

RESPIROMETRÍA DE *Phragmites australis* EN PRESENCIA DE MATERIA ORGÁNICA DISUELTA Y EL XENOBIÓTICO CLOROTALONILO

JUAN PABLO SERNA¹
JUAN CARLOS CASAS²
GUSTAVO ANTONIO PEÑUELA³
NÉSTOR JAIME AGUIRRE⁴

RESUMEN

La frecuencia respiratoria de *Phragmites australis* en presencia de agua residual sintética (ARS) y clorotalonilo (CLT) se evaluó utilizando un respirómetro. El estudio se dividió en dos fases, con los siguientes tratamientos: fase I con a) agua de grifo, b) agua de grifo + *P. australis*, c) ARS; fase II con a) ARS + CLT (0,29 mg L⁻¹), b) ARS + CLT (2,18 mg L⁻¹), c) CLT (0,29 mg L⁻¹), d) CLT (2,18 mg L⁻¹). Cada experimento se realizó por duplicado. Se analizó la influencia de las variables humedad relativa (HR), radiación solar (Rs), temperatura ambiente (T), presión barométrica (PB), evaporación y la evapotranspiración potencial (ET_o) sobre la frecuencia de respiración de *P. australis*.

No se encontraron diferencias significativas de la frecuencia respiratoria de *P. australis* ($p < 0,05$) con agua de grifo y ARS durante los experimentos de la fase I; lo mismo se encontró para todos los experimentos de la fase

¹ Ingeniero Ambiental, Universidad del Cauca. Integrante del Grupo en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA), Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. juanpasernalopez@gmail.com

² Ingeniero Químico, Magíster y Doctor (c) en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia. Profesor y Director del Grupo de Investigación en Ciencia e Ingeniería en Sistemas Ambientales (GCISA), Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. jccasas@unicauca.edu.co

³ Químico y Magíster en Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Colombia; Doctor en Química Ambiental, Universidad de Barcelona. Profesor y Coordinador del Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. gpenuela@udea.edu.co

⁴ Licenciado en Biología y Química, Universidad de Caldas; Magíster en Biología, Universidad de Antioquia; Doctor en Ciencias Naturales, Justus-Liebig Universität, Giessen, Alemania. Integrante del Grupo GeoLimna, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. naguirre@udea.edu.co

II. Las variables climatológicas afectaron la frecuencia respiratoria en todos los tratamientos. ETo, T y R mostraron una correlación positiva significativa con la frecuencia respiratoria; y la HR y la PB, una correlación negativa.

PALABRAS CLAVE: *Phragmites australis*; clorotalonilo; evapotranspiración potencial; materia orgánica; frecuencia respiratoria.

RESPIROMETRY OF *Phragmites australis* IN PRESENCE OF DISSOLVED ORGANIC MATTER AND THE XENOBIOTIC CHLOROTHALONIL

ABSTRACT

The respiratory rate of *Phragmites australis* exposed to synthetic sewage water (SSW) and chlorothalonil (CLT) was evaluated using a respirometer. The study was divided into two phases with the following treatments: phase I with a) tap water, b) tap water + *P. australis*, c) ARS; phase II with a) SWW + CLT (0,29 mg L⁻¹), b) SWW + CLT (2,18 mg L⁻¹), c) CLT (0,29 mg L⁻¹), d) CLT (2,18 mg L⁻¹). Each experiment was done by replicate. The influence of relative humidity (RH), solar radiation (SR), air temperature (T), barometric pressure (BP), evaporation and potential evapotranspiration (ETo) on *P. australis* respiration rate was analyzed. No significant differences were found on the respiratory rate of *P. australis* ($p < 0.05$) using tap water and SWW during phase I experiments; the same finding was seen for all phase II experiments. Meteorological variables affected the respiratory rate in all treatments. ETo, T and SR showed significant positive correlation with respiratory rate; RH and BP, a negative correlation.

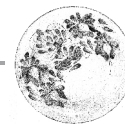
KEY WORDS: *Phragmites australis*; chlorothalonil; potential evapotranspiration; organic matter; respiratory rate.

RESPIROMETRIA DE *Phragmites australis* EM PRESENÇA DE MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA E O XENOBIÓTICO CLOROTALONILO

RESUMO

A frequência respiratória de *Phragmites australis* em presença de água residual sintética (ARS) e clorotalonilo (CLT) avaliou-se utilizando um respirómetro. O estudo dividiu-se em duas fases, com os seguintes tratamentos: fase I com a) água de grifo, b) água de grifo + *P. australis*, c) ARS; fase II com a) ARS + CLT (0,29 mg L⁻¹), b) ARS + CLT (2,18 mg L⁻¹), c) CLT (0,29 mg L⁻¹), d) CLT (2,18 mg L⁻¹). A cada experimento realizou-se por duplicado. Analisou-se a influência das variáveis umidade relativa (HR), radiação solar (Rs), temperatura ambiente (T), pressão barométrica (PB), evaporação e a evapotranspiração potencial (ETo) sobre a frequência de respiração de *P. australis*. Não se encontraram diferenças significativas da frequência respiratória de *P. australis* ($p < 0,05$) com água de grifo e ARS durante os experimentos da fase I; o mesmo encontrou-se para todos os experimentos da fase II. As variáveis climatológicas afetaram a frequência respiratória em todos os tratamentos. ETo, T e R mostraram uma correlação positiva significativa com a frequência respiratória, e a HR e a PB, uma correlação negativa.

PALAVRAS-CHAVE: *Phragmites australis*; clorotalonilo; evapotranspiração potencial; matéria orgânica; frequência respiratória.



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las principales fuentes de agua para uso humano son los lagos, los ríos, la humedad del suelo y las aguas subterráneas poco profundas. Sin embargo, la calidad del agua en lagos y embalses está sometida a la degradación natural, a los procesos de eutrofización y al impacto de las actividades humanas (Srivastava, Gupta y Chandra, 2008). La tecnología de fitorremediación con plantas acuáticas por humedales artificiales y estanques de detención de aguas lluvias se aplica cada vez más para remediar las aguas eutróficas (Lu *et al.*, 2008).

El uso de plaguicidas es una de las prácticas que más ha contribuido al incremento de la producción agrícola (Cornejo, 2001). Estos compuestos generan una problemática, ya que al disponerse inadecuadamente pueden ser tóxicos para determinados organismos, provocando alteraciones en los ecosistemas y riesgos en la salubridad.

La contaminación ambiental con xenobióticos orgánicos como plaguicidas es un problema mundial. El desarrollo de tecnologías de remediación para la descontaminación de los sitios afectados es de vital importancia. Para la remediación de sitios contaminados pueden usarse métodos físicos, químicos y biológicos (Abhilash, Jamil y Singh, 2009).

