 formada por las algas.

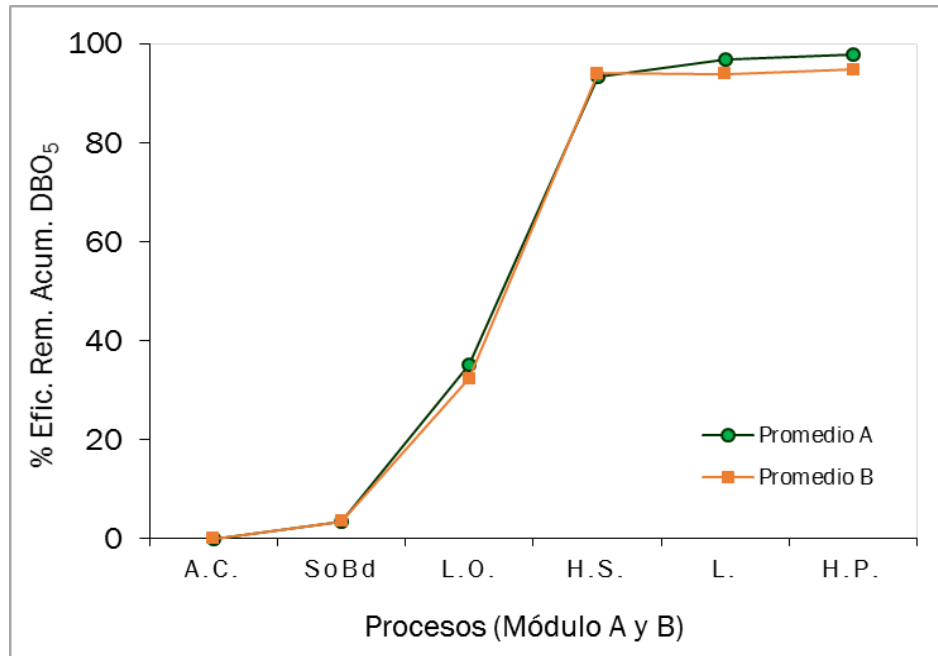


Figura 4.8 Eficiencia de remoción acumulada de DBO₅, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

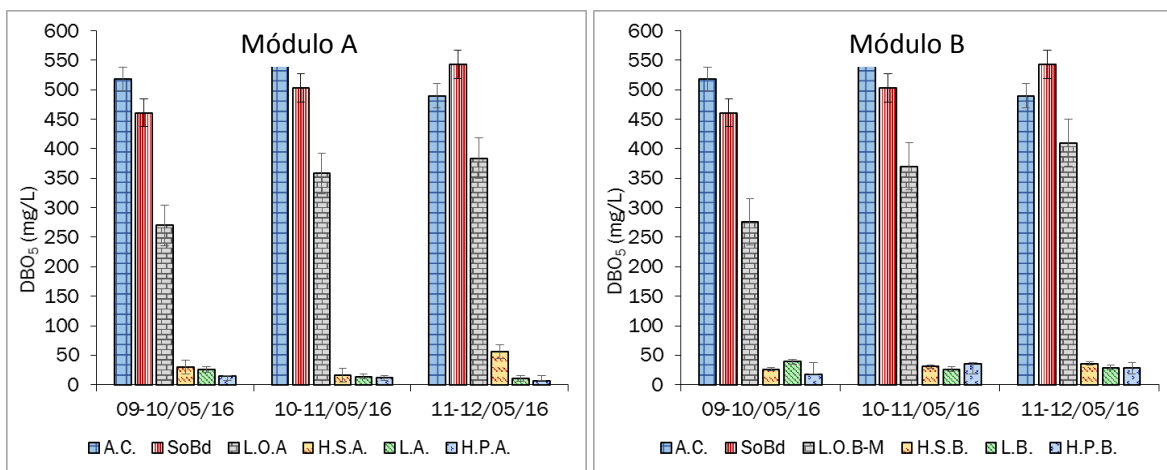


Figura 4.9 Desviación estándar de la DBO₅ en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Tabla 4.5 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de la DBO₅.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar	Eficiencia de remoción DBO ₅ (%)						
			Primer muestreo		Segundo muestreo		Tercer muestreo		Promedio acumulada
			Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	
MÓDULO A									
A.C.	523	29	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	502	33	11	11	10	10	-11	-11	3
L.O.A.	337	49	41	48	29	36	29	22	35
H.S.A	34	17	89	94	96	97	85	89	93
L.A.	17	6	13	95	13	98	80	98	97
H.P.A	11	4	42	97	14	98	41	99	98
MÓDULO B									
A.C.	523	29	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	502	33	11	11	10	10	-11	-11	3
L.O.B-M	352	56	40	47	26	34	24	16	32
H.S.B	31	4	91	95	92	94	91	93	94
L.B.	31	6	-50	92	16	95	19	94	94
H.P.B.	27	8	56	97	-38	94	0	94	95

El mayor porcentaje de remoción de DBO₅ obtenido en los humedales del sistema fue de 96 y 92% para el módulo A y B respectivamente, mientras que en las lagunas se obtuvo un máximo de 80 y 19%, por lo que se infiere que los humedales de tratamiento son más eficientes en términos de reducción de DBO₅. Kadlec y Knight (1996), EPA (2000), señalan que este parámetro es mayormente removido en los primeros metros del medio filtrante en forma de material particulado, filtración, sedimentación, así como por la asimilación de plantas y microorganismos. Los microorganismos, adheridos o suspendidos, utilizan el carbón orgánico para la síntesis de nuevas células; en condiciones aerobias, la materia orgánica es oxidada por reducción del O₂ produciendo CO₂ y liberando energía, la que es usada por las bacterias; en condiciones anóxicas la oxidación del material orgánico puede ocurrir reemplazando el electrón receptor por nitrato a través de microorganismos desnitrificadores (Cooper et al., 1996).

García y Corzo (2008), citan que en humedales de flujo horizontal, se alcanzan rendimientos para la DBO_5 entre 75 y 95%, produciendo efluentes con concentración menores de 20 mg/L, ideal para el cumplimiento de la normatividad. Por otro lado, las lagunas de maduración que son diseñadas principalmente para reducir organismos patógenos, son poco efectivas en la reducción de DBO, además cerca del 60 y 70% de la DBO_5 contenida en el efluente de una laguna de maduración se debe a las algas que contiene (Mara y Pearson, 1998).

Demanda química de oxígeno, mg/L

Se presenta en la Figura 4.10 el comportamiento de la DQO a lo largo del sistema de tratamiento, y en la Figura 4.11 se grafican las eficiencias de remoción. Los registros de los tres muestreos y en promedio por módulo presentan un comportamiento de reducción similar.

En el primer muestreo, la DQO del agua cruda en el sistema fue de 1,131 mg/L, posteriormente en el sobrenadante del biodigestor se obtuvo 962 mg/L, consiguiendo un 15% de eficiencia de remoción. Después, el sistema se divide en dos módulos A y B con la misma combinación de procesos, siendo el lecho orgánico el siguiente proceso con una concentración de 949 y 792 mg/L y una eficiencia de remoción acumulada de 16 y 30% respectivamente. En los humedales del sobrenadante se obtuvieron 244 y 240 mg/L con 78 y 79% de ERA, en la salida de las lagunas se obtuvo 320 y 307 mg/L, presentando un incremento de DQO en las dos lagunas; mientras que en los humedales de pulimento se obtuvieron 95 y 190 mg/L con una eficiencia de remoción acumulada de 92 y 83% para el módulo A y B respectivamente.

La concentración de DQO en el agua cruda fue de 1,131 mg/L en el primer muestreo, 1,545 mg/L en el segundo y 1,277 mg/L en el tercero, con una desviación estándar de 171 y la concentración media fue de 1,318 mg/L.

La concentración de DQO, en la salida de los humedales de pulimento A y B o efluentes del sistema fueron de 95 y 190 mg/L en el primer muestreo, 93 y 238 mg/L en el segundo y en el tercer muestreo de 87 y 217 mg/L.

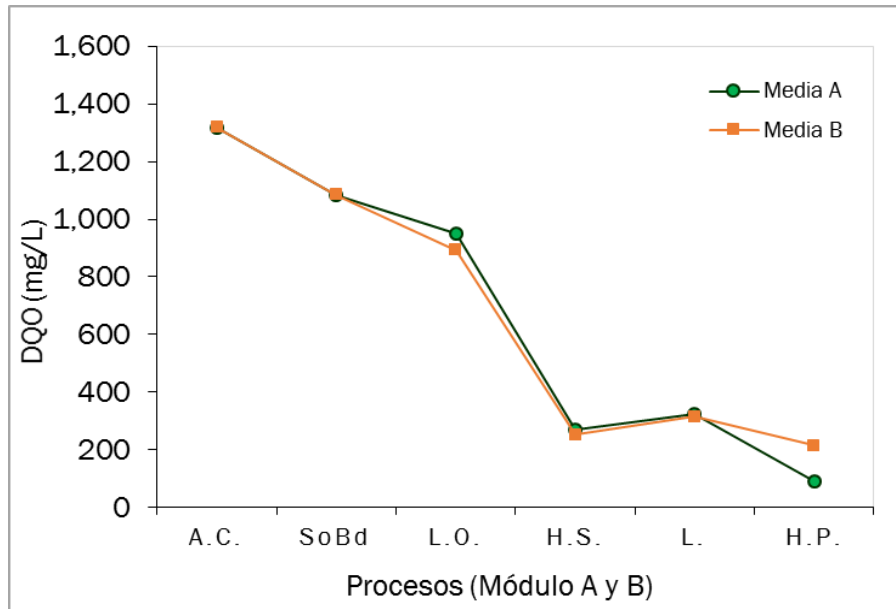


Figura 4.10 Remoción de DQO con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

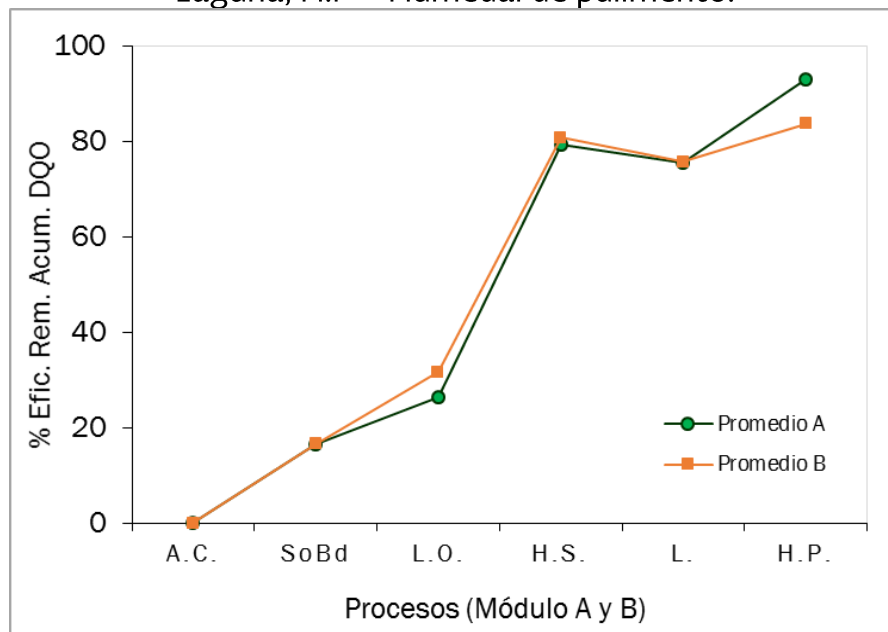


Figura 4.11 Eficiencia de remoción acumulada de DQO, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

En la Tabla 4.6 se presenta la media, desviación estándar (Figura 4.12) y los porcentajes de remoción por proceso y acumulada, siendo el 93 y 84% la eficiencia promedio de remoción de los tres muestreos en el módulo A y B respectivamente. Al comparar la eficiencia de remoción en los procesos de lagunas y humedales, se observa que se sólo se logra remoción de DQO en los humedales y en las lagunas no, a excepción de un 9% de eficiencia en el tercer muestreo.

Tabla 4.6 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de la DQO.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar	Eficiencia de remoción DQO (%)						
			Primer muestreo		Segundo muestreo		Tercer muestreo		Promedio acumulada
			Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	
MÓDULO A									
A.C.	1,318	171	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	1,086	107	15	15	31	31	4	4	17
L.O.A.	951	29	1	16	15	41	19	23	26
H.S.A	268	20	74	78	71	83	70	77	79
L.A.	322	45	-31	72	-42	75	9	79	75
H.P.A	92	4	70	92	75	94	68	93	93
MÓDULO B									
A.C.	1,318	171	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	1,086	107	15	15	31	31	4	4	17
L.O.B-M	893	71	18	30	13	39	22	26	32
H.S.B	251	13	70	79	71	83	74	81	81
L.B.	314	26	-28	73	-6	81	-42	73	76
H.P.B.	215	20	38	83	17	85	38	83	84

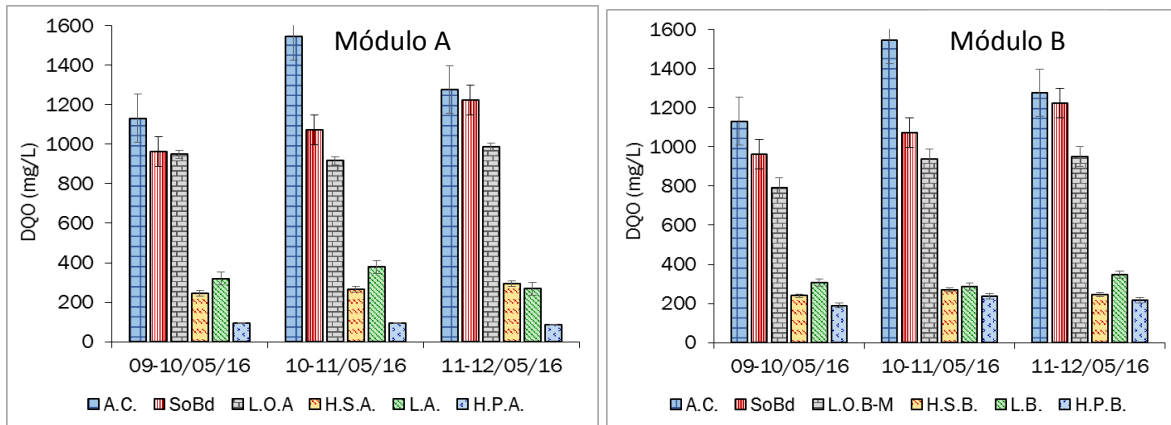


Figura 4.12 Desviación estándar de la DQO en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Sólidos suspendidos totales, mg/L

La remoción de sólidos suspendidos totales a través del sistema se muestra en la Figura 4.13. En el primer muestreo el agua cruda presentó 240 mg/L y al pasar por el primer proceso se logró una concentración de 170 mg/L, equivalente a una reducción del 29%.

