

# Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la mina Barrick

## Constructed wetlands for treating domestic wastewater in the Barrick mine

***Jorge Luis Minchola Gallardo***

Gerencia Regional de la Producción, Gobierno Regional La Libertad, Perú.

mijoga80@hotmail.com

***Federico Gonzáles Veintimilla***

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad, Perú.

gonveinte@yahoo.es

## Resumen

Esta investigación, analizó el potencial y la viabilidad de uso de un humedal artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en el afán de mitigar el impacto en la minera "Barrick". La muestra lo constituyó el efluente entrada y salida del humedal. Se determinó la concentración de DBO<sub>5</sub> (mg/l), SST (mg/l), Coliformes fecales (NMP/100 ml), Coliformes totales (NMP/100 ml), pH, Temperatura (°C) y Oxígeno disuelto (OD) (mg/l) con respecto al tiempo de retención (TR) (días). También se determinó la remoción porcentual DBO<sub>5</sub>, SST, Coliformes fecales, Coliformes totales y la tasa de incremento de oxígeno. Los resultados permitieron estimar la eficiencia de remoción del DBO<sub>5</sub> (73,00%), SST (84,00%), Coliformes fecales (93,00%), Coliformes totales (86,00%), y la tasa de incremento de oxígeno disuelto fue del 18,73%; se concluye que los humedales artificiales son eficientes en la remoción de contaminantes e incremento de oxígeno disuelto.

**Palabras clave:** Humedal artificial, Aguas residuales domésticas, Remoción, Tasa de incremento, Tiempo de retención..

## Abstract

This research examined the potential and feasibility of using an artificial wetland treating domestic wastewater in an effort to mitigate the impact on mining "Barrick". The sample was constituted by the effluent inlet and outlet of the wetland. The concentration of BOD<sub>5</sub> (mg / l), TSS (mg / l), fecal coliforms (MPN/100 ml), Total Coliforms (MPN/100 ml), pH, temperature (° C) and dissolved oxygen (DO) (mg / l) with respect to retention time (TR) (days). We also determined the percentage removal of BOD<sub>5</sub>, TSS, fecal coliforms, total coliforms and the rate of increase of oxygen. The results allowed to estimate the BOD<sub>5</sub> removal efficiency (73,00%), TSS (84,00%), fecal coliforms (93,00%), Total Coliforms (86,00%), and the rate of increase of oxygen dissolved was 18,73 %, it is concluded that wetlands are efficient at removing contaminants and increase dissolved oxygen.

**Key words:** artificial wetland, domestic wastewater, removal, increase rate, retention time.

## Introducción

Las aguas residuales son aguas con sólidos que por uno u otro medio se introducen en sumideros y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado. En general, las aguas residuales consisten de dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo (Romero, 2008; Otálora, 2011).

En tal sentido, las aguas residuales no tratadas, pueden ocasionar graves problemas ambientales y sanitarios, como infecciones bacterianas, además de mantener vectores y hospedadores. Desde el punto de vista ambiental, la contaminación de las aguas no sólo elimina una buena parte de la vegetación y fauna autóctona acuática, sino que también ocasiona desequilibrios generalizados a todo el ecosistema terrestre.

El exceso de materia orgánica y nutriente en el agua (nitrógeno y fósforo) conduce a la eutrofización. Los coliformes fecales y totales; así como, otros compuestos tóxicos producen envenenamientos y bioacumulación (Fernández *et al.*, 2001).

Debido a esto, es de vital importancia ahondar en el estudio de formas y métodos de purificación del agua que sean de bajo costo, que se acoplen a la naturaleza y que sean eficientes en cuanto a la remoción de contaminantes, en este caso de coliformes fecales y totales; y sólidos suspendidos totales que son elementos altamente perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente (Atlas & Bartha, 2002).

El principal objetivo del tratamiento

de aguas residuales es eliminar o reducir los contaminantes a niveles que no causen efectos nocivos en humanos o en los ambientes receptores (Hedine *et al.*, 1994).