El clorotalonilo es un fungicida organoclorado de amplio espectro de actividad utilizado no sólo en la agricultura, sino también en cultivos ornamentales. Presenta una estructura química compleja con dobles enlaces, cianuros y cloros. El clorotalonilo se comercializa como Bravo 500 y Daconil, entre otros (Restrepo y Zapata, 2006). El clorotalonilo es eficaz como protector no sistémico para el control de varios patógenos causantes de tizones, pudriciones y manchas de tallos, hojas y frutos. Algunos de los patógenos que controla son *Alternaria sp.*, *Cercospora sp.*, *Colletotrichum sp.* y *Sclerotinia sp.*, entre otros. El clorotalonilo también se usa ampliamente en hortalizas y frutas y se autoriza en varios países para la aplicación aérea en cultivos como banano y plátano (OMS, 2006).

Baird (2001) caracterizó a los pesticidas organoclorados por los enlaces carbono-cloro difíciles de romper, que le confieren una baja reactividad, además de una lenta degradación en el ambiente. Estos compuestos tienen otras propiedades notables: estabilidad a la descomposición y bajas solubilidades en agua, excepto que estén presentes átomos de oxígeno o nitrógeno en las moléculas. Este autor concluye que los pesticidas organoclorados son los que han causado un mayor impacto ambiental negativo, ya que, una vez en el ambiente, se degradan despacio. Además, la mayor parte de estos compuestos son hidrofóbicos; no se disuelven con facilidad en agua, pero sí en medios hidrocarbonatos, tales como aceites o tejidos grasos. Esta peculiaridad ha conducido a su acumulación en los organismos vivos como peces y seres humanos.

La tecnología de humedales construidos para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales industriales ha recibido gran atención. Los estudios específicos con *Phragmites sp.* expuestos a clorobencenos han demostrado su potencial para la fitorremediación (Faure *et al.*, 2012). Las plantas acuáticas tienen un gran potencial como biofiltros de contaminantes acuáticos, debido a su abundancia y movilidad reducida. Las plantas se han utilizado con éxito en la captación y aislamiento de determinados metales pesados y nutrientes por medio de sus sistemas de raíces. Algunas plantas tienen la capacidad natural para absorber y hiperacumular pesticidas en sus tejidos (Gao *et al.*, 2000; Bouldin *et al.*, 2006; Bragato, Brix y Malagoli, 2006). El crecimiento de las plantas por un aumento significativo de biomasa favorece la eliminación de la carga excesiva de nutrientes en el agua que le causa su eutrofización (Srivastava, Gupta y Chandra, 2008).

Diferentes investigaciones (Olette *et al.*, 2008; Rose, Crossan y Kennedy, 2008; Matamoros *et al.*, 2012) han puesto de manifiesto la importancia de las macrófitas en la mitigación de plaguicidas. Donson, Couderchet y Eullaffroy (2009) encontraron que las macrófitas *Lemna minor* y *Spirodela polyrrhiza* fueron eficaces en la eliminación de dimetofomo y

pirimetanil, mostrando así su capacidad de acumulación y su eficiencia en la fitorremediación de agua contaminada con metales pesados y nutrientes. A pesar de ello, son pocos los datos sobre la eficacia de las plantas acuáticas en la fitorremediación de plaguicidas (Donson, Couderchet y Eullaffroy, 2009).

Las plantas acuáticas desempeñan un papel muy importante en el tratamiento de aguas residuales en los humedales. La caña común (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel) es una planta silvestre muy utilizada en la remoción y eliminación de sustancias que afectan los cuerpos de agua, ya que se propaga fácilmente de manera natural. Gagnon *et al.* (2012) destacan la alta tasa de evapotranspiración de la planta al compararla con otras. Crece en pantanos, drenajes y zonas húmedas, con amplia distribución geográfica desde zonas templadas a tropicales, siendo su periodo vegetativo perenne. Crece mejor en suelos firmes arcillosos de contenido mineral; tolera una salinidad moderada, pero puede crecer en agua salobre; sus brotes nuevos emergen de las yemas de los nudos de los tallos viejos (Gerritsen, Ortiz y González, 2009).

En esta investigación se plantearon como preguntas cómo afecta el ARS o la solución de CLT a la *P. australis* en efluentes contaminados con residuos agrícolas y cómo se asocian las variables climatológicas en la respiración de *P. australis* en presencia de ARS o solución de CLT, durante el proceso de la ETo. Se consideró como hipótesis que las plantas acuáticas emergentes como *P. australis* tienen un potencial para acumular contaminantes acuáticos actuando como sumideros y biofiltros biológicos. Esta especie se ha utilizado con éxito en la captación de agroquímicos y nutrientes por medio de su sistema de raíces y tallo. Por esto la planta permite la atenuación

de una matriz contaminante que contiene materia orgánica y el xenobiótico CLT. Así, se espera que, mediante el proceso de ETo, la matriz contaminante se incorpore a la biomasa vegetal.

Como objetivo general se planteó evaluar la frecuencia respiratoria de *P. australis* en presencia ARS o CLT durante el proceso de ETo con un respirómetro como alternativa para la depuración de aguas residuales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la sede de investigación universitaria (SIU) de la Universidad de Antioquia.

En el diseño experimental (figura 1), se efectuó la recolección de la planta *P. australis* de un humedal madre. Se consideraron dos fases con los siguientes tratamientos: fase I con a) agua de grifo, b) agua de grifo + *P. australis*, c) ARS; fase II con a) ARS + CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$), b) ARS + CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$), c) CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$), d) CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$). Por cada tratamiento se dispusieron dos réplicas. Las plantas recolectadas presentaron características morfológicas similares como número de hojas y tamaño del tallo. En las fases I y II (tabla 2) se utilizaron seis y ocho montajes, respectivamente.

Cada montaje consistió en un soporte metálico que sostenía una bureta de 50 mL (figura 2). A cada bureta que contenía los respectivos tratamientos se conectó una manguera de nivel plástica incolora de 1,35 cm de diámetro interno conectada al tallo de la planta. Se hizo un corte en bisel al tallo de la planta midiendo desde el primer nudo hasta los 60 cm de longitud.