Delgadillo *et al.*, (2010), exponen que la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo (en la fosa séptica), sin embargo, en los humedales se lleva a cabo una filtración y sedimentación que completa esta remoción.

El promedio de SST en el agua cruda fue de 293 mg/L, concentración relativamente menor a la de diseño (300 mg/L). Este resultado fue menor a una concentración típica alta de SST (400 mg/L) en aguas residuales municipales de acuerdo a Metcalf & Eddy (2003).

La concentración promedio en los humedales de pulimento o efluentes del sistema fueron de 10 y 15 mg/L en el módulo A y B respectivamente, con una remoción global de 97 y 95% (Figura 4.14), dichas concentraciones en el efluente del sistema cumplen con la normatividad establecida de (40 mg/L, para la NOM 001).

Escudero (2011), indica que los humedales de flujo subsuperficial son eficientes en la remoción de SST, con niveles usuales en el efluente por debajo de 10 mg/L.

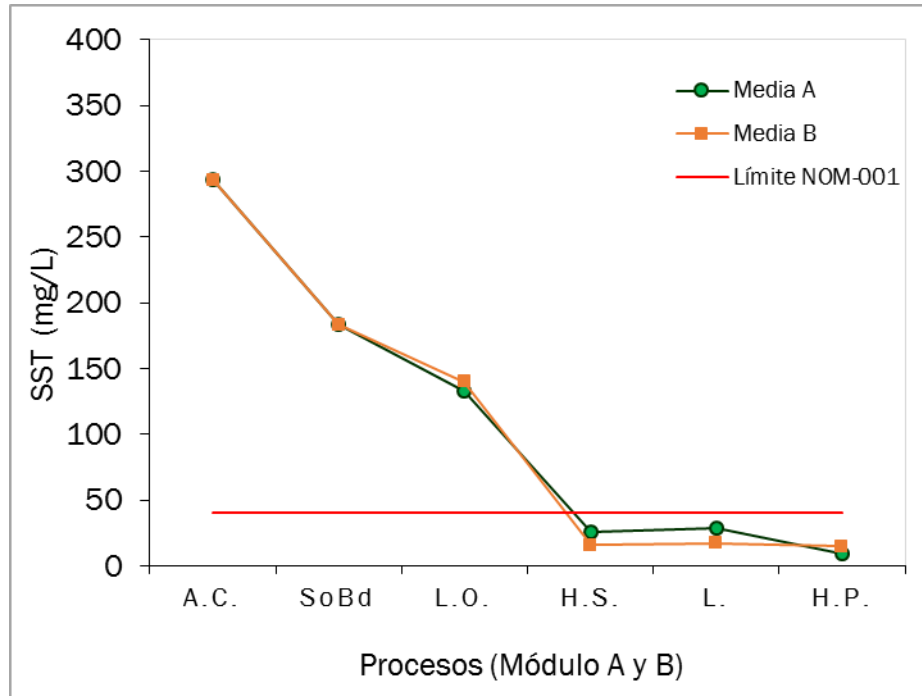


Figura 4.13 Remoción de SST con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

En la Tabla 4.7 se presenta la media, desviación estándar (Figura 4.15) y los porcentajes de remoción por proceso y acumulada. En el efluente de los procesos se obtuvieron las siguientes desviaciones estándar: en el SoBd, de 22.5; en el L.O.A, de 20.5; en el H.S.A, de 1.9; en la L.A, de 8.2; en el H.P.A, de 0.5; el L.O.B-M, de 17.8; en el H.S.B, de 1.6; en la L.B, de 2.5 y en el H.P.B, de 4.5 y la desviación estándar más pequeña por proceso se obtuvo en el humedal de pulimento A o efluente del sistema con un valor de 0.5 y una media de 10 mg/L.

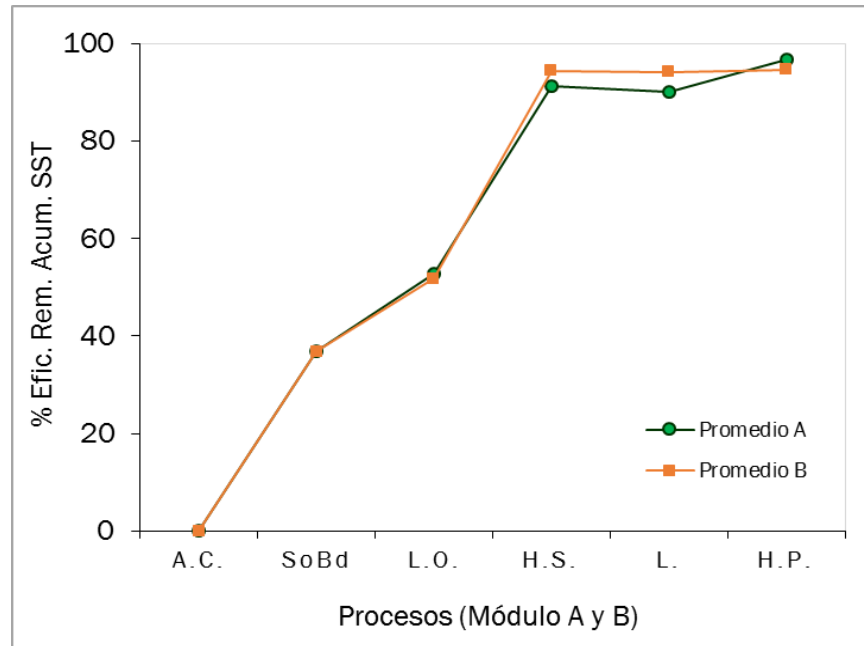


Figura 4.14 Eficiencia de remoción acumulada de SST, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

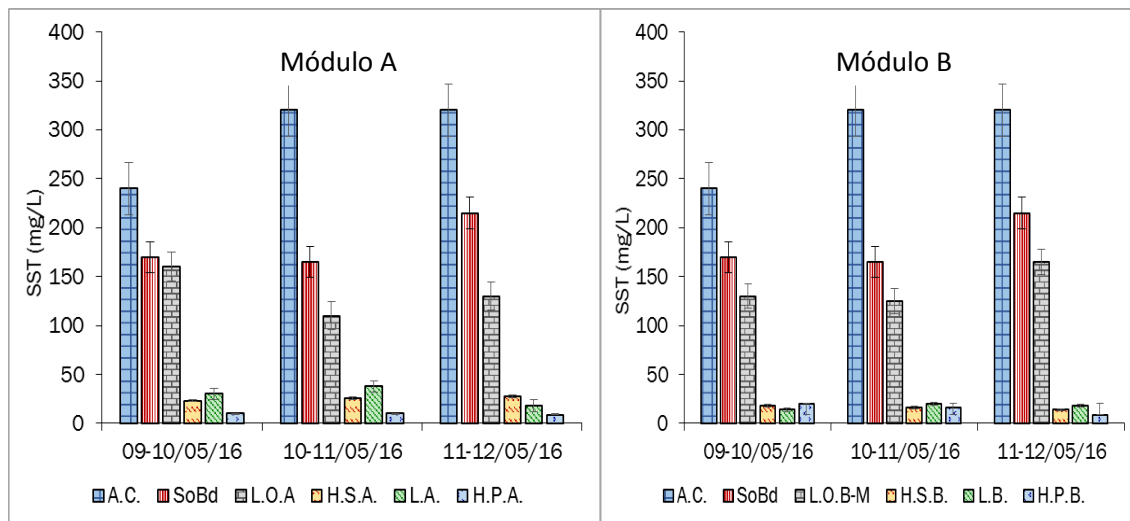


Figura 4.15 Desviación estándar de SST en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Tabla 4.7 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de SST.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar	Eficiencia de remoción SST (%)						
			Primer muestreo		Segundo muestreo		Tercer muestreo		Promedio acumulada
			Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	
MÓDULO A									
A.C.	293	37.7	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	183	22.5	29	29	48	48	33	33	37
L.O.A.	133	20.5	6	33	33	66	40	59	53
H.S.A	26	1.9	85	90	76	92	78	91	91
L.A.	29	8.2	-29	88	-46	88	36	94	90
H.P.A	10	0.5	67	96	74	97	50	97	97
MÓDULO B									
A.C.	293	38	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	183	22	29	2-	48	48	33	33	37
L.O.B-M	140	18	24	46	24	61	23	48	52
H.S.B	16	2	86	93	87	95	92	96	94
L.B.	17	2	22	94	-25	94	-29	94	94
H.P.B.	15	5	-43	92	20	95	50	97	95

Coliformes fecales, NMP/100mL

En la Figura 4.16 se observa la reducción del contaminante en función de los procesos del sistema y el promedio de cada módulo. El valor de coliformes fecales que se registró en el agua cruda fue de 9,300 NMP/100mL en el primer muestreo, 11,000,000 NMP/100mL en el segundo y 150,000 NMP/100mL en el tercero.

En el primer y segundo muestreo en el módulo B y segundo en el módulo A, el valor final aumenta ligeramente respecto del proceso anterior (efluente de la laguna), posiblemente por la presencia de animales de sangre caliente, como es el caso de las aves, siendo estos causantes del aumento de los coliformes fecales provenientes de sus heces. No obstante, del ligero incremento que se presentó, el sistema cumple para la Norma 001 (1,000 NMP/100 mL).

Al promediar las concentraciones de los tres muestreos, se obtiene en el agua cruda 248,498NMP/100mL. En los humedales de pulimento A y B o efluentes del sistema se obtuvo un promedio de 106 y 75NMP/100mL respectivamente con una eficiencia de remoción acumulada de 99.85 y 99.45% (Figura 4.17). Ambos valores están por debajo de los límites que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 de 1,000NMP/100mL.

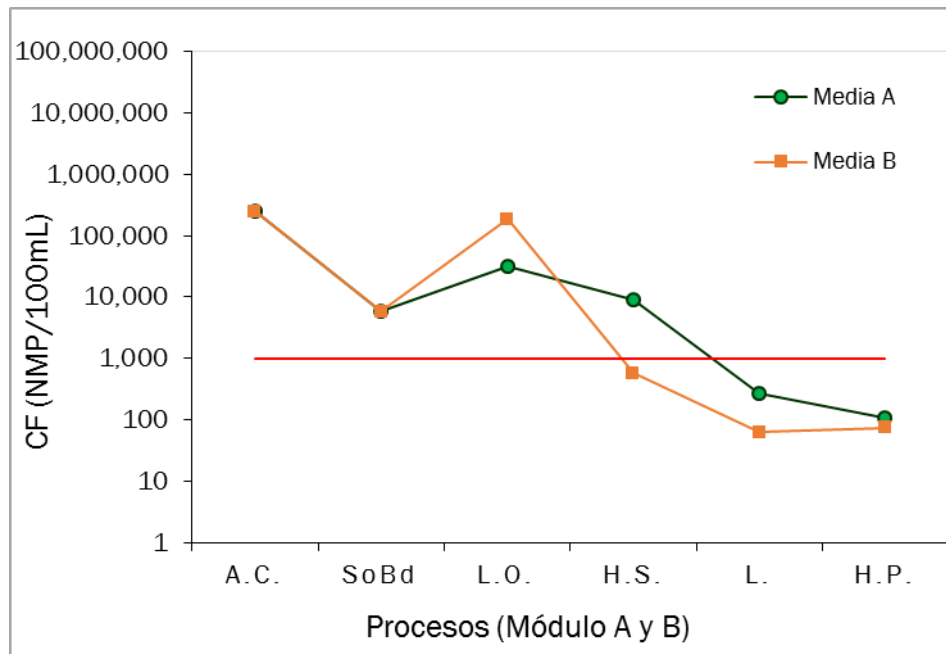


Figura 4.16 Remoción de CF con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

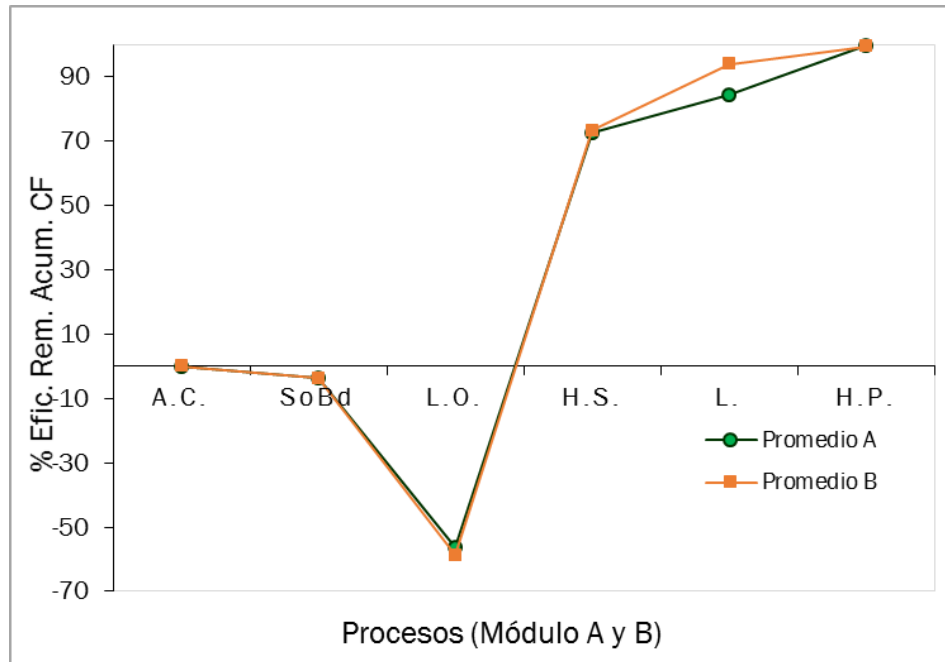


Figura 4.17 Eficiencia de remoción acumulada de CF, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

La Tabla 4.8 muestra la media, desviación estándar y eficiencia de remoción de CF en cada proceso. En el agua cruda se obtuvo la mayor desviación estándar (Figura 4.18) de 6,209,179 y la menor se obtuvo en el efluente del humedal de pulimento B con una desviación estándar de 48.

