



Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante humedales subsuperficiales con macrófita *Alocasia macrorrhizos* (orejas de elefante) en la urbanización los tulipanes –Chosica, Lima

Castro Sarco Diana Gloria ^{a*}, Cruz Paredes Yobana Elsa^a, Florez Mamani Michael Edgard^a

Recibido 22 de abril de 2017, Aceptado 27 de mayo de 2017

Received: april 22, 2017 Accepted: may 27, 2017

^aEP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

Resumen

El objetivo de este artículo es evaluar la eficiencia de la macrófita *alocasia macrorrhizos* (orejas de elefante) en un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para la remoción de los parámetros físicoquímicos y microbiológicos, para el riego de cultivos agrícolas. Utilizando el método de aforo de caudal, método de tubos múltiples y análisis físico químico, y la prueba de T-Student. Para el diseño del humedal se empleó 8 macrófitas de *alocasia*, se manejó un tanque a escala piloto con 16 litros, donde posteriormente se almaceno el agua a tratar durante un periodo de retención de 3 días, consecutivamente con el monitoreo de un mes. La eficiencia del uso del humedal subsuperficial con la macrófita consiguió el 60.72% de remoción de parámetros microbiológicos (coliformes totales, coliformes termotolerantes y e.coli), físicoquímicos (pH, temperatura, turbiedad, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, solidos totales, DBO₅, DQO, fosfato) y organolépticos (olor, color, sabor) del agua residual, por ello, se confirma que la eficiencia de las macrófitas como parte del tratamiento de agua residual es viable a un nivel ambiental, económico y ostenta ventajas atractivas para el apoyo de la conservación del ambiente ya que no requieren grandes insumos de energía o máquina para su operación.

Palabras clave: agua residual; humedal; *alocasia macrorrhizos*.

Abstract

The objective of this article is to evaluate the efficiency of macrophyte *alocasia macrorrhizos* (elephant ears) in a horizontal subsurface artificial wetland for the removal of physicochemical and microbiological parameters, for the irrigation of agricultural crops. Using the flow gauging method, multiple tube method and physical chemical analysis, and the T-Student test. For the design of the wetland, 8 *alocasia* macrophytes were used, a pilot scale tank with 16 liters was handled, where the water to be treated was subsequently stored for a retention period of 3 days, consecutively with a month's monitoring. The efficiency of the use of the subsurface wetland with the macrophyte achieved 60.72% removal of microbiological parameters (total coliforms, thermotolerant and e.coli coliforms), physicochemical (pH, temperature, turbidity, electrical conductivity, dissolved oxygen, total solids, BOD₅, COD, phosphate) and organoleptic (smell, color, taste) of wastewater, therefore, it is confirmed that the efficiency of the macrophytes as part of wastewater treatment is viable at an environmental, economic level and has attractive advantages for the support of the conservation of the environment since they do not require large inputs of energy or machinery for their operation.

Keywords: residual water; wetland; *alocasia macrorrhizos*

* Autor de correspondencia: Castro Sarco Diana Gloria
Km. 19 Carretera Central, Ñaña, Lima
Tel.: +51-960-080-205
E-mail: dianacastro@upeu.edu.pe, yobanacruz@upeu.edu.pe, michaeledgard@gmail.com

1. Introducción

Jaramillo (1996) denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Ya que habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que tienen habitualmente. El tratamiento tiene como fin reducir la concentración del elemento contaminante que afecta los parámetros de calidad para su uso definido del agua. Se clasifican en aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, aguas residuales pluviales, aguas grises y aguas municipales.

Los humedales son zonas de la superficie que están temporal o permanente inundadas, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan. En los humedales el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación degradación microbiana, acción de las plantas, absorción reacciones químicas y volatilización (Stearman, 2003).

