

# EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DEPURADORA DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS DEL PARAGUAY

## ASSEMENT OF THE FILTER CAPABILITIES OF AQUATIC PLANTS IN PARAGUAY

Marecos, O. (\*);

Vely, R.;

Inchausti, A.;

Argüello, L.;

Gutiérrez, E.;

Colmán, A.

### RESUMEN

La necesidad de una gestión ecosistémica del agua, siguiendo los principios del desarrollo sostenible hace que se adopten sistemas naturales que aprovechan y potencian los procesos físicos, químicos y bacterianos que ocurren a diario en la naturaleza. El trabajo pretende evaluar de manera comparativa la eficiencia de los humedales artificiales en las lagunas de estabilización con respecto a la remoción de las cargas contaminantes nitrogenadas y fosforadas. Como parte de la investigación se recopilaron los datos resultantes de investigaciones anteriores realizadas en nuestro país. El estudio presenta resultados que demuestran que mediante el uso de estas plantas se pueden ser eficaces en la remoción de los contaminantes más comunes de las aguas.

**Palabras claves:** tratamiento de aguas, agua de arroyo, aguas cloacales, humedales artificiales.

---

(\*) **Responsable técnico del Proyecto de Investigación de la Universidad Iberoamericana (UNIBE)**, seleccionado en el marco de la Convocatoria del año 2009, Programa de Apoyo al Desarrollo de la Ciencia, Tecnología e Innovación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con financiamiento del BID

## **ABSTRACT**

The need for an ecosystem-based treatment of water which follows the principles of sustainable development requires the adoption of natural systems that use and strengthen the physical, chemical and bacterial processes that occur daily in nature. This work is a comparative evaluation of the efficiency of artificial wetlands in holding ponds with regard to the removal of nitrogen and phosphorus contaminants. The results of the study prove that the use of these plants is efficient in removing the most common pollutants in water. This study uses information and research about wetlands that have been collected in Paraguay.

**Keywords:** water treatment, stream water, brown water, artificial wetlands.

## INTRODUCCIÓN

El agua es una necesidad básica para cualquier ser vivo; en tal sentido, el incremento de la población mundial ha significado el aumento por la demanda y requerimientos de este recurso. De esta manera, los distintos cuerpos de agua (ríos, arroyos, lagos, humedales, entre otros), además de proveer dicho recurso, se convirtieron en receptores de distintas descargas de aguas residuales (urbanas, industriales, agrícolas, entre otras), modificando de esta manera su ciclo natural.

Ante la evidente crisis mundial del agua, hace falta realizar una gestión ecosistémica del agua, siguiendo los principios del desarrollo sostenible, los sistemas como los fangos activados, filtros biológicos empleados para el tratamiento de aguas cloacales, requieren de numerosos equipos y sistemas electromecánicos que producen costos de explotación y mantenimiento elevados. La implantación de estos sistemas plantea grandes dificultades en países en desarrollo, por lo que las tecnologías sostenibles de bajo costo se convierten en una alternativa viable. Las tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua se basan en procedimientos naturales de depuración que no requieren de aditivos químicos, eliminan las sustancias contaminantes usando vegetación acuática (Morató, 2009).

La alternativa de tratamiento denominado Sistemas Naturales (lagunas de estabilización, humedales artificiales y otros), aprovecha y potencia los procesos físicos, químicos y bacterianos que ocurren a diario en la naturaleza. En el Paraguay existe comprobada eficiencia en el empleo de lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas cloacales municipales. Mas la situación que se plantea al evaluar de manera comparativa la eficiencia de los humedales artificiales en a las lagunas de estabilización con respecto a la mayor acción de aquellas en la remoción de las cargas contaminantes nitrogenadas y fosforadas.

En esta evaluación no se consideran los Sistemas Ecológicos (ECOSAN) que comprende entre sus tecnologías de tratamiento básicamente la separación de aguas negras (provenientes de las excretas) de las grises (provenientes de la limpieza).

En Paraguay las aguas cloacales de origen urbano están constituidas principalmente por desechos humanos y animales (contaminación fecal), y de limpieza (higiene personal, lavado de la cocina y de la vivienda en general); por lo que existe una contaminación, en principio, medida en

términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes fecales (CF). Cabe al respecto resaltar que la carga contaminante de las aguas cloacales recolectadas del sistema de alcantarillado de la ciudad de San Bernardino, en cuanto a la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno es baja (DBO<sup>5</sup> < 50 mg/l, DQO <100 mg/l) comparando con los valores de otras experiencias internacionales, constituyéndose, por tanto, la reducción de las cargas contaminantes bacterianos indicadores de contaminación, como son los coliformes fecales, un factor determinante en el desempeño de los humedales. Para poder efectuar unas orientaciones a la planificación y el diseño de los humedales artificiales, es importante conocer la caracterización de las aguas cloacales recolectadas en los sistemas de alcantarillado sanitario en el Paraguay, que más de las veces se encuentran valores de DBO<sup>5</sup> menores a 200 mg/l y DQO menores a 400 mg/l, por responder las descargas a contribuciones de origen doméstico.

Ante contribuciones de emprendimientos industriales, los valores de carga contaminantes serán mayores, lo cual implicará prever un tratamiento previo a los humedales artificiales, que en este caso estas últimas actuarán como de pulido por su comprobada eficiencia en la reducción de coliformes fecales (99,9%). En el Paraguay existen antecedentes del empleo de lagunas facultativas, sin que ello signifique limitar la elección de lagunas anaeróbicas previas a los humedales para reducir la carga contaminante.

En la siguiente tabla se resumen los valores límites de vertido de una planta de tratamiento de aguas residuales con base en la Resolución 222/02 “Por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional” y en el Reglamento del Ente Regulador - Reglamento de Calidad del Servicio para Concesionarios, respectivamente.

Parámetros	Valor de vertido a cuerpo receptor
DBO <sup>5</sup> (mg/l)	≤50
DQO (mg/l)	≤150
CF (NMP/100 ml)	≤4000

La presencia de los contaminantes nitrogenados, medidos en términos de nitrógeno total Kjeldahl (2 a 7 mg N/l), nitritos (0,32 mg N/l) y nitratos (0,005 mg N/l) que se encuentran dentro de los valores permitidos

de descarga conforme a la Resolución 222/02, nitrógeno total: 40 N y fósforo total: 4 P

Es comprensible que todos los valores expuestos en la Resolución N° 222/02 deben, a su vez, ser ajustados conforme al recurso receptor categorizado por los usos del agua y su característica (río, arroyo, lago u otro).