Tabla 4.8 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de coliformes fecales.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar	Eficiencia de remoción CF (%)						
			Primer muestreo		Segundo muestreo		Tercer muestreo		Promedio acumulada
			Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	
MÓDULO A									
A.C.	248,498	6,209,179	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SoBd	5,827	244,927	75.27	75.27	100.00	100.00	-186.67	-186.67	-3.80
L.O.A.	31,070	29,133	-1,769.57	362.37	37,400.00	99.32	97.84	93.80	-56.42
H.S.A	8,963	103,763	99.91	99.57	-100.00	98.64	-1,190.32	20.00	72.74
L.A.	268	2,439	10,650.00	53.76	100.00	100.00	98.75	99.00	84.25
H.P.A	106	376	99.07	99.57	24,900.00	99.99	97.33	99.97	99.85
MÓDULO B									
A.C.	248,498	6,209,179	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SoBd	5,827	244,927	75.27	75.27	100.00	100.00	-186.67	-186.67	-3.80
L.O.B-M	185,828	468,382	-552.17	-61.29	464,900.0	91.55	-6.98	206.67	-58.80
H.S.B	577	68,950	99.73	99.57	100.00	100.00	73.91	20.00	73.19
L.B.	63	16,129	92.50	99.97	92.50	100.00	76.67	81.33	93.77
H.P.B.	75	28	-4,900.00	98.39	-2,233.33	99.99	99.86	99.97	99.45

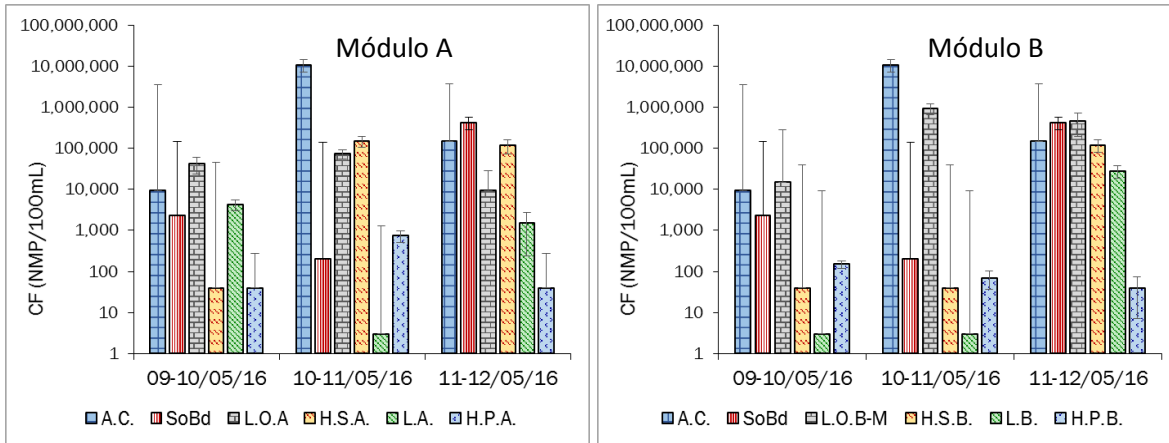
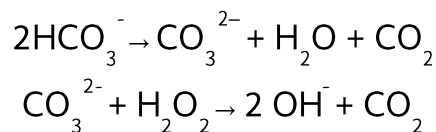


Figura 4.18 Desviación estándar de CF en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

García *et al.*, (2008), mencionan que el grado de eliminación obtenido en humedales de flujo horizontal y vertical es similar y oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas, siendo insuficiente para producir efluentes que cumplan con la normatividad, por lo que recomiendan combinar el sistema con lagunas o humedales de flujo superficial que favorezcan la desinfección.

Rolim (2000), refiere que se puede obtener en las lagunas de maduración una eliminación de coliformes fecales mayor de 99.999%; mientras que en humedales de tratamiento se citan concentraciones mayores al 90% (Vymazal y Kröpfelavá, 2008).

Mara (1997), cita que los altos valores de pH en las lagunas de maduración, se debe a la fotosíntesis realizada por las algas que consumen el CO₂, más rápido de lo que puede ser reemplazado por la respiración bacteriana. Como resultado, los iones de carbonato y bicarbonato se disocian, de la siguiente manera:



El CO₂ que resulta se fija por las algas, y los iones hidroxilo se acumulan, elevando el pH a valores por encima de 10.

Huevos de helmintos, H/L

Los huevos de helmintos se evaluaron durante los tres muestreos y en cada proceso del sistema. Los resultados de laboratorio dieron un valor de 0 H/L para todos los procesos a excepción del efluente de la laguna B en el primer muestreo de 1 H/L y en el agua cruda en el segundo muestreo de 1 H/L, al final del sistema 0 H/L para los dos módulos.

De acuerdo con Rolim (2000), el agua residual doméstica cruda contiene menos de 1,000 huevos por litro. El análisis realizado en el primer muestreo, indica que el agua residual de la localidad de Acamixtla, Taxco de Alarcón Guerrero no contiene HH, sin embargo, es conveniente seguir realizando este análisis, y en caso de que se presente este contaminante, se debe cumplir con la exigencia microbiológica para huevos de helmintos, la cual es de ≤ 1 para riego con contacto directo.

Peña *et al.* (2003), citan que en humedales de flujo subsuperficial horizontal, se obtienen remociones del 95 y 100% para huevos de helmintos.

Rolim (2000), señala que los huevos de helmintos en los sistemas lagunares se remueven por medio de la sedimentación, y su remoción depende del número de huevos de helmintos presentes en el afluente y de los tiempos de retención hidráulica. Normalmente la gran mayoría se elimina en la primera o segunda laguna del sistema, de ser necesario se pueden agregar más lagunas de maduración para asegurarse que el afluente final no contenga huevos de helmintos.

Mara (1997), menciona que las velocidades de sedimentación de los huevos de helmintos son bastante altas (por ejemplo, 3.4×10^{-4} m/s en el caso de *Ascaris lumbricoides*).

Grasas y aceites, mg/L

El valor promedio de la concentración de grasas y aceites en el agua cruda durante los tres muestreos fue de 106 mg/L y la concentración media de los humedales de pulimento o efluentes del sistema fue de 9 y 15 mg/L, con una desviación estándar de 0.2 y 5 respectivamente (Figura 4.19).

Los valores en los humedales de pulimento o efluentes del sistema obtenidos en los tres muestreos (8.6 mg/L, 9.0 mg/L y 8.6 mg/L para el módulo A) y (12.4 mg/L, 21.5 mg/L y 10.2 mg/L para el módulo B) cumplen con las normas mexicanas (LMP 15 mg/L) a excepción del muestreo dos en el módulo B. La eficiencia de remoción global del sistema fue de 91 y 86% respectivamente.

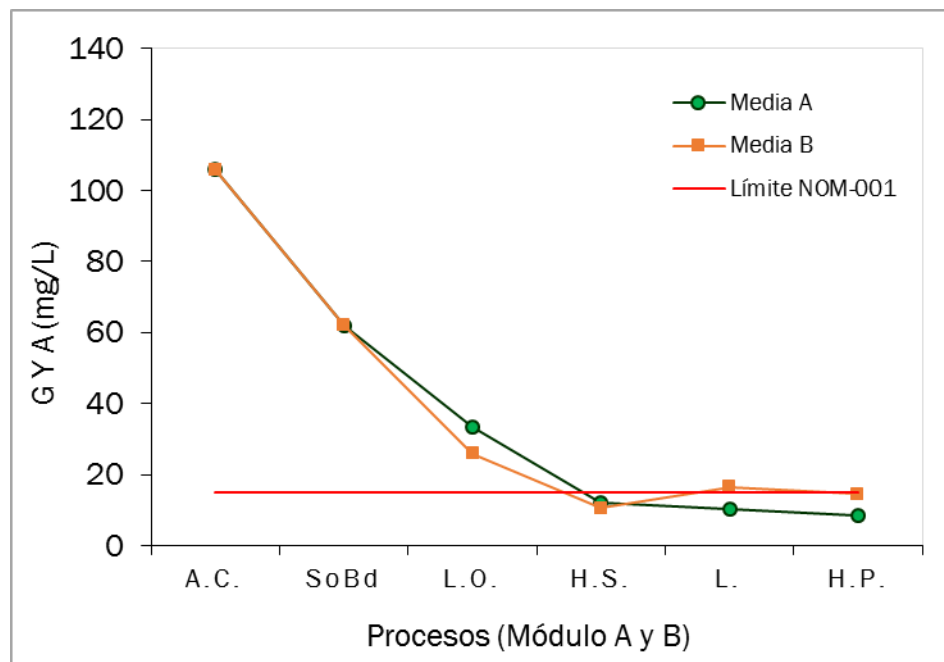


Figura 4.19 Remoción de G y A con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

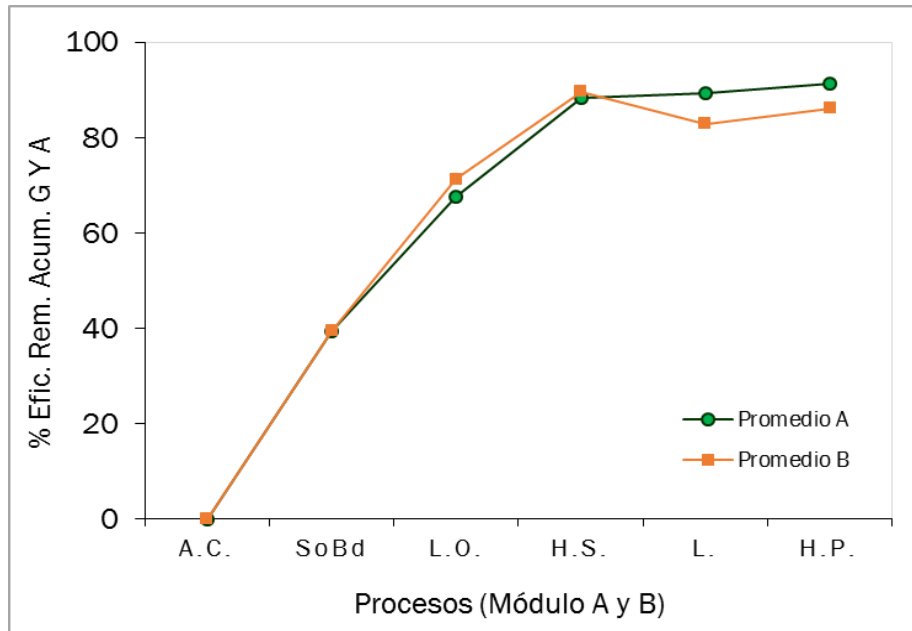


Figura 4.20 Eficiencia de remoción acumulada de G y A, con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

Tabla 4.9 Media y desviación estándar de grasas y aceites en los diversos procesos de tratamiento.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar
A.C.	106	23
SoBd	62	5
L.O.A.	34	26
H.S.A	12	3
L.A.	10	1
H.P.A	9	0
L.O.B-M	26	14
H.S.B.	11	2
L.B.	17	4
H.P.B	15	5

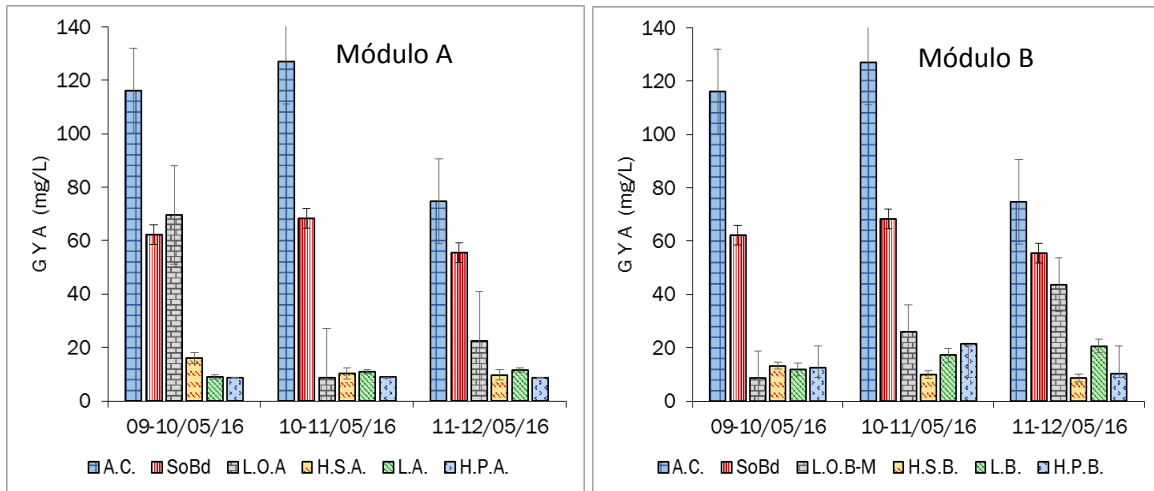


Figura 4.21 Desviación estándar de G y A en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Nitrógeno total, mg/L

Como objetivo de estudio se analizan los nutrientes incluidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para protección a la vida acuática (C).