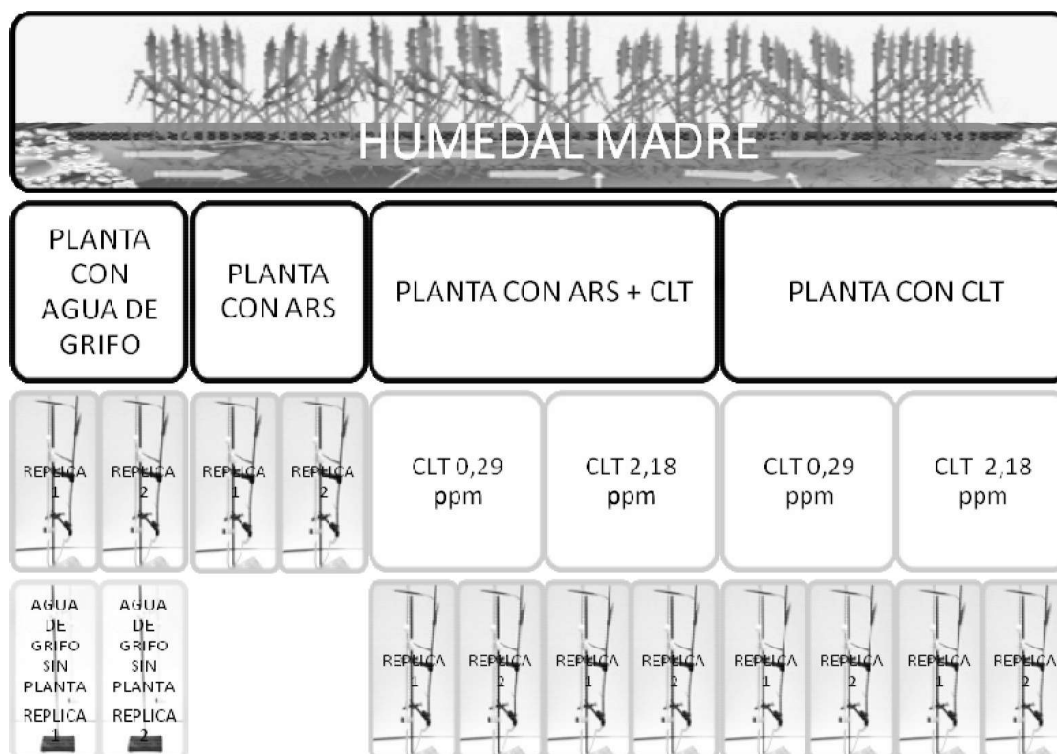
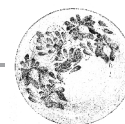


Figura 1. Diseño experimental

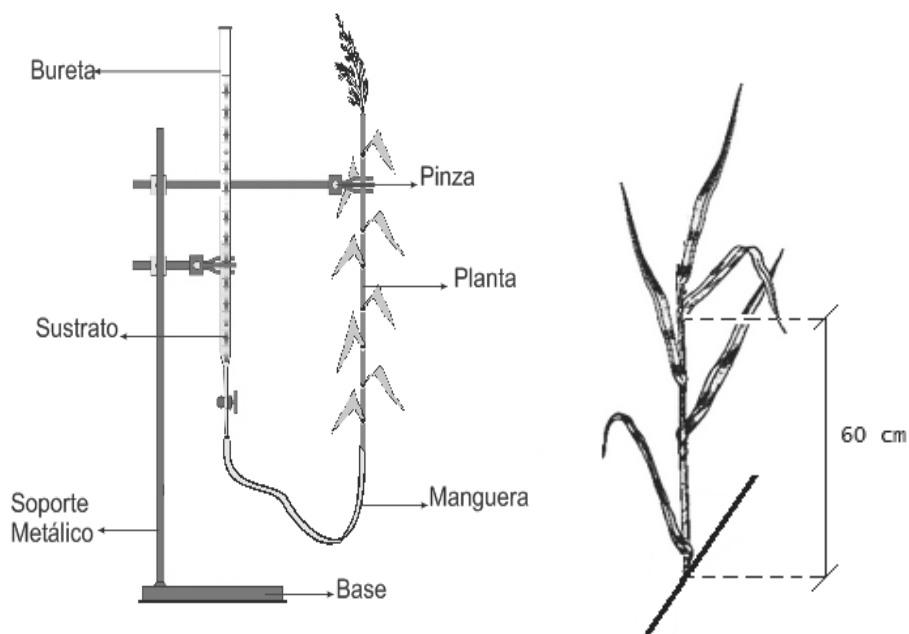


Figura 2. Montaje experimental y longitud de corte de la planta

Se preparó la solución de ARS en el laboratorio del grupo GAIA en la sede de investigación universitaria (SIU) de la Universidad de Antioquia. Esta solución simula los componentes de un agua residual (tabla 1).

Tabla 1. Componentes del ARS (Fuente: Bolaños, Casas y Aguirre, 2008)

Compuesto	Cantidad (mg L ⁻¹)
KH ₂ PO ₄	62,25
NH ₄ Cl	272,60
K ₂ HPO ₄	25,50
MgCl ₂	275,52
C ₆ H ₁₂ O ₆	375,00

Para la preparación del ARS + CLT se tomaron 30 mL de CLT (0,29 mg L⁻¹) y 30 mL de CLT (2,18 mg L⁻¹) a cada una se le adicionó 20 mL de ARS.

Se planeó emplear dos niveles de concentraciones de clorotalonilo, uno por encima y otro por debajo del rango de solubilidad (0,6 mg L⁻¹ - 1,2 mg L⁻¹). Las concentraciones reales de CLT identificados por el equipo fueron 0,29 mg L⁻¹ y 2,18 mg L⁻¹. El clorotalonilo se cuantificó con un cromatógrafo de gases Agilent Technologies modelo 6890, con inyector automático, detector de microcaptura de electrones, columna HP 5 (30 m x 0,322 mm x 0,25 μm; metilpolisiloxano [2.8 mL min⁻¹]), empleando nitrógeno como gas de arrastre (60 mL.min⁻¹). Las temperaturas del horno fueron:

Primer gradiente de temperatura: 80 a 180 °C, a 30 °C min⁻¹. Segundo gradiente: 180 °C a 205 °C, a 3 °C min⁻¹. Las temperaturas del inyector y del detector fueron 290 °C y 300 °C, respectivamente. En cada análisis se inyectó 1 mL de muestra en modo splitless. Las curvas de calibración se prepararon con clorotalonilo grado analítico al 98 % de pureza (Chem Service)

En total se llevaron a cabo 14 ensayos durante las dos fases (tabla 2). La primera fase comprendió desde el 4 de julio hasta el 22 de agosto de 2010 en la cual los tratamientos con sus respectivas réplicas fueron: agua de grifo sin planta, agua de grifo con

planta y ARS. La segunda fase abarcó desde el 11 de septiembre hasta el 11 de noviembre de 2010.

Tabla 2. Fases I y II con los diferentes tratamientos

FASE 1	FASE 2
Agua de grifo	ARS + CLT (0,29 mg L ⁻¹)
Agua de grifo + <i>P. australis</i>	ARS + CLT (2,18 mg L ⁻¹)
ARS	CLT (0,29 mg L ⁻¹)
	CLT (2,18 mg L ⁻¹)

El tratamiento de agua de grifo sin planta permitió determinar la pérdida de agua por evaporación.