Atendiendo a que existe escasa información en nuestro país sobre la capacidad depuradora de las plantas acuáticas, nos hemos abocado en realizar un estudio comparativo acerca de la capacidad depuradora de cuatro plantas acuáticas flotantes libres sobre las aguas cloacales, de arroyos contaminados y de humedales naturales.

Para este estudio hemos utilizado las lentejas de agua (*Lemna* sp. en asociación con *Wolffia* sp.), el repollito de agua (*Pistia stratiotes*), helecho de agua (*Salvinia* sp.) y el camalote (*Eichhornia crassipes*) obtenidos de humedales naturales.

Los resultados obtenidos demuestran que mediante el uso de estas plantas se pueden obtener buenas eficiencias en la remoción de los contaminantes más comunes de las aguas.

Tabla orientativa del nivel de eficiencia alcanzado en el tratamiento de las aguas cloacales recolectadas.

Parámetro	Salvinia	Lemna + Wolffia	Pistia	Eichhornia
DBO <sup>5</sup>	60-70	60-80	55-76	55-75
DQO	50	40	46	8
CF	99,9	99,9	99,9	99,8
PT	20	14	14	50
NTK	80	50	90	70
N-NO <sub>2</sub>	3	6	30	15

## OBJETIVO GENERAL

Evaluar el empleo de plantas acuáticas en su acción favorable para la reducción natural de las cargas orgánicas contaminantes de los cursos hídricos del Paraguay.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar especies de plantas acuáticas que están presentes en los humedales del departamento Central del Paraguay.
2. Identificar las especies acuáticas de mayor eficiencia en la reducción de las cargas contaminantes.
3. Establecer lineamientos que sirvan de guía para la introducción de humedades artificiales en el país.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los estudios fueron realizados en la granja de la UNIBE ubicada en la ciudad de Ypacaraí del departamento de Cordillera.

Durante los meses de febrero y agosto del año 2011 fueron realizados viajes para la cosecha de plantas acuáticas, siendo cosechadas 5 (cinco) especies identificadas como *Salvinia* sp, *Eichhornia* sp, *Pistia stratiotes* y la asociación de *Lemna* + *Wolffia* sp. Las plantas fueron colectadas con redes de mano y colocadas en recipientes de plástico para el transporte hasta la granja de la UNIBE.

Las plantas fueron sembradas en bateas de capacidad útil de 33 litros por duplicado. Se utilizaron 3 tipos de aguas: aguas cloacales municipales, aguas de arroyos contaminados y agua de los humedales provenientes de los lugares donde fueron cosechadas las plantas. Antes del sembrado, las plantas fueron pesadas (peso húmedo) utilizando Pesolas de 1 kg, 300 g y 100 g.

**Medición de parámetros físicos, químicos y biológicos:** Antes del sembrado de las plantas, se midieron los parámetros físicos, químicos y biológicos. Se evaluó el resultado de la reducción de las cargas contaminantes conforme a la especie empleada, para cada batea durante siete días en las dos estaciones (verano e invierno). Diariamente se procedió al monitoreo de temperatura ambiente y del agua, densidad de las plantas, OD (oxígeno disuelto) *in situ* y se tomaron muestras para la medición en laboratorio de nitrógeno total (NTK), nitrato,

nitrito, fósforo total, sólidos totales disueltos, coliformes fecales, DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno) y DQO (demanda química de oxígeno), conforme a las técnicas analíticas estandarizadas publicadas por el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater-APHA-AWWA-WPC*.

Las muestras fueron recogidas a diario y a las 9:00 hs, desde el lugar de la experiencia, ciudad de Ypacaraí, y transportadas refrigeradas hasta los laboratorios contratados, Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional, que durante la experiencia se abocó de manera exclusiva a analizar las muestras de este proyecto de investigación.

Para la medición de oxígeno disuelto, pH, y temperatura se contaron con equipos portátiles adquiridos al efecto y fueron realizados in situ de manera horaria.

## RESULTADOS

### IDENTIFICACIÓN DE PLANTAS ACUÁTICAS PREDOMINANTES EN EL PARAGUAY

Para el objetivo uno hemos recopilado información acerca de los humedales y las expediciones o investigaciones realizadas en nuestro país que a continuación se presentan:

Se estima que el Paraguay tiene aproximadamente 30% a 40% de ambientes conocidos como ecosistemas de humedales permanentes; sin embargo, no se ha podido precisar esta cifra por falta de estudios cartográficos (Burgos, 2004).

La flora de los humedales se presenta en forma muy variada, con plantas increíblemente pequeñas y con hábitos de vida variados, desempeñan un rol importante, proporcionando alimento, refugio, hábitats y enriquecen al agua con el oxígeno disuelto producido durante la fotosíntesis, manteniendo así la pureza del agua (Mereles, 2004).

Tanto en la Región Oriental como en la Región Occidental del Paraguay, la distribución de plantas acuáticas es amplia, no existen estudios de endemidad relacionada a las especies, sí en cuanto a los tipos de ambientes.

Existen diferentes tipos de plantas acuáticas, tales como:

- i) flotantes libres, a las cuales se denominan Pleuston (*Eichhornia sp.*, *Salvinia sp.*, *Lemna sp.*);

- ii) plantas arraigadas en el fondo que pueden ser enteramente sumergidas o con flores y hojas que flotan, se las denomina Rizomemon, Submersiherbosa y Emersiherbosa (*Elodea sp.*, *Nymphaea sp.*;
- iii) plantas microscópicas suspendidas denominadas Fitoplancton (*Pediastrum sp.*, *Microcystis sp.*);
- iv) plantas microscópicas en el agua del suelo denominadas Fitoedafon; y
- v) plantas adaptadas a corrientes rápidas (Podostemaceas y Hepáticas) (Fleitas, 2007).

Se cuentan con algunas informaciones relacionadas con plantas acuáticas en el Paraguay; cabe destacar que el sector Medio Ambiente de la Itaipú Binacional, en agosto del año 1993 inició un programa de plantas acuáticas de la margen derecha enfocando dos aspectos: la distribución fitogeográfica en el embalse, incluyendo a su vez la frecuencia e intensidad de aparición de las especies consideradas malezas; y, por otra parte, los estudios sobre posibles controles ya sean biológicos, mecánicos o químicos (Biota Itaipú, 1997). Un total de 13 especies de plantas acuáticas han sido estudiadas en el marco del proyecto mencionado.

El Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay de la Secretaría del Ambiente cuenta con colecciones de algunas especies de plantas acuáticas según se mencionan en el libro de colecciones del Museo del año 1996; también el Departamento de Botánica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción cuenta con colecciones científicas en su herbario.