Según Kadlec *et al.* (1993), Knight (1994) y Frers (2012) la tecnología de los humedales artificiales está definida como un complejo ecosistema de sustratos saturados, vegetación (macrófitas) y agua, cuyo objetivo es la remoción de la mayor cantidad de contaminantes del agua residual a través de mecanismos de depuración que actúan en los pantanos como la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación y filtración; biodegradación de la materia orgánica a partir de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos; eliminación de microorganismos patógenos por sedimentación, filtración, toxicidad por antibióticos producidas por las raíces de las macrófitas, absorción en partículas de arcilla y la acción predatoria de otros organismos; remoción de metales pesados atribuido al fenómeno precipitación-absorción; precipitación de los hidróxidos, sulfuros; y ajuste de pH.

En este contexto, el objetivo de la investigación fue demostrar la importancia de los Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas; asimismo, determinar el potencial y la viabilidad de usar un humedal artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas como una alternativa.

## Material y métodos

### Ubicación del área de estudio.

La minera Barrick se ubica en Los Andes peruanos, en el Distrito de Quiruvilca, Provincia de Santiago de Chuco, en la zona norte del país y a una altura entre 3 700-4 200 msnm. Está situada a 140 kilómetros de la ciudad de Trujillo, capital de la Región La

Libertad (Barrick, 2012).

### Material de estudio

El material de estudio lo constituyó el afluente de aguas residuales domésticas de la minera Barrick. Asimismo, el efluente del humedal construido de flujo superficial que fue construido a nivel de planta piloto.

### Métodos y técnicas

#### A. Humedal

##### a. Consideraciones del diseño del humedal

Las consideraciones del diseño desarrolladas según Campbell (1999) y Hurtado (2012), recomiendan algunas reglas para el diseño (Tabla 1). Algunas de ellas se pudo mencionar como: (1) Profundidad, (2) Aspecto de ratio y (3) Velocidad de flujo (Tabla 1).

##### b. Capa impermeable y sustrato

**Tabla 1.** Resumen del criterio de diseño para tratamiento de humedales construidos (Whittar, 2013).

CRITERIOS	RANGO
Profundidad de agua (cm)	< 60
Número de células	Múltiple
Aspecto de ratio L/W	>2/1
Velocidad de flujo (m/s)	0,3048
Tiempo de retención (días)	10

En la construcción total del humedal artificial se utilizó una geomembrana de 1,5 mm de espesor. E igualmente, se usó grava de 1 pulgada de diámetro como sustrato, hasta una altura de 20 cm.

### c. La selección de la vegetación

En el humedal artificial se sembró los rizomas de "tifa" *Typha angustifolia* (Skousen *et al.*, 1994) debido a que es una especie tolerantes y a su fácil adaptación a una gran variedad de condiciones ambientales. La *T. angustifolia* se sembró en el humedal artificial a una altura de 1,50 m, más o menos.

## B. Análisis del efluente líquido

Los parámetros utilizados para evaluar la eficiencia del tratamiento del efluente líquido en humedales artificiales de flujo superficial fueron el Caudal promedio diaria (l/s), Volumen tratado ( $m^3/d$ ),  $DBO_5$  (mg/l), SST (mg/l), Coliformes totales y fecales (NMP/100ml), pH, Temperatura ( $^{\circ}C$ ), Oxígeno disuelto (OD) (mg/l) de acuerdo a lo indicado por el Environmental Protection Agency (1993).

El tipo de muestreo y la frecuencia que se usaron fueron aleatorio sistemático, por el tamaño de la población y lo que hizo difícil determinar una muestra representativa. El muestreo de la caracterización de las aguas ácidas de ingreso al humedal artificial fue de tipo compuesto. Es decir, se tomó 1 litro de muestra puntual en el efluente cada día. Las muestras recolectadas en frascos de boca ancha de polipropileno, se trasladó al laboratorio (Owen *et al.*, 1994).

Para el procedimiento de muestreo, recolección de muestra, tipo de recipiente, etiquetado, manipulación de muestras, transporte a laboratorio de control de calidad de SEDALID S.A., se aplicó los procedimientos de vigencia para el Perú

contenidos en el protocolo de monitoreo de calidad de agua del Ministerio de Energía y Minas (Owen *et al.*, 1994; Ministerio del Ambiente, 2008).

