

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Influencia del crecimiento biológico de la biopelícula sobre el comportamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal sin vegetación.



CENTRO ANDINO PARA LA GESTIÓN Y USO DEL AGUA
(Centro AGUA - UMSS)

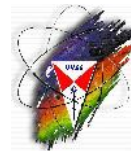
Reporte de Investigación



Universidad Mayor de
San Simón



Facultad de Ciencias
Agrícolas, Pecuarias,
Forestales y
Veterinaria



Dirección de Investigación
Científica y Tecnológica



Asdi
Agencia Sueca de
Desarrollo
Internacional

Luís F. Pérez Mercado

Víctor R. Chiri Chipana

© Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA)
Universidad Mayor de San Simón
Av. Petrolera Km. 4,5 (Facultad de Agronomía)
Teléfono: +591 4 4762382
www.centro-agua.org
Cochabamba, Bolivia

El Centro AGUA es un centro de investigación y enseñanza, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, Forestales y Veterinarias de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS, Cochabamba-Bolivia). En base a las experiencias y conocimientos acumulados desde su creación, actualmente trabaja en forma interactiva y multidisciplinaria en la profundización del conocimiento sobre la gestión y los usos del agua mediante sus líneas de acción: formación académica, investigación, coordinación institucional y servicios. Se proyecta como un referente nacional en la investigación y enseñanza para la gestión integral, equitativa y sostenible del agua.

Edición:
Luis Pérez
Victor Chiri

Impresión:
Centro AGUA

Cochabamba, Bolivia

Septiembre, 2011

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO CONCEPTUAL	2
2.1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES	2
2.2. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	2
2.2.1. <i>De flujo horizontal</i>	3
2.2.2. <i>De flujo vertical</i>	3
2.3. HIDRODINÁMICA DE REACTORES	3
2.3.1. <i>Tiempo de retención hidráulica</i>	3
2.3.2. <i>Ensayos de trazadores</i>	4
3. METODOLOGÍA	5
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	6
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL AFLUENTE AL SISTEMA DE HUMEDALES	6
4.2. COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO	6
4.2.1. <i>Humedal artificial con medio caudal de diseño (H1)</i>	6
4.2.2. <i>Humedal artificial con caudal de diseño (H2)</i>	8
4.2.3. <i>Humedal artificial con medio caudal de diseño adicional (H3)</i>	10
4.3. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA	11
4.4. REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES	12
4.5. REMOCIÓN DE NUTRIENTES	13
4.6. REMOCIÓN BACTERIOLÓGICA (COLIFORMES FECALES)	15
5. CONCLUSIONES	15
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	16

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Influencia del crecimiento biológico de la biopelícula sobre el comportamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal sin vegetación.

1. INTRODUCCIÓN

En general, a nivel mundial existe una crisis del agua. Se han establecido grandes diferencias en acceso al agua, tanto en cantidad como en calidad. Estas diferencias también se reflejan en la provisión de un adecuado tratamiento para las aguas residuales, pues estas tecnologías son, de un modo general, costoso y complejo en su construcción y operación.

Algunas alternativas desarrolladas para lograr el tratamiento de las aguas residuales de una forma sostenible y, a la vez, reduciendo sus costos, son las tecnologías naturales. Éstas se basan en el empleo de matrices naturales: suelo, planta y microorganismos. Dentro de las tecnologías naturales, una de las más interesantes es la de los humedales de flujo subsuperficial. Algunas ventajas como la ausencia de olores, la escasa proliferación de insectos y su simplicidad en la operación, además de un buen rendimiento depurador, han significado su gran difusión en varios países y su aplicación especialmente en zonas periurbanas y rurales.

Sus características convierten a los humedales artificiales en una tecnología apropiada para el país. Por un lado, la simplicidad en su operación facilita su adopción a nivel técnico y, por lo tanto, su gestión; por otro lado, el tratamiento del agua en contextos rurales posibilita su reuso especialmente para riego, constituyendo una fuente estable de agua.

Sin embargo, y a pesar de los grandes esfuerzos dedicados, aún quedan muchos aspectos que investigar en esta tecnología, resaltando aquellos destinados a la comprensión de su funcionamiento de forma que se logre la optimización de su diseño y, por lo tanto, de su costo. El mismo empleo de matrices naturales, pero además la condición de pequeño ecosistema que tienen los humedales, resulta en una serie de variaciones que deben ser estudiadas para las diferentes condiciones en las que vayan a implementarse.

El presente documento reporta los resultados obtenidos en una investigación desarrollada en humedales de flujo subsuperficial horizontal en condiciones iniciales de madurez biológica, para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

El **objetivo** de ambas investigaciones fue evaluar la influencia del crecimiento biológico de la biopelícula sobre el funcionamiento de humedales artificiales con flujo subsuperficial horizontal sin vegetación, para contribuir a la comprensión de los mecanismos de depuración de este tipo de humedales en condiciones de valle interandino.