La expedición denominada AquaRap, conformada por expertos de Conservación Internacional, del Museo de Historia Natural del Paraguay y de la Universidad Nacional de Asunción, realizó un muestreo de plantas acuáticas en diferentes ambientes a lo largo del río Paraguay en el año 1997, un total de 147 especies fueron colectadas en dicha expedición, de las cuales 35 especies correspondían al tipo flotante libre (Mereles, 2001).

Entre las especies flotantes libres más representativas en Paraguay se encuentran: *Eichhornia crassipes* (camalote), *E. azurea* (camalote), *Pontederia rotundifolia* (camalote), *Pistia stratiotes* (repollito de agua), *Azolla filiculoides* (helechito de agua), *A. caroliniana* (helechito de agua), *Salvinia herzogii*, *Lemna sp.* (lenteja), *Spirodela sp.* (helechito), *Wolffia sp.* (lenteja), *Hydrocleis nymphoides* (amapola de agua), *H. modesta*,

*Phyllanthus fluitans*, *Mayaca fluviatilis*, *Alternanthera philoxeroides* (raíz roja), *Ceratopteris pteridioides* (helecho flotante), *Ludwigia helminthorrhiza*, *Pacourina edulis*, *Hymenachne amplexicaulis*, *Heteranthera reniformis*, *H. multiflora*, *H. zosterifolia*, *Polygonum ferrugineum*, *P. paraguayensis*, *P. stelligerum*, *Rumex argentinus*, entre otras (Mereles, 2007).

Un total de 45 especies de plantas acuáticas flotantes libres se tienen registradas para Paraguay, la misma se aprecia en la tabla siguiente:

**Tabla: Lista de especies de plantas acuáticas flotantes libres registradas para Paraguay 5, 6, 7.**

Familia	Nombre científico
Alimastaceae	<i>Echinodorus austroamericanus</i>
	<i>Echinodorus grandiflorus</i>
	<i>Hydrocleis nymphoides</i>
	<i>Hydrocleis modesta</i>
Amaranthaceae	<i>Alternanthera philoxeroides</i>
	<i>Alternanthera philoxeroides</i> var. <i>ficoidea</i>
Apiaceae	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>
	<i>Hydrocotyle</i> sp.
Araceae	<i>Pistia stratiotes</i>
Azollaceae	<i>Azolla caroliniana</i>
	<i>Azolla filiculoides</i>
Euphorbiaceae	<i>Phyllanthus fluitans</i>
Hepática	<i>Ricciocarpus natans</i>
Leguminosae	<i>Neptunia frutescens</i>
	<i>Neptunia pubescens</i>
Lemnaceae	<i>Lemna</i> sp.
	<i>Spirodella</i> cfr. <i>Intermedia</i>
	<i>Wolffia</i> sp.
	<i>Wolffiella</i> sp.
Malvaceae	<i>Hibiscus</i> sp.
Mayacaceae	<i>Mayaca fluviatilis</i>
	<i>Mayaca sellowiana</i>
Onagraceae	<i>Ludwigia helminthorrhiza</i>

Familia	Nombre científico
Parkeriaceae	Salvinia herzogii
	Salvinia natans
	Ceraptopteris pteridoides
	Ceraptopteris paraguariensis
	Ceraptopteris crf. Paraguariensis
Poaceae	Hymenachme amplexicaulis
	Panicum elephantipes
	Panicum sp.
	Paspalum repens
Polygonaceae	Polygonum ferrugineum
	Polygonum hidropiperoides
	Polygonum paraguayense
	Polygonum stelligerum
	Rumex argentinus
Pontederiaceae	Eichhornia azurea
	Eichhornia crassipes
	Heteranthera limosa
	Heteranthera multiflora
	Heteranthera reniformis
	Heteranthera zosterifolia
	Pontederia rotundifolia
	Pontederia subovata

A continuación se presenta una descripción de las características de las especies que hemos seleccionado para el estudio:

**Nombre científico:** Eichhornia crassipes - Familia: Pontederiaceae

**Nombre vulgar:** camalote, jacinto de agua.

Es una planta herbácea, perenne, acuática y flotante, de tallo vegetativo muy condensado, hojas arrosetadas y flotante.

La base de cada pecíolo es un gran “boya” que ayuda a mantener toda la estructura del pecíolo (incluyendo la hoja y flor) por encima del agua. Florece y fructifica todo el año.

Es una planta de amplia distribución, normalmente permanece confinada a las costas de los ríos, suelen formar grandes embalsados que flotan libremente sobre los cuerpos de agua.

**Nombre científico:** Pistia stratiotes - Familia: Araceae

**Nombre vulgar:** repollito de agua

Las plantas de Pistia stratiotes flotan en la superficie del agua con sus raíces que cuelgan sumergidas debajo de las hojas flotantes. Es una planta perenne monocotiledónea con las hojas gruesas, suaves que forman una roseta.

Las hojas pueden llegar hasta 14 centímetros de largo y tener algún vástago, son de márgenes verdes, con las venas paralelas, onduladas ligeras y se cubren con pelos cortos que forman como la estructura de una cesta que atrapan burbujas de aire, aumentando la flotabilidad de la planta. Las flores se ocultan en el centro de la planta entre las hojas; la planta madre y las hijas están conectadas por un estolón corto. Son de amplia distribución y abundan durante todo el año.

**Nombre científico:** Salvinia - Familia: Salviniaceae

**Nombre vulgar:** helecho flotante

Plantas pequeñas, flotantes con tallos trepadores, ramificados, pilosos sin ser verdaderas raíces. Las hojas, anchas, tienen de 0,5 a 4 cm de longitud, de epidermis brillante y tersa, y produce raíces secundarias y aun terciarias modificadas que ayudan a “fijarse” al agua. Se reproduce asexualmente, y es capaz de crecer a gran velocidad desde un pequeño fragmento de vegetal, y doblar la población en pocos días. De amplia distribución y abundan todo el año.

**Nombre científico:** Lemna sp. - Familia: Araceae

**Nombre vulgar:** Lenteja de agua

La forma del cuerpo de la planta es aplanada, fusiforme en el esquema, simétricas. El tamaño va de 1-3 mm de largo (a menudo sólo 1 mm de largo cuando se llena y en plena luz del sol). Una vena débil, que se extiende sólo la mitad de la distancia desde el nodo raíz (punto de unión de raíz) hasta el ápice (a menudo muy oscuro y no perceptible), por lo general más corta que la región de los espacios aéreos. Muy a menudo se encuentra en asociación con otras especies de lentejas.