## Procesamiento y Tabulación de datos

La información recolectada, sobre aguas residuales domésticas, tratadas en los humedales artificiales de la minera Barrick, se procesaron en el paquete Excel o SPSS Versión 15.00; elaborándose tablas y gráficas estadísticas descriptivas simples y las respectivas pruebas de regresión lineal para medir la asociación y minimizar la contaminación del agua.

## Resultados

Los parámetros de mayor importancia en el agua residual del campamento minero fueron, el pH, que varió en la primera etapa de 7,72 a 7,07 indicando una disminución de pH. Asimismo, la temperatura varió de  $16,5^{\circ}C$  reduciéndose a  $17,2^{\circ}C$ . Para el caso del caudal, este se mantuvo constante tanto a la salida como a la entrada del humedal; siendo este, para la primera etapa del trabajo de 0,376 l/s; mientras, que el volumen de entrada varió con respecto al de salida, presentando un valor de entrada de  $0,32 m^3$  y uno de salida de  $0,30 m^3$  (Tabla 2).

En la tabla 3 se detalla los resultados obtenidos de la medición de la  $DBO_5$  (mg/l) y  $O_2$  (mg/l) permitieron constatar que el agua residual de la empresa minera contiene concentraciones altas. Las aguas residuales tuvo una concentración de 36,80 mg/l de  $DBO_5$  disminuyendo a 9,80 mg/l y el  $O_2$  fue de 0,26 mg/l, incrementándose a 3,12 mg/l. De esta manera, los porcentajes de remoción promedio fueron de un 73,00% para  $DBO_5$  y en el caso del  $O_2$  disuelto se encontró un aumento porcentual del 82,00% y una tasa de incremento periódica del 18,73 % (Tabla 3).

Para el caso del SST, la concentración a 11 mg/l en el último día en el efluente comenzó siendo para el primer día de salida y con un valor porcentual de alrededor de 69,33 mg/l, disminuyendo a 11 mg/l en el último día en el efluente de salida y con un valor porcentual de retención igual al 84%, (Tabla 4).

**Tabla 2.** Valores promedios para parámetros de aguas residuales del módulo experimental del sistema.

PARAMETRO	ETAPA	
	Entrada	Salida
Caudal (l/s)	0,376	0,376
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,32	0,30
pH	7,72	7,07
Temperatura (°C)	19,8	17,2

**Tabla 3.** Valores de las concentraciones promedio de DBO (mg/l) de las muestras y porcentaje de remoción de la carga orgánica de las aguas residuales.

T i e m p o retención (días)	Demanda Bioquímica Oxígeno		Oxígeno Disuelto	
	mg/l	%	mg/l	%
1	36,80	----	0,26	----
2	29,24	0,21	0,89	0,37
3	26,93	0,27	1,16	0,52
4	23,06	0,37	1,37	0,59
5	20,12	0,45	1,65	0,66
6	18,90	0,49	1,96	0,71
7	15,49	0,58	2,20	0,75
8	12,98	0,65	2,56	0,78
9	11,12	0,70	2,76	0,80
10	9,80	0,73	3,12	0,82

**Tabla 4.** Valores de concentraciones promedio y porcentaje de retención de SST (mg/l) de las aguas residuales.

Tiempo de retención (días)	Concentración (mg/l)	Porcentaje de Retención
1	69,33	----
2	53,54	0,23
3	44,56	0,36
4	38,21	0,45
5	34,57	0,50
6	25,62	0,63
7	18,98	0,73
8	14,87	0,79
9	11,42	0,84
10	11,00	0,84

Los resultados de la cuenta de bacterias, se muestran en la tabla 5. Se encontraron que la concentración de coliformes totales, presentó un valor inicial de  $670 \times 10^4$  NMP/100ml disminuyendo a  $96,3 \times 10^4$  NMP/100ml; con un 86% de remoción y, en los coliformes fecales se encontró, un valor inicial de  $135 \times 10^4$  NMP/100 ml, reduciéndose hasta un valor  $9,5 \times 10^4$  NMP/100ml, con un porcentaje de remoción del 93%. Dichos valores, indican que existen

bacterias asociadas al sustrato y en mayor proporción a la rizósfera. Estos resultados, ponen de manifiesto la presencia de los microorganismos en el sistema, establecidos como biopelícula sobre el sustrato (tezontle y arena) y asociados a las raíces de las plantas. Además, estos datos sugieren que no existe una correlación entre el número de bacterias y la especie de las plantas que se instalaron en el sistema.