Para una mejor comprensión, se ha visto por conveniente organizar el presente documento presentando en primer lugar algunos conceptos necesarios para la comprensión de la investigación. Luego de ese acápite se expone brevemente la metodología, y se analizan los resultados. Finalmente se exponen las conclusiones.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

La degradación de los cuerpos de agua por material orgánico presente en las aguas residuales llevó al desarrollo de varios sistemas de tratamiento basados en métodos biológicos (Sandoval, 2003). Los objetivos principales del tratamiento biológico son estabilizar la materia orgánica y coagular y remover los sólidos coloidales que se encuentran en las aguas residuales domésticas. Dependiendo de las circunstancias se pueden incluir otros objetivos como la remoción de nutrientes y compuestos orgánicos (Metcalf y Eddy, 1995).

Se debe tener en cuenta que todos los procesos biológicos que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales derivan de procesos que ocurren en la naturaleza. Al controlar el ambiente requerido para el óptimo crecimiento de los microorganismos participantes, se incrementa la descomposición de los contaminantes (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Cuando se implementan sistemas de tratamiento biológico se debe, en lo posible, aprovechar la capacidad de depuración del medio natural y del potencial de reuso del agua residual. A diferencia de los sistemas convencionales, en los que los procesos se llevan a cabo de forma acelerada por el aporte energético, en los sistemas naturales los procesos se producen a velocidades “naturales” y se realizan en un único reactor o ecosistema (Metcalf y Eddy, 1995).

2.2. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Los humedales de flujo subsuperficial son estanques o canales con el fondo impermeabilizado sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava, en el cual se siembran plantas emergentes. La remoción de contaminantes depende principalmente de la interacción entre el medio filtrante y el ecosistema conformado por la rizósfera y las poblaciones microbiales adheridas al medio y las raíces

(Lara, 1999; Ñique, 2000). Son sistemas complejos de medio saturado, diseñados y construidos por el hombre, con vegetación sumergida o emergente, que simulan un humedal natural para uso y beneficio humano (Peña et al, 2003).

A su vez, entre los humedales artificiales de flujo subsuperficial se distinguen dos clases:

- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal.
- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical.

2.2.1. DE FLUJO HORIZONTAL

Este tipo de humedales pueden usarse como tratamiento secundario o también como avanzado. En ellos, el agua residual fluye a través de un medio poroso, generalmente grava, el cual se encuentra confinado en un canal impermeable. En el medio poroso se implanta vegetación emergente, generalmente plantas helófitas. El sentido del flujo es horizontal. En este tipo de humedales, el sistema de aplicación se encuentra a un lado del humedal, creando así un flujo pistón a lo largo del humedal (Andrade, 2008).

2.2.2. DE FLUJO VERTICAL

En este tipo de humedales, las aguas residuales son aplicadas superficialmente. Las aguas percolan verticalmente a través del sustrato. Éste generalmente está formado por arena, aunque ocasionalmente se coloca grava. El sistema de aplicación distribuye el agua a ser tratada de manera uniforme en la extensión del sustrato, de forma que, junto con la aplicación intermitente forma pequeñas láminas de agua varias veces durante un día. El agua residual se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del humedal (Andrade, 2008).

2.3. HIDRODINÁMICA DE REACTORES

La eficiencia con la cual se realiza un proceso depende de la adecuada selección y especificación de las variables que lo afectan y de las características hidráulicas del reactor (Ascuntar y Toro, 2007). En algunos casos un reactor no tiene la eficiencia esperada por deficiencias hidráulicas que ocasionan determinadas características de flujo en la unidad y que afectan los periodos de retención en el reactor (CEPIS/OPS, 2005).

2.3.1. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA

En los reactores se dan procesos que ocurren muy rápidamente y también otros con mucha lentitud. Se necesitan tiempos de retención o periodos de contacto cortos o largos para lograr las reacciones necesarias (CEPIS/OPS, 2005). Es importante que la masa de fluido sometida a tratamiento permanezca el tiempo adecuado para conseguir la mayor eficiencia en las diferentes unidades (Ascuntar y Toro, 2007). El tiempo de residencia de un elemento de un fluido es el tiempo que transcurre desde el instante en que el elemento entra en el recipiente hasta que lo abandona.

2.3.2. ENSAYOS DE TRAZADORES

Las variaciones del comportamiento hidráulico de un reactor respecto de un modelo ideal pueden ser evaluadas experimentalmente. Levenspiel (1999) analizó una serie de modelos matemáticos para conocer lo que sucede al interior de un reactor utilizando información directa, por un método empleado ampliamente, como es el método experimental de inyección de trazadores en el afluente y obteniendo como respuesta la concentración del trazador en el efluente.

