

## Use of subsurface flow constructed wetlands for the removal of copper and lead from oil production water

**Edith Blanco Fontalvo<sup>1\*</sup>, Ninoska Paz<sup>1</sup>, Edixón Gutiérrez<sup>1</sup>,  
Yaxcelys Caldera<sup>2</sup>, Marisel Núñez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado postal 526. Maracaibo 4011, Venezuela. \* [edithblanco.1502@gmail.com](mailto:edithblanco.1502@gmail.com)

<sup>2</sup>Laboratorio de Investigaciones Ambientales del Núcleo Costa Oriental del Lago (LIANCOL), Universidad del Zulia (LUZ). Cabimas, Venezuela.

<sup>3</sup>Universidad Experimental Rafael María Baralt (UNERMB). Cabimas, Venezuela.

### Abstract

Subsurface Flow Constructed Wetlands (SFW) are natural purification systems characterized because has bed contains a porous mean in which are emergent aquatic plants. During this investigation the efficiency of the SFW, for the removal of copper and lead present in water from oil production, (OPW) was evaluated. A system conformed by two polythene trays with 0,175 m<sup>3</sup> capacity was used. In one tray these emergent species were implanted: *Typha dominguensis*, *Cyperus luzulae*, *Cyperus feraz L.* C and *Cyperus ligularis L.*, one second tray was used as control (C) without plants. The organic load was 29.42 g/m<sup>2</sup>d and the hydraulic retention time (TRH) was 7 days. The wetland's bed was provided of a gravel layer of 15 cm thickness with different granulometry. A weekly sampling was taken during four months. The metals copper and lead quantification was carried out through the instrumental technique of Atomic Absorption Spectrophotometry and the methodologies described in the Standard Methods. The results indicate statistically significant differences (P<0,05) between the removals of evaluated copper and lead in SFW and C. The average removals of copper and lead in the SFW were: 57.89% and 52.92% respectively whereas in C the copper removal was 39.91% and the of lead 22.94%. The results allow concluding that constructed wetlands are partially efficient for the removal of copper and lead water from oil crude production.

**Keywords:** Water from oil crude production, constructed wetlands, subsurface flow, emergent aquatic plants, heavy metals.

## Uso de humedales construidos de flujo subsuperficial para la remoción de cobre y plomo de aguas de producción de petróleo

### Resumen

Los humedales construidos de flujo subsuperficial (HFS) son sistemas de depuración natural que se caracterizan porque su lecho contiene un medio poroso en el cual se encuentran plantas macrófitas emergentes. Durante esta investigación se evaluó la eficiencia de los HFS para la remoción de cobre y plomo presentes en aguas de producción de petróleo (APP). Se empleó un sistema conformado por dos bandejas de polietileno de 0,175 m<sup>3</sup> de capacidad. En una bandeja se implantaron las especies emergentes: *Typha dominguensis*, *Cyperus luzulae*, *Cyperus feraz L.* C y *Cyperus ligularis L.*, una segunda bandeja se empleó como control (C) sin plantas. Se trabajó con una carga orgánica de 29,42 g/m<sup>2</sup>d y un tiempo de retención

hidráulico (TRH) de 7 días. El lecho del humedal estuvo provisto de una capa de grava de 15 cm de espesor con diferente granulometría. Se realizó un muestreo semanal durante cuatro meses. La cuantificación de los metales cobre y plomo se llevó a cabo a través de la técnica instrumental de espectrofotometría de absorción atómica y las metodologías descritas en el Standard Methods. Los resultados indican diferencias estadísticamente significativa ( $P < 0,05$ ) entre las remociones de cobre y plomo evaluados en el HFS y C. Las remociones medias de cobre y plomo en el HFS fueron: 57,89% y 52,92%, respectivamente mientras que, en C la remoción media de cobre fue 39,91% y la de plomo 22,94%. Los resultados permiten concluir que los humedales construidos de flujo subsuperficial son eficientes para la remoción de cobre y plomo de las aguas de producción de petróleo.