**Nombre científico:** Wolffia arrhiza - Familia: Araceae

**Nombre vulgar:** Lenteja de agua

**Raíces:** Ninguna

**Tamaño:** 0,8 hasta 1,3 mm de largo.

Tiene forma globular, casi esférica, con la superficie superior aplanada de color verde oscuro. Su estructura está muy reducida: carece de tallo, con 1 a 3 hojuelas diminutas, y con una inflorescencia diminuta, de 2 estambres y 1 pistilo, apenas visible a simple vista, que sale en el borde de la hoja y carece de raíces. Flota en la superficie de las aguas estancadas o tranquilas y es capaz de reproducirse rápidamente, mediante clonación, encontrándose a menudo parejas de individuos aun unidos por uno de los lados.

Forma de la planta del cuerpo: ovoide a casi esférica con una claridad aplanada, superficie dorsal verde oscura, flotando con sólo la parte central de la superficie dorsal por encima del agua, sin células de pigmento marrón.

### EFICIENCIA EN LA REDUCCIÓN DE LAS CARGAS CONTAMINANTES

En el cuadro Resumen se presentan los resultados de la eficiencia para cada una de las especies de plantas acuáticas de cada parámetro medido en el tiempo, y se le otorga una calificación de 1 (uno) al o los de más alta eficiencia comparativa en cada parámetro, con la calificación 2 (dos) puntúan las siguientes en eficiencia y 3 (tres) aquellas que no tuvieron eficiencia en la remoción o reducción.

Como la mayor de las veces, en el Paraguay es predominio de altas temperaturas, las eficiencias en verano son consideradas de mayor valía para la elección final (E).

Así, los resultados en la eficiencia de remoción son dispares según las plantas acuáticas empleadas en el tratamiento y fundamentalmente con las condiciones climáticas del verano e invierno. Si debiéramos elegir la planta acuática de mayor eficiencia en la remoción de las cargas carbonáceas y nitrogenadas para humedales todas tienen un buen desempeño apreciando la eficiencia en la remoción de cada parámetro (CF, DBO<sup>5</sup>, DQO, NTK, NO<sup>3</sup>, NO<sup>2</sup>, PT y STD) por la que todas son elegibles, concordante con la naturaleza.

En las aguas de arroyo, las excelentes condiciones de OD dan realce para que todas sean elegibles, mientras que en las aguas cloacales las Eichhornias están desfavorecidas en eficiencia con respecto a las otras especies de plantas acuáticas.

		Humedal		Arroyo		Cloaca
SALVINIA	E	9	E	12	E	11
L+W	E	9	E	12	E	12
Pistia	E	8	E	12	E	11
Eichhornia	E	7	E	12		14

		HUMEDAL VERANO			HUMEDAL INVIERNO		
		Eficiencia (%)	días	Calificación(*)	Eficiencia	días	Calificación(*)
DBO5	SALVINIA	20	7	1	70-85	2-7	2
	L+W	20	7	1	60-85	2-7	2
	Pistia	sin eficiencia		3	77-85	2-7	1
	Eichhornia	6	7	2	75-83	2-7	1
	Control	17	7		38-83	2-7	1
DQO	SALVINIA	5-10	2-7	2	7-30	2-7	2
	L+W	13-20	2-7	1	15-17	2-7	2
	Pistia	11-18	2-7	1	29	4	1
	Eichhornia	12	2	2	30	4	1
	Control	17-26	2-7		19-20	2-4	
CF	SALVINIA			2	86-98	2-7	2
	L+W	La muestra inicial contiene <3		2	85-99	2-5	2
	Pistia			2	99,9	3	1
	Eichhornia	50	4	1	94-99,9	2-5	1
	Control	25	2		97-99,9	2-5	
PT	SALVINIA	50-60	4-7	1	40-68	2-7	1
	L+W	50-70	2-7	1	20-45	2-7	2
	Pistia	50-70	4-7	1	40-64	2-7	1
	Eichhornia	40-50	4-7	2	30-69	2-7	1
	Control	40-66	2-7		29-54	2-7	
NTK	SALVINIA	5-39	2-7		75	2	2
	L+W	32	4		66-85	2-3	2
	Pistia	28	2		75-82	2-7	2
	Eichhornia	33	2		82-92	2-7	1
	Control	38	5		89-81	2-7	
NO3	SALVINIA	80	7	1	41	7	
	L+W	70	7	2	32	7	
	Pistia	55	7	2	55	7	
	Eichhornia	45	7	2	55	7	
	Control				38	7	
SDT	SALVINIA	15	2		4	5	
	L+W	28	6		1-10	2-7	
	Pistia	20	2		10	3	
	Eichhornia	30	4		17	4	
	Control	sin eficiencia			9	2	
NO2	SALVINIA				57-78	3-7	1
	L+W				59-79	3-7	1
	Pistia				64-79	3-7	1
	Eichhornia				75	5	
	Control				58-84	3-7	

	Calif. verano	Calif. Invierno
SALVINIA	7	10
L+W	7	11
Pistia	9	7
Eichhornia	9	5

		ARROYO VERANO			ARROYO INVIERNO		
		eficiencia	Días	Calificación(*)	eficiencia	días	Calificación(*)
DBO5	SALVINIA	20-30	4-7	1	15-83	2-7	3
	L+W	13-18	4-7	2	28-75	2-7	2
	Pistia	9-14	4-7	2	32-78	2-7	2
	Eichhornia	14	4	2	47-80	2-7	1
	Control	14	7		35-80	2-7	
DQO	SALVINIA	18	2	1	21	4	2
	L+W	20	7	2	2	7	3
	Pistia	16	7	2	14	4	2
	Eichhornia	12	2	2	30	4	1
	Control	9-24	2-7		sin eficiencia		
CF	SALVINIA	70	2	1	99,90%	6	1
	L+W	60	2	1	67-89	2-5	2
	Pistia	54	2	2	53-99,9	2-6	2
	Eichhornia	Sin eficiencia		3	30-99,9	2-6	2
	Control	99,9	4		53-99,9	2-6	
PT	SALVINIA	50-70	4-7	2	27	7	2
	L+W	50-70	4-7	2	28	7	2
	Pistia	65	4	2	16	5	2
	Eichhornia	74	3	1	30-53	2-7	1
	Control	83	5		10-16	2-7	
NTK	SALVINIA	sin eficiencia		3	sin eficiencia		3
	L+W	sin eficiencia		3	9	6	2
	Pistia	sin eficiencia		3	20	6	1
	Eichhornia	sin eficiencia		3	sin eficiencia		3
	Control	sin eficiencia			40	2	
NO3	SALVINIA	85	7	2	64	7	1
	L+W	90	7	1	56	7	1
	Pistia	97	7	1	60	7	1
	Eichhornia	96	7	1	65	7	1
	Control				sin eficiencia		
SDT	SALVINIA	14	2		37	6	
	L+W	sin eficiencia			4-6	2-3	
	Pistia	1	5		sin eficiencia		
	Eichhornia	7	2		sin eficiencia		
	Control	Sin eficiencia			47	7	
NO2	SALVINIA				39-73	3-7	2
	L+W				33-64	3-7	2
	Pistia				47-84	3-7	1
	Eichhornia				77	7	2
	Control				20-44	3-5	
				Calif. verano	Calif. Invierno		
SALVINIA				10			14
L+W				11			14
Pistia				12			11
Eichhornia				12			11