Se utilizan principalmente para determinar los tiempos reales de retención y sus principales características asociadas: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos en unidades de tratamiento como mezcladores, floculadores, sedimentadores, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica (CEPIS/OPS, 2005). El ensayo consiste en agregar la sustancia trazadora en el afluente del reactor con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo.

Para el análisis de la tendencia de la curva de concentración del trazador, ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador (Figura 1) y relacionando sus diferentes parámetros con condiciones de flujo (CEPIS/OPS, 2005).

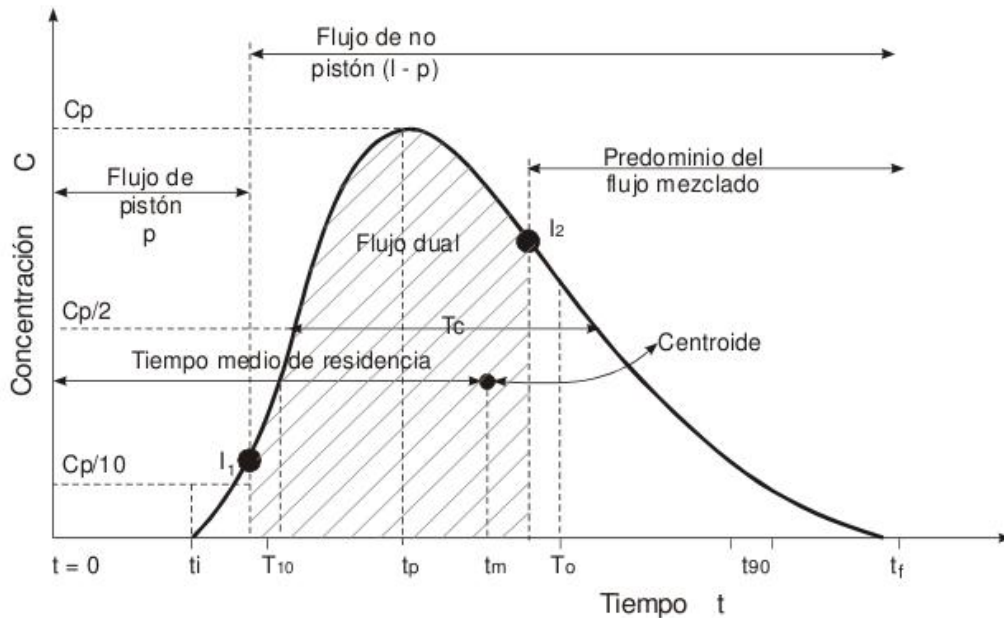


Figura 1. Tendencia de la curva de concentración del trazador

Los principales parámetros que se tienen en cuenta para el análisis de la curva son:

ti = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente

tp = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración

tm = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador

to = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención

Los criterios que se tienen en cuenta para este análisis son dados por (CEPIS/OPS, 2005):

ti/to : Es igual a 1 para FP y a 0 para el FCM. Si el valor de la relación es $<0,3$ puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y salida (cortocircuito)

tm/to : Si la relación es menor a 1, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo, para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada.

tp/to : Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo pistón, y cuando es 0, existe flujo completamente mezclado. Cuando la relación se aproxima a 1 y $ti/to > 0,5$, se puede concluir que existe predominio de flujo pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo completamente mezclado.

3. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Simón, la cual se encuentra ubicada en el Municipio de Cercado, departamento de Cochabamba. Ésta recibe el agua residual del sistema sanitario que atiende las necesidades de las actividades de dicha facultad. Las tres unidades experimentales en las que se realizó el estudio son parte de un módulo de cuatro humedales subsuperficial a escala piloto. Sus parámetros de diseño se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño de los Humedales de la Facultad de Agronomía

PARÁMETRO	VALOR
Caudal de diseño (QD)	1,29 m ³ /día
Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	4,7 días
Profundidad de lámina de agua	0,6 m
Largo	8 m
Ancho	3,4 m
Porosidad	38%

Esta batería de humedales artificiales era prácticamente nueva, es decir que no había funcionado antes del presente ensayo. Por ello, hubo un periodo de 30 días de funcionamiento inicial, con los caudales de experimentación previstos (0,5QD, QD y 1,5QD). Durante dicho periodo también se realizaron mediciones de conductividad eléctrica y pH del afluente y el efluente, para obtener el valor de base necesario para el ensayo de trazador con cloruro de sodio. El estudio del comportamiento hidrodinámico de los humedales se realizó mediante ensayos de trazadores. Se efectuaron tres ensayos: uno a los 15 días del inicio de la experimentación, otro a los 45 días y el último a los 75 días.