**Palabras clave:** Agua de producción de petróleo, humedales construidos, flujo subsuperficial, macrófitas emergente, metales pesados.

## Introducción

El objetivo de este estudio es evaluar la eficiencia de los humedales construidos de flujo subsuperficial (HFS) para la remoción de cobre y plomo de las aguas de producción de petróleo (APP). Los HFS constituyen sistemas pasivos de depuración que se caracterizan porque el agua fluye a través de un medio poroso con el cual se remueven contaminantes especialmente materia orgánica biodegradable, nutrientes y metales pesados [1], a través de procesos físicos, químicos y biológicos, tales como: sedimentación, precipitación, adsorción a las partículas del suelo, transformaciones microbiana y asimilación en los tejidos de las plantas [2]. Las plantas que se desarrollan en los humedales juegan un papel primordial en la remoción de contaminantes, debido a su particular fisiología y ecología, estas macrófitas tienen la capacidad de depurar el agua mediante la asimilación directa de nutrientes (en especial nitrógeno y fósforo) y metales que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal [2]. Las macrófitas más empleados para la depuración son *Typha latifolia*, *Scirpus lacustris*, *Phragmites communis*, *Juncus spp* [3] *Typha dominguensis*, *Typha angustifolia*, *Patometon spp* [4].

La industria petrolera venezolana, Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA) genera un millón de barriles diarios de APP [5] que por lo general contienen una significativa carga de metales pesados. Un gran número de investigaciones [6-8] indican que estas concentraciones se encuentran alrededor de  $0,19 \pm 0,05$  mg/L de Cu;  $0,31 \pm 0,09$  mg/L de Cr;  $0,17 \pm 0,09$  mg/L de Pb;  $0,20 \pm 0,05$  mg/L de Ni y  $0,32 \pm 0,9$  mg/L de Zn. Actualmente, este efluente es almacenado en unidades diseñadas para tal fin. Sin embargo,

una vez colapsados estas unidades la solución inmediata para su disposición descargar las APP a los cuerpos de agua, trayendo como consecuencia un problema de tipo sanitario y ambiental debido a la transferencia de los metales pesados a la cadena trófica, al disponer inadecuadamente estos efluentes en los cuerpos de agua.

## Parte experimental

### Área de estudio

Las APP utilizadas para esta investigación se colectaron en la tubería de entrada al tanque clarificador del patio de tanques de Ulé, ubicado entre las carreteras B y C Avenida Intercomunal sector La Vaca en el Municipio Simón Bolívar, de la Costa Oriental del Lago (COL) del estado Zulia, Venezuela. Las muestras se almacenaron en recipientes de polietileno de 22 L de capacidad.

### Adaptación y reproducción de las macrófitas

La adaptación y reproducción de las macrófitas acuáticas vasculares *Cyperus luzulae*, *Cyperus feras L.*, *Cyperus ligularis L.* y *Typha dominguensis* se llevó a cabo en una fosa de  $2,5 \text{ m}^2$  de extensión dividida en cuadrículas, separadas por una maya de polietileno. La fosa se alimentó diariamente con 3,75 L de agua potable para mantener el grado de humedad requerido. Una vez reproducidas las macrófitas en la fosa, se podaron a una altura de tallo de 10 cm y se implantaron en una bandeja de polietileno, denominada humedal de flujo subsuperficial (HFS). Las macrófitas se dispusieron en filas intercaladas dejando una separación de 25 cm entre plantas y una distancia igual entre filas. Una segunda ban-

deja se utilizó para efectos de control (C) sin plantas. Las dimensiones del HFS y C fueron: 1,28 m de largo por 0,45 m de ancho y una profundidad de 0,25 m. El lecho estuvo constituido por 86400 cm<sup>3</sup> de un medio granular (grava) como soporte y un nivel de agua de potable de 1,5 L para simular un sistema natural de humedal. La sustitución de la misma por APP se llevó a cabo considerando las proporciones siguientes 60:40 y 40:60 (agua potable:agua de producción de petróleo). El cambio de proporción se realizó cada 8 días hasta el 100% de APP en los humedales.

