

**UNIVERSIDAD METROPOLITANA  
ESCUELA DE ASUNTOS AMBIENTALES  
SAN JUAN, PUERTO RICO**

**EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE FILTRACIÓN  
DE NUTRIENTES Y CONTAMINANTES EN UNA MITIGACIÓN DE  
HUMEDAL**

Requisito parcial para la obtención del Grado de Maestría en Ciencias en Gerencia  
Ambiental en Evaluación y Manejo de Riesgo Ambiental

Por  
Rosaida Burgos Cerpa

30 de abril de 2010

## **DEDICATORIA**

A todos los seres que de una manera u otra  
se cruzaron en mi camino para lograr esta meta.  
Este logro se lo dedico en especial a mi abuela,  
Aida Adorno, que aunque no se encuentre hoy a mi lado,  
siempre estuvo en mis tropiezos y triunfos.  
TE AMO

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi jefe el Sr. José A. Torres y su señora esposa la Sra. Norma Pérez, por permitirme llevar a cabo esta investigación en muchas ocasiones durante mis horas de trabajo. Gracias por brindarme el tiempo para lograr alcanzar esta meta. Gracias al Lcdo. Esteban Mujica, por su apoyo, colaboración y dirigir esta investigación. Gracias a la Dra. Olga Castro por todas sus recomendaciones y anotaciones que le realizó al documento y por el apoyo inmenso durante estos últimos tres años de mis estudios. Mil gracias a la Sra. Myrna Orama, porque sin importar el poco tiempo que nos faltaba, siempre dijo presente y dispuesta en ayudarnos en todo.

Gracias a todos los profesores desde mis estudios subgraduados en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Aguadilla y los de la Escuela Graduada de Asuntos Ambientales de la UMET, por brindarme el conocimiento y las herramientas para llevar a cabo mis estudios y profesión.

Agradezco también a todo el personal técnico del Laboratorio Central Analítico de la Universidad de Puerto Rico ubicados en el Jardín Botánico, en especial a la Dra. Julia O'Hallorans y a Yamilis Ocacio, quienes desde comienzos de esta investigación, siempre me ofrecieron sus recomendaciones y apoyo. Gracias a Dios por colocar en mi camino a un ser humano extraordinario, al consultor ambiental el Sr. Raúl Díaz, que al conocerme puso todo a mi disposición para ayudarme, motivarme y guiarme para terminar esta investigación, gracias Raúl.

A mi familia por su ayuda incondicional, por su comprensión y apoyo durante todos mis años de estudios. A todos, gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE APÉNDICES.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS O ABREVIATURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
Trasfondo del problema.....	1
Problema de estudio.....	3
Justificación del estudio.....	6
Hipótesis.....	7
Meta y objetivos.....	7
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
Trasfondo histórico.....	8
Marco teórico.....	13
Estudios de casos.....	22
Marco legal.....	26
Leyes estatales.....	26
Reglamentos estatales.....	32
Leyes federales.....	35
Reglamentos federales.....	37
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	39
Área de estudio.....	39
Diseño metodológico.....	40
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
Investigación.....	55
Diseño.....	55
Construcción.....	56

Monitoreo.....	57
Limitaciones.....	58
LITERATURA CITADA.....	59

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de los pH.....	66
Tabla 2. Resultados de la conductividad.....	67
Tabla 3. Ilustración de los resultados de los sólidos suspendidos.....	68
Tabla 4. Ilustración de los resultados del amonio.....	69
Tabla 5. Ilustración de los resultados del nitrato.....	70
Tabla 6. Ilustración de los resultados del fósforo.....	71
Tabla 7. Ilustración de los resultados del calcio.....	72
Tabla 8. Ilustración de los resultados del magnesio.....	73
Tabla 9. Ilustración de los resultados del potasio.....	74
Tabla 10. Ilustración de los resultados del sodio.....	75
Tabla 11. Ilustración de los resultados del zinc.....	76
Tabla 12. Ilustración de los resultados del manganeso.....	77
Tabla 13. Ilustración de los resultados del hierro.....	78
Tabla 14. Ilustración de los resultados del cadmio.....	79
Tabla 15. Ilustración de los resultados del cobre.....	80
Tabla 16. Ilustración de los resultados del plomo.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de localización del área de estudio.....	83
Figura 2.	Concentraciones de los sólidos suspendidos.....	84
Figura 3.	Porcentaje de filtración de los sólidos suspendidos.....	85
Figura 4.	Concentraciones del amonio.....	86
Figura 5.	Porcentaje de filtración del amonio.....	87
Figura 6.	Concentraciones del nitrato.....	88
Figura 7.	Porcentaje de filtración del nitrato.....	89
Figura 8.	Concentraciones del fósforo.....	90
Figura 9.	Porcentaje de filtración del fósforo.....	91
Figura 10.	Concentraciones del calcio.....	92
Figura 11.	Porcentaje de filtración del calcio.....	93
Figura 12.	Concentraciones del magnesio.....	94
Figura 13.	Porcentaje de filtración del magnesio.....	95
Figura 14.	Concentraciones del potasio.....	96
Figura 15.	Porcentaje de filtración del potasio.....	97
Figura 16.	Concentraciones del sodio.....	98
Figura 17.	Porcentaje de filtración del sodio.....	99
Figura 18.	Concentraciones del manganeso.....	100
Figura 19.	Porcentaje de filtración del manganeso.....	101
Figura 20.	Concentraciones del hierro.....	102
Figura 21.	Porcentaje de filtración del hierro.....	103