El cloruro de sodio fue utilizado como sustancia trazadora, siguiendo la metodología reportada por Rocha et al (1996). Al mismo tiempo, se realizaron caracterizaciones del afluente y del efluente del sistema, haciendo mediciones de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos más representativos. Todos los análisis se realizaron siguiendo las técnicas, procedimientos y recomendaciones de los Standard Methods 21 Edition (APHA-AWWA-WEF, 2002).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL AFLUENTE AL SISTEMA DE HUMEDALES

El agua residual afluente al sistema de humedales proviene de un tanque séptico a manera de tratamiento primario. Por lo tanto el tratamiento que proveen corresponde a un nivel secundario. En el estudio se observó que el agua residual presentó un comportamiento relativamente constante respecto a las variaciones climáticas y operativas de la PTAR. Entre las más importantes estuvieron obstrucciones en el sistema de alcantarillado, que una vez resueltos implicaron una fuerte descarga puntual de caudal y carga orgánica. De la misma forma, se presentaron grandes variaciones de caudal a lo largo del día, considerando que durante la noche no se realizan actividades académicas. El sistema ha demostrado una buena capacidad de amortiguamiento, respondiendo a estas variaciones con un rendimiento acorde a lo descrito en literatura.

4.2. COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO

4.2.1. HUMEDAL ARTIFICIAL CON MEDIO CAUDAL DE DISEÑO (H1)

La variable obtenida para evaluar el comportamiento hidrodinámico real del humedal fue la curva de salida del trazador, Luego se determinaron los parámetros necesarios para los criterios de evaluación del flujo. Los valores encontrados para cada etapa se muestran en la Tabla 2. Los resultados obtenidos se analizaron determinando su tendencia para luego relacionarla con diferentes parámetros de las condiciones de flujo.

Tabla 2. Valores iniciales para el H1 en sus diferentes etapas de estudio.

Muestreo	Q aplicado (m ³ /día)	t diseño (h)	t ₀ = V/Q (h)	t _{real} (h)
1	0,75	169,2	193,2	50,7
2	0,58	169,2	249,8	42
3	0,63	169,2	230,1	46

Primer muestreo (a los 15 días)

En la Tabla 3 se muestran los parámetros obtenidos del primer ensayo de trazador, y posteriormente su interpretación.

Tabla 3. Resultados encontrados en el primer ensayo de Trazador, H1

t _{real} (h)	Parámetros		
	t _i /t ₀	t _m /t ₀	t _p /t ₀
50,7	0,01	0,26	0,04

Se observa una tendencia a flujo completamente mezclado a partir de lo expuesto previamente para t_i/t₀ y t_p/t₀. Su origen pueden ser cortocircuitos hidráulicos (t_m/t₀). Esto es contradictorio respecto a los datos reportados por Ascuntar y Toro (2007), quienes reportan que en fases iniciales, más bien existe una mayor tendencia al flujo pistón. De acuerdo a Levenspiel (1999), en esta etapa el régimen de flujo es arbitrario, lo cual puede significar una aproximación tanto a flujo pistón como a flujo completamente mezclado. Finalmente, existieron algunos problemas durante la fase inicial, especialmente en el caudal afluente a la batería de humedales, lo que durante algunos días significó un caudal irregular, lo que pudo haber afectado los datos del ensayo.

Segundo muestreo (45 días)

En la Tabla 4 se muestran los parámetros obtenidos durante el segundo ensayo de trazador.

Tabla 4. Resultados de los parámetros analizados en el segundo ensayo de Trazador

t _{real} (h)	Parámetros		
	t _i /t ₀	t _m /t ₀	t _p /t ₀
42	0,006	0,17	0,05

Una vez más se observa una tendencia al flujo completamente mezclado, siendo su origen más probable algunos cortocircuitos hidráulicos. Cabe también la posibilidad de algún error experimental, considerando que lo esperado era un incremento en el tiempo de retención real por la colonización de la biopelícula. Este error estaría propiciado también por las imprecisiones del método utilizando la sal como trazador (Rocha et al, 1996).

Tercer muestreo (75 días)

En la Tabla 5 se muestran los parámetros obtenidos durante el segundo ensayo de trazador.

Tabla 5. Resultados del tercer ensayo de Trazador, en el H1.

treal (h)	Parámetros		
	ti/to	tm/to	tp/to
46	0,050	0,24	0,04

La tendencia general sigue siendo al flujo completamente mezclado. El tiempo real, junto con el incremento en el valor de ti/to, suponen la mantención de la incidencia de cortocircuitos hidráulicos, aunque con una ligera tendencia a aumentar. Ésta estaría originada en el desarrollo de la biopelícula, la cual comienza a ocupar los espacios porosos del humedal (Ascúntar et al, 2008). Por otro lado, la continuación en la tendencia a la disminución de tp/to, parece indicar que el flujo completamente mezclado es el definitivo en ésta unidad experimental, lo cual coincide con lo afirmado por Ascúntar y Toro (2007).