La alimentación del HFS y C con APP, se llevó a cabo empleando un tanque de polietileno de 520 L de capacidad, del cual descendió el agua por efectos de la gravedad. El volumen de afluente consumido por el sistema se restableció cada dos días. Se trabajó a flujo continuo, sin recirculación del efluente hacia el tanque de alimentación, con una carga orgánica del afluente de 29,42 g/m<sup>2</sup>d, un caudal de 10 mL/min y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 7 días. El caudal y el TRH se controlaron a través de un sistema de válvulas conectadas a un sistema de tuberías que sirvieron para asegurar la distribución adecuada del afluente y la recolección uniforme del efluente.

### Tratamiento de las APP

La recolección de muestras en el sistema de humedales consistió en captar semanalmente durante cuatro meses tres muestras de afluente (n=48) y efluente (n=48) del sistema. Utilizando recipientes de polietileno de 500 mL. Las muestras se dejaron reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Las determinaciones analíticas se realizaron por triplicado. La cuantificación de los elementos metálicos cobre y plomo presentes en el afluente y efluente se realizó a través de la técnica instrumental de Espectrofotometría de Absorción Atómica (Thermo Scientific modelo Spectrometer Series AA). Previo al análisis espectrométrico, las muestras fueron sometidas a digestión ácida en bombas de teflón con HNO<sub>3</sub>:HCl (3:1), durante 4 horas.

La determinación de la concentración de alcalinidad y sulfuros se realizó por volumetría, mientras que la de sulfato y la DQO se llevó a cabo a través del método espectrofotométrico (HACH DRL 6000). La medición del pH se realizó

a través del método potenciométrico, usando un pH-metro (Orion Research 611). En todos los casos se siguieron las metodologías descritas en el Standard Methods [9].

### Tratamiento de las plantas y soporte

Las muestras de plantas y soporte (grava) se recolectaron al inicio y culminación de la investigación. La recolección de las muestras de grava (n=3) se llevó a cabo empleando la técnica del cuarteo, mientras que las muestras de plantas (n=10) se recolectaron en bolsas de papel, las especies fueron separadas en raíces y hojas. Todas las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente hasta alcanzar peso constante, se trituraron y se sometieron a digestión en bombas de teflón con HNO<sub>3</sub>:HCl (3:1), durante cuatro horas, el extracto se filtró por gravedad, recolectando el filtrado en un balón aforado [10] y finalmente se cuantificó la concentración de cobre y plomo a través de la técnica instrumental de Espectrofotometría de Absorción Atómica (Thermo Scientific modelo AA. Spectrometer Series).

### Exactitud y precisión

Se definió un estudio de exactitud y precisión de diferentes muestras del sistema de tratamiento, con la finalidad de validar analíticamente la metodología para la determinación de los metales cobre y plomo por espectrometría de absorción atómica. Para evaluar la exactitud (expresada como porcentaje de recuperación), se realizaron adiciones estándar sobre varias muestras antes de la digestión (n = 3), utilizando tres niveles de concentración para cada metal, a partir de soluciones certificadas de 1000 mg/L (MERCK). Para conocer la variabilidad en la reproducibilidad de las mediciones (precisión), se calculó la desviación estándar relativa de muestras analizadas por triplicado (n = 3).

El límite de detección (LD) del espectrofotómetro de absorción atómica (Thermo Scientific modelo AA. Spectrometer Series) empleado para esta investigación es de 0,07 mg/L para el Cu y 0,09 mg/L para el Pb.