1.2. Tipos de humedales

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confiere atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistente con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, 1999).

a) Humedales de flujo superficial: Son aquellos donde el agua circula destacadamente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmosfera. Este tipo de humedales es una innovación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de estas tienen menor profundidad.

b) Humedales de Flujo Subsuperficial: (subsurface now constructed wetlands)

En este tipo de humedales los procesos aeróbicos predominan cerca de la rizosfera, el cual se presenta el crecimiento microbiano más importante de la superficie de soporte (Madigan et al. 2004). Esto da lugar a diversos procesos microbianos en la cual se transforma en la zona de reacción activa de estos sistemas, ya que están compuestos de un medio filtrante, tipo de vegetación y microorganismos asociados, cada uno desempeñando funciones que favorecen el tratamiento del agua residual, a través de la captura y fijación de la materia orgánica y su posterior incorporación a los procesos de las plantas y microorganismos (Kura et al., 1997)

c) Horizontal: El diseño de estos sistemas por lo general radica en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de casos son la caña común o carrizo. Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo. El agua ingresa en forma continua. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior (Kolb, 1998)

d) Vertical: Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de instauración, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios, Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo. (Seoanez, 1999)

Según indico Llangas & Guadalupe (2006) las plantas conocidas como macrófitas o micrófitos son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados de forma superviviente por largos periodos de tiempo en condiciones de encharcamiento. Ya que estas macrófitas acuáticas presentan tasas altas de crecimiento y de

reproducción, lo cual favorece su capacidad de absorber sustancias disueltas en el agua y transformarlas en biomasa, con un consecuente efecto depurador del agua donde crecen.

1.3. *Alocasia Macrorrhizos– Orejas de Elefante*

El género *Alocasia* pertenece a la familia Araceae e incluye plantas nativas de las regiones tropicales del sudeste de Asia, muy apreciadas por la extraordinaria belleza de sus hojas (Mayol, et al., 1997).

Según Schott (1839) la macrófita *Alocasia macrorrhizos* tiene las siguientes características:

- Nombre común: Oreja de Elefante
- Nombre científico: *Alocasia macrorrhizos*
- Reino: Plantae
- Clado: Angiosperma
- Familia: Araceae
- Género: *Alocasia*
- Clima: Tropical
- Resistente a: Suelo encharcado
- Tipo de suelo: pH Neutro - Suelo fértil - Suelo Húmedo - Textura arcillosa – Textura arenosa
- Porte: Herbácea
- Tipo: Vivaces
- Tipo de mantenimiento: Medio
- Exposición: Semi-sol - Sombra luminosa
- Grupo de plantas: Acuáticas - Plantas de Interior
- Altura adulta: De 60-99cm
- Anchura adulta: De 30-60cm
- Floración: Verano
- Fructificación: Verano
- Longevidad: > 2 AÑOS
- Origen: Asia Tropical
- Ubicación: Interior y Exterior (zonas cálidas)
- Temperatura: 10-25 °C
- Riego: Tierra siempre húmeda
- Abono: Fertilizante líquido para plantas con hojas cada 15 días en primavera y verano

1.4. *Ventajas y desventajas de la planta alocasia*

Según Delgadillo (2006) las ventajas son las siguientes:

- Mantienen la capacidad hidráulica del suelo; su actividad mecánica permite desplazar el suelo y romper las capas colmatantes. La muerte de raíces favorece el desarrollo de túneles que facilitan el flujo a largo plazo.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas oxigena otros espacios dentro del sustrato.

- Retienen y procesan los nutrientes y numerosos productos que puede incorporar a sus ciclos metabólicos.
- Los sistemas de raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos:
- En climas fríos, la acumulación de detritos vegetales sobre el lecho de grava proporciona un aislamiento térmico que es útil durante los meses de invierno.
- El tallo de los sistemas de la raíz da lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

Estas plantas tienen la capacidad de purificar el agua mediante la asimilación directa de nutrientes, especialmente del fósforo, que es retirado del medio e incorporado al tejido vegetal, siendo éste también, el principal contaminante de la eutrofización de los cuerpos de agua. Las orejas de elefante son capaces de transportar oxígeno en grandes cantidades desde los tallos hacia sus raíces y rizomas, donde es utilizado por los microorganismos heterótrofos que crecen sobre ellos, en forma de una biopelícula, los que también contribuyen a la reducción de la contaminación a través de procesos aeróbicos de degradación.