En la Figura 4.22 se muestran los resultados de nitrógeno total. La concentración de NT promedio en el agua cruda fue de 136 mg/L, con una desviación estándar de 23, la cual es casi el doble a la concentración de 70 mg/L indicado como valor típico alto, de acuerdo a Metcalf & Eddy (2003).

Las concentraciones de nitrógeno total en los humedales de pulimento o efluentes del sistema obtenidas en los tres muestreos fueron: 138 mg/L, 267 mg/L y 191 mg/L (módulo A) con una media de 199 mg/L y 120 mg/L, 177 mg/L y 116 mg/L (módulo B) con una media de 138 mg/L, las cuales se encuentran por arriba del límite (15 mg/L) establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996. En ninguno de los dos módulos hubo eficiencia de remoción al final del sistema (Figura 4.23 y Tabla 4.10), esto puede deberse a las grandes cantidades de fertilizantes terrenos arriba, antes de ingresar el agua al sistema de tratamiento, Lara (1999), indica que en este tratamiento se remueven entre 25 y un 85% de nitrógeno total.

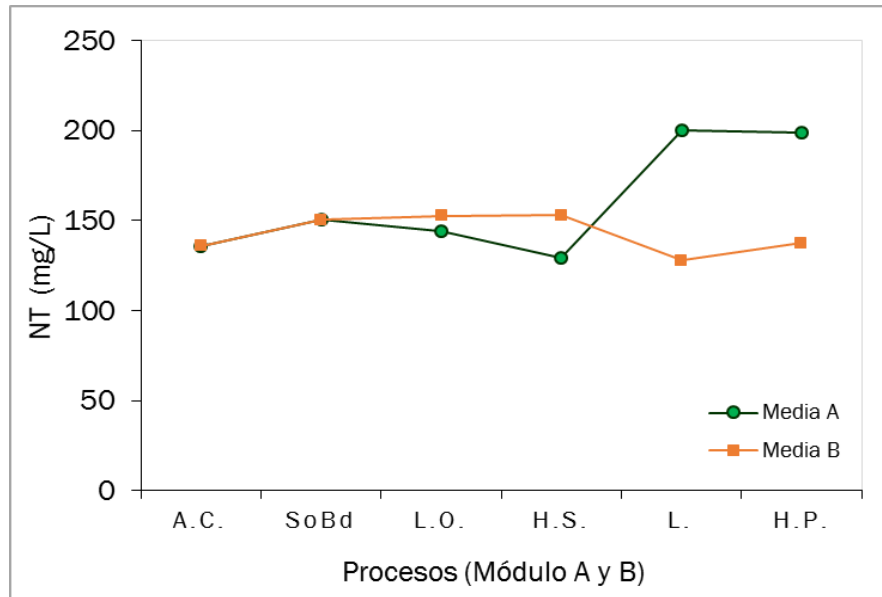


Figura 4.22 Remoción de NT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

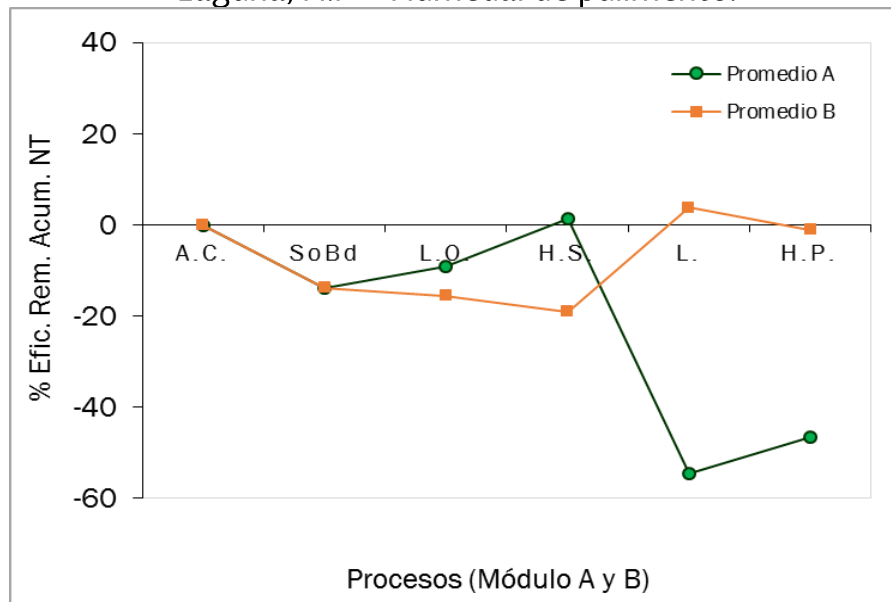


Figura 4.23 Eficiencia de remoción acumulada de NT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

La Tabla 4.10 muestra la media, desviación estándar y eficiencia de remoción de NT en cada proceso. En el efluente del humedal de pulimento A se obtuvo la mayor desviación estándar de 53 y la menor se obtuvo en el lecho orgánico B-M de 3.

Tabla 4.10 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de nitrógeno total.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar	Eficiencia de remoción NT (%)						
			Primer muestreo		Segundo muestreo		Tercer muestreo		Promedio acumulada
			Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	
MÓDULO A									
A.C.	136	23	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	150	4	-7	-7	7	7	-41	-41	-14
L.O.A.	144	8	8	1	3	10	3	-38	-9
H.S.A	129	7	-2	-1	20	28	11	-23	1
L.A.	200	39	-80	-81	-24	10	-57	-93	-55
H.P.A	199	53	43	-3	-80	-62	9	-75	-47
MÓDULO B									
A.C.	136	23	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	150	4	-7	-7	7	7	-41	-41	-14
L.O.B-M	153	3	-3	-10	-1	6	-1	-42	-16
H.S.B	153	28	8	-1	15	21	-24	-76	-19
L.B.	128	9	14	13	-7	15	34	-17	4
H.P.B.	138	28	-3	10	-26	-7	9	-6	-1

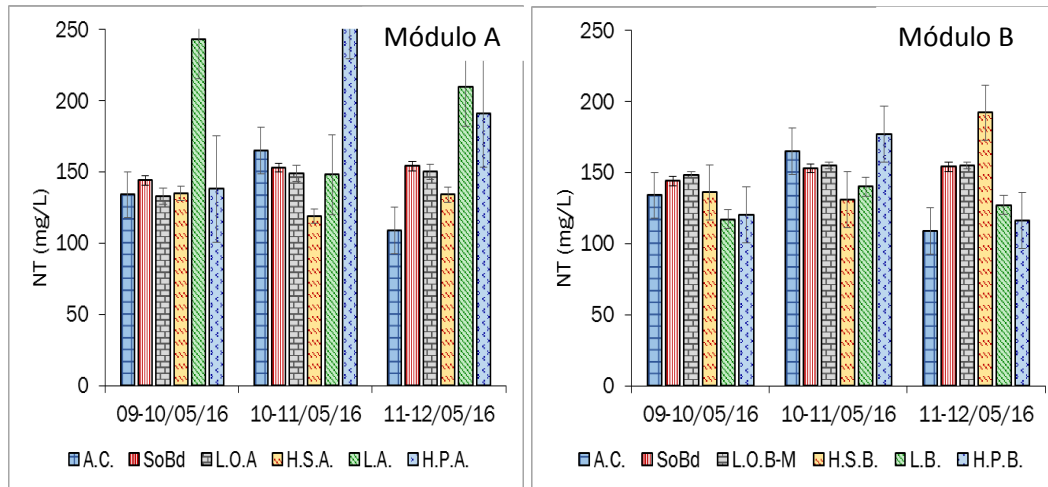


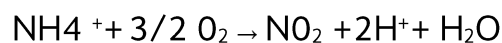
Figura 4.24 Desviación estándar de NT en cada uno de los muestreos, con respecto a los procesos del sistema y por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A = humedal del sobrenadante A; L.A = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

Las condiciones de nitrificación y desnitrificación se desarrollan de manera eficiente, comprobándose en las concentraciones bajas (menor a 1 mg/L) de NO_3 y NO_2 .

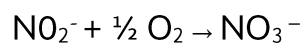
En los humedales de tratamiento la remoción del nitrógeno se lleva a cabo por procesos de nitrificación-desnitrificación. García y Corzo (2008), citan que la nitrificación es realizada por bacterias autótrofas aeróbicas que aprovechan el poder reductor del amonio y éste se convierte en nitratos. La reacción de la desnitrificación permite eliminar el nitrato formado previamente por la nitrificación y convertirlo en nitrógeno gas.

El proceso es el siguiente:

El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito. El género bacteriano que es considerado para catalizar esta reacción es Nitrosomas.



El género Nitrobacter es el responsable para la transformación de nitrito a nitrato.



La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas:



Platzer (1999), menciona que, si el transporte de oxígeno en el humedal es limitado, la nitrificación también será limitada. En cambio, la desnitrificación puede ser muy eficiente, incluso con niveles muy bajos de carbono en relación al nitrógeno.

Kadlec y Knight (1996), señalan que la asimilación de nitrógeno por la planta es otra vía de remoción, pero se considera que mientras no haya cosecha de plantas no hay remoción, sin embargo, otros autores (Osnaya, 2012), citan que por esta vía solo se puede remover cerca del 10%.

Peña y Mara (2004), citan que en los estanques de maduración se realiza una contribución significativa a la eliminación de nitrógeno y fósforo. La eliminación de nitrógeno en un sistema de lagunas es a menudo por encima de 80% y la eliminación de amoníaco es generalmente más de 90% (estas cifras dependen del número de lagunas de maduración incluido en el sistema). En este estudio, se obtuvieron remociones en un rango de 14 a 34% en la laguna B.

Fósforo total, mg/L

Las concentraciones de fósforo total en el agua cruda durante los muestreos fueron: 17.7 mg/L en el primer muestreo, 17.5 mg/L en el segundo y 15.7 mg/L en el tercero, con una desviación estándar de 17 (Tabla 4.11). El promedio fue de 17 mg/L, mayor a una concentración típica alta en un agua residual (12 mg/L) citado en Metcalf & Eddy (2003).

En la Figura 4.25 se presenta la remoción acumulada. En el efluente de los humedales del sobrenadante A y B se consiguió una concentración promedio de 10 mg/L para los dos casos, obteniéndose una eficiencia acumulada de 43 y 39% respectivamente, en los efluente de las lagunas A y B se obtuvo una concentración promedio de 10 y 9 mg/L, por lo tanto la remoción acumulada fue de 42 y 45%, finalmente en los humedales de pulimento se obtuvo una media de 2 y 5 mg/L.

La remoción promedio del sistema fue de 86 y 68% (módulo A y módulo B respectivamente), con una concentración de 2 y 5 mg/L, el cual cumple con el límite que establece la norma de 5 mg/L.