En general, los datos de las tres fases indican un flujo arbitrario, aunque con tendencia al flujo completamente mezclado a medida que el humedal es colonizado por la biopelícula. Esta colonización parece ser más lenta que lo reportado por Ascúntar y Toro (2007), lo cual se debe, seguramente, a que los humedales del presente estudio no están plantados. Por otro lado, el ingreso a la estación de invierno puede haber condicionado el desarrollo de la biopelícula.

De cualquier forma, se aprecia un comportamiento hidrodinámico que difiere de manera significativa del flujo pistón empleado para el diseño de este tipo de unidades (Reed et al, 1995). Esto podría deberse a la presencia de canalizaciones e interacción de zonas muertas (Werner y Kadlec, 2000).

4.2.2. HUMEDAL ARTIFICIAL CON CAUDAL DE DISEÑO (H2)

Los valores encontrados para cada etapa se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Valores iniciales para el H2 en sus diferentes etapas de estudio.

Muestreo	Q aplicado (m ³ /día)	t diseño (h)	t ₀ = V/Q (h)	t _{real} (h)
1	1,27	112,3	114,1	14
2	1,12	112,3	129,4	42
3	1,07	112,3	136,7	53

Destaca el incremento del tiempo medio real de retención. Esto seguramente se debe al crecimiento de la biopelícula, poblando los espacios disponibles de forma lenta al principio, pero más consistente con el transcurrir del tiempo (Ascúntar y Toro, 2007).

Primer muestreo (a los 15 días)

En la Tabla 7 se pueden observar los valores obtenidos para este muestreo. Allí se observa un comportamiento similar a la unidad experimental anterior. Evidentemente, t_i/t_0 y t_m/t_0 indican una gran probabilidad de cortocircuitos hidráulicos. Además t_p/t_0 indica cercanía al flujo completamente mezclado (CEPIS/OPS, 2005).

Tabla 7 Resultados hallados en el primer ensayo de Trazador, en el H2.

t _{real} (h)	Parámetros		
	t _i /t ₀	t _m /t ₀	t _p /t ₀
14	0,010	0,25	0,05

De la misma forma, estos valores indican que el flujo del humedal subsuperficial en esta etapa es ambiguo, por el reciente inicio de su funcionamiento (Ascúntar y Toro, 2007). Destacan una vez más las constantes variaciones en el caudal al inicio del experimento, como posible explicación para este resultado.

Segundo muestreo (a los 45 días)

Los datos obtenidos en este muestreo son expuestos en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados del segundo ensayo de Trazador, en el H2.

t _{real} (h)	Parámetros		
	t _i /t ₀	t _m /t ₀	t _p /t ₀
42	0,010	2,8	0,11

Destaca para este periodo el índice t_m/t_o , el cual indicaría zonas muertas donde se retiene una parte del trazador, o un posible error experimental. El valor de t_p/t_o ha incrementado, respecto al anterior muestreo, aunque todavía es muy pequeño como para pensar en un cambio hacia el flujo pistón. Es más probable que sea el inicio de un comportamiento ambiguo, donde se combinen el flujo pistón con el flujo completamente mezclado (Levenspiel, 1999).

Tercer muestreo (a los 75 días)

Durante este periodo se han registrado datos muy similares al primer muestreo. Éstos se muestran en la Tabla 9. Por una parte, esto significa un avance lento de la biopelícula al interior del humedal.

Tabla 9. Resultados del tercer ensayo de Trazador, en el H2.

t _{real} (h)	Parámetros		
	t _i /t _o	t _m /t _o	t _p /t _o
53	0,012	0,39	0.07

Por otra parte, parece confirmar que la variación de los datos observada en el segundo muestreo, fue debido a un error experimental (CEPIS/OPS, 2005).

La tendencia general de este humedal ha sido la del predominio del flujo completamente mezclado, con cambios no significativos en el patrón de flujo para las diferentes etapas.

4.2.3 HUMEDAL ARTIFICIAL CON MEDIO CAUDAL DE DISEÑO ADICIONAL (H3)

Los valores de los diferentes tiempos de residencia calculados y obtenidos para cada etapa del estudio se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10 Valores iniciales para el H3 en sus diferentes etapas de estudio.

Muestreo	Q aplicado (m ³ /día)	t diseño (h)	t _o = V/Q (h)	t _{real} (h)
1	1,7	168,5	85,3	19,8
2	1,56	168,5	92,9	42
3	1,7	168,5	85,3	53

Los tres muestreos (a los 15, 45 y 75 días)

De la misma forma que las otras dos unidades experimentales, este humedal ha arrojado datos que indican el predominio del flujo completamente mezclado (ver Tabla 11). Lo más destacable es el bajo valor del tiempo real de retención para el primer muestreo, aunque posteriormente éste se estabiliza en rangos más aceptables.

Tabla 11 Resultado del ensayo de Trazador en los tres muestreos en el H3.