Según Delgadillo (2006) las desventajas son las siguientes:

- Generalmente requieren grandes extensiones de terreno, comparado con los tratamientos convencionales. El tratamiento con estanques de oreja de elefante puede ser relativamente más barato que otras opciones, solo en el caso de tener terreno disponible y asequible.
- El rendimiento del sistema puede ser menos constante que el de un proceso convencional porque depende de los cambios en las condiciones ambientales, incluyendo lluvias y sequías.
- Los componentes biológicos son sensibles a sustancias como el amoníaco y los pesticidas que llegan a ser tóxicos.
- Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

Aforo de Caudal

- Wincha
- Cronometro
- Botella....

Análisis Físicoquímico

- Medidor portátil de pH/CE/TDS/°C
- pH-metro
- Conductímetro
- Oxímetro

Análisis Microbiológico

Reactivos

- Lauril Triptosa 5.36 gr
- EC. Medium 5.55 gr
- Verde Bilis Brillante 6 gr
- NaCl 0.68 gr
- Reactivo Covac

Materiales

- Pipetas
- Tubos de ensayo
- Tubos durham
- Matraz
- Vaso precipitado

- Gradillas
- Pipeteador
- Aza de siembra

- Balde de 16 litros
- Grava
- Arena fina
- 8 plantas de oreja de elefante (2 meses aproximadamente)

Humedal artificial subsuperficial

- Vidrio (30cmx50cmx25cm)

2.2. Métodos

- Se trató con el método del flotador con la cual se obtuvo el caudal del cauce de riego siendo de 0.03267 m³/seg en una distancia de 12 mt.
- Método de tubos múltiples donde consta de la prueba presuntiva, prueba confirmativa para coliformes totales y prueba complementaria para coliformes fecales
- La metodología implementada para realizar el análisis de muestras de agua residual agrícola tanto físicos y químicos es la siguiente: toma de muestras, etiquetado, preservación y conservación, análisis de parámetros organolépticos y fisicoquímicos, resultados e interpretación.

Se construyó un humedal piloto de material de vidrio con medidas de 50 cm de largo, 25 cm de ancho y 30 cm de altura; en la cual se dispuso tres capas internas impermeables con grava de tamaños distintos (40 mm, 20 mm y 5 mm aproximadamente). El afluente ingresa al sistema directamente en forma horizontal. En la base se colocó el material de grava gruesa con una altura de 5 cm, seguido se colocó grava mediana con una altura de 3 cm y continuo se colocó gravas pequeñas con una altura de 3 cm; y arena fina, finalmente se colocaron 8 plantas macrófitas utilizadas *Alocasia macrorrhizos*. El Efluente sale por un tubo sin ningún control del flujo de salida.