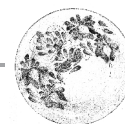
Las mediciones se realizaron por duplicado para cada tratamiento en un intervalo de tiempo de 11:00 a.m a 3:00 p.m., debido a que en este periodo se presenta la mayor radiación; se registró el volumen desplazado en la bureta cada 30 minutos. Al finalizar este intervalo, la planta fue desconectada de la manguera y conectada de nuevo al siguiente día. Este procedimiento se efectuó por tres días. Se determinó el volumen desplazado por día.

Los datos climatológicos fueron registrados por una estación meteorológica tipo Vantage Pro2™, ubicada en el octavo piso de la instalaciones de la SIU. Las variables climatológicas proporcionadas por la estación fueron HR, Rs, T, PB, ET. Esto permitió evaluar el comportamiento de la planta bajo estas condiciones y su relación con la frecuencia respiratoria.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de componentes de varianza (ACV)

El análisis de componentes de varianza para la variable respuesta volumen desplazado se asoció en su mayoría con el factor día con un 41,78 %, en tanto el factor réplica tuvo un peso del 38,35 %. El factor tratamiento, 19,87 %.



Con base en el ACV, aquellos valores con un porcentaje mayor del 30 % fueron analizados más tarde con una prueba de Kruskal-Wallis.

La tabla 3 muestra los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para los ensayos, usando como variable de agrupación día, tratamiento y réplica, donde se evalúa la hipótesis de las medianas para el factor frecuencia respiratoria. Para la variable día se obtuvo un $P < 0,05$.

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis para el factor tiempo o día de muestreo

Factor	Variable de agrupación	P-valor	Observaciones
Volumen	Día	4,44E-08	$p < 0.05$, se rechaza Ho.
	Fase 1	7,39E-02	$p > 0.05$, se acepta Ho.
	Fase 2	1,66E-01	$p > 0.05$, se acepta Ho.
	Réplica	7,42E-01	$p > 0.05$, se acepta Ho.

No se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) de la frecuencia respiratoria para el factor réplicas (tabla 4). Tampoco se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos en cada una de las fases. Ello en contraposición al factor día, en que se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la frecuencia respiratoria de los diferentes tratamientos, tal vez por influencia de las condiciones climáticas.

En la figura 3 se presentan los valores de la frecuencia respiratoria obtenidos durante los días de ensayos, independientemente del tratamiento usado. Se hallaron valores atípicos los días 6, 7 y 8 de noviembre.

No se encontró una tendencia homogénea en la frecuencia respiratoria de *P. australis*. Los días 14 y 17 de julio, 20 agosto, 11 y 14 de septiembre, 6 y 9 de noviembre se presentaron las frecuencias más altas, debido a que eran plantas con mayor vitalidad. El 15 de julio se presentaron los valores más bajos, con una mediana de 0,7 cm.

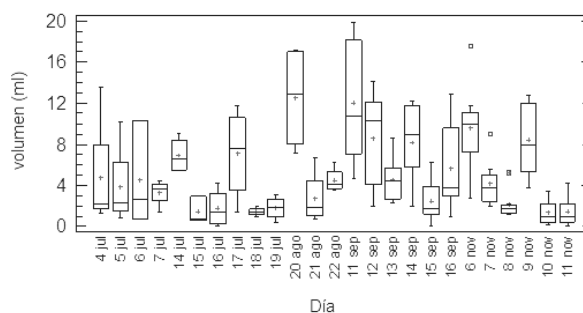


Figura 3. Diagramas de cajas y bigotes múltiples según volumen y día

Las variables climatológicas determinadas permiten inferir qué tan influyentes fueron las condiciones del medio en el cual se encontraban las plantas en el momento de ser sometidas a los diferentes tratamientos. Para la determinación de la ETo, se empleó la ecuación del Centro Nacional de Estudios del Café (Cenicafé) que involucra las variables climatológicas como temperatura y radiación neta, mediante regresión a los valores obtenidos de aplicar el método de Penman-Monteith a los datos de las estaciones climáticas en Colombia (Jaramillo, 2006). La figura 4 muestra el comportamiento de la ETo con la ET suministrada por la estación durante los días de muestreo, encontrándose una relación directa ($r = 0,48$).

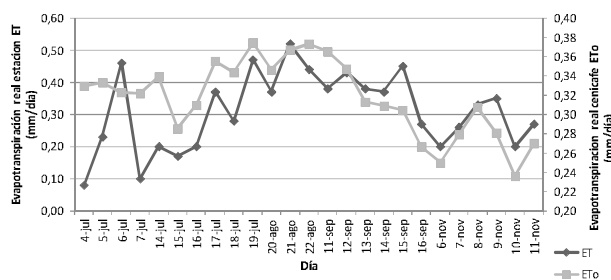


Figura 4. Variación de la ETo y ET durante los días de ensayo

El mayor valor de HR con un 87 % se encontró el 15 de julio (figura 5), mientras que la más baja se presentó el 13 septiembre con un 48,8 %, lo que indica que el aire pudo absorber un 13 % y 51,2 % más vapor de agua, respectivamente.

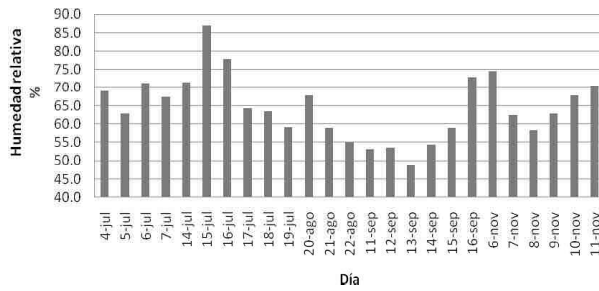


Figura 5. Variación de la HR para los días de ensayo

La Rs varió de modo significativo durante el periodo de ensayos (figura 6) en que se observaron días con altos valores en la Rs del lugar, como fue el caso del 21 de agosto cuando se presentó la mayor radiación ($1711 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{día}$), y el 15 de julio, la menor ($460 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{día}$).

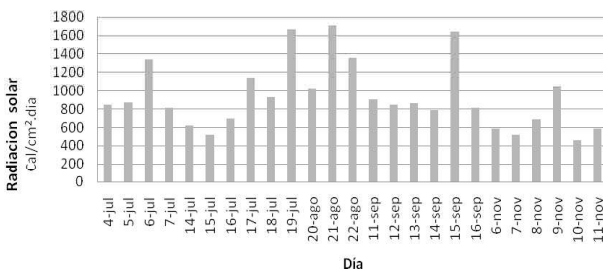


Figura 6. Variación de la Rs para los días de ensayo

La tendencia a presentar los valores más altos en T (figura 7) se encontraron entre 17 de julio y 15 de septiembre. El menor valor ($19,5 \text{ }^\circ\text{C}$) se presentó el 15 de julio.