Figura 22.	Concentraciones del cobre.....	104
Figura 23.	Porcentaje de filtración del cobre.....	105
Figura 24.	Concentraciones del plomo.....	106
Figura 25.	Porcentaje de filtración del plomo.....	107
Figura 26.	Porcentaje de filtración de la mitigación de humedal.....	108
Figura 26.	Vista general del punto agua abajo del humedal.....	109



## LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1.	Resultados certificados por el Laboratorio Central Analítico de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez.....	111
Apéndice 2.	Fotografías del área de estudio.....	116

## LISTA DE SÍMBOLOS O ABREVIATURAS

Al – Aluminio

Ca – Calcio

Cd – Cadmio

CFR – Código Federal de Regulación

CITEC – Centro de Innovación Tecnológica de la Universidad de los Andes

Cm – centímetro

COE – Corps of Engineers

Cu - Cobre

CWA – Clean Water Act

<sup>0</sup>C – Grados Celsius

DBO – Demanda biológica de oxígeno

DIA – Declaración de Impacto Ambiental

DRNA – Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

DQO – Demanda química de oxígeno

E – Entrada

EPA – Environmental Protection Agency

ESA – Endangered Species Act

Fe – Hierro

FWS – Fish and Wildlife Services

GAO – Oficina de Responsabilidad del Gobierno

HFSS – Humedales de flujo superficial

JCA – Junta de Calidad Ambiental

K – Potasio

Mg – Magnesio

Mn – Manganeseo

MOA – Memorandum of Agreement

μS – microSiemens

Na – Sodio

NH<sub>3</sub> – Amonio  
Ni – Niquel  
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration  
NO<sub>3</sub> – Nitrato  
NTU – Unidades nefelométricas  
Pb - Plomo  
PO<sub>4</sub> – Fósforo  
ppm – partes por millón  
PR – Puerto Rico  
RGL – Regulatory Guidance Letter  
Sn – Estaño  
SS – Sólidos suspendidos  
SST – Sólidos suspendidos totales  
Zn - Zinc

## RESUMEN

La mitigación, restauración y protección de humedales ha cobrado relevancia nacional e internacional, debido principalmente a las crecientes amenazas contra estos ecosistemas, que son de gran beneficio para los seres vivos. Con el propósito de determinar si un una mitigación de humedal logra obtener los valores y funciones de filtración, realizamos un estudio donde evaluamos una mitigación con siete años de construida. Utilizando algunos parámetros físicos-químicos que pueden causar contaminación ambiental, llevamos a cabo un muestreo aguas arriba y aguas abajo del humedal comparando las concentraciones en ambos puntos. Estas muestras fueron almacenadas y transportadas al Laboratorio Central Analítico en la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico. Luego identificamos el porcentaje de filtración de los siguientes parámetros: sólidos suspendidos (SS), amonio ( $\text{NH}_3$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), fosforo ( $\text{PO}_4$ ), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb). Los resultados de esta investigación demuestran que el sistema de mitigación de humedal bajo estudio no sobrepasa el 14% de filtración. Sin embargo, también observamos que en algunos días se logró filtrar el 50% de los parámetros, lo que refleja que optimizando el diseño de la mitigación de humedal se puede lograr obtener una mejor eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes del cuerpo de agua.