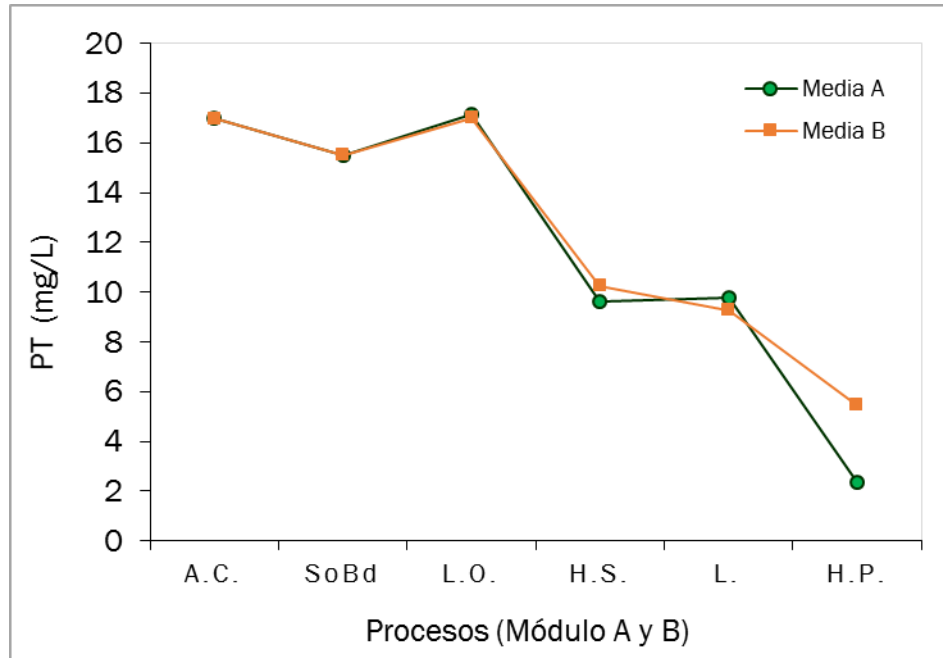


Figura 4.25 Remoción de PT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua clarificada; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

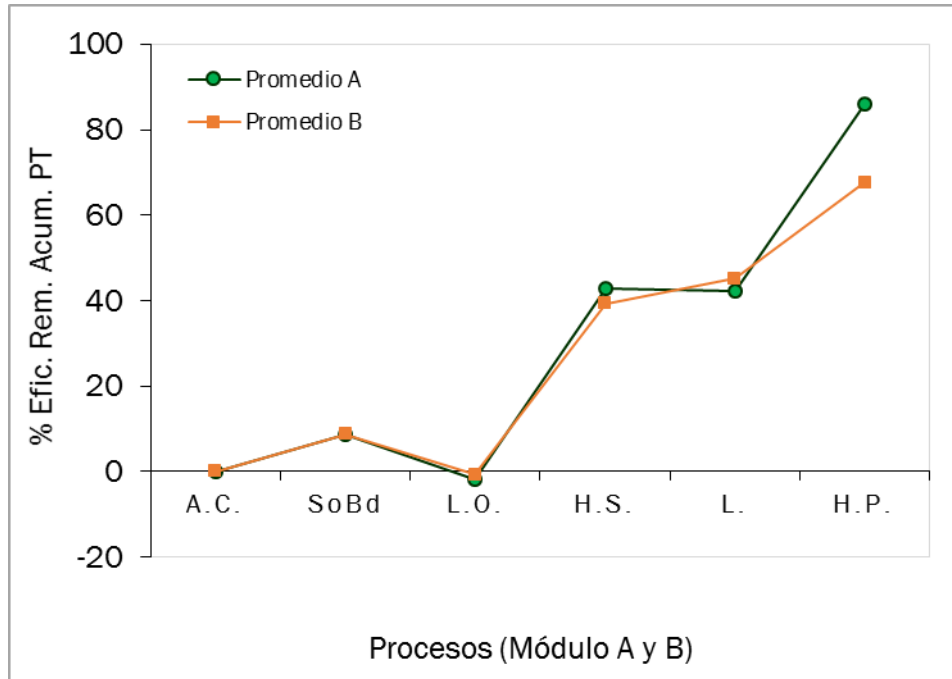


Figura 4.26 Eficiencia de remoción acumulada de PT con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua clarificada; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.= Lecho orgánico, H.S. = humedal del sobrenadante; L. = Laguna; H.P = Humedal de pulimento.

En la Tabla 4.11 se presenta la media, desviación estándar y porcentajes de remoción de contaminantes, se observa que la mayor desviación estándar obtenida fue en el sobrenadante del biodigestor con 1.33 y la menor en el humedal de pulimento B con 0.1.

Tabla 4.11 Media, desviación estándar y eficiencia de remoción en el sistema de fósforo total.

Proceso	Media (mg/L)	Desviación estándar	Eficiencia de remoción PT (%)						
			Primer muestreo		Segundo muestreo		Tercer muestreo		Promedio acumulada
			Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	Proceso	Acum.	
MÓDULO A									
A.C.	17	0.9	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	16	1.3	14	14	2	2	10	10	9
L.O.A.	17	1.2	-9	7	6	8	-34	-20	-2
H.S.A	10	0.6	46	50	38	43	47	36	43
L.A.	10	0.7	-4	48	-8	38	7	40	42
H.P.A	2	0.2	76	88	75	85	76	86	86
MÓDULO B									
A.C.	17	0.9	0	0	0	0	0	0	0
SoBd	16	1.3	14	14	2	2	10	10	9
L.O.B-M	17	0.8	-5	10	-1	1	-26	-13	-1
H.S.B	10	0.2	34	41	41	42	43	36	39
L.B.	9	0.2	9	46	10	47	10	42	45
H.P.B.	5	0.1	42	69	40	69	41	66	68

Brown (1994), Reed *et al.* (1995), reportan eficiencias de 30-50% que corresponden a sistemas específicos evaluados. El rendimiento del sistema estudiado fue del 97%.

Kadlec y Knight (1996), mencionan que el fósforo se puede remover de aguas residuales de las siguientes maneras: asimilación microbiana y por macrófitas, retención en el medio, precipitación con cationes como Ca, Mg, Fe, Mn y adsorción sobre arcillas y materia orgánica.

Hoffman y Platzer (2011), citan que las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.

García y Corzo (2008), refieren que en muchos estudios se ha observado que después de la puesta en marcha de humedales se consigue una buena eficiencia de remoción del fósforo y esta se va reduciendo conforme el tiempo de operación, debido a que el medio granular limpio tiene alta capacidad de adsorción, la cual se va perdiendo.

Otros factores que pueden afectar a los mecanismos de eliminación incluyen el crecimiento de biopelículas adheridas a los medios, lo que reduce el contacto y la interacción entre el material y el agua tratada (Arias y Brix, 2004).

Por otro lado, en las lagunas de estabilización la eliminación del fósforo se asocia con la absorción por las algas y sedimentación (Kayombo *et al.*, 2005). Sin embargo, se puede eliminar a través de mecanismos físicos tales como la adsorción, la coagulación y la precipitación (EPA, 2011).

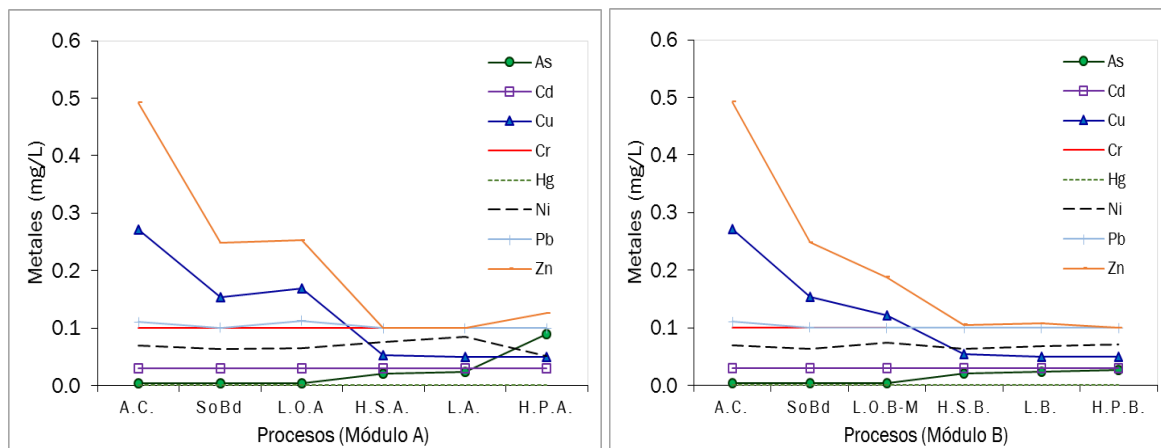


Figura 4.27 Remoción de metales con respecto a los procesos del sistema de tratamiento y promedio por módulo. A.C = Agua cruda; SoBd = Salida del biodigestor; L.O.A = Lecho orgánico A, H.S.A. = humedal del sobrenadante A; L.A. = Laguna A; H.P.A = Humedal de pulimento A.

De manera general todos los metales están dentro de los límites de la NOM-001 desde la entrada del sistema para los tres muestreos realizado como se puede observar en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Promedio de los tres muestreos de los metales en cada proceso del sistema.

Proceso	Promedio de metales (mg/L)							
	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
MÓDULO A								
A.C.	0.0042	0.0300	0.2720	0.1000	0.0005	0.0693	0.1110	0.4917
SoBd	0.0034	0.0300	0.1533	0.1000	0.0011	0.0640	0.1007	0.2483
L.O.A.	0.0042	0.0300	0.1687	0.1000	0.0005	0.0650	0.1127	0.2530
H.S.A	0.0211	0.0300	0.0533	0.1000	0.0005	0.0767	0.1000	0.1000
L.A.	0.0233	0.0300	0.0500	0.1000	0.0006	0.0853	0.1000	0.1000
H.P.A	0.0890	0.0300	0.0500	0.1000	0.0005	0.0510	0.1000	0.1263
MÓDULO B								
A.C.	0.0042	0.0300	0.2720	0.1000	0.0005	0.0693	0.1110	0.4917
SoBd	0.0034	0.0300	0.1533	0.1000	0.0011	0.0640	0.1007	0.2483
L.O.B-M	0.0045	0.0300	0.1213	0.1000	0.0005	0.0740	0.1003	0.1880
H.S.B	0.0209	0.0300	0.0543	0.1000	0.0005	0.0643	0.1000	0.1050
L.B.	0.0242	0.0300	0.0503	0.1000	0.0005	0.0677	0.1000	0.1077
H.P.B.	0.0276	0.0300	0.0500	0.1000	0.0005	0.0713	0.1000	0.1000

5. EVALUACIÓN DEL DISEÑO FÍSICO

El problema principal que presenta la PTAR consiste en que el caudal de operación es prácticamente el doble del de diseño. La información proporcionada indica que el sistema fue diseñado para tratar un caudal promedio de 3 L/s, sin embargo, de acuerdo con registros obtenidos por el operador, y el caudal observado durante la visita, el caudal de operación es del orden de los 6 L/s (Foto 5.1).

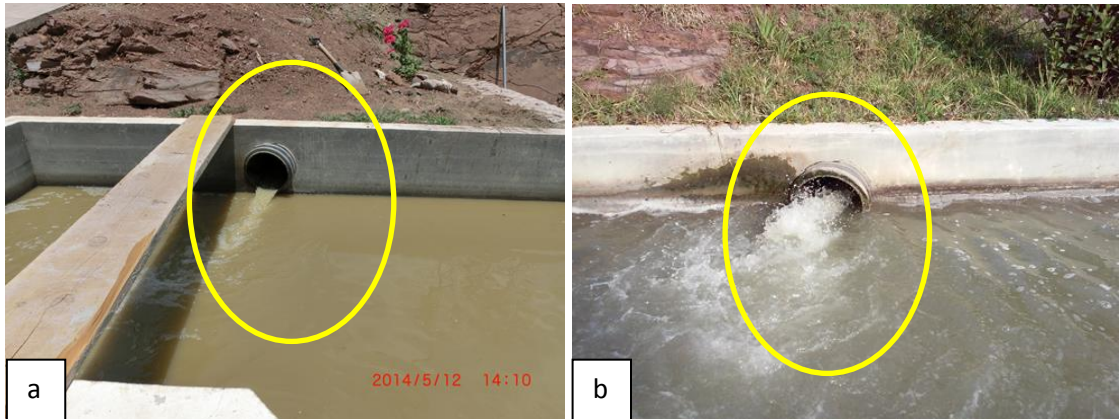


Foto 5.1 Actividades de capacitación de personal de CAPASEG en aula y en campo.

Esta situación provocará un acortamiento significativo de la vida útil del sistema, un incremento considerable de las actividades de operación y mantenimiento, la reducción de más del 50% de la eficiencia de eliminación de contaminantes y provocará la generación de malos olores.

La recomendación de mayor importancia de este reporte consiste en hacer operar el sistema de acuerdo con el caudal de diseño, es decir, para 3 L/s, y que el caudal excedente sea tratado en otro sistema ubicado junto a la comunidad que lo genera.

En la Foto 5.2, previo a la unidad de rejillas, se observa el tanque del homogenización. El operador informó que este tanque no fue construido conforme a las especificaciones de profundidad, sino que fue rellenado con cemento reduciendo considerablemente su profundidad. Por esta situación se pierde la oportunidad de amortiguar y retener las basuras y otros sólidos contenidos en el agua residual, por lo que se genera el riesgo de taponamientos y de que los sólidos, como es el caso de las arenas y pequeñas piedras pasen sin ser retenidos en el canal desarenador.

Se recomienda restablecer la profundidad inicialmente señalada en el proyecto.



Foto 5.2 Aspecto general del tanque de homogenización.

En la Foto 5.3 se muestra una malla para la retención de basuras, instalada previa al canal desarenador, la cual presenta una luz de malla muy pequeña, con lo que se provoca que rápidamente se tape. Ciertamente su función es retener los sólidos, sin embargo se recomienda que sea colocada al final del tanque desarenador, justo antes de que el agua residual sea conducida hacia el tanque digestor, o bien después de la segunda rejilla, a menos que su limpieza se realice de manera altamente frecuente, es decir, retirar las basuras tan pronto como estén llegando.



Foto 5.3 Presencia de una malla previa a las rejillas y al canal desarenador.

La forma correcta de operar los canales del desarenador consiste en hacer los funcionarios de manera alternativa, de tal manera que el agua debe destruir por uno de ellos, en tanto que se realiza la limpieza del otro.



Foto 5.4 Operación incorrecta de los canales del desarenador.

