

Humedales de tratamiento:

*alternativa de saneamiento de aguas
residuales aplicable en América Latina*

*María Teresa Alarcón Herrera
Florentina Zurita Martínez
Jaime A. Lara-Borrero
Gladys Vidal
Editores académicos*



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Bogotá

5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES DE TRATAMIENTO

5.1 Diseño de Humedales de Tratamiento.

Jaime A. Lara-Borrero. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Calle 40 No. 5 -50. Bogotá, Colombia. Email: laraj@javeriana.edu.co

5.2 Construcción de humedales de flujo sub-superficiales vertical /horizontal

Armando Rivas Hernández. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso. Jiutepec, Mor. E-mail: arivas@tlaloc.imta.mx

6 APLICACIONES ESPECÍFICAS

6.1 Tratamiento de aguas residuales

Catalina Plaza de los Reyes y Gladys Vidal*
Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile.
Universidad de Concepción. Barrio Universitario s/n, Concepción, Casilla 160-C, Chile. Teléfono: 56-041-2204067, Fax: 56-041-2207076.

*Autor por correspondencia: glvidal@udec.cl

6.2 Tratamiento de efluentes mineros

Norma Perez^a, Gabriela Morales^b, Alex Schwarz^a, Ma. Teresa Alarcón-Herrera^d, Gladys Vidal^{b*}

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción. Barrio Universitario s/n, Concepción – Chile.

^bGrupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción. Barrio Universitario s/n, Concepción – Chile.

^dCentro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., CIMAV Unidad Durango. Victoria 147 Norte, Centro Histórico, Durango, Dgo., México. C.P. 34000.

*Autor por correspondencia: glvidal@udec.cl

6.3 Tratamiento de efluentes de la industria metalúrgica

María Alejandra Maine^{a, b,*}, Gabriela C. Sánchez^a

^aQuímica Analítica, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santiago del Estero 2829, Santa Fe (3000), Argentina. ^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

*Autor por correspondencia: amaine@fiq.unl.edu.ar

6.3 TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA

Hay cientos de humedales de tratamiento funcionando especialmente en países como Alemania, Francia, Reino Unido, España, Italia, Dinamarca, Australia y Estados Unidos. En Latinoamérica, esta tecnología ha encontrado una importante implementación para la depuración de efluentes sanitarios de pequeños poblados, complejos turísticos, campus universitarios, etc. En Argentina, a pesar de que el uso de humedales construidos para tratamiento de efluentes sanitarios es aún limitado, se han construido humedales para tratamiento de efluentes de industrias metalúrgicas. La eliminación de metales utilizando humedales se ha aplicado en el mundo para efluentes de minas, cuyos pH son ácidos. En el caso de los efluentes de industrias metalúrgicas, el pH es alcalino y la salinidad es elevada. Tal es el caso, de dos humedales construidos para el tratamiento final de efluentes de industrias metalúrgicas los cuales están operando satisfactoriamente desde hace años. Estos humedales de tratamiento son de flujo superficial y en ambos se realiza el tratamiento final de los efluentes industriales en forma conjunta con el efluente sanitario de la planta. Como los volúmenes a tratar y la composición química de los efluentes es diferente, los humedales de tratamiento presentan diferentes características de diseño.