## ABSTRACT

Wetlands mitigation, restoration and protection has gained national and international importance, mainly due to increasing threats against these ecosystems, which are of great benefit to living beings. In order to determine whether wetland mitigation achieve to obtain the functions and values of water filtration, we conducted a study evaluating a mitigation built seven years ago. Using physical-chemical parameters that can cause environmental pollution, we conducted a monitoring sampling upstream and downstream of the wetland comparing the concentrations in both points. These samples were stored and transported to the Central Analytical Laboratory at the Agricultural Experiment Station, University of Puerto Rico. Then we identify the rate of filtration of the following parameters: suspended solids (SS), ammonia (NH<sub>3</sub>), nitrate (NO<sub>3</sub>), phosphorus (PO<sub>4</sub>), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), sodium (Na), zinc (Zn), manganese (Mn), iron (Fe), copper (Cu), cadmium (Cd), and lead (Pb). The results of this research indicate that the wetland mitigation system under study does not exceed 14% of filtration. However, we also note that on some days it was possible to filter 50% of the parameters, which shows that optimizing the design of wetland mitigation construction can be achieved more removal efficiency of nutrients and pollutants of from a water body.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### **Trasfondo del problema**

En los últimos dos siglos se ha observado como el crecimiento poblacional, desparrame urbano y desarrollo industrial y comercial han afectado los recursos naturales, especialmente los humedales, sin que se hayan tomado en cuenta las consecuencias o los impactos acumulativos que traerían estas acciones. Año tras año hemos menospreciado nuestros recursos con el propósito de saciar nuestras necesidades humanas, económicas y sociales (Fletcher, 2003; Pérez, 2003).

El Sistema de Clasificación Cowardin (1979) define que un humedal es todo aquel hábitat en el cual su saturación de agua es el elemento dominante que determina la naturaleza de su desarrollo, así como el de las comunidades de flora y fauna que viven en su suelo y superficie. La pérdida de estos hábitats ha ocurrido a un ritmo devastador en todo el mundo. Durante mucho tiempo los humedales fueron subestimados y, como consecuencia, a menudo destruidos o degradados (NOAA, 2007). Sin embargo, estas pérdidas no son todas iguales y algunos hábitats han sido impactados más que otros (Fletcher, 2003). A lo largo de los Estados Unidos, las pérdidas de los humedales han sido substanciales: Entre los años de 1780 y 1980, los 48 estados inferiores perdieron el 53% de los hábitat de humedales originales, equivalentes a 104 millones de acres (42 millones de hectáreas) (Dahl, 1990). Veintidós estados han perdido el 50% o más de sus humedales naturales, siendo California el estado que más ha perdido (91%) y la Florida,

el que ha perdido la mayor cantidad en superficie (9.3 millones de acres, ó 3.76 millones de hectáreas) (Dahl, 1990). Las pérdidas más recientes, ocurridas en las últimas dos décadas, han sido causadas principalmente por la agricultura y por el desarrollo urbano, causando la eliminación de un 98% de humedales de agua dulce (Dahl, 2000).

La pérdida severa de humedales no se ha limitado a los Estados Unidos. Por ejemplo, en Nueva Zelanda, sólo quedan el 8% de los humedales originales. Sin embargo, para la mayoría de las regiones del mundo, existe muy poca información sobre la pérdida de los humedales o sobre el estado actual de los mismos. (Brinson & Malvarez, 2002). Esto ha conllevado el deterioro de los ríos, quebradas, humedales y la explotación de los recursos geológicos e hidrológicos en las llanuras de inundación, provocando riesgos ambientales y a nuestra seguridad.

Los impactos a estos sistemas son evidentes: la reducción de su riqueza ecológica, y de su diversidad biológica; además de los problemas de inundación que se confrontan en las temporadas de lluvias. La percepción pública de los humedales ha sido, históricamente, muy negativa, con la percepción de que los humedales son áreas pantanosas, desechables y sin utilidad alguna. Con mucha frecuencia, el valor de los humedales no se reconoce hasta que ya han sido destruidos; cuando los propietarios evalúan la inundación de sus casas o cuando tienen que enfrentar el aumento de los impuestos por la instalación de una planta nueva para tratar el agua potable contaminada (Salzman & Ruhl, 2005). Ahora sabemos que los humedales son componentes esenciales de los ecosistemas, proveyendo servicios múltiples; tales como: (1) minimización de la erosión con la reducción potencial de la velocidad y el volumen de las aguas de inundación (EPA, 2001); (2) prevención de los efectos río-abajo de las inundaciones, por

medio de la dispersión de las aguas en exceso hacia los llanos de inundación y hacia las depresiones poco profundas (De Laney, 1995); (3) mejoramiento de la calidad del agua por medio de la remoción de nutrientes y la absorción de sedimentos (EPA, 2001), beneficio potencial que depende grandemente del tiempo de retención de las aguas en los humedales; y, (4) provee hábitats para una variedad de vida silvestre, tales como aves acuáticas, anfibios e insectos (EPA, 2001).