	CLOACA VERANO				CLOACA INVIERNO		
		eficiencia	días	Calificación(*)	eficiencia	días	Calificación(*)
DBO5	SALVINIA	45-60	2-7	1	55-70	2-7	2
	L+W	45-60	2-7	1	80	2	1
	Pistia	45-55	2-7	2	62-76	2-7	2
	Eichhornia	45-55	2-7	2	75	2	2
	Control	40-57	2-7		42-58	2-7	
DQO	SALVINIA	28-50	2-7	1	10-19	2-7	2
	L+W	22-40	2-7	2	14-16	2-7	2
	Pistia	27-46	2-7	1	31	4	1
	Eichhornia	8	2	3	14	4	2
	Control	25-62	2-7		38	4	
CF	SALVINIA	99,9	3	1	99,9	4	1
	L+W	99,9	3	1	99,9	6	2
	Pistia	99,9	4	2	98	4	2
	Eichhornia	99,8	4	2	97	3	2
	Control	99,9	6		99,9	5	
PT	SALVINIA	20	4	2	26	5	2
	L+W	14	7	2	6-27	2-7	2
	Pistia	7-14	4-7	2	12-18	2-7	2
	Eichhornia	6-50	4-7	1	14-58	2-7	1
	Control	25	6		6-24	2-7	
NTK	SALVINIA	80	3	1	70	2	1
	L+W	50	3	2	55-66	2-3	1
	Pistia	90	3	1	25-50	2-3	2
	Eichhornia	70	2	2	40	2	2
	Control	sin eficiencia	2		43-85	2-7	
NO3	SALVINIA	sin eficiencia		3	sin eficiencia		3
	L+W	sin eficiencia		3	sin eficiencia		3
	Pistia	sin eficiencia		3	41	4	1
	Eichhornia	sin eficiencia		3	sin eficiencia		3
	Control	sin eficiencia			sin eficiencia		
SDT	SALVINIA	sin eficiencia	3		sin eficiencia		
	L+W	36	1		4-6	2-3	
	Pistia	sin eficiencia	3		3	2	
	Eichhornia	1	3		1	2	
	Control	sin eficiencia			3	3	
NO2	SALVINIA				3	5	2
	L+W				6	3	2
	Pistia				30	5	1
	Eichhornia				15	5	2
	Control				12-26	3-5	
				Calif. verano	Calif. invierno		
SALVINIA				9	13		
L+W				11	13		
Pistia				11	11		
Eichhornia				13	14		

## GUÍA DE DIMENSIONAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Con la selección de las especies de plantas acuáticas de mayor eficiencia, los resultados de remoción de las cargas contaminantes monitoreadas, el comportamiento del oxígeno disuelto y la literatura existente para el diseño de humedales permite efectuar la elección de humedales artificiales híbridos, combinación de los humedales flujo superficial con la de tipo de flujo subsuperficial (HFSS). Al respecto, esta investigación integra el Documento Técnico de Diseño de Humedales.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente para nuestro Proyecto de Investigación hemos seleccionado 3 especies (*Lemna sp.*, *Azolla sp.* y *Spirodela sp.*). Estas especies son comunes en los humedales de aguas lenticas, pero el tamaño de las poblaciones varía dependiendo de las estaciones.

En tal sentido, a *Lemna sp.* la hemos observado siempre asociada a *Wolffia sp.*, en la estación cálida (verano). *Wolffia sp.* era más abundante que *Lemna sp.*, observándose lo contrario en la estación fría (invierno).

Unos pocos individuos de *Spirodela* hemos observado tanto en verano como en invierno, imposibilitando la obtención de una buena cantidad de plantas para utilizarlos en el estudio.

Las especies tales como *Eichhornia crassipes* (camalote), *Salvinia sp.* (helecho de agua) y *Pistia stratiotes* (repollito de agua), abundan durante todo el año; sin embargo, *Azolla sp.* (helechito de agua) pudimos observar que proliferaban en mayor cantidad durante la época de frío.

Cabe destacar que no hemos realizado estudios de abundancia relativa, más bien realizamos observaciones cualitativas para identificar las especies que más frecuentemente eran visualizadas y que teníamos la posibilidad de coleccionar lo suficiente para nuestra investigación.

En tal sentido, hemos seleccionado 5 especies que ya fueron mencionadas para el desarrollo de la investigación.

Varias son las experiencias de investigación realizada, y los logros obtenidos con la aplicación en gran escala de los humedales artificiales otros países. Estas experiencias favorables tienen por factor común el empleo de los camalotes (*Eichhornias*) y resultados variables en la reducción de las cargas bacterianas.

Para una comprensión de las eficiencias obtenidas, en esta investigación

se analiza cada parámetro con base en los procesos que intervienen para su reducción.

En los cuerpos de agua, la materia orgánica es convertida en productos inertes por mecanismos puramente naturales, por lo que recibe el nombre de autodepuración.

Cuando efectuamos el análisis de la DBO<sub>5</sub>, en la luz del conocimiento existente, y simplificando la oxidación bioquímica de la materia carbonácea podemos recordar que las mismas son reacciones aerobias, en las cuales predominan los siguientes dos fases (Eckenfelder, 1980):

Etapa Inicial, de predominio de la síntesis (asimilación o anabolismo), actividad en la cual los microorganismos presentes en las aguas consumen el OD para su actividad metabólica de crecimiento y obtención de energía (Hanisch, 1980).

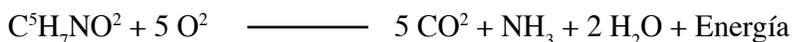


Materia orgánica

Materia celular

Por lo tanto, esta actividad implica, la utilización de oxígeno, la producción de gas carbónico y la liberación de energía.