6.3.1 Caso 1: Humedal para tratamiento de efluentes de una industria metalúrgica para fabricación de herramientas

Se realizó un estudio de factibilidad “in situ”, construyéndose un humedal experimental a escala piloto para evaluar la posibilidad de utilizar esta tecnología para tratamiento final de efluentes de una empresa metalúrgica dedicada a la fabricación de herramientas. Las dimensiones del humedal fueron de 6 m de largo por 3 m de ancho. El humedal se impermeabilizó con una capa de polietileno de 200 μm de espesor, para asegurar que los contaminantes no percolen a las napas. Sobre esta capa se dispuso la tierra del área de excavación hasta un nivel de aproximadamente 50 cm, donde se arraigaron las plantas emergentes. Las plantas utilizadas fueron especies arraigadas emergentes y flotantes libres nativas, trasplantadas de ambientes naturales de la zona del valle aluvial del río Paraná Medio. Se emplearon varias especies ya que, en general, no se recomienda el monocultivo por considerarse más vulnerable a las enfermedades. A partir de resultados obtenidos en experiencias previas, entre las especies flotantes libres se utilizaron *Salvinia herzogii*, *Salvinia rotundifolia*, *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* (Maine et al., 2004). Las especies emergentes *Cyperus alternifolius*, *Typha domingensis*, *Pontederia cordata* y *Schoenoplectus californicus*, se dispusieron teniendo en cuenta el criterio de que son eficientes en la acumulación de nutrientes y contaminantes en humedales naturales y construidos (Gersberg et al., 1986; Jenssen et al., 1993; Ellis et al., 1994). Las especies emergentes se podaron antes de su trasplante.

El efluente a tratar presentaba alta salinidad y alto pH y contenía Cr, Ni, Zn y Fe, cuyas concentraciones debían disminuirse para cumplir con la legislación vigente. La composición del efluente a tratar era variable debido a los distintos procesos que se llevaban a cabo en la industria en forma diaria. El efluente llegaba al humedal través de un tubo de PVC de 63 mm de diámetro, en cuyo extremo se colocó un tubo de distribución perpendicular con orificios dispuestos de forma de producir una entrada de agua en forma laminar. Una válvula de cierre se colocó en el tubo de entrada antes de la cañería perpendicular de distribución. El efluente de salida, abandonaba el humedal a través de una compuerta de plástico con un corte en “V”. El humedal se llenó con agua de red hasta lograr un nivel de aproximadamente 40 cm (inmediatamente después de haber trasplantado las especies arraigadas emergentes). Luego se agregó diariamente el efluente mezclado con agua de red. La proporción agua de red/efluente fue disminuida paulatinamente hasta llegar a agregar solamente efluente. El caudal del efluente que ingresaba al humedal era de 1000 L/día y el tiempo de residencia hidráulico en el humedal se estimó en 7 días. El humedal fue monitoreado durante un año, durante el cual, se evaluó la eficiencia de las macrófitas en la retención de contaminantes y su tolerancia al efluente. En una primera etapa, *P. stratiotes* y *E. crassipes* fueron las especies dominantes (Hadad et al., 2007), pero luego de 6 meses de operación, *T. domingensis* se convirtió en la especie dominante (Fig. 1). El humedal presentó eficientes porcentajes de remoción de Cr, Ni y Zn (Maine et al., 2006).



Figura. 1. Humedal a escala piloto a 1 mes (a) y 6 meses (b) del inicio de su funcionamiento.



Figura. 2. Vista aérea del humedal de tratamiento y la laguna donde desagua.

En función de los satisfactorios resultados obtenidos en el humedal piloto, se decidió la construcción de un humedal a escala industrial para el tratamiento final de los efluentes. El mismo es de tipo de flujo superficial,

funciona desde el año 2003, y sus dimensiones son de 50 m de largo por 40 m de ancho. Para favorecer la hidráulica del sistema, se construyó un tabique central, paralelo al sentido de circulación del efluente, el cual divide al humedal en dos secciones de igual superficie y que obliga al efluente a recorrer el doble de distancia, obteniéndose una relación longitud: ancho de 5:1 que favorece la hidráulica del sistema. El efluente ingresa al humedal por un tubo con orificios que se colocó a lo largo del área de entrada para lograr un flujo laminar. El tiempo de residencia hidráulica se encuentra comprendido entre 7 y 12 días. El caudal que ingresa es de aproximadamente 100 m³/día. El efluente recorre el humedal en forma de U debido al tabique central y, una vez tratado, desagua en una laguna existente en el predio de la empresa (Fig. 2).