**Tabla 5.** Valores de las concentraciones de coliformes fecales (NMP/ 100ml) de las muestras y porcentaje de remoción de la carga orgánica de las aguas residuales.

Tiempo de retención (días)	COLIFORMES TOTALES		COLIFORMES FECALES	
	Concentración ( $10^4$ NMP/100ml)	Porcentaje de retención	Concentración ( $10^4$ NMP/100ml)	Porcentaje de retención
1	670,0	----	135,0	----
2	560,0	0,16	126,0	0,07
3	480,0	0,28	122,0	0,10
4	450,0	0,33	79,0	0,41
5	370,0	0,45	47,0	0,65
6	200,8	0,70	32,0	0,76
7	170,4	0,75	19,4	0,86
8	150,4	0,78	17,0	0,87
9	130,6	0,81	10,3	0,92
10	96,3	0,86	9,5	0,93

En las figuras 1, se analizó la relación entre los coliformes totales y el  $O_2$ , la cual tuvieron una relación inversa, indicándose que, mientras el oxígeno se incrementó, los coliformes totales disminuyeron y su remoción aumentó, observándose un grado

de asociación del 94,95%. En la figura 2, se presentó el caso de coliformes totales y el  $DBO_5$ , se logró determinar una relación directa; presentando un grado de asociación del 94,91%.

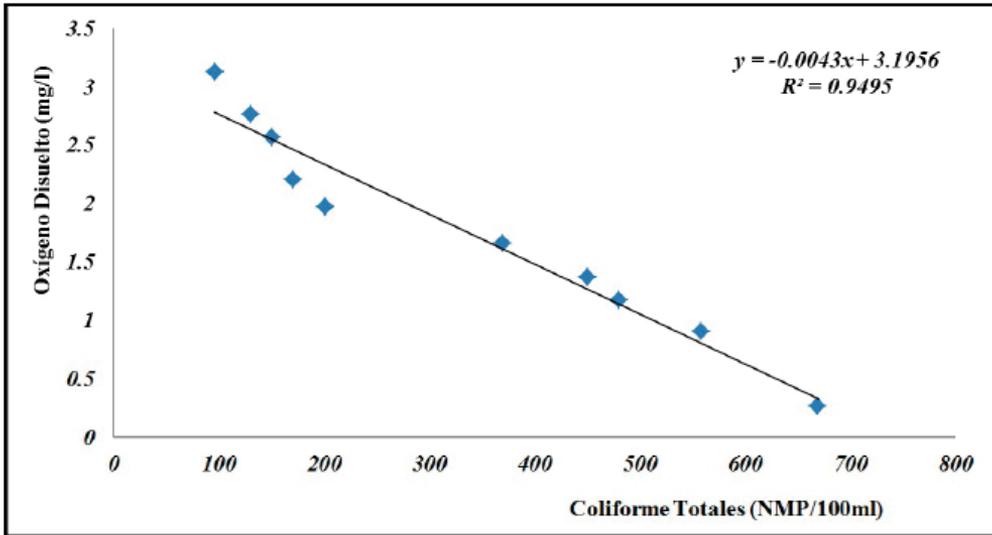


Fig 1. Grado de asociación entre los Coliformes Totales y el Oxígeno Disuelto.