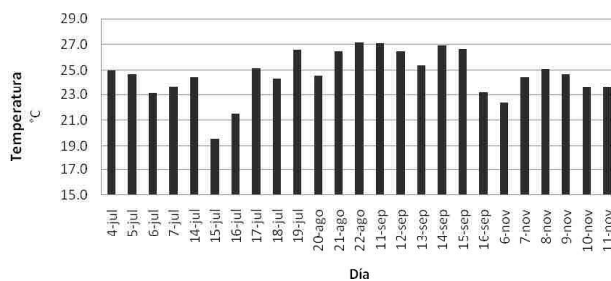


Figura 7. Variación de la T para los días de ensayo

La PB presentó incrementos entre el 4 de julio y el 22 de agosto (figura 8); el mayor valor ($640,6 \text{ mm Hg}$) y el menor ($635,2 \text{ mm Hg}$) de la PB se presentaron el 18 de julio y el 11 de septiembre, respectivamente. Según el comportamiento de la PB (figura 8), el rango de variación en los datos no fue con tendencia a la fluctuación, aunque se presentó disminución a partir del 19 de julio.

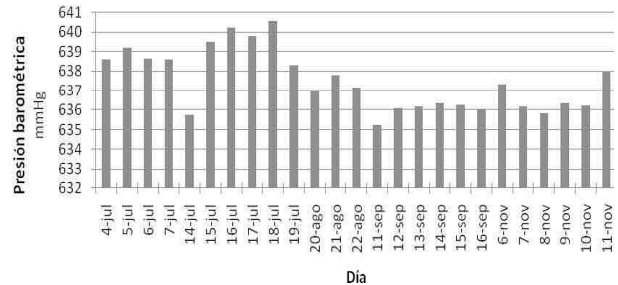


Figura 8. Variación de la PB para los días de ensayo

Las frecuencias respiratorias en los diferentes tratamientos separados por bloques representados en diagramas de cajas y bigotes se muestran en las figuras 9, 10 y 11. Los primeros días cuando se instalaron nuevas plantas se encontraron los mayores valores. Los puntos extremos de la caja muestran los valores de las réplicas, que en algunos casos coinciden. La línea negra en cada caja indica la mediana.

La figura 9 muestra las cajas de las frecuencias respiratorias en dos tratamientos: agua de grifo y ARS. El agua de grifo el 20 agosto (figura 9a) presentó el mayor registro de volumen ($17,2 \text{ mL}$). La tendencia fue a la disminución, aunque en algunos casos, según la figura 9a del 15 al 16 de julio se presentó un leve aumento en el valor de la mediana de $2,9 \text{ mL}$ a $3,3 \text{ mL}$.

En la figura 9b para el caso del ARS, el 20 agosto se presentó el mayor valor ($8,05 \text{ mL}$) en la mediana, y el menor ($0,25 \text{ mL}$) el 16 de julio, es decir, durante el tercer día de cada bloque. El 22 de agosto se obtuvo la mayor frecuencia respiratoria ($4,85 \text{ mL}$).

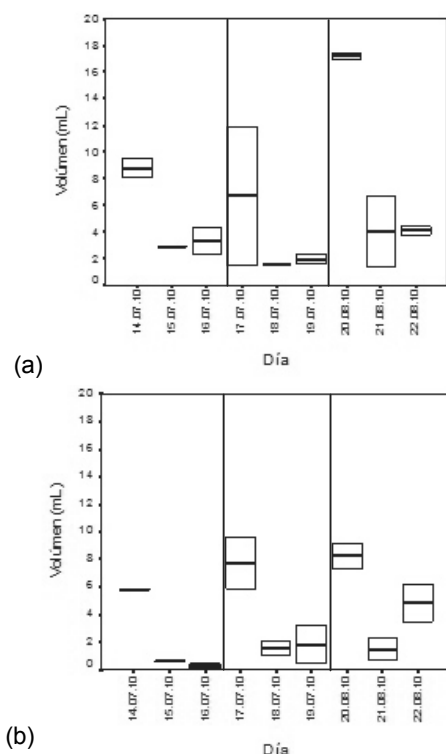
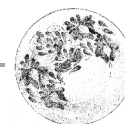


Figura 9. Diagramas de cajas y bigotes (a) Agua de grifo, (b) ARS

La distribución por bloques en los diagramas de cajas y bigotes permite comparar dentro de un mismo tratamiento la frecuencia respiratoria. Es así como en el caso del agua de grifo (figura 9a), se mantuvo una tendencia en cada uno de los intervalos de tres días, además, se encontró que las variables ETo y T presentaron una relación directamente proporcional a la frecuencia respiratoria, como sucedió del 14 al 16 de julio y del 17 al 19 de julio. La mayor frecuencia respiratoria ocurrió el 20 de agosto. Es posible que haya influido la morfología de la planta, la cual tenía un peso de 69,77 g y presentaba 6 hojas.

Para el tratamiento ARS (figura 9b) se encontró que el comportamiento de la frecuencia respiratoria fue decreciente. Pero en los últimos dos bloques, del 18 al 19 de julio y del 21 al 22 de agosto, se presentó un incremento cuando se encontraron los valores de ETo más altos (4,48 mm d⁻¹ y 4,57 mm d⁻¹), respectivamente. Así mismo, se presentaron altas temperaturas y valores de HR bajos en comparación con los otros

días, lo cual pudo ser influido por la temporada seca que comprende los meses de julio y agosto. Engloner (2009) encontró que *P. australis* presentó una mayor biomasa durante los meses de julio, agosto y septiembre, observándose un ligero aumento del diámetro del tallo basal de la caña de junio a agosto. Esto podría influir en la capacidad de la planta de incorporar el tratamiento.

La figura 10 presenta el diagrama de cajas y bigotes por bloques de ARS + CLT (0,29 mg L⁻¹) y ARS + CLT (2,18 mg L⁻¹). En la figura 10a, la mayor respiración se presentó el 9 de noviembre con un valor en la mediana de 12 mL, mientras que en la figura 10b fue el 6 de noviembre, con 10,75 mL. En general se presentó un comportamiento descendente de la frecuencia respiratoria desde el inicio de la medición hasta el final, a excepción de los días 15 y 16 de septiembre en las figuras 10a y 10b; 10 y 11 de noviembre en la figura 10b donde se incrementó levemente.