A fin de asegurar que no se produzca filtración a las napas freáticas, el humedal se impermeabilizó con bentonita (6 capas de bentonita compactada, a fin de lograr una conductividad hidráulica de 10⁻⁷ m s⁻¹) (Fig. 3). Sobre la misma, se colocó una capa de 1 m del suelo excavado y arena. Se ubicaron freatímetros alrededor del humedal para monitorear la calidad del agua subterránea, como medida de seguridad.



Figura. 3. Impermeabilización del área del humedal con bentonita.

El humedal lleva a cabo el tratamiento final de los efluentes industriales (efluente de cromado: 45 m³/d, efluente de tamboreado: 20 m³/d y efluente de pavonado: 10 m³/d) y los efluentes sanitarios (25 m³/d) de la planta. Los efluentes industriales cuentan cada uno con su planta de tratamiento primario. En líneas generales consisten en procesos físico-químicos como: coagulación, floculación, alcalinización, precipitación, filtración y reducción. Los efluentes sanitarios cuentan con una planta de tratamiento de lodos activados.

Se trasplantaron varias especies comunes de la zona, teniendo en cuenta los resultados del humedal experimental, siendo *E. crassipes*, *T. domingensis* y *P. Cordata*, las que alcanzaron mayor cobertura. En una primera etapa de funcionamiento solo se trataron efluentes sanitarios de la empresa previo tratamiento primario, ya que, al contener altas concentraciones de nutrientes, favorecieron el desarrollo de la vegetación. Luego, se comenzó a tratar en forma conjunta efluentes sanitarios e industriales. En experiencias en invernadero, corroboramos la hipótesis de que el enriquecimiento del efluente con nutrientes podría mejorar la tolerancia de

las plantas a los metales (Hadad et al., 2007; Di Luca et al., 2014). Durante el primer año de funcionamiento, *E. crassipes* fue la especie dominante, pero luego disminuyó su cobertura hasta desaparecer. En experiencias de laboratorio, pudo comprobarse que esta especie flotante no resistió las condiciones de alto pH y alta salinidad del efluente (Hadad et al., 2006). Después de 2 años de operación del sistema, la especie emergente *T. domingensis* se convirtió en dominante, demostrando alta tolerancia a las condiciones del efluente, logrando una gran cobertura y biomasa (Fig. 4). El desarrollo de *T. domingensis* se favoreció con la regulación del nivel de agua, logrando el mejor crecimiento a 30 cm de profundidad. La eficiencia de remoción de contaminantes del humedal fue satisfactoria en todas las etapas de dominancia de vegetación (Maine et al., 2009). *T. domingensis* demostró ser una especie adecuada para tratar efluentes de alto pH y alta conductividad con metales pesados, que resultan de muchos procesos industriales (Mufarrege et al., 2011).



Figura. 4. Etapa de desarrollo de la vegetación en el humedal de tratamiento: a) luego de 15 días del trasplante, donde se observa el tabique central; b) a los 4 meses; c) al año de operación; d) después de 2 años, donde se observa la dominancia de especies emergentes y el caño de ingreso del efluente.

T. domingensis mantuvo una cobertura media del 60-90 % durante los últimos 10 años. Las plantas son podadas periódicamente para favorecer su crecimiento. Durante 2009 sufrieron una importante disminución de la cobertura, debido a que las plantas del humedal sufrieron una depredación por carpinchos (*Hydrochoerus hydrochaeris*). El humedal se presentaba como una laguna con escasa vegetación, ya que la parte aérea de la misma, había sido depredada por estos animales. Sin embargo, las raíces y rizomas de las plantas emergentes no habían sido dañadas (Maine et al., 2013) y las plantas se recuperaron luego de la colocación de un cerco perimetral que impidió el acceso de los animales al humedal. De cualquier modo, durante este evento de depredación cuya duración fue de unos pocos meses, el humedal no disminuyó su eficiencia, reteniendo los metales en sedimento y en el sistema radicular de las plantas, demostrándose la robustez de estos sistemas (Maine et al., 2013).