### Tratamiento de datos

Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis estadístico descriptivo calculando la

media, mediana y desviación estándar, con la finalidad de evaluar la reproducibilidad de los resultados. También se realizó un estudio de correlación simple para establecer la influencia de los parámetros fisicoquímicos y las concentraciones finales de los metales. Todas las evaluaciones estadísticas se realizaron usando el programa estadístico comercial SSPS.

## Resultados y discusión

El estudio de recuperación realizado para validar analíticamente la metodología de análisis de los metales, mostró valores medios de: cobre 99,01% y plomo 98,26%, los cuales se encuentran dentro del rango generalmente aceptado para un estudio de adición estándar ( $100 \pm 5\%$ ). Por otra parte, la precisión expresada como desviación estándar relativa (DSR) se encontró por debajo de 5% (DSR = 2,41%), mostrando un grado de variabilidad aceptable en las repeticiones de los análisis. Estos resultados evidencian la ausencia de interferencias espectrales en el análisis espectrofotométrico de metales [11], así como la confiabilidad de la metodología.

### Metales en APP

En la Figura 1, se muestra el comportamiento en % de la eficiencia de remoción de cobre y plomo en el HFS y C. La remoción promedio de cobre y plomo para HFS fue 57,89% y 52,92% respectivamente mientras que, para C se obtuvieron remociones promedio de cobre de 39,91% y plomo de 34,79%.

El análisis de regresión con un nivel del 95% de confianza entre la variables pH y concen-

tración de sulfuro con respecto a la variable remoción de cobre en el HFS, revelan una asociación significativa muy alta ( $r: 0,9288$  y  $0,849$  respectivamente). Para la variable remoción de plomo, la asociación entre el pH revela una relación lineal muy alta y positiva ( $r: 0,8437$ ) mientras que, para el sulfuro se obtuvo una asociación directa moderada positiva ( $r: 0,5721$ ).

En el C, la asociación entre la remoción de cobre y las variables pH y concentración de sulfuro resultaron nula ( $r: 0,0588$ ) y muy baja y negativa ( $r: -0,1520$ ) respectivamente. Las asociaciones entre la variable remoción de plomo y el pH resultaron muy bajas ( $r: 0,1626$ ), con respecto a la concentración de sulfuro la relación fue muy baja y negativa ( $r: -0,061$ ).

El comportamiento del pH y la alcalinidad total en el sistema bajo estudio, evidencian el desarrollo de procesos físicos, químicos y biológicos, asociados con los materiales de soporte utilizados y la presencia de plantas y otros organismos desarrollados durante el período de estudio. Los valores obtenidos durante el período de estudio se consideran adecuados como para garantizar el desarrollo de una comunidad biológica capaz de participar en el proceso de tratamiento [12, 13]. Diversos procesos microbiológicos contribuyen a mantener la alcalinidad en estos sistemas de tratamiento, entre los que se encuentran: desnitrificación, amonificación, metanogénesis y reducción de sulfatos, de hierro y de manganeso [12, 14, 15].

Los resultados obtenidos indican que la remoción de cobre y plomo en el HFS se encuentra asociada a factores fisicoquímicos y microbiológicos que interfieren en la inmovilización y/o pre-