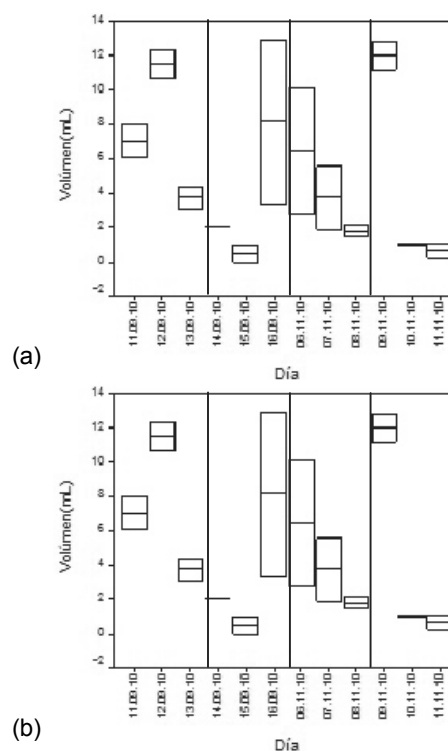


Figura 10. Diagramas de cajas y bigotes (a) ARS + CLT [0,29 mg L⁻¹] (b) ARS + CLT [2,18 mg L⁻¹]

En esta fase de experimentación se encontró para el ARS + CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$) un incremento en la frecuencia respiratoria. Después de los primeros días siguió el 12 de septiembre (figura 10a). A pesar de que las condiciones climáticas en estos días fueron muy similares, no se observó una variación significativa en la ETo durante este periodo (figura 4). El aumento en la frecuencia respiratoria se debió quizás a la dinámica interna de la planta.

El 16 de septiembre se evidenció un incremento en la frecuencia respiratoria en ambos tratamientos (figura 10a). El diagrama de cajas y bigotes presenta diferencias entre el valor máximo y mínimo. Muy probablemente, se generó una fuga en el momento de la toma de los datos que afectó la tendencia general. Aunque en la figura 10b esta diferencia no fue alta, se halló un leve incremento en la frecuencia respiratoria. También fue posible un estado de saturación en donde la estructura interna de la planta expuesta a sustancias extrañas y su mismo deterioro afectasen la respiración tomando lo necesario y expulsándolo. Esto se reflejó por la humedad de las partes externas del tallo.

Para el tratamiento ARS + CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$) se encontró disminución de la frecuencia respiratoria durante los tres días de medición, por tanto, se evidenció una tendencia estable en el consumo de este tratamiento (figura 10a) donde los valores se encontraron en un rango de 6,9 a $10,75 \text{ mL}$. Además, el día que se presentó el mayor consumo que corresponde al 6 de noviembre, la ETo y la T disminuyeron.

Según las cajas y bigotes de las figuras 11a y 11b para el CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$) y CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$), la frecuencia respiratoria en el tratamiento con CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$) fue decreciente, resultando un valor máximo ($16,1 \text{ mL}$) el 11 de septiembre. Cuando el tratamiento considerado fue CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$), el volumen desplazado presentó tendencia creciente en los tres últimos bloques del segundo al tercer día.

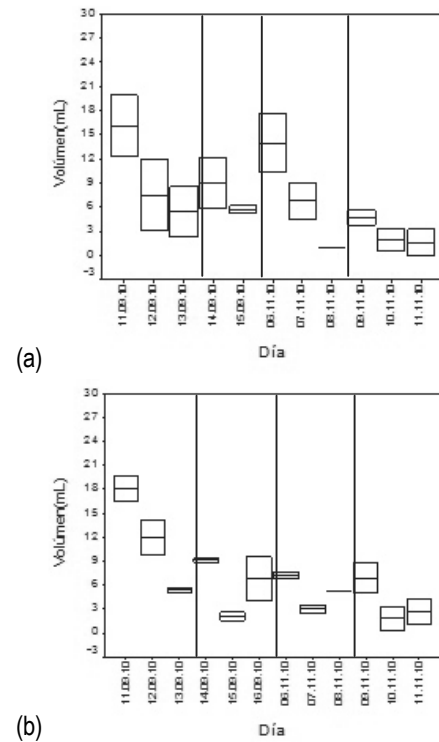
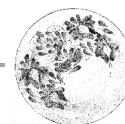


Figura 11. Diagramas de cajas y bigotes (a) CLT [$0,29 \text{ mg L}^{-1}$] (b) CLT [$2,18 \text{ mg L}^{-1}$]

Durante los ensayos con CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$) y CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$) se encontraron las mayores frecuencias respiratorias entre los tratamientos de la fase II. En la figura 11b se observó un aumento del segundo al tercer día el 15 y 16 de septiembre cuando se encontró una reducción considerable en la radiación, pasando de $1541 \text{ cal/cm}^2.\text{día}$ a $815 \text{ cal/cm}^2.\text{día}$ (figura 6).

El efecto de la Rs y la influencia de la luz sobre la planta se evidencian durante la transpiración estomática, desarrollando un estado de deshidratación. Esto facilita el enfriamiento de las hojas cuando el tiempo es caluroso o la luz es potente, por cuanto calor y luz cumplen un papel fundamental en la conservación de agua por parte de la planta (Cuevas, 2001). En este caso es posible que la acción de los órganos sea fundamental para controlar las variaciones climáticas y permitir el consumo por parte de la planta.



El 11 de septiembre (figura 12a), en los tratamientos con CLT, se encontró que la frecuencia respiratoria fue considerable. Para este día se presentó el valor más alto de E_{To} y T ; además, la R_s fue baja. Esto favoreció la estabilidad del xenobiótico, la cual influye de modo directo en la degradación del plaguicida. Para el 14 de septiembre, el comportamiento de ambas concentraciones fue similar. Para el 6 de noviembre se encontró un aumento significativo para el CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$). Aun cuando la HR fue alta, es posible que en la planta, al estar sometida a una sustancia extraña, su metabolismo reaccione buscando expulsarla.

Existen sistemas que al detectar una concentración de un xenobiótico generan enzimas para metabolizarlo, e incluso, para eliminar metabolitos secundarios. Cuando detectan una concentración baja, dejan de producir enzimas e intentan librarse del tóxico lo antes posible, aunque en ocasiones la concentración es tan elevada que a ellos no les favorece producir enzimas suficientes para metabolizarlo causando así un daño irreversible (García, 1998).

Según la figura 12a, la frecuencia respiratoria durante el primer día fue muy notable, ya que la planta se encontraba en completa vitalidad. Cada uno de los ensayos se consideró un experimento independiente, pero se puede resaltar el hecho de que las plantas a las que se les suministró agua de grifo presentaron una mayor frecuencia respiratoria comparada con el ARS, a excepción del 17 de julio cuando se consideraron las condiciones ARS + CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$), ARS + CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$), CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$) y CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$). No se encontró una tendencia definida en la frecuencia respiratoria de *P. australis*.