La segunda fase de oxidación, ocurre cuando la materia orgánica, originalmente presente en su mayor parte, ya fue removida, predomina los mecanismos de autooxidación o de respiración endógena, que simplificadaamente la representan en la siguiente ecuación:



Materia celular

Así, el oxígeno consumido en ambas fases es definido como demanda última (DBOu). La remoción de la materia orgánica presente tiene una duración de uno a dos días, estimándose que a los veinte días de incubación se obtiene la DBOu.

En la experiencia se realizaron determinaciones de la DBO<sub>5</sub> en los días 1, 2, 4 (en Invierno) y en el día 7. También se ha efectuado con respecto a la muestra inicial la DBO con veinte días de incubación. Los resultados arrojan que la DBO<sub>5</sub> de la muestra tomada a los siete días de la experiencia dan el mismo valor de la DBO<sub>20</sub> días, pudiendo, por tanto, conocerse el máximo nivel de eficiencia a alcanzarse.

Por supuesto, el oxígeno consumido no responde a la relación estequiométrica porque por la muerte de las bacterias se convierte en alimento para otras bacterias, ocurriendo consecuentemente una transformación a  $\text{CO}_2$ , agua y materia celular. Las bacterias vivas como muertas sirven de alimento para los organismos superiores.

En la investigación se obtuvieron tasas de remoción de la DBO<sub>5</sub> en verano en las aguas de humedales en el orden del 20% (*Salvinia* sp. y *Lemna+Wolffia*), 6% (*Eichhornia* sp.). mientras que las *Pistias* sp. no removieron. Al analizar las condiciones ambientales, el tratamiento de las aguas de humedales por estas dos últimas especies tiene en común que tuvieron el bajo valor promedio de OD, fundamental para efectuar la oxidación. En el invierno, la situación en las aguas de humedales es inmejorable al observar la eficiencia en la reducción del orden del 85% en los siete días de tratamiento, si bien con las más de las especies ya se lograban eficiencias del 70% en el segundo día. Es significativo cómo la presencia de las plantas acuáticas contribuye, dado que en las aguas donde no fueron sembradas éstas, denominadas aguas de control de humedal, tienen una remoción del 38%; si bien al séptimo día, los niveles de reducción son similares.

En las aguas de arroyo, todas las plantas acuáticas presentan una pequeña eficiencia en la remoción de DBO<sub>5</sub> durante el verano, siendo la *Salvinia* sp. la de mayores valores de remoción, 30%. En invierno, la situación es muy favorable para la remoción de las cargas contaminantes, alcanzándose niveles de remoción mayor al 80%. En las aguas de arroyo, el promedio de pH es mayor a la de humedales.

Así, contrario a lo esperado, los niveles de remoción de la DBO<sub>5</sub> en las aguas de humedales (85%) y arroyo (80%) son mayores en invierno con respecto al obtenido en verano. Esta situación se soporta en OD promedio del orden de 9 mg O<sub>2</sub>/l (temperatura promedio del agua: 18 °C), mientras en verano OD: 6 mg O<sub>2</sub>/l (temperatura promedio del agua: 31 °C).

En las aguas cloacales, la eficiencia en la remoción de DBO<sub>5</sub> es variable según la especie empleada y no es tan marcada como la observada en las aguas tratadas con plantas acuática entre el verano e invierno, pero siempre es ligeramente mayor la eficiencia en invierno. Durante el verano, los niveles de OD llegaron a ser crítico, alcanzando niveles promedio de 2 mg/l. Los bajos niveles de OD en las aguas cloacales están asociados a la contaminación con materia orgánica, cuya carga inicial son similares en verano y en invierno. Hemos comprobado la capacidad de las plantas

acuáticas flotantes para otorgar oxígeno, aun en condiciones de verano con el sembrado de Lemna + Wolffia, recuperándose, en el orden de sumar, 2 mg O<sub>2</sub>/l.

Cuando estudiamos el comportamiento para la reducción de demanda química de oxígeno (DQO), la eficiencia es ligeramente mayor durante el invierno en las aguas de humedal. Los mejores niveles de remoción alcanzados durante el verano llegan a 20% con la contribución de las especies Lemna + Wolffia y las Pistias sp. En invierno, la eficiencia mejor es de 30% alcanzada ya al cuarto día de tratamiento con las Pistias y la Eichhornia.

En las aguas de arroyo, la eficiencia en la remoción, de DQO por cada una de la macrófitas es similar entre la experiencia de verano y de invierno, siendo del orden del 20%. Cabe destacar que en las aguas de control, no obtuvieron eficiencia alguna en la remoción de DQO durante el invierno.

En las aguas cloacales, con respecto a la DQO, se tienen eficiencias del orden del 50% con la Salvinia sp. y las Pistias sp.; mientras que en invierno es del 30%, Pistias sp. Los bajos niveles de remoción, comparados con otras investigaciones que dan cuenta de remociones hasta del orden del 90% se soportan probablemente en los bajos niveles de DQO en las aguas cloacales muestreadas, provenientes del sistema de alcantarillado de la ciudad de San Bernardino de Paraguay. (DQO=69 mgO<sub>2</sub>/l en verano y 41 mgO<sub>2</sub>/l en invierno vs. 200 mgO<sub>2</sub>/l de otras experiencias).

Notablemente, las aguas del humedal denotaban mayor carga bacteriana, medida en términos de coliforme fecal, con respecto a las aguas de arroyo. El agua de humedal proveniente de la cuenca del lago Ypacarai tienen más CF durante el invierno, sin embargo, excelentes niveles de remoción del orden del 99,9% fueron alcanzadas por cada una de las especies de macrófitas estudiadas.

En las aguas de arroyo es recomendable el empleo de las Salvinias como especie predominante en verano y en invierno. Las Eichhornias no han dado los mejores resultados durante el verano.

Con relación a los parámetros, DBO y DQO, en las aguas cloacales, éstas se encuentran dentro de los valores reglamentados del Paraguay, para su vertido directo al curso receptor (Reglamentación de vertido directo DBO<sup>5</sup><50 mgO<sub>2</sub>/l y la DQO < 150 mg/l). También los valores de fósforo total (<4P), nitrógeno total (PT<40N) y sólidos totales disueltos (STD

<300) cumplen con las normas para su vertido directo. Por ello, el énfasis puesto en los coliformes fecales (CF). La eficiencia de remoción de CF, que debe ser del orden de 99,9%, en las aguas cloacales es fundamental para la elección del tipo de tratamiento. Así, los humedales artificiales se constituyen en tratamientos recomendables por la eficiencia en la remoción alcanzada en verano es del 99,9% en verano y en invierno, a excepción de los resultados obtenidos con las *Eichhornias* (97%) y las *Pistias* sp. (98%).