En la Foto 5.4 se aprecia que ambos canales contienen agua, e incluso el color de uno de ellos es de color verde, lo que indica que lleva varias semanas sin que se haya desalojado su volumen de agua. Por lo tanto, el agua fluye de manera continua por el otro canal, sin que se realice de manera eficiente la retención de arenas, las cuales están pasando directamente al digestor, provocando su azolvamiento, con lo que se reduce su volumen de tratamiento, y consecuentemente se afecta su eficiencia.

Adicionalmente se observa que esta unidad de tratamiento fue subdimensionada, o se construyó con una escala menor a la requerida para el caudal de operación, con características específicas de calidad del agua, por lo que no es posible que los sólidos sean retenidos de manera eficiente.

Se recomienda la construcción de un tercer canal de tal manera que el agua fluya por dos canales al mismo tiempo, con el objeto de reducir su velocidad y generar las condiciones necesarias para que las partículas vayan al fondo, queden ahí retenidas y posteriormente ser extraídas para ser llevadas al sitio

asignado para tal fin. De este modo se puede realizar la extracción de sólidos del canal por el que no debe estar pasando el agua residual.

Un aspecto de seguridad muy importante que se identificó consiste en que la caseta de vigilancia fue construida sobre el tanque digestor (Foto 5.5), lo que representa un grave riesgo para las personas, ya que en esta unidad de tratamiento se generan gases como el gas metano que con facilidad pueden generar un incendio o una explosión.



Foto 5.5 Caseta de vigilancia construida sobre el digestor.

De hecho, es frecuente el uso de los biodigestores confines de generación de gas como combustible. Se recomienda de manera remarcada la instalación de avisos que informen del riesgo ahí existente, que se prohíba producir cualquier tipo de fuego o chispas, ya sea por cerillos, encendedores, golpeteos de herramientas y de ser posible evitar el uso del celular.

Un aspecto de relevante importancia radica en la forma en que está siendo operado el biodigestor. Esta unidad de tratamiento está conformada por cuatro compartimentos (Figura 5.1), el primero de los cuales opera como un sedimentador, por lo que la mayoría de los sólidos se acumulan ahí, lo que también sucede en el segundo compartimento, cuando se realiza la purga de lodos, los sólidos son conducidos hacia el humedal de lodos B, por lo que son acumulados en exceso sobre la superficie (Fotos 5.6, 5.8 y 5.9), mientras que el efluente de lodos de los compartimentos 2° y 3° son enviados hacia el

humedal de lodos B, donde se presenta una escasa acumulación sobre su superficie. Se observa en la Foto 5.6 una mayor acumulación de sólidos sobre la superficie del humedal de lodos del módulo A.



Foto 5.6 Acumulación de sólidos: humedal lodos A, humedal lodos B.

En la Figura 5.2 se muestran las observaciones sugeridas, que básicamente consisten en colocar una mampara en los dos primeros compartimientos (sedimentador), transformar los compartimientos 3° y 4° en reactores con medio orgánico de flujo ascendente, y en la instalación de las tuberías conforme se indica.

En la Figura 5.3 se muestran los cambios requeridos para la purga de lodos, los que permitirán conducirlos hasta los humedales de lodos A y B, con la misma calidad.

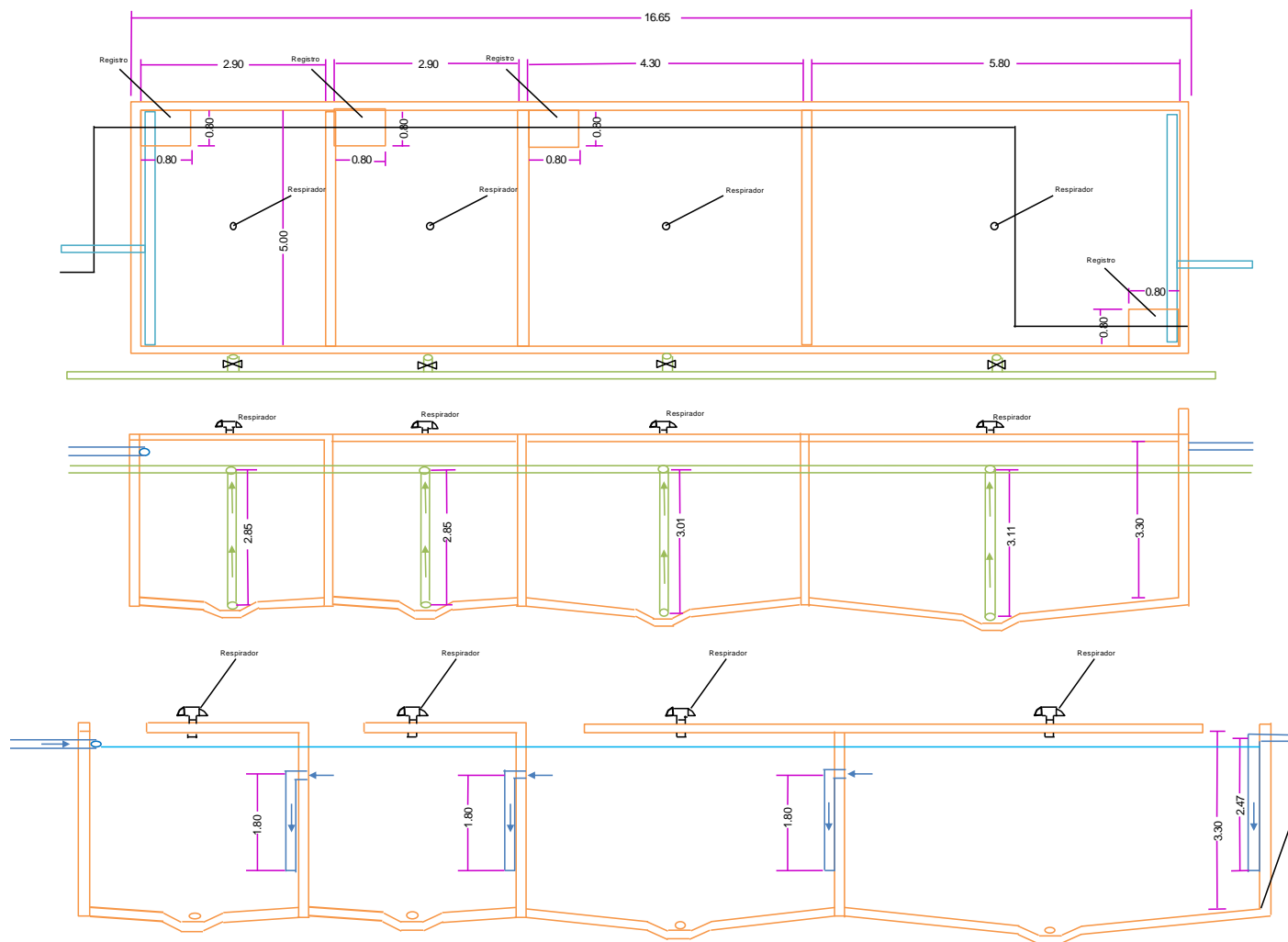


Figura 5.1 Arreglo actual del biodigestor.

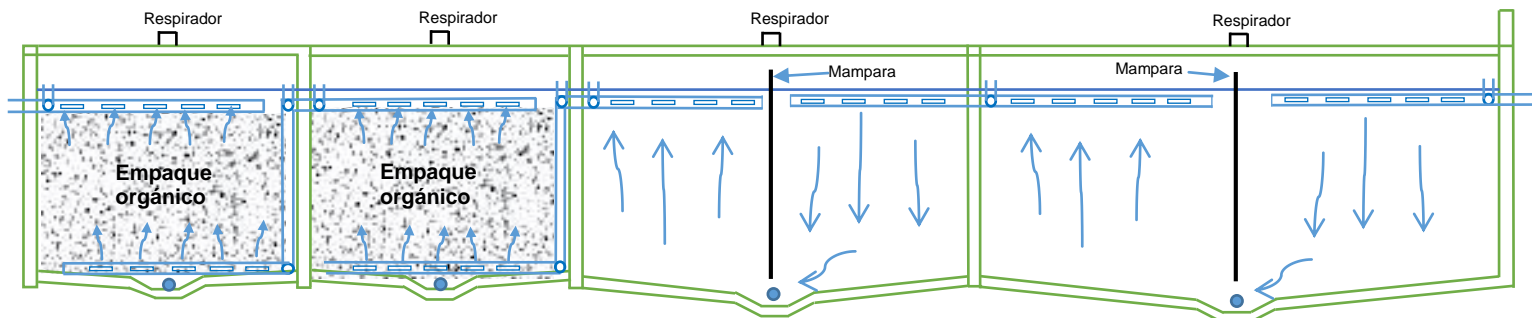


Figura 5.2 Biodigestor con las modificaciones sugeridas.

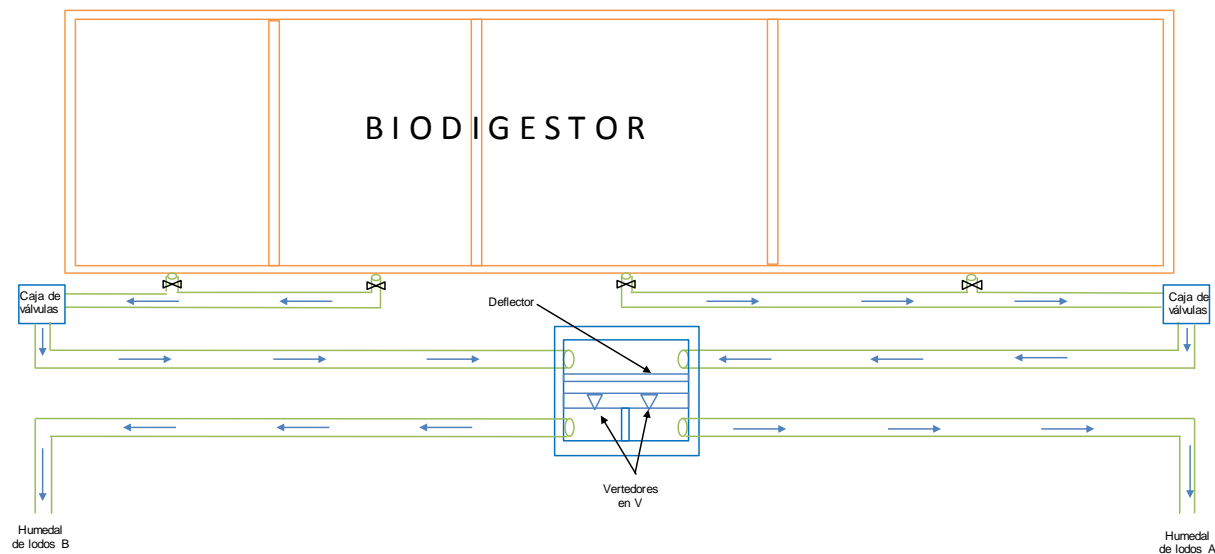


Figura 5.3 Modificaciones en la línea de purga de lodos.

En la Foto 5.7a se observan dos estanques que contienen grava como lecho filtrante. De acuerdo con información proporcionada por el operador se tiene que los dos estanques son nombrados como tanques del lecho orgánico. De acuerdo con este nombre estas unidades de tratamiento debieran estar rellenas con materiales orgánicos, que sean difíciles de biodegradar, por ejemplo trozos de bambú o de carrizo, sin embargo, como puede observarse en la Foto 5.7 el medio de empaque consiste de grava y no de materiales orgánicos, por lo que este proceso ni fue construido, ni está siendo operado de acuerdo con el diseño, con lo que se afecta el funcionamiento de todo el sistema. Éste tipo de lechos con materiales orgánicos usualmente son construidos y operan como una unidad de flujo vertical, para lo cual debieron haber sido instaladas una serie de tuberías sobre la superficie, de tal modo que el agua se hace pasar por el medio filtrante desde la superficie hacia el fondo. En la Foto 5.7a se observa que en el cabezal por donde llega el agua a esta unidad de tratamiento está constituida por un tubo distribuidor de agua, lo que significa que el agua fluye de manera horizontal a través del lecho, lo que afecta eficiencia esperada de este proceso.

También se observa en la figura que la grava tiene un diámetro promedio bastante pequeño, con lo que se propicia el taponamiento del medio de empaque, la formación de flujos preferenciales, la reducción del tiempo de tratamiento, la ineficiencia de remoción de contaminantes, la generación de malos olores, así como la aceptación de la vegetación ahí existente.

Cabe señalar que no fue factible obtener información de la granulometría de este proceso de tratamiento, sus diámetros, si fue colocada en capas o por sectores dentro del estanque.

En la Foto 5.7b se observa un detalle de la construcción de un canal superficial, el que fue generado con el objetivo de facilitar el flujo del agua, ya que el tubo distribuidor y el medio de empaque se tapan con relativa facilidad. Esta situación provoca que el agua no fluya a través del medio filtrante sino que sea desviada mediante un pequeño canal, con lo que se anula el funcionamiento del estanque del lecho orgánico. Cabe señalar que todo el tratamiento que no logró realizarse en esta unidad tendrá que realizarse en el siguiente proceso, sólo que el siguiente proceso fue diseñado para recibir una calidad de agua mejor que la que realmente le está llegando, por lo que será incapaz de remover los contaminantes conforme al diseño, y por lo tanto también

afectará del mismo modo a la siguiente unidad de tratamiento. En resumen, se afecta la eficiencia y el funcionamiento de todo el sistema.

La solución consiste en sustituir la grava por materiales orgánicos adecuados, además de colocar las tuberías requeridas para propiciar un flujo vertical.