Para la frecuencia respiratoria del segundo día (figura 12b) en el agua de grifo se presentó un incremento comparado con el ARS, mientras que para los tratamientos ARS + CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$), ARS + CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$), CLT ($0,29 \text{ mg L}^{-1}$) y CLT ($2,18 \text{ mg L}^{-1}$) no se encontró una tendencia definida. En el caso del tercer día (figura 12c), el agua de grifo continuó con altos valores, a excepción del 22 de agosto, cuando

el ARS fue mayor. En el caso de los demás sustratos, no se encontró una tendencia definida.

Los días en que la frecuencia respiratoria del ARS superó a la del grifo se caracterizaron por presentar altas temperaturas, mayor evapotranspiración y baja humedad relativa. Esto permite comprender que un aumento significativo en las condiciones climáticas favoreció la frecuencia respiratoria.

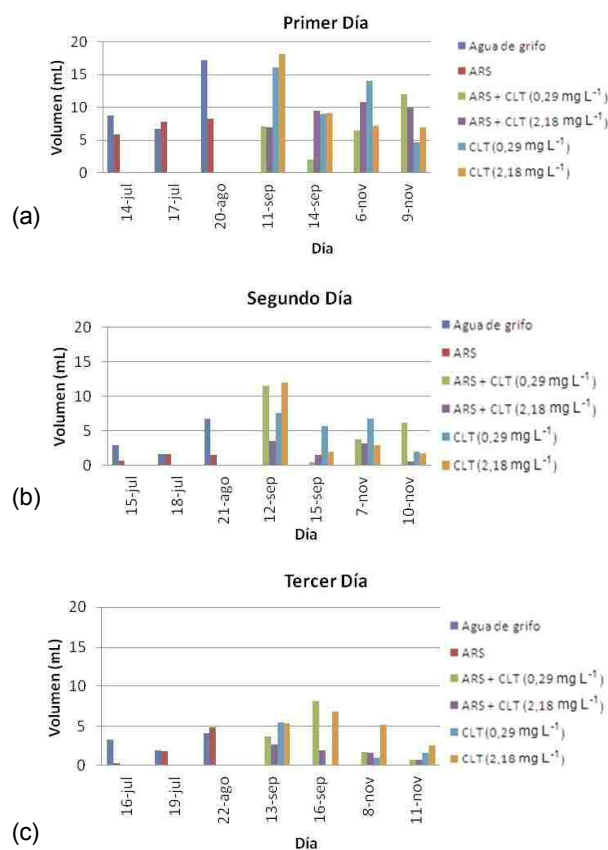


Figura 12. Frecuencia respiratoria en diferentes tratamientos

Según la frecuencia respiratoria por la evaporación (figura 13), durante 13 días de ensayo, se presentó una alta evaporación ($0,4 \text{ mL}$) en los días 4 y 14 de julio. Situación contraria ocurrió los días 15 de julio y 22 de agosto. Los valores no inciden de manera significativa en comparación con los volúmenes reportados en los tratamientos.

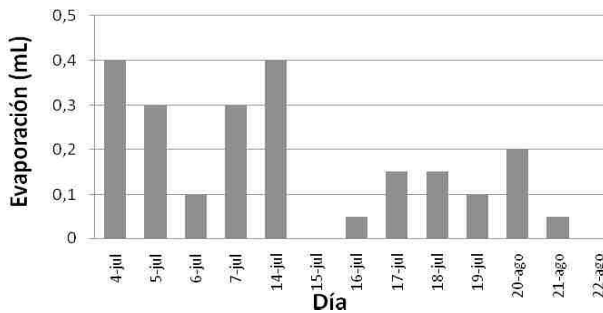


Figura 13. Frecuencia respiratoria por evaporación

Según la tabla 4, un incremento en la T y la ETo, con una disminución en la HR y la PB, ocasionó un aumento de la frecuencia respiratoria.

La prueba de correlación de Spearman permitió inferir el comportamiento de la frecuencia respiratoria con respecto a las variables climatológicas determinadas (tabla 4). La HR presentó correlación negativa y significativa con las variables Rs, T y ETo, y positiva con la PB. Ello sugiere un efecto inverso en la respiración de la planta, lo cual indica que al disminuir la HR decrece la cantidad de vapor de agua, y por tanto, la densidad disminuye, produciendo disminución en la presión que se ejerce sobre la superficie terrestre. A pesar de ello, es posible que esta variable no tenga un efecto determinante en la

frecuencia respiratoria. También, se encontró una correlación positiva, aunque no significativa, entre el volumen y la Rs. Esto sugiere un efecto positivo en la respiración de *P. australis*.

También la Rs aumentó con el incremento de la T y la ETo. Con la PB se encontró una correlación positiva pero no significativa. Para el caso de la T, se halló una correlación positiva con la ETo. Las variables T y Rs son importantes en la determinación de la ETo. La correlación positiva mayor (0,998) y la menor (0,226) se encontraron entre la ETo y T y entre el volumen y T, respectivamente. La correlación negativa más alta (-0,884) ocurrió entre la HR y ETo.

En muchos casos, los ambientes muy húmedos reducen la transpiración de la planta. El grado de humedad en el aire está determinado por el grado de transpiración. En un ambiente muy seco, las plantas deben incrementar la transpiración, por lo que absorben más agua del suelo.

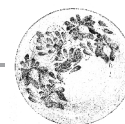
El número de correlaciones significativas entre el volumen y las demás variables fue notorio. Ello sugiere que las variables climatológicas presentaron un efecto importante en la frecuencia respiratoria de *P. australis* en presencia de materia orgánica y el CLT.

Tabla 4. Matriz de correlación de Spearman para la variable respuesta y variables climatológicas. Los valores entre paréntesis indican el número de muestras

	Volumen	HR	Rs	T	ETo	PB
Volumen	1					
HR	-0,19 (140) ²	1				
Rs	0,152(140) ¹	-0,397(140) ¹	1			
T	0,226(140) ¹	-0,882(140) ¹	0,593(140) ¹	1		
ETo	0,239(140) ¹	-0,884(140) ¹	0,585(140) ¹	0,998(140) ¹	1	
PB	-0,316(140) ¹	0,519(140) ¹	0,064(140) ¹	-0,405(140) ¹	-0,424(140) ¹	1

1 = Correlación significativa a nivel de 0,01

2 = Correlación significativa a nivel de 0,05



Según Patrick (2010), la HR es una variable altamente sensible. Sin embargo, tiene un efecto negativo sobre la ETo. Un aumento de la T produce un incremento en la ETo, la contribución en el incremento de la T a la ETo se ve compensada en gran medida por el impacto de la velocidad del viento, debido a su disminución y alta sensibilidad. En este sentido, las variables son determinantes en la frecuencia respiratoria de la planta *P. australis*, siendo estimulada en días de alta T, radiación y baja HR. En algunos casos, no se encontró esta relación quizás a causa de factores externos como la vitalidad de la planta, el peso y número de hojas.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que el plaguicida CLT afecta la frecuencia respiratoria de *P. australis*. El aumento en la transpiración de la planta se evidencia como un mecanismo de reacción frente al contaminante. Los resultados obtenidos en este trabajo indican que esta especie es conveniente para la depuración de aguas contaminadas con plaguicidas, como el CLT, en sistemas de tratamientos naturales y zonas tropicales. De hecho algunas plantas presentan la capacidad natural para absorber e hiperacumular pesticidas en sus tejidos. Diferentes estudios demuestran el uso potencial de macrófitas en sistemas naturales en la remoción de pesticidas. No obstante, se considera necesaria mayor investigación al respecto. Se concluye también que las variables climatológicas HR, Rs, T y ETo tienen un importante efecto sobre la frecuencia respiratoria de *P. australis*, en sistemas alimentados con materia orgánica y CLT. El efecto causado por la ETo se destaca entre ellos.