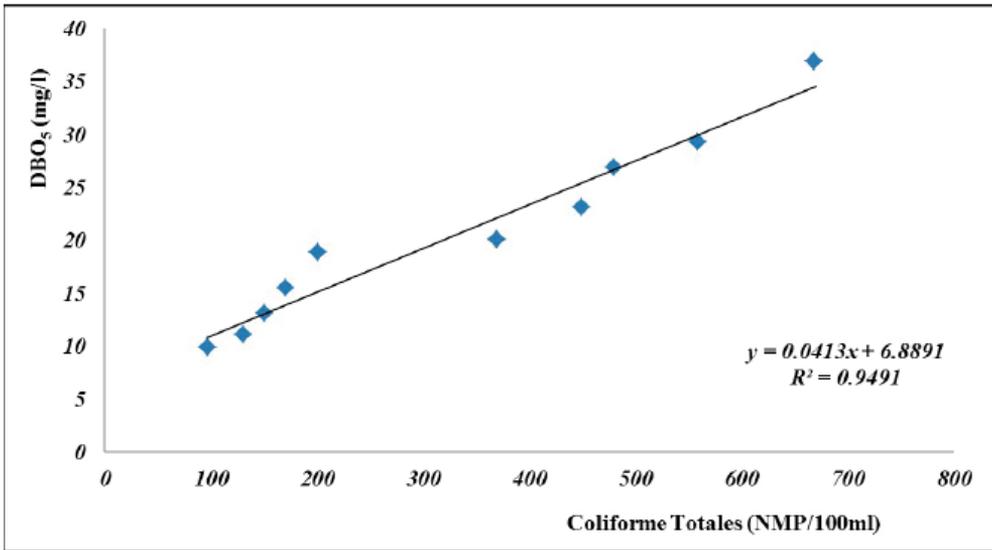


Fig 2. Grado de asociación entre los Coliformes Totales y el DBO<sub>5</sub>.

El  $DBO_5$  y el oxígeno disuelto, presentaron un grado de asociación estadísticamente significativo del 98,03% y una relación inversa; es decir, mientras

la remoción de  $DBO_5$  aumentó y su concentración disminuyó, así mismo, el oxígeno disuelto se incrementó (Figura 3).

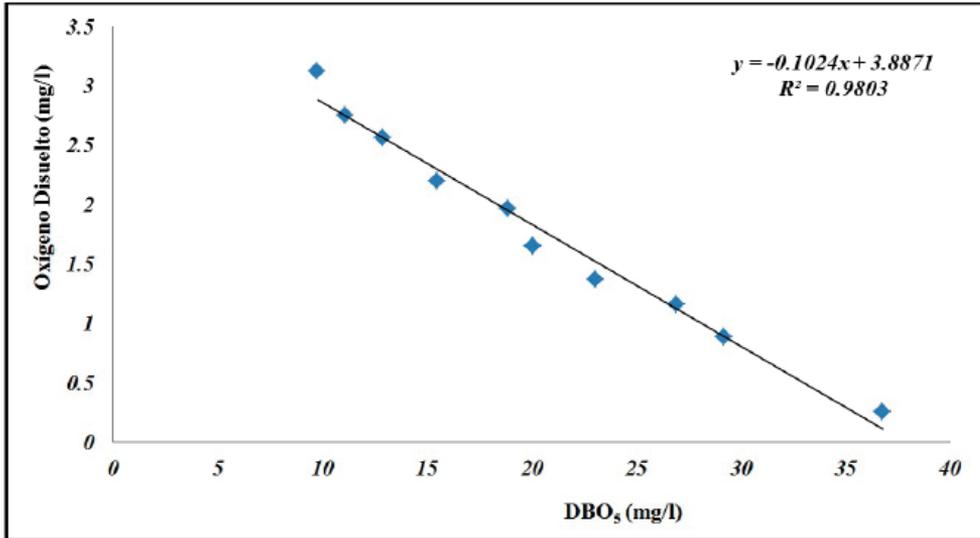


Fig.3. Grado de asociación entre el  $DBO_5$  y oxígeno disuelto.

### Discusión

En esta investigación, se logró determinar, que el humedal permitió incrementar el oxígeno disuelto en el efluente, lográndose recuperar hasta un 18,73% de oxígeno; esto coincide con lo reportado por Zuñiga (2004) quien señala que los humedales construidos permiten una recuperación de hasta el 40% de oxígeno en los efluentes de aguas residuales domésticas.