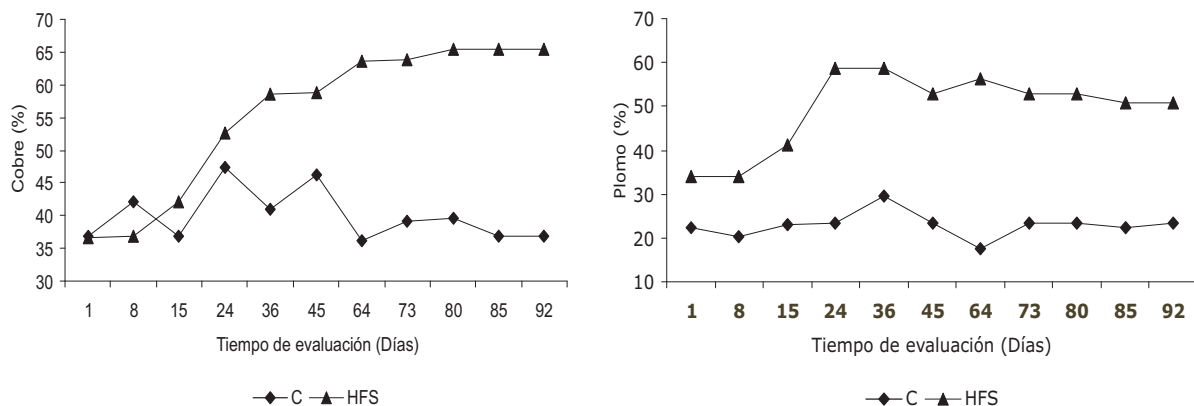


Figura 1. Remociones de cobre y plomo en el humedal y el control.

cipitación de los iones metálicos presentes en la columna de agua. Entre estos factores se destacan el valor del pH y la concentración de sulfuro según los planteamientos señalados por Mant y col. [16], en los cuales se establece que las bacterias sulfatoredutoras (SBR) producen sulfuro de hidrógeno como consecuencia del proceso redox, lo cual según Groudeva y col. [3] produce la precipitación de los iones metálicos a hidróxidos de cobre y plomo.

A los efectos de esta investigación la presencia de las SBR en el sistema se fundamentó en la comparación del porcentaje de remoción obtenido en C con respecto al HFS, ya que el efluente del primero exhibió características (Tabla 1) de la presencia de este tipo de bacterias en aguas contaminadas con crudo. Según Groudeva y col. [3], estas características son incremento del pH, de la alcalinidad y de la concentración de sulfuros, así como a la baja concentración de iones sulfato y la presencia de compuestos biodegradables.

Estudios realizados Speelmans y col. [17], indican que el grado de movilidad del cobre en el medio acuoso depende del pH y de la alcalinidad del medio ya que el incremento de los mismos limita la solubilidad de las sales de cobre y en consecuencia se favorece la precipitación de los iones cúpricos. La remoción de cobre obtenida en el HFS coincide con los valores remoción reportados por Mays [18], quien encontró remociones de cobre de 45% y 50% durante el tratamiento de aguas residuales domésticas a través de humedales de flujo subsuperficial. La remoción de plomo en el HFS obtenida durante esta investigación es superior a la reportada por Mant y col. [16],

quienes obtuvieron remociones de plomo de 43% durante el tratamiento de aguas residuales domésticas a través de humedales de flujo subsuperficial.

### Cobre en las macrófitas

En cuanto al papel de las macrófitas en la asimilación de metales, durante esta investigación se evidencia (Tabla 2) que las especies *Typha dominguensis*, *Cyperus feraz* L. y *Cyperus ligularis* L. registraron diferencias significativas ( $P < 0,05$ ), entre las concentraciones iniciales de cobre y las concentraciones obtenidas después de la aplicación del agua de producción. La especie *Cyperus luzulae* no registró diferencias significativas ( $P > 0,05$ ). El comportamiento de esta especie probablemente se encuentre asociado al poder de discriminación de la misma, entre los elementos que le son esenciales y aquellos que no lo son. En virtud de lo cual Llugany y col. [19], publican que las plantas basan su resistencia a la asimilación de metales en la estrategia de exclusión del metal, restringiendo su transporte hacia el tejido foliar lo cual se corresponde con los resultados obtenidos durante esta investigación.