Muestreo	treal (h)	Parámetros		
		ti/to	tm/to	tp/to
1	19,8	0,021	0,23	0,07
2	42	0,057	0,45	0,23
3	53	0,086	0,62	0,47

Ninguno de los tres sistemas cumple lo que reporta la literatura en casos similares. En efecto, Ascuntar y Toro (2007) reportan que el grado de mezcla aumenta conforme los humedales maduran. En el presente caso, parece difícil una mayor mezcla, aunque sí coincide con los mismos autores en que el patrón de flujo tiende a estabilizarse conforme transcurre el tiempo. Esto es probablemente porque la porosidad de la matriz disminuye paulatinamente por la ocupación de la biopelícula. Una explicación plausible es que la ausencia de vegetación retarda la colonización de los espacios disponibles en el sustrato, tanto de forma indirecta -promoviendo la aparición de microorganismos afines a la rizósfera- como directa, colonizando espacios mediante sus raíces. Esto también explicaría la rapidez con la que se comienza a registrar salida del trazador.

De cualquier forma, el flujo predominante es arbitrario con predominio de mezcla completa (Ascuntar y Toro, 2007), en detrimento del supuesto utilizado para el diseño de humedales, que es el flujo pistón.

4.3. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Primer muestreo (a los 25 días)

En la Tabla 12, pueden verse los resultados obtenidos en el primer muestreo, en cuanto a la remoción de DBO5 y DQO, siendo aceptables, manteniéndose en el rendimiento esperado en humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) de 80-90% de remoción, y por debajo de los 80 mg como límite permisible para su descarga según la legislación Boliviana. En su primera evaluación H1 destaca por su mejor rendimiento seguido de H2.

Tabla 12. Remoción de DBO5 y DQO en el primer muestreo

Parámetro	Unidad	Técnica usada	Muestreo 1							Limite permisible
			Concentración				Eficiencia % remoción			
			A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
DBO5	mgO2/L	Dilución - Winkler	360	16	39	75	95.6	89.2	79.2	80
DQO	mgO2/L	Oxidación con Dicromato	740	90	137	216	87.8	81.5	70.8	250

A= afluente al sistema de humedales

Fuente: Laboratorio CASA

En cuanto a la remoción de DQO también se observa una buena eficiencia de los distintos tratamientos, destacando el T1. De cualquier forma, los tres tratamientos alcanzaron la eficiencia de 75-85 % esperada en este tipo de humedales. Según la legislación boliviana, ninguno de los 3 tratamientos no sobrepasan el límite permisible de 250 mgO2/L para la descarga de efluentes.

Segundo muestreo (a los 55 días)

La tabla 13, muestra la segunda evaluación de los humedales horizontales, donde se observa una disminución del rendimiento tanto en DBO5 como en DQO. De todas formas, la eliminación de DBO estuvo entre 80-90% que es lo que se espera de un tratamiento secundario. La remoción de DQO tuvo un bajo rendimiento, pues estuvo por debajo de lo esperado (75-85%), pero aun así dentro del límite permisible en cuanto a descargas.

Tabla 13. Remoción de DBO5 y DQO en el muestreo 2.

Parámetro	Unidad	Técnica usada	Muestreo 2							Limite permisible
			Concentración				Eficiencia % remoción			
			A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
DBO5	mgO2/L	Dilución - Winkler	90	10	15	25	88.9	83.3	72.2	80
DQO	mgO2/L	Oxidación con Dicromato	282	90	87	124	68.1	69.1	56	250

Fuente: Laboratorio CASA.

4.4. REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES

Como se observa en la Tabla 14, el primer muestreo presenta una buena remoción de sólidos totales debida en gran manera a la filtración y degradación de la materia orgánica, aunque no está dentro de lo esperado en cuanto al rendimiento de este tipo de humedales. Aún está dentro de lo aceptable para la descarga.

Tabla 14. Remoción de sólidos totales en el primer muestreo.

		Muestreo 1							
		Concentración				Eficiencia % remoción			Limite permisible
Parámetro	Unidad	A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
Sólidos totales	mg/L	1386	786	1036	856	43	25.3	38	60

Fuente: Laboratorio CASA.

En la Tabla 15 se ve que la eficiencia disminuye. Muy probablemente se deba a que la formación de la biopelícula es limitada, lo cual implica que no se esté eliminando la fracción sólida que es parte de la materia orgánica. Una vez más, el rendimiento mantiene dentro de los límites legales al agua tratada.

Tabla 15. Remoción de sólidos totales en el segundo muestreo.

		Muestreo 2							
		Concentración				Eficiencia % remoción			Limite permisible
Parámetro	Unidad	A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
Sólidos totales	mg/L	772	688	682	738	11	11.7	4.4	60

Fuente: Laboratorio CASA.

4.5 REMOCIÓN DE NUTRIENTES

Nitrógeno

En la Tabla 16 se observa que la eficiencia de remoción de nitrógeno total y nitritos es importante en el primer muestreo.