Desde que el humedal comenzó a funcionar, se monitoreó la calidad del efluente antes y después del tratamiento. La Tabla 1 muestra los rangos de concentración y los porcentajes de remoción de contaminantes. La concentración de calcio y la alcalinidad disminuyen, lo que sugiere la precipitación de carbonato de calcio en la zona de entrada. El humedal presentó altas eficiencias de remoción de Cr, Ni y Zn, que coprecipitaron con el carbonato de calcio formado y con oxihidróxidos de hierro, de acuerdo a lo que se corroboró con un fraccionamiento secuencial de los metales retenidos en el sedimento (Di Luca et al., 2011). La DQO y DBO presentaron buenos porcentajes de reducción demostrando una importante mineralización de la materia orgánica en el humedal. Las concentraciones de nitrato y nitrito disminuyeron satisfactoriamente, mientras que el amonio, el fósforo reactivo soluble (PRS) y el fósforo total (PT) presentaron bajos porcentajes de remoción, probablemente debido a las bajas concentraciones de OD en la zona de salida, motivo por el cual, se colocó un aireador para que oxigene el efluente antes de su descarga.

Tabla 1. Concentraciones medias en el efluente de entrada y de salida y porcentajes de remoción.

Parámetro	Entrada	Salida	% remoción
pH	10,4-11,8	7,9-9,1	-
OD (mg l ⁻¹)	0-6,2	0,3-5,2	-
Conductividad (umho/cm)	3890-8700	1400-2500	-
Ca ²⁺ (mg l ⁻¹)	32,3-120,7	11,1-41,2	59,3
Alcalinidad	194,6-750,4	136,8-332,3	46,5
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	15,4-98,2	3,6-24,2	80,4
NO ₂ ⁻ (mg l ⁻¹)	0,258-6,22	0,017-0,766	84,1
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	0,154-2,67	0,05-2,14	11,8
PRS (mg l ⁻¹)	0,005-0,079	0,005-0,334	13,3
PT (mg l ⁻¹)	0,064-1,38	0,129-0,696	22,0
Fe (mg l ⁻¹)	0,05-8,54	0,05-0,430	93,4
Cr (mg l ⁻¹)	0,023-0,204	0,002-0,033	84,7
Zn (mg l ⁻¹)	0,022-0,070	0,015-0,039	61,2
Ni (mg l ⁻¹)	0,004-0,101	0,004-0,082	69,5
DQO (mg l ⁻¹)	57,9-154,0	13,9-39,9	79,5
DBO (mg l ⁻¹)	9,8-30,9	3,0-14,1	83,2

Las concentraciones de metales en el sedimento de fondo fueron mayores en la zona de entrada que en la zona de salida, denotando su retención en esta área del humedal. Utilizando técnicas de fraccionamiento de metales, pudo comprobarse que estos contaminantes quedaron retenidos en fracciones químicas del sedimento que no los liberarán al agua, aunque cambien las condiciones ambientales (Maine et al., 2007, 2013; Di Luca et al., 2011). Las concentraciones de metales y fósforo en el sedimento de la zona de salida no mostraron diferencias

estadísticamente significativas con los valores iniciales, tampoco presentaron variaciones significativas a lo largo del tiempo ni a las distintas profundidades, lo que indicaría que el humedal sólo ha utilizado la capacidad de sorción del sedimento de la zona de entrada, y los sitios de adsorción del sedimento de la zona de salida continúan disponibles para la sorción de contaminantes (Di Luca et al., 2011; Maine et al., 2013).

La acumulación de metales se produjo en las raíces de *T. domingensis*. La concentración de metal en la biomasa aérea no mostró un incremento significativo respecto a los valores que se encuentran en ambientes naturales, lo cual es importante ya que los contaminantes no ingresan a la cadena trófica. *T. domingensis* mostró un óptimo crecimiento alcanzando una biomasa máxima mayor que en ambientes naturales cercanos (8 kg/m^2) (Hada et al., 2010).