### Plomo en las macrófitas

El análisis de los resultados de la concentración de plomo en el tejido foliar y radicular de la especie *Cyperus feraz* L., *Cyperus ligularis* L., *Cyperus luzulae* y *Typha dominguensis* registraron diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre las concentraciones iniciales de estos metales y las concentraciones obtenidas después de la aplicación del agua de producción. Los valores reporta-

Tabla 1  
Comparación entre parámetros fisicoquímicos evaluados en el efluente del control y el humedal de flujo subsuperficial

Parámetro	C <sup>a</sup>	HFS <sup>a</sup>
pH	9,24±0,05	8,75±0,04
Alcalinidad (mg/L COCa3)	2382,92±0,04	2507,92±0,04
DQO (mg/L)	1329,78±0,04	65,73±0,05
Sulfuros (mg/L)	37,26±0,05	5,43±0,04
Sulfato (mg/L)	11,62±0,03	12,43±0,04

<sup>a</sup> Valor promedio ± desviación estándar instrumental, C: control, HFS: humedal subsuperficial, DQO: demanda química de oxígeno.

dos en la Tabla 3, indican ausencia de traslocación del plomo hacia el tejido foliar en las especies *Cyperus feraz* L. C, *Cyperus ligularis* L y *Cyperus luzulae*, probablemente, asociado a la capacidad de exclusión de las especies permitiéndole restringir la asimilación de iones tóxicos a sus tejidos.

La concentración de plomo en el tejido de la especie *Typha dominguensis* indican una amplia acumulación de este metal en el tejido radicular con una leve traslocación hacia el tejido foliar. De acuerdo con Llugany y col. [3], las macrófitas almacenan iones metálicos en la raíz y permiten que se dirijan hacia la parte aéreas (hojas) empleando para ello un mecanismo de desintoxicación [20], que le proporciona la capacidad de tolerancia de la especie para almacenar metales pesados en sus tejidos permitiéndole sobrevivir y crecer en ambientes contaminados con plomo.

### Metales en el sustrato

En la Tabla 4, se presentan los valores de la concentración de cobre y plomo en el sustrato del C y HFS antes y después de la aplicación del APP. Los resultados obtenidos registraron diferencias entre la concentración inicial de plomo en el sustrato con respecto a la concentración de este metal después de la aplicación de APP, no así para la variable concentración de cobre.

Los resultados obtenidos podrían explicarse debido al bajo potencial catiónico (-800 meq/100 g) y selectividad del sustrato, donde se condujo el ensayo experimental (grava gruesa) lo cual dificultó el proceso de desplazamiento de los iones de la grava para aceptar los iones de plata y cobre e incorporarlos a su estructura (intercambio iónico), estos planteamientos se corresponde con lo señalado por D' la Cruz [21], quien reporta que la grava gruesa posee una baja estabilidad estructural como elemento de soporte, limitando

Tabla 2  
Concentración inicial y final de cobre en el tejido foliar y radicular de las especies implantadas en el humedal

	Tejido	<i>Typha dominguensis</i>	<i>Cyperus luzulae</i>	<i>Cyperus feraz</i> L.C	<i>Cyperus ligularis</i> L.
Conc. Inicial <sup>a</sup>	Foliar	8,19±0,35 <sup>b</sup>	nd	6,33±0,54 <sup>b</sup>	5,36±0,14 <sup>b</sup>
	Radicular	8,29±0,16 <sup>d</sup>	8,04±0,36 <sup>b</sup>	10,79±0,54 <sup>d</sup>	12,39±0,25 <sup>d</sup>
Conc. Final <sup>a</sup>	Foliar	10,20±0,11 <sup>c</sup>	nd	6,85±0,31 <sup>b</sup>	5,70±0,14 <sup>b</sup>
	Radicular	13,36±0,01 <sup>c</sup>	8,08±0,65 <sup>b</sup>	12,08±0,65 <sup>e</sup>	18,43±0,11 <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Concentración en mg/K ± desviación estándar instrumental. nd: no detectable. Valores seguidos de letras distintas difieren significativamente (P<0,05).