Tabla 16. Remoción de nitrógeno en sus diversas formas en el muestreo 1.

			Muestreo 1							Limite permisible
			Concentración				Eficiencia % remoción			
Parámetro	Unidad	Técnica usada	A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
Nitrógeno Total	mg/L	Acido Cromotrópico	83	53	54	65	36.1	34.9	21.7	12
N amoniacal (NH3-N)	mg/L	Nessler	-	-	-	-	-	-	-	4
Nitrato (NO3-N)	mg/L	Acido Cromotrópico	-	-	-	-	-	-	-	50
Nitrito (NO2-)	mg/L		64	9	10	18	85.9	84.4	71.9	1

Fuente: Laboratorio calidad de aguas Centro AGUA

Los resultados alcanzados en la remoción de nitrógeno total en el segundo muestreo son negativos. Esto puede explicarse tomando en cuenta que la mayor parte de la remoción de nitrógeno se produce por la incorporación de las plantas y por la adsorción en el

sustrato. Ante la ausencia de vegetación, es probable que los sitios de adsorción ya hayan sido ocupados, siendo su lógica consecuencia la liberación del nitrógeno retenido, incrementando su contenido total (Silva, 2003).

Tabla 17. Remoción de nitrógeno en sus diversas formas en el muestreo 2.

Parámetro	Unidad	Técnica usada	Muestreo 2							Limite permisible
			Concentración				Eficiencia % remoción			
			A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
Nitrógeno Total	mg/L	Acido Cromotrópico	47	59	54	77	-26	-15	-64	12
N amoniacal (NH ₃ -N)	mg/L	Nessler	91	89	90	100	2.2	1.1	-10	4
Nitrato (NO ₃ -N)	mg/L	Acido Cromotrópico	0.1	0	0.3	0.7	100	-200	-600	50
Nitrito (NO ₂ -)	mg/L		28	10	4	8	64.3	85.7	71.4	1

Fuente: Laboratorio calidad de aguas Centro AGUA

Remoción de Fosfatos

La remoción de fósforo en su forma (PO₄ 3-) resulta es satisfactoria en el primer muestreo, manteniendo los rendimientos esperados en este tipo de humedales de 15-30 % de remoción. Los datos obtenidos y mostrados en la Tabla 18 muestran una mayor remoción en H1 (40%), seguido de cerca por el humedal tres (H3) con un 39.9 %. Ante la ausencia de vegetación, se puede asumir que la remoción de nutrientes se debe a la adsorción por parte del sustrato (Silva, 2003).

Tabla 18. Eficiencia de remoción de fósforo, en el muestreo 1

Parámetro	Unidad	Técnica usada	Muestreo 1						
			Concentración				Eficiencia % remoción		
			A	H1	H2	H3	H1	H2	H3
Fosfato (PO ₄ 3-)	mg/L	Acido ascórbico	37.6	22.4	31.4	22.6	40.4	16.5	39.9

Fuente: Laboratorio calidad de aguas Centro AGUA

En el segundo muestreo puede verse un aumento del fosfato en todos los tratamientos (ver Tabla 19) Este incremento confirma lo señalado por algunos autores, quienes han concluido que la remoción de fósforo en la mayoría de estos sistemas de tratamiento no es eficaz (Lara 1999), principalmente debido a que su principal mecanismo es la adsorción al sustrato. Entonces, lo más probable es que los sistemas estén liberando los nutrientes previamente retenidos.

Tabla 19. Eficiencia de remoción de fósforo, en el muestreo 2

Parámetro	Unidad	Técnica usada	Muestreo 2						
			Concentración				Eficiencia % remoción		
			A	H1	H2	H3	H1	H2	H3
Fosfato (PO ₄ 3-)	mg/L	Acido ascórbico	27	33.6	33.2	30.8	-24	-23	-14

Fuente: Laboratorio calidad de aguas Centro AGUA

4.6. REMOCIÓN BACTERIOLÓGICA (COLIFORMES FECALES)

Los resultados de se muestran en la Tabla 20. En el primer muestreo (a los 25 días), la mayor eficiencia de remoción de coliformes fue en H1, con un 97%. Los otros dos humedales eliminaron coliformes en valores menores que el rango de 90-99%, que es considerado satisfactorio para este tipo de sistemas (Seoáñez, 1999).

En el segundo muestreo se ve una reducción en la eliminación de patógenos por parte del H1, y un incremento importante en H3. Esto puede ser explicado de diferentes formas. En primer lugar puede ser que el incipiente grado de madurez ocasione fluctuaciones importantes en el rendimiento, especialmente mientras la biopelícula no alcance su madurez. En segundo lugar, y considerando que los resultados en H2 no presentan diferencias significativas, parece ser lógico pensar en algún error experimental.