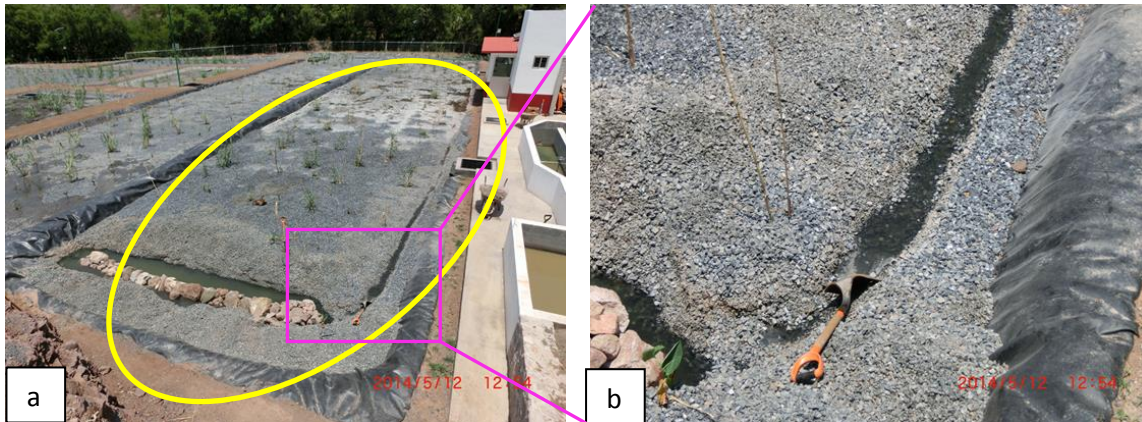


Foto 5.7 Estanques denominados del lecho orgánico, cuyo medio de empaque está compuesto por grava.

En la Foto 5.8 se observa en estanque del lecho orgánico del módulo B. Presenta las mismas características del estanque antes citado. En ese estanque no se han construido pequeños canales, como se realizó en el estanque del módulo A, por lo que se han formado un flujo superficial del agua como resultado de los sólidos que no fueron removidos en el desarenador, ni tampoco en el biodigestor, por lo que se han provocado taponamientos. La recomendación es igual a la presentada para el tanque del módulo A.



Foto 5.8 Flujo superficial del agua en el tanque del lecho orgánico del módulo B.

Al igual que con los lechos empaque orgánico los humedales denominados de lodos debieron de haberse diseñado y construido como lechos de flujo vertical. En la Foto 5.9 se observa la acumulación de lodos sobre la superficie del lecho del módulo, sin embargo no se muestran las tuberías colocada sobre la superficie del medio filtrante, además de que se aprecia que los lodos se acumulan principalmente en un sector del estanque por lo que podría pensarse que no están siendo operados con un sistema de flujo vertical. Información proporcionada por el operador no fue suficiente para identificar si las tuberías fueron instaladas bajo la variante de flujo horizontal, o las de flujo vertical. Igualmente no se obtuvo información de la granulometría del medio filtrante, si fue por capas o fue homogénea.

En condiciones estándar se esperaría una acumulación de lodos sobre la superficie de la grava entre 2 y 3 centímetros por año, en contraste, el operador informó que ese grosor de lodos se genera en menos de una semana, lo que evidencia la ineficiencia de los procesos anteriores, con principal énfasis el desarenador. De igual modo el operador informó que los lodos son extraídos del humedal de dos a tres veces por semana, lo que es un error, ya que la purga de lodos debe realizarse cuando mucho unos pocos minutos por semana, considerando que los lodos deben permanecer el tiempo suficiente en el biodigestor, ya que son ellos los que participan en la purificación del agua.



Foto 5.9 Presencia de sólidos en la superficie del humedal de lodos.

Cabe aclarar que los sólidos acumulados en los humedales de lodos, están constituidos principalmente de tierra, arenas y otros sólidos inorgánicos y no principalmente de los lodos activos que intervienen en el tratamiento.

En la Foto 5.10 se muestran los sólidos acumulados sobre la superficie del humedal de lodos del módulo B.

Se recomienda que esta unidad de tratamiento esté operando como un lecho de flujo vertical, que la granulometría sea conforme al diseño, e igualmente que la operación se ajuste de acuerdo con la guía de operación y mantenimiento.



Foto 5.10 Acumulación de sólidos sobre la superficie del humedal de lodos del módulo B.

Las grandes cantidades de sólidos que no fueron removidos en el desarenador también están afectando a los humedales provocando taponamientos, flujos superficiales, malos olores, reducción del tiempo de retención hidráulico y en general el mal funcionamiento de estas unidades de tratamiento. En la Foto 5.11 se observa que ha sido necesario generar pequeños canales superficiales por los que se provoca que pase el agua, en lugar de fluir a través del medio filtrante. Al igual que como se previamente se mencionó para los estanques de lecho orgánico y lechos de lodos se reduce de manera bastante significativa el tiempo de tratamiento, lo que a su vez generará un mal funcionamiento del siguiente proceso en este caso las lagunas de maduración, ya que estas recibirán cargas orgánicas mayores para lo que fueron diseñadas.



Foto 5.11 Presencia de canales superficiales sobre los humedales de tratamiento.

Como puede apreciarse en la Foto 5.12 la granulometría del humedal de tratamiento también es bastante pequeña, además de que la forma de los granos es predominantemente de tipo laminar, con lo que se reduce el volumen total de espacios vacíos, que es por donde fluye el agua.



Foto 5.12 Diámetro pequeño de la granulometría existente la superficie del humedal de tratamiento.

Al igual que con los lechos orgánicos los lechos de lodos se recomienda revisar si existen estratos con diferentes granulometría, conocer el diámetro promedio de la grava y de ser necesario sustituirla por grava o tezontle de acuerdo con las especificaciones señaladas en el diseño.

La función de las mamparas consiste en provocar que el agua fluya de manera similar a un canal, en donde se reducen las zonas muertas (volúmenes estancados de agua), las que restan los volúmenes eficientes de tratamiento, es decir, se propicia el reducir la dispersión de contaminantes con el objeto de conservar la eficiencia de tratamiento. En las Foto 5.13a y 5.13b se observa que el agua pasa de un canal al otro sin seguir la ruta a la que debería obligar la mampara que fue instalada para ese fin. La línea roja indica la ubicación de la mampara, la cual para localizarse fue necesario descubrir retirando entre 5 y 10 cm de grava sobre la superficie (Foto 5.13c y 5.13d). El hecho de que la mampara se encuentre sumergida permite que el agua pase de un canal hacia el otro, dicho de una manera más clara, pasa directamente del tubo de distribución al tubo de recolección sin haber pasado a través del medio filtrante (esto último se aprecia con mayor facilidad en la Foto 5.14 mediante la flecha en color verde), con lo que se anula la participación y el funcionamiento del humedal de tratamiento.

Se observa también en las Foto 5.13a y 5.13b que la vegetación muestra a ejemplares vegetales que fueron afectados durante la extracción, traslado y siembra en el humedal. La información proporcionada fue que la vegetación fue traída al sitio y permaneció sobre la superficie varios días hasta que fue finalmente sembrada. Sin duda alguna esto afectó la vitalidad de las plantas, las cuales debieron haber sido replantadas inmediatamente después de haber sido sustraídas del sitio donde se desarrollaban de manera natural. Para esto ya se debían haber tenido preparadas las fosas donde debían sembrarse, además de que el nivel del agua debiera haber sido suficiente para que las raíces tuvieran contacto con esta al momento de ser sembradas.

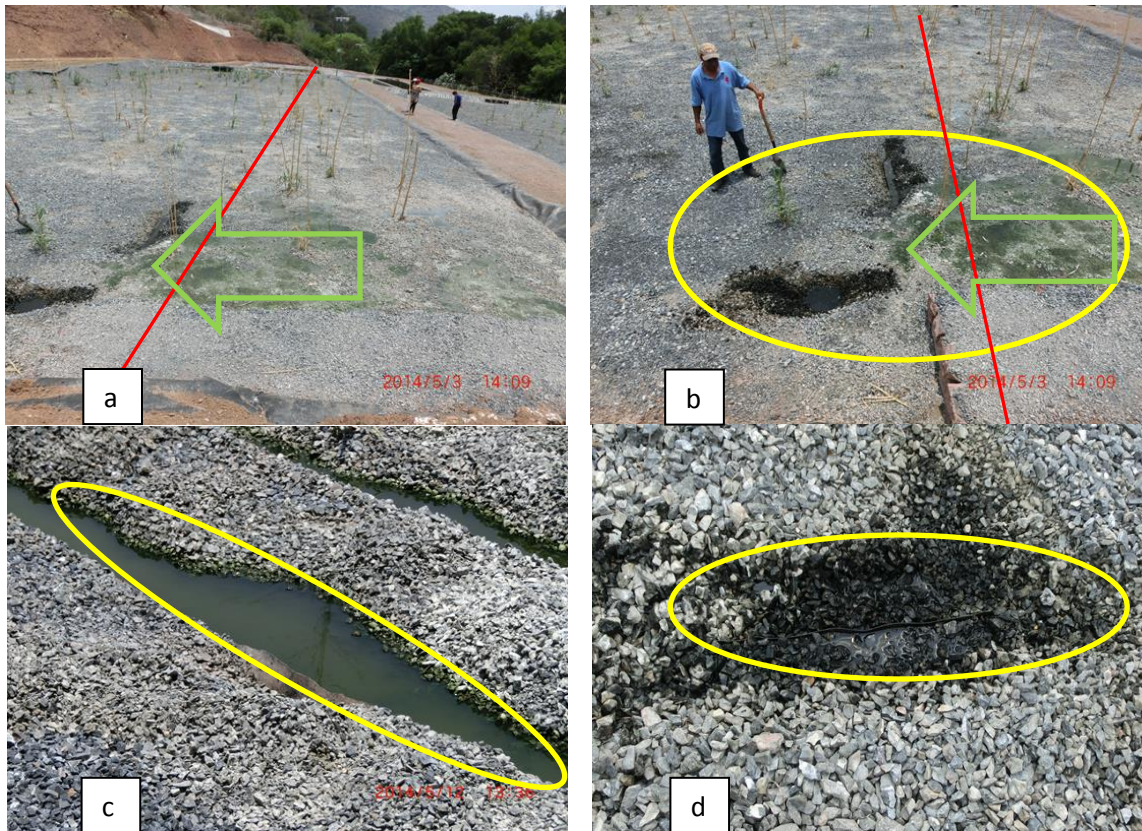


Foto 5.13 Incorrecta instalación de las mamparas en los humedales de tratamiento.

Se recomienda incrementar la altura de las mamparas, entre 15 y 20 cm por encima de la superficie, así como extraer las plantas que ya estén muertas y realizarla resiembra con nuevos ejemplares.

La tubería de los cabezales fue protegida mediante piedras o rocas de entre 15 y 20 cm de diámetro. Tienen también la función de colaborar en la distribución del agua a lo ancho del medio filtrante; sin embargo, se observa en la Foto 5.14 que les fue colocada grava en su superficie, lo que en un futuro próximo se tornará en un problema cuando se requiera realizar la limpieza de las tuberías, para lo que se requerirá extraerlas fuera de los humedales.



Foto 5.14 Inadecuada colocación de grava sobre los cabezales.

Con base en información proporcionada por el operador se tiene que las mamparas de las lagunas no fueron selladas ni vulcanizadas con la geomembrana del fondo (Figura 5.15), por lo que seguramente el agua fluye por debajo de dichas mamparas sin realizar el recorrido a lo largo de los canales, de manera similar a lo que ocurre en los humedales de tratamiento.

La solución consiste en base a las lagunas y sellar la unión entre la mampara y la geomembrana del fondo mediante un proceso eficiente de vulcanización.



Foto 5.15 Mamparas instalada incorrectamente sobre el fondo de las lagunas.

En la Foto 5.16 se muestra una panorámica del humedal de pulimento, que corresponde a la última unidad de tratamiento del sistema. De manera análoga a los humedales de tratamiento las mamparas se encuentran sumergidas, por lo que no pueden observarse. La línea roja indica la ubicación en la que debería observarse la geomembrana. La recomendación es por lo tanto la misma planteada para el humedal de tratamiento.



Foto 5.16 Deficiencias en la instalación de la mampara en el humedal de pulimento.

En la Foto 5.17. se observa la presencia de hojarasca proveniente de los árboles cercanos al humedal de pulimento. De igual modo en la Foto 5.18 se muestra que parte del suelo que conforman los bordos se está desparramando dentro del humedal de pulimento. Tanto la hojarasca como el suelo deben ser extraídos y dispuestos fuera del humedal, con el objeto de evitar taponamientos de incrementar la carga orgánica dentro de esta unidad de tratamiento.



Foto 5.17 Presencia de basura sobre la superficie del humedal de pulimento.



Foto 5.18 Presencia del suelo sobre la superficie del humedal de pulimento.

El problema de que el suelo esté cayendo dentro del humedal se debe a que se realizó de manera incorrecta la mezcla de materiales con la que fue construir un bordo, en donde se infiere la abundancia de materiales arenosos y la insuficiencia de materiales arcillosos. Esta situación puede observarse con mayor detalle en la Foto 5.19, en donde parte de esos materiales pueden caer con relativa facilidad dentro del humedal, especialmente durante un periodo de lluvia.

Sería sumamente costoso eliminar los bordos actualmente existentes, por lo que se recomienda colocar sobre su superficie una delgada capa de arcilla, con

un buen proceso de compactación y finalmente instalar una cubierta de asfalto para reducir el riesgo de su destrucción. La capa de asfalto también tendría el beneficio de evitar que se desarrolle vegetación sobre los bordos, lo que además de protegerlos reduciría las labores de operación por concepto de eliminación de vegetación sobre los bordos.