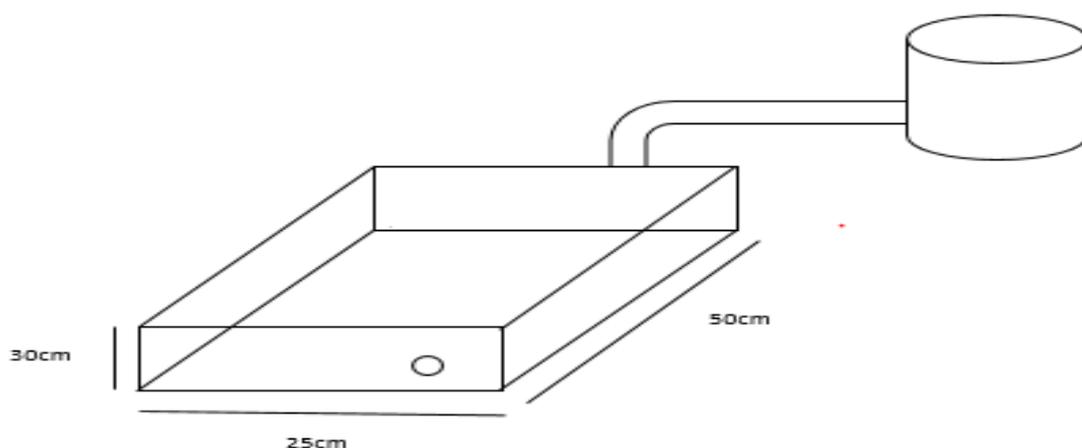


Figura 1: Diseño del humedal

- T-Student se utilizó para evaluar las muestras del análisis pre y pos de los parámetros físico- químico y microbiológico para estimar las diferencias significativas y el nivel de confianza de los valores.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis Físicoquímicos

Tabla 1

Análisis físicoquímico datos pre y post en comparación con el ECA y LMP

Se realizó la comparación de los resultados de acuerdo a la normativa D.S. N° 004-2017-MINAM, ECA para agua de la Categoría 3. "Riego de vegetales y bebida de animales" Sub Categoría D1. "riego de cultivos de tallo alto y bajo", donde se muestra que el pH, temperatura y conductividad está dentro de la parámetros establecidos, mientras que el oxígeno disuelto (4.11ppm) debido al exceso de residuos orgánicos, DBO₅ en el pre análisis se muestra con una concentración de 41mg/l, y en un 15.58 mg/l, muestra una disminución

	pH	Temperatura	Turbiedad	Conductividad	Oxígeno Disuelto	Solidos Totales	DBO ₅	Fosfato	DQO
Pre	6.9	22.4	108.5	790	7.25	390	41	2.07	90.2
Post	6.9	22.1	14.9	5.82	4.11	226	15.58	0.05	45.1
LMP	8.5	35	0	0	0	150	100	0	200
ECA	8.5	25	0	2500	4	0	15	0	40

significativamente, el DQO en el análisis pre se presentó con una concentración de 90.2mg/l y en el post es de 45.1 mg/l, se puede observar que después de pasar por tratamiento mediante el humedal el DQO ha disminuido significativamente esto quiere decir que la concentración del DQO presentada se debe al metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios, utilizando los compuestos orgánicos del agua para la producción de biomasa, aunque en el sistema también se genera reacciones químicas. (Vymazal, 2002)