Tabla 3  
Concentración inicial y final de plomo en el tejido foliar y radicular de las especies implantadas en el humedal

	Tejido	<i>Typha dominguensis</i>	<i>Cyperus luzulae</i>	<i>Cyperus feraz</i> L.C	<i>Cyperus ligularis</i> L.
Conc. Inicial <sup>a</sup>	Foliar	nd	nd	nd	nd
	Radicular	nd	nd	nd	nd
Conc. Final <sup>a</sup>	Foliar	0,01±0,01 <sup>b</sup>	nd	nd	nd
	Radicular	1,03±0,01 <sup>c</sup>	0,08±0,02 <sup>d</sup>	0,02±0,01 <sup>e</sup>	0,02±0,01 <sup>e</sup>

<sup>a</sup>Concentración en mg/K ± desviación estándar instrumental. nd: no detectable. Valores seguidos de letras distintas difieren significativamente (P<0,05).

Tabla 4  
Comparación de las concentraciones de cobre y plomo en el sustrato del control y humedal antes y después de aplicar APP

Elemento	Conc. inicial del sustrato	Conc. final del sustrato	
		C	HFS
Cu <sup>a</sup>	8,71±0,54 <sup>b</sup>	10,72±0,12 <sup>b</sup>	9,56±0,10 <sup>b</sup>
Pb <sup>a</sup>	1,74±0,26 <sup>c</sup>	4,08±0,10 <sup>d</sup>	2,79±0,10 <sup>e</sup>

<sup>a</sup>Concentración en mg/K ± desviación estándar instrumental. C: Concentración del elemento en el sustrato de control. HFS: Concentración del elemento en el sustrato del humedal de flujo subsuperficial. Valores seguidos de letras distintas difieren significativamente (P<0,05).

la capacidad de intercambio catiónico y la retención de humedad aún cuando la porosidad es elevada (más del 40% de volumen).

Por otra parte la mayor absorción de plomo en el sustrato del sistema con respecto a la concentración de cobre, se puede explicar debido a la selectividad del sustrato por los iones plúmbicos con relación a los iones cúpricos. Lo cual coincide con los argumentos planteados por Pavón y col. [22] quienes señalan que la selectividad de la grava por los iones metálicos es  $Pb^{+2} > Cd^{+2} > Fe^{+2} > Cu^{+2} > Zn^{+2} > Ni^{+2}$ .

Por su parte Groudeva y col. [3], establecen que la fijación de plomo como catión absorbido en el sustrato es directamente proporcional con valores de pH superiores a 6. Estos argumentos coinciden con los resultados obtenidos durante esta investigación ya que, en el sustrato del control se incrementó la concentración de plomo con respecto a la concentración inicial de este metal.

Con referencia a la concentración de cobre y plomo presentes en el sustrato se evidencia que estas son levemente superiores en C con respecto al HFS, lo cual demuestra el efecto de las macrófitas presentes en el HFS.

### Conclusión

Los humedales de construidos de flujo subsuperficial son eficientes para la remoción de cobre y plomo contenidos en el APP.

La remoción de cobre y plomo de las aguas de producción de petróleo se encuentra principalmente asociada a la biomasa y fisiología de las macrófitas y no a los fenómenos fisicoquímicos de absorción, retención y precipitación que se dan en el humedal de flujo subsuperficial.

### Agradecimientos

Se agradecen las subvenciones otorgados por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) de la Universidad del Zulia para la realización de esta investigación.