Foto 5.19 Deficiencias de los materiales de construcción.

En la Foto 5.20 se observa el sitio donde están siendo dispuestos los sólidos que han sido extraídos tanto del desarenador, como de los humedales de lodos.

Se recomienda construir un retén de manera similar a una pileta, de tal manera que se evite que los sólidos vayan a ser arrastrados hacia el río durante un periodo de lluvia.



Foto 5.20 Áreas de disposición de los sólidos extraídos del sistema de tratamiento.

Existen cuantiosas experiencias en las que los bordos han sido destruidos durante una fuerte avenida. Como consecuencia el agua de lluvia ingresa a las unidades de tratamiento con lo que se afecta su funcionamiento. La instalación de drenes y/o cunetas se realiza con el fin de prevenir este problema, sin embargo su área transversal debe calcularse con base en información meteorológica en la que se calcula un máximo momentáneo de agua. En la Foto 21a se observa la cuneta desde el inicio de la planta de tratamiento, la Foto 21b se muestra la etapa final de la hasta el final. Se esperaría que la última parte debiera presentar mayores dimensiones considerando que es la zona en la que se ha acumulado mayor caudal.



Foto 5.21 Cunetas para la protección del agua proveniente de lluvia.

En la Foto 5.22 se muestra el tren que fue instalado para prevenir que el agua proveniente de la lluvia pueda llegar y afectar al sistema de tratamiento.

Se recomienda realizar la limpieza de todos los canales determinado de manera frecuente, especialmente antes y durante la temporada de lluvias.



Foto 5.22 Canal para el drenado de agua de lluvia instalado para la protección del sistema de tratamiento.

Uno de los parámetros más operación que con mayor frecuencia debe conocerse es la cantidad de agua que ingresa al sistema. En la Foto 5.23 se muestra un canal Parshall, el que fue instalado para la medición de caudal; sin embargo esta unidad fue instalada al final del sistema de tratamiento, siendo

que debe haber sido ubicada posterior al canal desarenador. Las desventajas principales de haber colocado al final este canal Parshall radica en que no podrá conocerse con precisión cuánta agua realmente llegar al sistema, cuánta se pierde por evapotranspiración en los humedales y por evaporación en las lagunas; tampoco podrá obtenerse un balance hídrico durante la temporada de lluvias, ya que tanto el agua de lluvia, como el agua tratada se mezclarán y generarán un mayor caudal.

Es de suponerse que no deben ingresar al sistema de tratamiento más agua que para la que fue diseñado, cualquier excedente debe conducirse a través de una unidad de desviación de caudal (by-pass) con el objeto de evitar sobrecargas hidráulicas u orgánicas. De aquí la importancia de que esta unidad debe presentarse cerca del influente.



Foto 5.23 Medidor Parshall.

Se observa también en esta Foto 5.23 un tubo de llegada justo en la boca del medidor Parshall, lo que sin duda alguna afectará de manera continua la precisión de las mediciones. Tampoco existe la posibilidad de medir el caudal proveniente de cada uno de los módulos de tratamiento, por lo que será sumamente difícil averiguar la carga hidráulica a la que estarán siendo sometidos.

Se recomienda la instalación de otro medidor Parshall cerca del influente.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con información proporcionada por los operadores el caudal de operación (mayor de 12 L/s), ha sido prácticamente mayor en un 400% del caudal de diseño. Con base en este exceso de caudal de operación se presentan los siguientes impactos:

- 1) Se está afectando la operación (aumento de actividades de extracción de sólidos de todos los procesos de tratamiento).
- 2) Se ha reducido la eficiencia de tratamiento ya que el agua residual, por presentarse en exceso, no permanece el tiempo de residencia hidráulico necesario para reducir la concentración de contaminantes para dar cumplimiento a la normativa mexicana.
- 3) El agua tratada está contaminando la calidad del agua del río San Juan, afectando el ambiente, las especies vegetales y animales que dependen de ese cuerpo receptor,
- 4) Se ha reducido de manera significativa la vida útil del sistema de tratamiento.

Con base en la evaluación realizada a partir de un caudal de operación dentro de los límites de diseño (3 L/s), así como del muestreo y análisis de laboratorio se tiene que la concentración de DBO₅, SST, HH, GyA, PT, así como los valores de CF y metales pesados se encuentra por debajo del límite establecido en la norma; sin embargo la concentración de NT se encuentra muy por encima de la norma, de hecho el agua tratada presenta valores mayores a los del agua cruda, por la acumulación que se ha tenido de este parámetro dentro del sistema. En resumen, el agua tratada no cumple con la norma para un cuerpo receptor con protección de la vida acuática.

Con base en el plano general original del sistema de tratamiento se tiene que el arreglo existente fue modificado, lo que no necesariamente afecta la eficiencia de tratamiento; sin embargo, el dimensionamiento original del pretratamiento fue reducido considerablemente, por lo que se disminuyó la capacidad de retención de sólidos (arenas y gravillas), provocando la colmatación del sistema en un tiempo relativamente corto.

Se concluye la importancia de operar el sistema conforme a los parámetros del dimensionamiento (diseño teórico), de realizar las adecuaciones de mejora del sistema con objeto de prolongar su vida útil, de obtener las eficiencias esperadas de remoción de contaminantes con objeto de proteger la calidad del agua del río San Juan y la calidad de vida de los habitantes ribereños, la calidad del agua freática, así como de preservar el medio ambiente.

7. RECOMENDACIONES

Con base en la evaluación efectuada, tanto a partir de muestreos y análisis de laboratorio, como del diseño y estado físico de las unidades de tratamiento se realizan las siguientes recomendaciones:

- 1) El caudal observado durante la visita realizada durante el mes de marzo del presente año fue del orden de 12 L/s. La recomendación de mayor importancia consiste en hacer operar el sistema de acuerdo con el caudal de diseño, es decir, para 3 L/s, y que el caudal producido por otras descargas de aguas residuales sean tratadas junto a la comunidades que lo generan. Cualquier excedente debe conducirse a través de una unidad de desviación de caudal (by-pass) con el objeto de evitar sobrecargas hidráulicas u orgánicas.
- 2) Construir el tanque de homogenización, previo al desarenador, conforme al diseño original, es decir, con la profundidad proyectada. Actualmente está relleno con concreto y no permite retener sólidos, que son uno de los grandes problemas que actualmente presentan los humedales. También es aconsejable incluir un deflector con objeto de que el agua residual no llegue de manera directa al desarenador.
- 3) Instalar dos rejillas adicionales a las existentes, para incrementar la eficiencia de eliminación de sólidos y basuras.
- 4) Incrementar la capacidad del desarenador en el pretratamiento, ya sea aumentando un canal alternativo, con el fin de operar dos canales en paralelo de manera simultánea, o bien eliminar el existente y diseñarlo con mayor capacidad. También se puede construir otro desarenador en

paralelo. El canal alternativo es más recomendable desde el punto de vista económico.

- 5) Hacer herméticas las compuertas del desarenador.
- 6) Modificar el comportamiento hidráulico del biodigestor. Actualmente está integrado por cuatro celdas en serie, lo que provoca que la primera y en parte la segunda, funcionen como sedimentador, por lo que acumulan la mayor cantidad de sólidos, provocando taponamientos excesivos en los humedales de lodos en el módulo A. Se requiere conducir los lodos de las cuatro cámaras hacia una nueva caja, de donde se distribuirán dos caudales iguales, con la misma calidad del agua, y hacerles llegar a los humedales de lodos. En la figura se presenta el esquema de la estructura del biodigestor y la forma en que está siendo actualmente operado, así como el gráfico con las sugerencias para su modificación.
- 7) Remover el medio filtrante de todos los humedales, ya que todos presentan problemas de azolve y taponamientos. Los dos primeros humedales de lecho orgánico deben ser rellenados con trozos de carrizo, del orden de 10 a 15 cm de largo. Cabe señalar que la CAPASEG tiene en su poder los planos con las especificaciones que sirvieron como base para la construcción del sistema.
- 8) Los lechos de medio orgánico y los de lodos deben ser de flujo subterráneo vertical.
- 9) El diámetro del medio filtrante debe hacerse conforme a las especificaciones (diámetros de partícula y arreglo en capas) del diseño original. La granulometría y forma de las partículas (grava) actualmente existentes facilitan el taponamiento y mal funcionamiento del sistema. No colocar grava sobre las piedras de los cabezales.
- 10) Realizar la limpieza de todo el sistema de tuberías.
- 11) Colocar codos de 45° en los extremos de las tuberías, tanto de distribución, como de recolección, con objeto de facilitar su limpieza. Actualmente no hay estructuras para la limpieza de las tuberías.

- 12) Las mamparas de geomembrana de los humedales debe tener un borde libre de 30 cm. Actualmente están por debajo de la superficie de la grava, por lo que el agua fluye entre canales, sin seguir el curso señalado en el diseño físico original.
- 13) Sembrar las especies vegetales indicadas en el proyecto original.
- 14) Vaciar las lagunas de maduración ya que actualmente presentan problemas de azolve.
- 15) Mejorar la estabilidad de los taludes que ya están siendo dañados por la erosión, ya que se utilizaron mezclas de suelos de manera incorrecta. Actualmente los bordos están contruidos con suelos arenosos, con poca arcilla, lo que propicia inestabilidad estructural.
- 16) Colocar una pequeña carpeta de asfalto sobre la corona de los humedales para evitar el desarrollo de vegetación externa, y la erosión hídrica y eólica que contribuye a su destrucción.
- 17) Construir un estanque para disponer los sólidos extraídos por azolve.
- 18) Eliminar la caseta de vigilancia, ya que está construida sobre el biodigestor, en el que se generan gases, los que representan altos de riesgos de explosión. Se debe construir otra nueva y ubicarla fuera de esta zona de riesgo.
- 19) Dar estabilidad al talud que se ubica junto al canal de excedencias en la loma del cerro, ya que se observa que en cualquier momento pueda deslavarse, producir accidentes, o bien azolvar y afectar a las unidades de tratamiento cercanas a esa zona.
- 20) Reparar las áreas de malla ciclónica que actualmente están dañadas.
- 21) La ubicación de los tubos con el agua tratada que llegan al aforador Parshall afecta la precisión de sus mediciones, por lo que hay que reubicar los tubos o el medidor Parshall.
- 22) Instalar un medidor parshall antes del biodigestor, con objeto de conocer el caudal de entrada.

8. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Arias, C., & Brix, H. (2004). Phosphorus removal in constructed wetlands: Can suitable alternative media be identified? *Water Science and Technology*, 267-73.
- 2) Brown, D. (1994). Constructed wetlands in the USA. (Vol. IV) in *Water Quality Internacional*.
- 3) Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba-Bolivia: Nelson Antequera Durán.
- 4) Cooper, M. J., Job, G., Green, M., & Shutes, R. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Swindon, United Kingdom: WRc Publications.
- 5) EPA. (2000). *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati, Ohio: Office of Research and Development.
- 6) EPA. (2011). *Principles of design and operations of wastewater treatment pond systems for plant operators, engineers, and managers*. Cincinnati, Ohio: Office of Research and Development.
- 7) Escudero, G. E. (2011). Tratamiento de efluentes de la granja porcina del Instituto Redentores Mater y Juan Pablo de Ventanilla a través de humedales artificiales para su reutilización como agua de clase III. Bellavista: Universidad Nacional de Callao.
- 8) García, J., & Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Politécnica de Catalunya.
- 9) Goldman, J., Oswald, W., & Jenkins. (1974). The kinetics of inorganic carbon limited algal growth. *WPCF*, 46(3), 559.

- 10) Hoffmann, H., & Platzer, C. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Eschborn: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ.
- 11) Kadlec, R., & Knight, R. (1996). Treatment Wetlands. Boca Ratón, FL, USA: Lewis Publishers.
- 12) Kayombo, S., Mbwette, T., & Katima, J. (2005). Waste stabilization ponds and constructed wetlands. Design manual. UNEP-IETC with the Danish International Development Agency.
- 13) Lara, J. 1999. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis de Maestría. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 114pp.
- 14) Mara, D. (1997). Design manual for waste stabilization ponds in India. Leeds, Inglaterra: Lagoon Technology International.
- 15) Mara, D. (2003). Domestic wastewater treatment in developing countries. London, Stearling: VA: Earhscan.
- 16) Mara, D., & Pearson, H. (1998). Design manual for waste stabilization ponds in Mediterranean Countries. Leeds, Inglaterra: Lagoon Technology International.
- 17) Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*. Mc-Graw Hill.
- 18) NOM-001-SEMARNAT-1996. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2003).
- 19) Osnaya, M. (2012). Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlan de Juárez Oaxaca: Universidad de la Sierra Juárez.
- 20) Peña, M., Ginneken, M., & Madera, C. (2003). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una alternativa natural para el tratamiento de aguas

residuales domésticas en zonas tropicales. Colombia: Ingeniería y competitividad. VOLUMEN 5 - No. 1 - Octubre.

- 21) Peña, M., & Mara, D. (2004). Waste Stabilisation Ponds. IRC International Water and Sanitation Centre.
- 22) Ramalho, R., Lora, F., & Jiménez, D. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Reverté.
- 23) Reed, S., Crites, R., & Middlebrooks, E. (1995). Natural Systems for waste Management and Treatment (Segunda ed.). New York, USA: McGraw-Hill, Inc.
- 24) Rolim, S. (2000). Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Acodal.
- 25) Vymazal, J., & Kröpfelavá, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. Springer.

9. ANEXO