Quipezco (2002) reporta que los humedales artificiales en alguna etapa no presentan reducciones de las concentraciones de la  $DBO_5$  y SST más bien, los valores se incrementan debido al arrastre de raíces o desprendimiento de la biopelícula formada alrededor de los rizomas. Así, se provoca su degradación en el medio y por lo tanto, el incremento en compuestos orgánicos e inorgánicos que aumentan la concentración

de la  $DBO_5$  y SST. Por otro lado, de acuerdo con Korkusuz, Beklioglu, & Demirer (2004), las concentraciones de los nutrientes y de la carga orgánica en el efluente de entrada y salida son afectadas por cambios en el volumen del agua en el sistema, debido a los efectos de la precipitación pluvial, de la evaporación y de la evapotranspiración. Los dos últimos procesos, concentran especialmente los componentes en el humedal, ya que el volumen de agua baja y las concentraciones de nutrientes y carga orgánica se incrementan.

De acuerdo con la remoción de la  $DBO_5$  y SST de las aguas residuales, el tiempo de retención hidráulica óptimo del sistema es de 10 días en los módulos donde se encuentra instalado *T. angustifolia* fueron óptimos sin requerir un tiempo de retención menor; concordando con los resultados por Piñeyro (2011) quien sostiene que un

humedal artificial permite una eficiente remoción de DBO y SST, donde presentaron valores de remoción superiores al 60%.

La carga orgánica del sistema, se comportó de la siguiente manera: DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes presentó una mayor remoción durante la primera etapa del trabajo. En términos globales, la remoción de la materia orgánica en la segunda etapa es menor, probablemente como producto de la descomposición de la misma por las biopelículas microbianas formadas sobre el tezontle.

Otálora (2011) y Piñeyro (2011) indicaron en sus resultados de remoción para sólidos suspensión totales, que los humedales artificiales, son eficientes como tratamiento (remoción de materia orgánica); presentando valores superiores al 95%; esto coincide, con lo encontrado en la investigación donde se encontró valores de remoción superiores al 70% para SST.

Con respecto a los coliformes fecales, los resultados indican una alta eficiencia del sistema, independientemente de la etapa de monitoreo. Algunos sistemas en Europa, usan arena en lugar de grava, para aumentar la capacidad de retención de coliformes fecales, pero este medio requiere instalaciones muy grandes, debido a la reducida conductividad hidráulica de la arena comparada con la grava (Lara, 1999).

De manera general, considerando los resultados individualmente, etapa I, es donde se presentan la mejor eficiencia de remoción, lo que sugiere que el establecimiento que una primera instancia, el humedal da mejores resultados utilizando *Typha*. No obstante, se requieren análisis complementarios y mayor tiempo de operación del sistema para llegar a conclusiones más contundentes señalados por Zuñiga (2004) y Piñeyro (2011).

Los coliformes fecales y totales presentaron un alto porcentaje de remoción, llegando hasta un 90%; coincidiendo con lo expuesto por Villarroel (2005) y Otálora (2011) quienes señalan, que los humedales construidos permiten una remoción de 89% hasta un 99%; pero, difiriendo de lo expuesto por Piñeyro (2011) que indica que los coliformes totales tuvieron un importante incremento en el efluente de salida respecto al efluente de ingreso. Una destacada contribución de coliformes puede atribuirse a la presencia de aves. Estos fueron observados alimentándose en los humedales artificiales, dejando sus excreciones fecales en la superficie de los mismos.

El diseño del humedal artificial aplicado en el sistema, no incluyó el análisis del comportamiento de la carga orgánica, de los nutrimentos y de los microorganismos del agua residual en un módulo sin plantas (sólo sustrato). El sustrato es un material importante, ya que cumple con varias funciones, como ser el medio de soporte de los microorganismos y de las plantas, además, de funcionar como medio filtrante para retener los sólidos suspendidos que se depositan en la superficie del sustrato, para luego ser degradados por los microorganismos. No obstante, el material utilizado en este trabajo ya ha sido estudiado anteriormente y la información pertinente ya se ha reportado por Fenoglio (2000).

## Conclusiones

El efluente resultante, de acuerdo a lo establecido en los estándares nacionales peruanos, no califica para ningún uso; pues la concentración de coliformes totales está por encima de los 10 000 NMP/100 ml.