Tanto el sedimento de fondo como las macrófitas fueron los encargados de la remoción de contaminantes. Las macrófitas emergentes como *T. domingensis* influyen en el ciclo biogeoquímico de los sedimentos a través de cambios en el potencial, debido a su capacidad de transportar oxígeno desde sus raíces a la zona rizosférica. Cualitativamente, esto puede visualizarse por el color rojizo asociado a las formas oxidadas del hierro en la superficie de las raíces y en el sedimento que se encuentra alrededor de las mismas. Un completo desarrollo del sistema raíz-rizósfera para un humedal construido nuevo puede requerir de 3 a 5 años, por lo que la eficiencia en la retención de contaminantes mejora con la madurez del humedal (Kadlec y Wallace, 2009). Vymazal y Kröpfelová (2005) informaron que para alcanzar la madurez de un humedal construido vegetado con la emergente *Phragmites* sp., usualmente se requieren tres o cuatro años o aún más tiempo para lograr las máximas eficiencias de remoción. El humedal estudiado se ha convertido en un monocultivo de la emergente *T. domingensis* y pudo comprobarse que su eficiencia mejoró con el tiempo.

Cuando la capacidad de un humedal para retener contaminantes depende fundamentalmente de su capacidad de sorción al sedimento, puede llegar a tener un tiempo de vida útil limitado. Sin embargo, como las condiciones para la precipitación están ampliamente provistas por la composición del efluente de entrada, es de esperar que el humedal continúe reteniendo contaminantes mientras haya sitios de adsorción disponibles en el sedimento y se mantengan las condiciones de precipitación (alto pH y altas concentraciones de Ca, Fe y carbonato), favorecido por la presencia de *T. domingensis*.



Figura. 5. Invernadero de plantas ornamentales cultivadas con el compost originado en el humedal de tratamiento.

Anualmente, se realizan tareas de mantenimiento del humedal luego del periodo invernal. Si es necesario, se retiran los sólidos acumulados en la zona de entrada y se realiza la poda de hojas secas de las macrófitas. Este material se utilizó en la manufactura de compost para el cultivo de plantas ornamentales que se realizó en invernaderos dentro del mismo predio de la fábrica, cerrando de este modo el ciclo (Fig. 5). La concentración de metales en el compost se encuentra por debajo de los límites encontrados en compost comerciales.

El humedal de tratamiento y la laguna receptora del efluente constituyen el hábitat de diversos animales de la zona como patos, gansos, gallaretas, chajás, nutrias, cuises, carpinchos, tortugas acuáticas, etc. (Fig. 6).



Figura. 6. Zona de salida del humedal de tratamiento que se constituye en un hábitat para la vida silvestre.

6.3.2 Caso 2: Humedal para tratamiento de efluentes de una empresa metalúrgica dedicada al cromado de piezas de gran tamaño

Otro humedal para tratamiento de efluentes se construyó en una industria metalúrgica dedicada al cromado de piezas metálicas de gran tamaño. Se decidió la construcción de un humedal de flujo superficial por ser adecuados para la eliminación de metales. De acuerdo a la experiencia adquirida con el humedal anterior, se planteó llevar a cabo en forma conjunta el tratamiento final de todos los efluentes de la planta. Los efluentes del baño de cromado, circuito de enfriamiento, sanitario y pluvial llegan a una cámara equalizadora para luego ingresar al humedal. El volumen diario que ingresa al humedal es de aproximadamente 10 m^3 . El efluente proveniente del baño de cromado se vuelca en forma discontinua, 3 veces por semana, y su volumen es de aproximadamente 15000 L por mes. Tanto este efluente como el sanitario reciben un tratamiento primario previo. Como vemos a diferencia del caso anterior, el caudal de efluentes es menor y no tienen la misma periodicidad de volcado. En este caso debe eliminarse fundamentalmente Cr y Zn provenientes del efluente industrial y los nutrientes provenientes del sanitario, que son aprovechados por las macrófitas para su desarrollo.

El humedal construido tiene un área de 7 m x 20 m, logrando una relación largo: ancho (3:1) adecuada, para lograr una buena distribución del flujo y favorecer la hidráulica del sistema (Fig. 7). Para la construcción del mismo, se realizaron trabajos de movimiento de suelo: excavación, perfilado y compactación de taludes laterales (Fig. 8). El lecho tiene una pendiente de 1°.