Tabla 20. Remoción de coliformes fecales

Muestreo 1							Muestreo 2						
Concentración (UFC)				Eficiencia % remoción			Concentración (UFC)				Eficiencia % remoción		
A	H1	H2	H3	H1	H2	H3	A	H1	H2	H3	H1	H2	H3
62x10 ⁴	2x10 ⁴	10x10 ⁴	16x10 ⁴	97	84	74	13x10 ⁴	4x10 ⁴	2x10 ⁴	0	69	85	100

Fuente: Laboratorio calidad de aguas Centro AGUA

5. CONCLUSIONES

- Desde el inicio del experimento, las unidades en estudio presentaron un comportamiento hidrodinámico con una clara tendencia a desempeñarse como reactores de mezcla completa, lo cual se reflejó en prácticamente todos los parámetros analizados. Esta evidencia concuerda con lo afirmado por algunos autores sobre que el supuesto del flujo pistón para el diseño de humedales no es totalmente acertada.
- Durante la fase experimental se pudo apreciar que el grado de mezcla aumentó conforme los sistemas iban madurando, mostrando todas las unidades

experimentales un predominio de flujo arbitrario con inclinación hacia la mezcla completa.

- Los resultados obtenidos muestran que al inicio de la actividad del sistema se presentan los efectos de mezcla completa, aunque aparentemente por el corto tiempo de experimentación, no se apreció el esperado incremento de los tiempos de retención.
- La mayor parte de las eficiencias de remoción de DBO fueron similares y estuvieron dentro del rango esperado según literatura, lo que abre la posibilidad de incrementar la carga hidráulica aplicada sin afectar su funcionamiento, más aún cuando las unidades cuenten con plantas.
- Aún no se logró la estabilidad en el rendimiento depurador ni en el comportamiento hidráulico de los humedales, por lo que es recomendable que este estudio continúe hasta alcanzar la madurez biológica, para obtener conclusiones más fiables.
- La eliminación/transformación de nutrientes demostró una inmediata variabilidad y menos estabilidad que la materia orgánica. Los resultados sugieren una mayor importancia del papel de las plantas en los mencionados procesos.
- El uso del cloruro de sodio como trazador presenta muchas posibilidades de error, por lo que, en lo posible, debe evitarse su uso.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Andrade, M. 2008. Eficiencia de depuración de agua residual en humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y horizontal en Punata, Cochabamba. Tesis de grado. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua, Departamento de ingeniería. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia.

APHA-AWWA-WEF. 2002. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21 Edition. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation. USA.

Ascuntar D., Toro, A., Peña, M., Madera, C. 2007. Influencia del crecimiento biológico en la hidrodinámica y en la remoción de materia orgánica en un humedal de flujo subsuperficial sin vegetación, para el tratamiento de aguas residuales domésticas en regiones tropicales, Seminario Internacional sobre Manejo Integral de Aguas Residuales Domésticas, Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico, Universidad del Valle, Colombia.

- Ascuntar D., Toro, A., Peña, M., Madera, C. 2008. Changes of flow patterns in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions. *Ecological Engineering*. Doi:10.1016/j.ecoleng.2008.08.014.
- Crites, R., Tchobanoglous, G. 2000. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. de. McGraw Hill, Colombia.
- Lara, J. 1999. *Depuración de Aguas Residuales Urbanos Mediante el Uso de Humedales Artificiales*. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto Catalán de Tecnología. 122p.
- Levenspiel, O. 1999. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. 2da Edición, Reverté, México.
- Metcalf, L., Eddy, H. 1995. *Ingeniería de aguas residuales*. Tercera edición. McGraw Hill, España.
- Ñique, A. 2000. *Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales*. En:http://www.Geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anoInro1/humedales_tratamiento_aguas.htm Consultado el 16 de julio de 2007.
- Peña, M., Van Ginneken, M., Madera. 2003. *Humedales de flujo subsuperficial: una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales*. *Revista Ingeniería y competitividad*, Vol 5 No 1, pp 27-35.
- Reed, S., Crites, R., Middlebrooks, E. 1995. *Natural Systems for waste Management and Treatment*, 2nd edn, McGraw-Hill, New York, USA
- Rocha, M., Souza, H., Andrade, C. 1996. *Aplicación de trazadores en filtros anaerobios para evaluación de características hidrodinámicas*. Ponencia para el XXVII Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.
- Silva, J. 2007. *Humedales construidos*. Ponencia para el congreso latinoamericano de saneamiento LATINOSAN.
- Sandoval, V. 2003. *Evaluación del comportamiento hidrodinámico de lagunas anaerobias modificadas a escala piloto*. Tesis de grado. Universidad del Valle, Colombia.
- Seoáñez, M. 1999. *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales*. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Werner, T., Kadlec, R. 2000. *Wetland residence time distribution modeling*. *Ecological Engineering* 15, pp. 77-90.