### Referencias bibliográficas

1. Lim P., Tay M., Mak K., Mohamed N. "The effect of heavy metals on nitrogen and oxygen demand removal in construed wetlands". *The Science of the total environment*, Vol. 30 (2003) 13-21.
2. Prado M. "Aprovechamiento de los humedales para la disposición y tratamiento de efluentes líquidos". *Visión Tecnológica*, Vol. 5, N° 1 (2007) 59-69.
3. Groudeva V., Groudeva S., Doycheva A. "Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals. *Mineral Processing*", Vol. 62 (2001) 293-299.
4. Timothy P., Gessner R., Kadlec R., Reaves P. "Wetland remediation of cyanide and hydrocarbons". *Ecological Engineering*, Vol. 25 (2005) 457-469.
5. Yokohama L. Phenol degradation in saline effluents of the petroleum industry. Ponencia presentada en: II foro Nacional de Control, Manejo y Disposición de Aguas de Producción de la Industria Petrolera. Maracaibo, Venezuela (2006) 31.
6. Blanco F. Tratamiento de aguas de producción de petróleo a través de humedales construidos de flujo subsuperficial. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. División de

- Postgrado de La Universidad del Zulia (2008).
7. Gutiérrez E., Pérez F., Blanco E., Paz, N., Caldera Y. "Comportamiento de metales presentes en aguas de producción de petróleo durante el tratamiento termofílico". Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas, Vol. 43, N° 1 (2009) 145-160.
  8. Gutiérrez E., Caldera Y., Fernández, N., Blanco E., Paz N., Mármol Z. "Biodegradabilidad anaerobia termofílica de aguas de producción en reactores por carga". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 30, N° 2 (2007) 111-117.
  9. Standard Methods. 20th Water and Wastewater. APHA-AWWA-WEF. (1998).
  10. Fernández L. Prácticas de Fertilizantes y Enmiendas. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (1992).
  11. Maia S., Welz B., Ganzarolli E., Curtius A. "Feasibility of eliminating interferences in graphite furnace atomic absorption spectrometry using analyte transfer to the permanently modified graphite tube surface". Spectrochim. Acta Part B, Vol. 57 (2002) 473-484.
  12. Johnson D., Hallberg K. "Acid mine drainage remediation options: a review". Sci. Total Environ, Vol. 5 (2005) 338-347.
  13. Stottmeister U., Wiebner A., Kusch P., Kappelmeyer U., Kästner M., Bederski O., Müller R., Moormann H. "Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment". Biotechnol Adv., Vol. 22 (2003) 93-117.
  14. Andersen R., Schiff S. "Alkalinity generation and the fate of sulphur in lake sediments. Can. J. Fish. Aquat. Sci., Vol. 44 (1987) 188-193.
  15. Halverson N. "Review of constructed subsurface flow vs. Surface flow wetlands". Westinghouse Savanna River Company. Aiken (2004) 174-183.
  16. Mant C., Costa S., Williams J., Tambourgi E., "Phytoremediation of chromium by model constructed wetland". Biresource Technology, Vol. 97, N° 15 (2006) 1767-1772.
  17. Speelmans M., Vanthuyne D., Lock K., Hendrickx F., Laing D., Tack F., Janssen C. "Influence of flooding, salinity and inundation time on the bioavailability of metals in wetlands". Science of Total Environment, Vol. 380 (2007) 144-153.
  18. Mays P. "Comparison of heavy metal ena a construted wetland". Ecological Engineering, Vol. 16 (2001) 487-500.
  19. Llugany M., Toira R., Poschnrieder C., Barceló J. "Hiperacumulación de metales: ¿Una ventaja para la planta y el hombre?" Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente, Vol. 16, N° 2 (2007) 1-6.
  20. López S., Gallegos M., Pérez L., Gutiérrez M. "Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas". Rev. Int. Contam. Ambient, Vol. 21, N° 2 (2005) 91-100.
  21. D' la Cruz, J. V. "Elementos de Horticultura". John Willey& Sons, Inc. New York, 2008.
  22. Pavón T., Briones R., Remerse C., Ilagovan K. "Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de cadmio, plomo, hierro y cobre del agua utilizando diferentes sustratos para horticultura. Instituto Colombiano de Horticultura (ICHO). Ferva Ltda. (2010) 358.

Recibido el 10 de Enero de 2010

En forma revisada el 18 de Julio de 2011