Figura. 7. Vista aérea del humedal de tratamiento (a), la pileta de salida (b), la laguna (c) y las instalaciones de la empresa (d).

Se impermeabilizó con una geomembrana de polietileno de alta densidad (PAD) de 1,5 mm de espesor. Sobre la misma se colocó una capa de tierra de aproximadamente 1,50 m que sirve como sustrato de las plantas enraizadas (Fig. 8). Se utilizó la tierra sobrante de las tareas de excavación y se agregó también tierra negra. Para favorecer el desarrollo de las plantas en la zona más profunda y el recorrido del efluente a través del humedal, se construyeron taludes de 0,50 m de ancho transversales al sentido de circulación del agua sobre los cuales, se plantaron los vegetales. El nivel de agua sobre ellos es de 0,30 - 0,40 m. En las otras zonas, la profundidad se encuentra entre 0,5 y 0,7 m. El efluente ingresa a través de un caño de PVC con cuatro salidas distribuidas a lo ancho de la zona de entrada. El tiempo de residencia mínimo es de 7 días; al cabo de ese período, el efluente ya depurado, abandona el humedal por un canal de salida en forma de cascada para volcar en una pileta de hormigón de 4 m x 2 m con una profundidad de 40 cm. Este es el lugar de toma de muestra del efluente tratado para monitorear el sistema. El agua tratada abandona la pileta a través de un salto de agua por rebase llegando por un canal a una laguna adyacente en el mismo predio (Figs. 7 y 9). El humedal funcionó con efluente sanitario (previo tratamiento primario), efluente pluvial y efluente del circuito de enfriamiento durante 1 año. Luego, comenzó a volcarse además el efluente industrial.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el humedal del caso anterior, la especie seleccionada para este humedal fue *T. domingensis*. Se trasplantaron ejemplares de la misma que crecen en la laguna existente en el

predio de la empresa, lo que garantiza que las plantas se encuentran adaptadas al lugar. Las plantas se podaron a una altura aproximada de 30 cm. Se plantaron sobre los taludes y en la zona de ingreso, con una densidad de 3 plantas por m² (Fig. 9). Luego, se sometieron a un período de aclimatación con riego, pero sin inundar el humedal hasta observar un crecimiento vigoroso. La cobertura de *T. domingensis* llegó al 90 % después de unos pocos meses, demostrando su alta productividad (Fig. 9).



Figura. 8. Etapas de la construcción del humedal. Trabajos de movimiento de suelo: excavación, perfilado y compactación de taludes laterales (a y b), impermeabilización con geomembrana (c) y agredado de tierra para sustrato de las plantas (d).

El humedal demostró una adecuada eficiencia en la retención de contaminantes. La Tabla 2 muestra los rangos de concentración y los porcentajes de remoción de contaminantes. El PRS, PT, DQO, DBO y los metales mostraron buenas eficiencias de remoción. Con respecto a las especies nitrogenadas, el amonio presentó la mayor remoción, mientras que nitrito aumentó a la salida del humedal, debido al proceso de nitrificación en condiciones aeróbicas. Aún así, nitrito y nitrato se encuentran en bajas concentraciones en el efluente de salida. Es de esperar, que la eficiencia mejore aún más cuando el humedal alcance su madurez como sistema y si se mantienen las buenas prácticas de operación y mantenimiento del mismo. Este humedal se encuentra en operación desde 2009.