Es también importante notar que en todas las aguas de control, la eficiencia en la remoción de CF es muy buena.

Pasemos a analizar el fósforo total, en las aguas de humedal durante el verano se han obtenido excelentes remociones del orden del 50% al 70%. Los valores ligeramente más altos de eficiencia son alcanzados durante el verano.

Si buscamos la caracterización de las aguas de arroyo, en resultado de los parámetros medidos, vemos que la misma se sitúa en Clase 3, por los valores de P total >0,05 mg/l en verano y en invierno. El resto de los parámetros se encuentra dentro de la clase 2. Así, el nivel de contaminación de las aguas del arroyo ubicado en la cuenca del lago Ypacaraí infiere presencia de fosfatos que tienen su origen en los productos de limpieza y en las aguas residuales agrícolas que son arrastradas por las aguas de lluvia hasta el torrente hídrico. La eficiencia en la remoción es mayor en verano, del orden del 50% a 70%. Son las *Salvinias* sp. las recomendadas por ejercer una acción eficiente en verano y en invierno.

En las aguas cloacales, el nivel de remoción de PT es muy bueno con el empleo de las *Eichhornias* (eficiencia en verano= 50%; eficiencia en invierno= 58%).

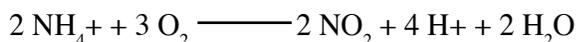
Cuando estudiamos la acción de las plantas en el proceso de reducción de la cargas nitrogenadas, como todas las especies de plantas acuáticas estudiadas son las flotantes, las condiciones hidráulicas de diseño deben ser comprobadas a escala piloto de modo a mantener una baja velocidad a fin de evitar pérdidas de esa masa de materia orgánica que al arrojarse al cauce hídrico producirá sedimentos no deseados en el fondo del curso receptor de las aguas tratadas por los humedales artificiales.

En relación con la materia nitrogenada, la misma puede ser orgánica o inorgánica. La materia nitrogenada inorgánica está representada en la forma libre por el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) e ionizada amonía ( $\text{NH}_4^+$ ).

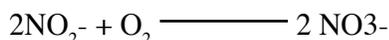
La materia nitrogenada orgánica, al igual que la carbonácea, tiene un componente biodegradable y otra no.

Los microorganismos envueltos en este proceso son los autótrofos quimiosintetizantes, para los cuales el gas carbónico es la principal fuente de carbono y la energía obtenida a través de la oxidación de la materia inorgánica, como la amonía a formas mineralizadas.

La transformación de amonía a nitrito es realizada a través de las bacterias nitrosomonas:

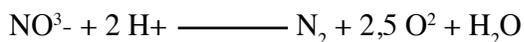


La oxidación de nitrito a nitrato se da principalmente por la utilización de bacterias, como las del género Nitrobacter, siendo expresada por:



Así, para estas reacciones hay consumo de oxígeno libre. Este consumo es referido como demanda nitrogenada. La liberación de H<sup>+</sup> debería reducir el pH.

Reducción de los nitratos: las condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno, pero sí presencia de nitrato), los nitratos son utilizados por los heterótrofos (aquellos, como las bacterias, cuya fuente de carbono es la materia orgánica), el nitrato es reducido a nitrógeno gaseoso



En los humedales, durante el verano los resultados son erráticos al medir el NTK, pudiendo interpretarse los resultados en la razón que el OD se encontraba en promedio 5 mg/l, y el NTK inicial es 0,117mg N/l. Así, a la luz, que durante la nitrificación, la amonía es oxidada a nitrato por la acción biológica y que la tasa de reacción aumenta cuando la temperatura aumenta y que la nitrificación requiere 4,3 mg/l O<sup>2</sup> por mg N oxidado (EPA, 2000) no se explica porque no se ha tenido buena eficiencia. En invierno, la situación se revierte, al medirse buena reducción del NTK con todas las plantas acuáticas, siendo las Eichhornias las de mayor eficiencia (>90%), cuando el OD promedio es 9 mg O<sup>2</sup>/l.

En las aguas de arroyo, es regular la remoción del NTK en invierno del orden del 20% (Pistias), mientras que en verano no se tuvo eficiencia.

En las aguas cloacales, la eficiencia en la reducción del NTK es del orden del 90% (Pistias) en verano y las Salvinias 70% en invierno. Las otras especies podrían demandar más oxígeno porque otros componentes, tales como la DBO y la eutrofización, consumen el oxígeno disponible disminuyendo la posibilidad de que la nitrificación ocurra. Es destacable concluir del pesaje de las plantas acuáticas entre el inicio y final de la experiencia, durante el verano se ha acrecentado el peso y la densidad; mientras en invierno han disminuido su peso. En el caso de las Eichhornias, se ha tenido siempre un incremento del peso.

La descomposición de las Eichhornias causó fuertes depresiones del consumo de oxígeno. Así son las Eichhornias, las que presentaron el OD promedio más bajo. Así, en el cuarto día de la experiencia durante el verano fueron remplazadas las Eichhornias por otras de igual pesaje, por encontrarse ya avejentadas las hojas. Las otras especies no demandaron dicha acción.

En cuanto al aumento de nitrógeno en las plantas, como la Pistia y las Lemnas+ Wolffia, los resultados son dispares al comparar la eficiencia en la reducción de NTK, en invierno, por las L+W:55 a 66% - Pistias: 25-55%, han reducido su contenido de nitrógeno en raíces, mientras que en las Pistias se ha incrementado, podría explicarse por el mayor desarrollo de las raíces en estas últimas que explica su eficiencia en la remoción de nitratos. Ver párrafo referente a nitrato.

	ANÁLISIS LABORATORIALES (INVIERNO)			
	CLOACA+ LEMNA+WOLFIA		CLOACA + PISTIA STRATIOTES	
	Inicial	Final	Inicial	Final
NITRÓGENO(g/100 g)	0.668	0.192	0.0939	0.219
POTASIO (mg/100 g)	31.4	29.3	54.6	49.8
FÓSFORO (mg/100 ml)	<0.5	<0.5	38.4	48.5

En cuanto al nitrito, cuyo monitoreo fue incorporado en invierno, en todas las muestras se han logrado eficiencia. En los humedales, por todas las especies: 60% a 80%; en las aguas de arroyo: 60% a 80% y en las cloacales, las Pistias lograron reducir un 30%.