Esta investigación acerca al estudio de procesos biológicos en sistemas de tratamiento de agua residual basados en plantas. Su conocimiento aporta a un mejor manejo y aprovechamiento de ellos. A futuro, es importante evaluar el efecto de diferentes niveles de estrés en *P. australis*, por la presencia de sustancias extrañas en su metabolismo, sobre factores

morfológicos que puedan alterar su frecuencia respiratoria (p. ej. tamaño de las hojas, diámetro del tallo).

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se desarrolló gracias al apoyo del Grupo de Gestión y Modelación Ambiental (GAIA) y del Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, en Medellín, y también del Grupo de Ciencia e Ingeniería en Sistemas Ambientales (GCISA), Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

REFERENCIAS

- Abhilash, P. C.; Jamil, S. and Singh, N. (2009) "Transgenic plants for enhanced biodegradation and phytoremediation of organic xenobiotics". *Biotechnology Advances*, vol. 27, No. 4 (July-August), pp. 474-488.
- Baird, C. *Química ambiental*, 2a. ed. Barcelona: Reverté, 2001. 622 p.
- Bolaños, S. V.; Casas, J. C. y Aguirre, N. J. (2008) "Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrófitas *Pistia stratiotes* y *Egeria densa* en un sistema batch". *Gestión y Ambiente*, vol. 11, No. 2, pp. 39-48.
- Bouldin, J. L.; Farris, J. L.; Moore, M. T.; Smith Jr., S. and Cooper, C. M. (2006). "Hydroponic uptake of atrazine and lambda-cyhalothrin in *Juncus effusus* and *Ludwigia peploides*". *Chemosphere*, vol. 65, No. 6 (November), pp. 1049-1057.
- Bragato, C.; Brix, H. and Malagoli, M. (2006). "Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed". *Environmental Pollution*, vol. 144, No. 3 (December), pp. 967-975.
- Cornejo, J. *Dinámica de plaguicidas en ecosistemas terrestres*. Congreso Implementación del Convenio de Contaminantes Orgánicos Persistentes, Madrid (26-27 noviembre 2001), pp. 1-7.
- Cuevas, E. (2001). *Estudio de mecanismos de adaptación ecofisiológica de la vid (Vitis vinifera L. cv. Tempranillo) al déficit hídrico: Evaluación del consumo de agua y de las respuestas agronómicas en diferentes regímenes*

- hídricos. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Donson, R.; Couderchet, M. and Eullaffroy, P. (2009). "Phytoremediation of fungicides by aquatic macrophytes: Toxicity and removal rate". *Ecotoxicology and Environmental*, vol. 72, No. 8 (November), pp. 2096-2101.
- Engloner, A. (2009). "Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*): A review". *Flora*, vol. 204, No. 5 (January), pp. 331-346.
- Faure, M.; San Miguel, A.; Ravanel, P. and Raveton, M. (2012) "Concentration responses to organochlorines in *Phragmites australis*". *Environmental Pollution*, vol. 164 (May), pp. 188-194.
- Gagnon, V.; Chazarenc, F.; Kõiv, M. and Brisson, J. (2012). "Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland". *Water Research*, vol. 46, No. 16 (October), pp. 5305-5315.
- Gao, J.; Garrison, A. W.; Hoehamer, C.; Mazur, C. S. and Wolfe, N. L. (2000). "Uptake and phytotransformation of organophosphorus pesticides by axenically cultivated aquatic plants". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 48, No. 12 (December), pp. 6114-6120.
- García, M. D. *Estrés vegetal*, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina, 1998. pp. 1-8.
- Gerritsen, P.; Ortiz, C. y González, R. (2009) "Usos populares, tradición y aprovechamiento del carrizo: Estudio de caso en la costa sur de Jalisco, México". *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. IX, No. 29 (enero-abril), pp. 185-207.
- Jaramillo, A. (2006). "Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia". *Cenicafé*, vol. 57, No. 4, pp. 288-298.
- Lu, Q.; He, Z. L.; Graetz, D. A.; Stofella, P. J. and Yang, X. (2008) "Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.)". *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 17, No. 1 (January), pp. 84-96.
- Matamoros, V.; Arias, C. A.; Nguyen, L. X.; Salvadó, V. and Brix, H. (2012). "Occurrence and behavior of emerging contaminants in surface water and a restored wetland". *Chemosphere*, vol. 88, No. 9 (August), pp. 1083-1089.
- Olette, R.; Couderchet, M.; Biagianti, S. and Eullaffroy, P. (2008). "Toxicity and removal of pesticides by selected aquatic plants". *Chemosphere*, vol. 70, No. 8 (February), pp. 1414-1421.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). Guías para la calidad del agua potable. Volumen 1. 3ª ed. [en línea] 2006: [consultado el 14 de agosto de 2010]. Disponible en: <www.who.int/entity/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_8.pdf>.
- Patrick, M. World climate report (WCR). *Hydrocycle looking better than ever*. 2010. [online] [Consulted on June 20, 2011]. Available in: <<http://www.worldclimatereport.com/index.php/2010/01/20/hydrocycle-looking-better-than-ever>>.
- Restrepo, D. y Zapata, N. Simulación del movimiento del clorotalonil en la zona no saturada del suelo por medio del modelo chemflo 2000. *Universidad de Medellín*. [en línea] 2006 [Consultado el 10 de noviembre de 2011] disponible en: <<http://cdigital.udem.edu.co/TESIS/CD-ROM19252006/01.Portada.pdf>>.
- Rose, M. T.; Crossan, A. N. and Kennedy, I. R. (2008). "The effect of vegetation on pesticide dissipation from ponded treatment wetlands: Quantification using a simple model". *Chemosphere*, vol. 72 No. 7 (July), pp. 999-1005
- Srivastava, J.; Gupta, A. and Chandra, H. (2008). "Managing water quality with aquatic macrophytes". *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 7, No. 3, (September), pp. 255-266.