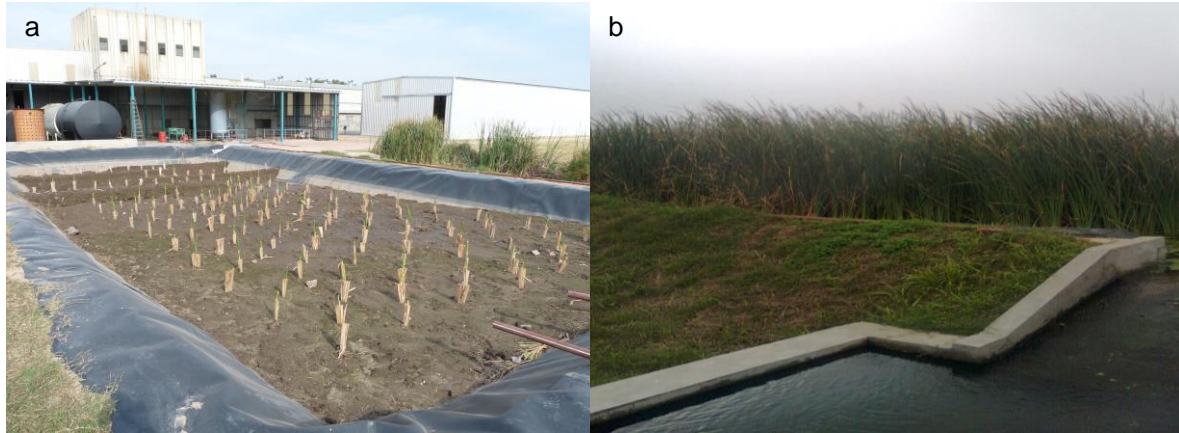


Figura. 9. a) Plantas de *T. domingensis* recién transplantadas y b) luego de 4 meses del transplante donde se observa la pileta de salida.

Tabla 2. Concentraciones medias en el efluente de entrada y de salida y porcentajes de remoción.

Parámetro	Entrada	Salida	% remoción
pH	7,4-8,3	8,0-8,1	-
OD (mg l ⁻¹)	3,2-5,4	4,2-5,8	-
Conductividad (umho/cm)	975-3060	1058-1358	-
Ca ²⁺ (mg l ⁻¹)	36,8-49,8	11,2-18,9	48,3
Alcalinidad	101,7-1647,0	167,9-378,2	63,2
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	0,271-1,28	0,158-1,084	24,4
NO ₂ ⁻ (mg l ⁻¹)	0,004-0,023	0,030-0,053	-246
NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)	0,957-15,6	0,722-3,89	66,1
PRS (mg l ⁻¹)	0,247-0,903	0,291-0,350	58,1
PT (mg l ⁻¹)	0,642-1,322	0,398-0,442	52,8
Fe (mg l ⁻¹)	0,15-0,56	0,06-0,17	70,4
Cr (mg l ⁻¹)	0,012-1,45	0,019-0,025	92,9
Zn (mg l ⁻¹)	0,006-0,145	0,003-0,067	51,7
Ni (mg l ⁻¹)	0,003-0,082	0,004-0,004	77,5
DQO (mg l ⁻¹)	21,3-160	< 6-27	78,2
DBO (mg l ⁻¹)	10,2-55,5	3,2- 17,6	82,5

Se produjo una disminución de cobertura vegetal en 2012 debido a un volcado accidental de efluente sin el adecuado tratamiento. El humedal se cerró y volvió a abrirse 1 mes después, cuando se comprobó que la concentración de Cr en agua, que era el contaminante crítico, había disminuido. Se registró una rápida recuperación de las plantas. Es de resaltar que, el ambiente se preservó debido a que los contaminantes quedaron retenidos en el humedal, cumpliendo una de las funciones para las que se le construyó. A pesar de las altas concentraciones de Cr determinadas en el efluente que llegó al humedal, la concentración de Cr no aumentó en el sedimento de la entrada como era de esperar. Esto se debió a que, sobre el sedimento se acumuló una considerable cantidad de detritos de *T. domingensis*, en los cuales se encontraron altas concentraciones de este