Los humedales artificiales resultan ser ecosistemas eficientes en el tratamiento

de aguas residuales de una manera segura, confiable, estética y económica. Los humedales artificiales permiten una eficiente remoción de contaminantes ya que no requieren de suministro de energía adicional, su funcionamiento se basa en la actividad combinada de plantas, microorganismos y sustrato, que en conjunto propician una depuración eficiente.

### Literatura citada

- Atlas, R. & R. Bartha.** 2002. Ecología microbiana y Microbiología ambiental. México: Prentice Hall.
- Barrick.** 2012. [En línea]. Barrickperu.com. Obtenido de BARRICK PERÚ. [28 de mayo del 2012]. <http://www.barrickperu.com/barrick/lagunas.html>
- Campbell, J.** 1999. Understanding water balance in landfill sites. *Wastes management*, 594 - 605.
- Environmental Protection Agency.** 1993. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 1993. Sub-surface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment a Technology Assessment. S.C. Reed, ed., EPA/832/R-93/008. US EPA Office of Water. Washington. Washington: EPA.
- Fenoglio, L.** 2000. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical. México: Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fernández, J.; E. De Miguel; J. De Miguel & M. Curt.** 2001. Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Madrid: Fundación Global Nature, Universidad Politécnica de Madrid.
- Frers, C.** 2012. [En Línea]. [elmercuriodigital.es](http://elmercuriodigital.es). Obtenido de El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. [19 de mayo del 2012]. <http://elmercuriodigital.es/content/view/5520/174/>
- Hedine, R.; R. Nairn & R. Kleinmann.** 1994. *Passive treatment of polluted coal mine drainage*. New York: United States Department of Interior.
- Hurtado, D.** 2012. Humedales construidos de flujo superficial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas del campamento Llamo - Llamo de la minería aurífera Santa Rosa - Angasmarca, Santiago de Chuco, La Libertad, Perú 2012. Trujillo: Maestría en Ciencias, Escuela de Postgrado, Universidad Nacional de Trujillo.
- Kadlec, R.; W. Bastiacens & D. Urban.** 1993. Hydrological design of free water surface treatment wetlands. Chelsea: Lewis Publishers.
- Knight, R.** 1994. Treatment wetlands data base now available. *Water environment & technology*, 31 - 33.
- Korkusuz, E.; M. Bekioglu & G. Demirer.** 2004. Treatment efficiencies of the vertical flow pilot-scale constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 333 - 344.
- Lara, J.** 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona: Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ministerio Del Ambiente.** 2008. Aprueban Los Estándares Nacionales de calidad ambiental para agua. DS-002-2008-MINAM. Lima: MINAM.
- Otálora, A.** 2011. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Owen, H.; R. Aquino & F. Bernabel.** 1994. Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua. Lima: República del Perú / Ministerio de Energía y Minas.
- Piñeyro, M.** 2011. Eficiencia en la depuración de un efluente de frigorífico por humedales construidos a escala. Montevideo: Universidad de la Republica.
- Quipuzco, E.** 2002. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr.*, 52 - 57.
- Romero, J.** 2008. Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Skousen, J.; A. Sextone; K. Garbutt & J. Sencindiver.** 1994. Acid mine drainage treatment with wetlands and anoxic limestone drains. *Applied wetlands science and technology*, 263 - 281.
- Villarreal, C.** 2005. Tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales El Corchito para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial. Trujillo: Escuela de Postgrado - UNT, Programa doctoral en medio ambiente, Universidad Nacional de Trujillo.
- Whittar.** 2013. [En línea]. [Biblioteca.unmsm.edu.pe](http://biblioteca.unmsm.edu.pe). Obtenido de criterio de diseño para tratamiento de humedales construidos. [16 de julio de 2013]. <http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAm>

biente/DAMhumedales.pdf

**Zuñiga, J.** 2004. *Influencia del soporte y tipo de macrófita en la remoción de materia orgánica y nutrientes en humedales construidos de flujo Subsuperficial horizontal*. Valparaíso: Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