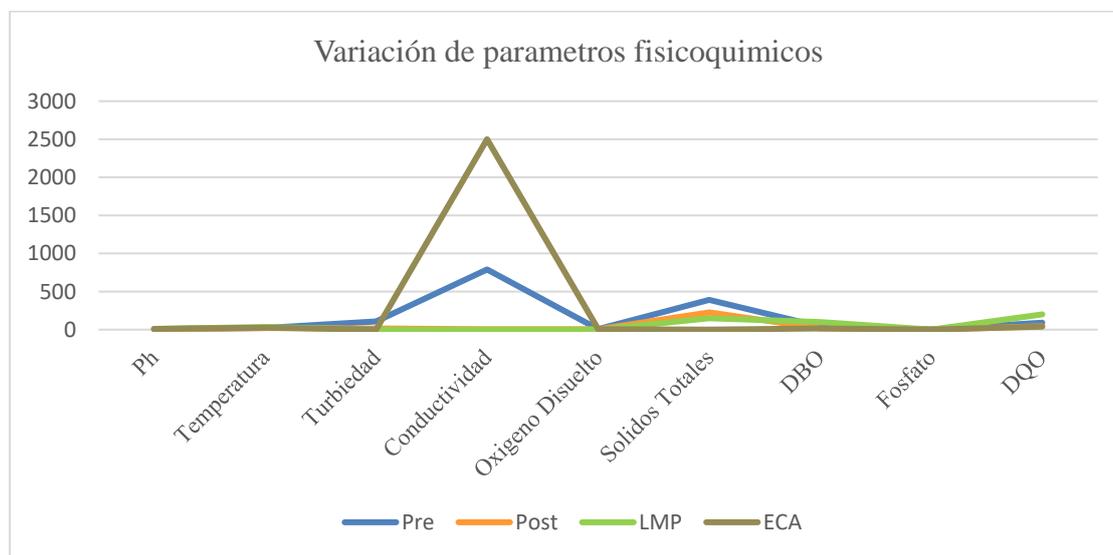


Figura 2: Variación de parámetros analizados

3.2. Análisis Organoléptico

Tabla 2

Parámetros organolépticos

	Datos - Pre	Datos - Post
--	-------------	--------------

Olor	Algas y vegetales descompuestos	Inoloro
Color	Gris oscuro	Amarillo claro
Sabor	Algas	Insípido

3.3. *Análisis Microbiológico*

Tabla 3

Comparación con los parámetros microbiológicos con el ECA

	Coliformes Totales	Coliformes termotolerantes	E. Coli
Datos Pre	>1600 NMP/100ml	>1600 NMP/100ml	>1600 NMP/100ml
Datos Post	6.1 NMP/100ml	6.1 NMP/100ml	<1.8 NMP/100ml
ECA	1000 NMP/100ml	1000 NMP/100ML	100 NMP/100ML
Eficiencia	100%	100%	100%

Los resultados se compararon para los coliformes totales con la normativa D.S. 015-2015 – MINAM, resultando con un 6.1 NMP/100ml por lo que no supera a 1000 NMP/100ml. Mientras que en los valores de los coliformes termo tolerantes de 6.1 NMP/100ml y E.coli <1.8 NMP/100ml se comparó con la normativa nueva D.S N° 004-2017-MINAM, encontrándose dentro de los establecido, esto indica que los resultados son aceptables.

3.4. *Eficiencia del Humedal de flujo subsuperficial*

Tabla 6

Eficiencia general de humedal artificial de flujo subsuperficial en comparación con el ECA

Parámetros	Pre	Post	ECA	Eficiencia
Ph	6.9	6.9	8.5	100%
Temperatura(°C)	22.4 °C	22.1 °C	25	100%
Turbiedad (UNT)	108.5 UNT	14.9 UNT	0	---
Conductividad (uS/cm)	790 uS/cm	5.82 uS/cm	2500	100%
Oxígeno disuelto	7.25 ppm	4.11 ppm	4	43.3%
Sólidos Totales	390	226	0	---
BDO ₅	41	15.58	15	96.01%
Fosfato	2.07	0.05	0	---
DQO	90.2	45.1	40	50%
Coliformes totales	>1600	6.1 NMP/100ml	100 NMP/100ml	100%
Coliformes termotolerantes	>1600	6.1 NMP/100ml	100 NMP/100ml	100%
E. coli	>1600	<1.8 NMP/100ml	100 NMP/100ml	100%
Total				60.72%

En resumen se muestra la eficiencia del humedal artificial de flujo horizontal con macrófita de alocaasia, en un 60.72% lo que indica la viabilidad de la remoción de los parámetros fisicoquímico y microbiológicos.

3.5. Datos estadísticos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos (T-Student)

a) Análisis Fisicoquímicos

Nivel de significancia

Alfa= 5% = 0.05

Prueba de hipótesis

H₁: Existe una diferencia significativa entre la media de los parámetros fisicoquímicos del pre análisis y la media del post análisis de agua residual.

H₂: No existe una diferencia significativa entre la media de los parámetros fisicoquímicos del pre análisis y la media del post análisis de agua residual.