metal. Estos detritos estaban conformados fundamentalmente por hojas secas. Las macrófitas no solamente sorben contaminantes cuando están vivas, la biomasa seca de macrófitas es un excelente biosorbedor de metales (Schneider y Rubio, 1999; Miretzky et al., 2006). Esto sería una importante ventaja para el manejo de humedales de tratamiento, porque cuando las plantas mueren, como su degradación es lenta (Hammerly et al., 1989), siguen reteniendo metales dentro del humedal, tal como lo determinamos experimentalmente. Estos detritos pueden ser removidos fácilmente del humedal para su disposición final, en caso que fuera necesario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), al Proyecto CAI+D de la Universidad Nacional del Litoral (UNL), y a la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica, por proveer los fondos necesarios para poder realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Di Luca, G.A., Maine, M.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Sánchez, G.C., Bonetto, C.A. 2011. Metal fractionation in the sediment of a constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Ecol. Eng.* 37, 1267-1275.
- Di Luca, G.A., Hadad, H.R., Mufarrege, M.M., Maine, M.A., Sánchez, G.C. 2014. Improvement of Cr phytoremediation by *Pistia stratiotes* in presence of nutrients. *Int. J. Phytorem.* 16, 167-178.
- Ellis, J., Shutes, R., Revitt, D., Zhang, T. 1994. Use of macrophytes for pollution treatment in urban wetlands. *Conserv. Recycl.*, 11, 1-12.
- Gersberg, R.M., Elkins, B.V., Lyon, S.R., Goldman, C.R. 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Water Res.* 20, 363-368.
- Hadad, H.R., Maine, M.A., Bonetto, C. 2006. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Chemosphere.* 63(10), 1744-1753.
- Hadad, H.R., Maine, M.A., Natale, G.S., Bonetto, C. 2007. The effect of nutrient addition on metal tolerance in *Salvinia herzogii*. *Ecol. Eng.* 31(2), 122-131.
- Hadad, H.R., Mufarrege, M.M., Pincirolí, M., Di Luca, G.A., Maine, M.A. 2010. Morphological response of *Typha domingensis* to an industrial effluent containing heavy metals in a constructed wetland. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 58(3), 666-675.
- Hammerly, J., Leguizamón, M., Maine, M.A., Schiver, D. 1989. Decomposition rate of plant material in the Parana Medio River (Argentina). *Hydrobiologia.* 183, 179-184.
- Jenssen, P.D., Mahlum, T., Krogstad, T. 1993. Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments. *Water Sci. Technol.* 28, 149-157.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D. 2009. *Treatment wetlands*, 2nd. ed. Boca Raton, Florida. RC Press.
- Maine, M.A., Suñé, N.L., Lager, S.C. 2004. Chromium bioaccumulation: comparison of the capacity of two floating aquatic macrophytes. *Water Res.* 38, 1494-1501.
- Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sánchez, G., Bonetto, C. 2006. Nutrient and metal removal in a constructed humedal for waste-water treatment from a metallurgic industry. *Ecol. Eng.* 26, 341-347.
- Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sánchez, G., Bonetto, C. 2007. Removal efficiency of a constructed humedal for wastewater treatment according to vegetation dominance. *Chemosphere.* 68, 1105-1113.

- Maine, M.A., Hadad, H.R., Sánchez, G., Caffaratti, S., Bonetto, C. 2009. Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed humedal. *J. Environ. Manage.* 90, 355-363.
- Maine, M.A., Hadad, H.R., Sánchez, G.C., Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Caffaratti, S.E., Pedro, M.C. 2013. Sustainability of a constructed humedal faced with a depredation event. *J. Environ. Manag.* 128, 1-6.
- Miretzky, P., Saralegui, A., Fernandez-Cirelli, A. 2006. Simultaneous heavy metal removal mechanism by dead macrophytes. *Chemosphere.* 66(2), 247-254.
- Mufarrege, M.M., Di Luca, G.A., Hadad, H.R., Maine, M.A. 2011. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity. *Ecotoxicology.* 20, 457-465.
- Schneider, I., Rubio, J. 1999. Sorption of heavy metal ions by the nonliving biomass of freshwater macrophytes. *Environ. Sci. Technol.* 33, 2213-2217.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L. 2005. Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecol. Eng.* 25, 606-621.