La desnitrificación, que es la reducción del nitrato a nitrógeno gas y óxido nitroso, tiene lugar bajo condiciones anóxicas, bajos niveles de oxígeno.

En las aguas cloacales no se tuvo eficiencia en la remoción, a excepción de las Pistias, que obtuvieron un eficiencia del 40%. En cambio en las aguas de humedal y arroyo, los resultados fueron muy buenos, del orden del 80% para las Salvinias en verano. Dicha eficiencia es atribuible a la adsorción/captación de las raíces de las plantas porque en las aguas de control la eficiencia es menor.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

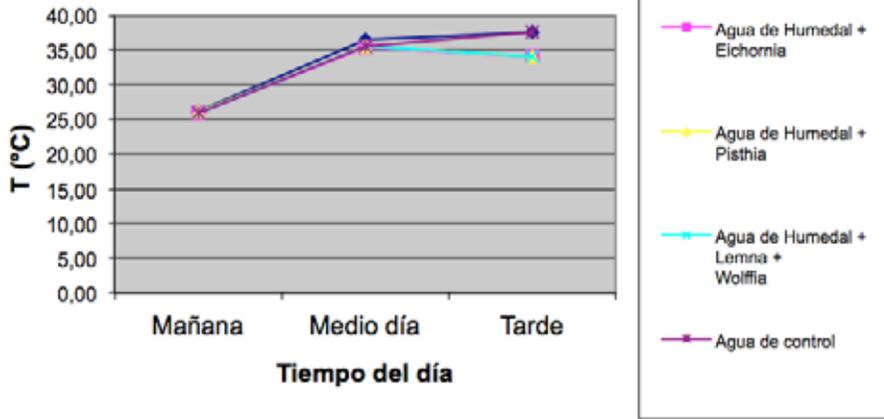
1. El estudio presenta resultados muy favorables presentando unas guías de diseño para la implementación de humedales artificiales que pueden ser construidos en línea paralela a las costas de los arroyos, realizando el tratamiento de una porción de los mismos para ser nuevamente retornados a su torrente hídrico.

La situación que se ha presentado con los sólidos totales disueltos (STD), donde los resultados son dispares, se explica por el hecho de que las plantas no eran muy enraizadas, por lo que para ejercer acción sobre este parámetro la guía de diseño incorporará que la construcción de humedales empleando las plantas acuáticas flotantes sea del tipo híbrido, así en el ingreso de las aguas cloacales será de flujo subsuperficial, donde la arena y grava que se colocan por encima del suelo retendrán los sólidos totales.

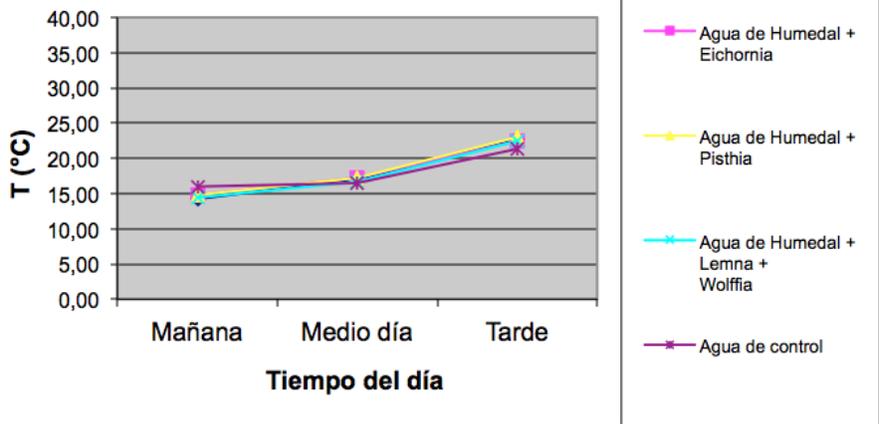


2. Con el empleo de las Salvinias, Pistias y Lemna + Wolffia, a su vez se logra evitar la proliferación de mosquitos, que en la experiencia se comprobó que se encuentra muy asociada con la Eichhornia (camalotes). Aquellas especies al mantener cubierta la superficie de agua impiden la presencia de larvas.
3. La importancia de mantener niveles de OD en las aguas cloacales, como ser la aireación artificial durante el verano por los bajísimos niveles dadas las altísimas temperaturas alcanzadas por el agua durante el verano, lo cual se aprecia de manera comparativa en los gráficos siguientes:

### Valores de temperatura en verano



### Valores de temperatura en invierno



## BIBLIOGRAFÍA

BURGOS, Sergio. 2004. Localización de Humedales en Paraguay – Capítulo 1, págs. 9-12.

*California State University Sacramento*, junio 2009. *Ammonia Removal in Wetlands a Literature Review*.

FLEITAS, Luis. 1997. Contribución al estudio de plantas acuáticas en embalses hidroeléctricos. El caso Itaipú (Margen Derecha). *Biota* N° 7.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio, 1996. Depuración de Aguas Residuales. España.

IWA, 2000 In COOPER *Specialist Group of the use of macrophytes in water*

KAWAI, H. M.y UCHARA y otros. 1987. *Pilot Scale in Water Hyacinth Lagoons for Wastewater Treatment*.

LLAGAS, A.V. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UN-MSM.

MERELES, Fátima. 2004. Los humedales del Paraguay: principales tipos de vegetación. En *Humedales del Paraguay* – págs. 67-87.

MORATÓ, Jordi. *Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas*. TECSPAR. Colombia. 2009

MUGEL Branco, Samuel - *Hidrobiología Aplicada a Engenharia Sanitaria*, 1986, CETESB. Brasil.

TEGEGNE, B.M.; HANS VON BRUGGEN, J.O. Keeffe. *MSW Wasals - 2006. A constructed Wetland for Wastewater Treatment emphasis on optimization of Nitrogen Removal*

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1993. *Subsurface flow Constructed Wetland for Waste Water Treatment - A Technology Assessment*.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). October 2000. *Guiding Principles for Constructed Treatment Wetlands: Providing for Water Quality and Wildlife Habitat*.

VALDERRAMA, L.T.; CAMPOS, C. y otros. Evaluación del efecto del tratamiento con plantas acuáticas (*E. Crassipes*, *Lemna sp.* y *L. Laevigatum*) en la Remoción de indicadores de contaminación fecal en aguas residuales domésticas.

VON SPERLING, Marcos, 1997. Principios básicos de tratamiento de esgotos. Capítulo 1, págs. 11-35; Capítulo 3, págs. 97-109.