Tabla 1:

Diseño estadístico T- student, parámetros fisicoquímicos

	Pre - análisis	Post - análisis
--	----------------	-----------------

Media	162.04	37.84
Varianza	70261.977	5159.344125
Observaciones	9	9
Coefficiente de correlación de Pearson	0.29	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	1.46924038	
P(T<=t) una cola	0.089980831	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	0.179961662	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Se acepta la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% ya que existe una diferencia significativa entre las medias del parámetro fisicoquímicos ya que hubo una variación tanto en el pre – análisis siendo de 162.04 y post análisis es de 37.84

b) Análisis microbiológicos

Alfa= 5% = 0.05

Prueba de hipótesis

H₁: Existe un diferencia significativa entre la media de los parámetros microbiológicos del pre análisis y la media del post análisis de agua residual.

H₂: No existe un diferencia significativa entre la media de los parámetros microbiológicos del pre análisis y la media del post análisis de agua residual

Tabla 2

Diseño estadístico T- student, parámetros microbiológicos

	<i>Pre - análisis</i>	<i>Post - análisis</i>
Media	1600	4
Varianza	0	5.886666667
Observaciones	4	4
Coefficiente de correlación de Pearson	0.29	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	1315.613013	
P(T<=t) una cola	4.84234E-10	
Valor crítico de t (una cola)	2.353363435	
P(T<=t) dos colas	9.68468E-10	
Valor crítico de t (dos colas)	3.182446305	

Se acepta la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95% ya que existe una diferencia significativa entre las medias del parámetro microbiológico ya que hubo una variación tanto en el pre – análisis siendo de 1600 y post análisis es de 4.

4. Conclusiones

Se concluye que la eficiencia en remoción general del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal con macrófita de alocaisia fue de 60.72%, ya que hubo eficacia de remoción del 54.4% en los parámetros fisicoquímicos y un 100% en parámetros microbiológicos. Por lo tanto, el diseño e implementación del humedal artificial es una alternativa viable para tratar agua residual desde el punto de vista ambiental y económica y ostenta ventajas atractivas para el apoyo de la conservación del ambiente ya que no requieren grandes insumos de energía o máquina para su operación.

Recomendaciones

Se recomienda el uso de tecnologías limpias y económicas para el tratamiento de aguas, como motivar a seguir con la investigación relacionado al tema.

Referencias

- Decreto Supremo N° 015-2015 – MINAM (2015) *El Peruano*. Lima – Perú
- Decreto Supremo N° 004-2017- MINAM (2017) *El Peruano*. Lima – Perú
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. *Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua Cochabamba – Bolivia*
- Jaramillo, A. (1996). Bioingeniería de aguas residuales. *ACODAL Colombia*.
- Kolb, P. (1998). Desing of constructed weland (pilot plant) for the reclamation of the river besós. *Universidad fur bodenkultur*. Austria.
- Kura, B., la Motta, E., Tittlebaum, M., Alawady M. (1997) Macroscopic BOD Kinetic Model for Microbial Rock Plant Filter Desing. *Advances in Evironmental* (pp. 36 – 43)
- Lara, J. (1999). Depuración de aguas residualesmunicipales con humedales artificiales. *Universidad Politécnica de Cataluña*. España
- Llangas, W., & Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Lima: Revista del instituto de Investigación.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J. (2004) Biología de los microorganismos. 10° edición. *Person education, S.A*. Madrid – España
- Mayol, M., J. Bogner & P.C. Boyce. 1997. The Genera of Araceae i–xii, 1–370. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Schott. L (1839) Taxonomía de alocaisia macrorrhiza. *Meletemata botánica*
- Seoanez, C. (1999). En Aguas Residuales: Tratamiento por humedales artificiles, fundamentos científicos (págs. 59 - 69) *Mundi - Prensa*. Madrid – España
- Stearman, G. (2003). Pesticide removal from container nursery in constructed wetland cells. *Journal of enviromental Quality*.
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wet - lands for wastewater treatment in the Czech Republic 10 year's experience. *Ecol. Engin*.

Anexos



Figura 3: Materiales y Construcción del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.



Figura 4: Implementación del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.