### **Problema de estudio**

La protección, restauración y construcción de los humedales ha cobrado relevancia nacional e internacional, debido principalmente a las crecientes amenazas contra estos ecosistemas, que son de gran beneficio para los seres vivos. La Agencia de Protección Ambiental federal (EPA, por sus siglas en inglés) y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (COE, por sus siglas en inglés) suscribieron un Memorando de Acuerdo (MOA, por sus siglas en inglés), bajo la Sección 404 de la Ley de Agua Limpia Federal (CWA, por sus siglas en inglés), con el propósito de proteger estos sistemas. Como parte de los objetivos del MOA, se pretende evaluar los proyectos propuestos para ser desarrollados cerca o sobre estos ecosistemas de manera que se agoten todas las alternativas viables para que los mismos sean construidos en otros lugares que no causen impactos a los humedales y/o en aguas de los Estados Unidos. En Puerto Rico, en el año 1999, se estableció un método o mecanismo para incorporar a las agencias regulatorias en un solo documento y proceso de obtención de permiso, con el propósito de analizar y evaluar en un contexto más amplio los impactos a los recursos naturales. Este es conocido como “Joint Permit Application” y el mismo es circulado



entre doce (12) agencias. Sin embargo, es el COE quien determina si autoriza dichos impactos y la magnitud de compensación de éstos.

En el 2003, José J. Pérez, ex-alumno de la Universidad Metropolitana, realizó una investigación dentro de las oficinas del COE, (Tesis-Mitigación de Humedales en Puerto Rico bajo el “Joint Permit Application”; La Sección 404 de la Ley Federal de Agua Limpia y la meta de cero pérdida neta), para determinar si efectivamente se ha estado requiriendo a estos proyectistas la conservación, restauración o creación de los ecosistemas al momento de otorgarle el permiso. La respuesta a esta interrogante fue en lo afirmativo, bajo las reglamentaciones vigentes y el MOA entre la EPA y el COE. En el mismo se requiere un mínimo de compensación de impactos en una relación o proporción de 1:1; o sea, que por cada acre de humedal impactado se requiere un acre de mitigación compensatoria (Pérez, 2003; MOA, 1990).

El concepto de mitigación compensatoria se refiere específicamente a la restauración, creación, mejoramiento y, en casos excepcionales, a la preservación de otros humedales como compensación por el impacto en humedales naturales (MOA, 1990). En muchos de los proyectos que son aprobados bajo el permiso de solicitud conjunta (JPA, por sus siglas en inglés) se le requiere la construcción de un área de mitigación compensatoria con las mismas especies o de mayor valor ecológico y/o dentro de la misma cuenca hidrográfica de los impactos autorizados (MOA, 1990). El concepto de mitigación de humedal o “humedal construido” consiste en crear un área similar o igual a un sistema natural, permitiendo que los procesos aeróbicos y anaeróbicos se lleven a cabo creando un ecosistema con valores y funciones mayores, previo a la creación de éste (Tenenbaum, 2004). Estas mitigaciones pueden variar de tamaño, forma,

suelos, y vegetación, pero el principio de cada una de estas es lograr convertirse en un área ecológicamente sustentable con los valores y funciones de un sistema natural.

Una de las funciones primordiales de los humedales es que actúan como esponjas; es decir, son un área fundamental de retención de agua, lo que ayuda a evitar inundaciones y, a la vez, recargar los acuíferos (EPA, 2000; EPA, 2001). A manera de ejemplo, nuestro acuífero del área norte aporta más de 45 millones de galones diarios de agua para las necesidades domésticas de los municipios de esa región, además de proveer más de 15 millones de galones diarios de agua pura para la industria farmacéutica ubicada allí. Buena parte de esta aportación se debe a la interacción de los humedales con el sustrato calizo que caracteriza esta porción de nuestra Isla. En el Estado de Florida se entendió muy tardíamente la conexión entre el humedal conocido como *Everglades* y el acuífero que abastece de agua potable a la ciudad de Miami. Luego de décadas de drenajes y canalizaciones en este humedal, el Gobierno Federal de los Estados Unidos se encuentra actualmente invirtiendo decenas de millones de dólares para tratar de revertir parcialmente los daños causados, y así asegurar los abastos de agua de la zona.

Los humedales también actúan como filtros de sustancias químicas y metales peligrosos para la vida, todo esto a muy bajo costo. Al llegar las aguas de escorrentía a los humedales, arrastrando metales pesados provenientes de actividades industriales y comerciales, o cargadas de nitrógeno y fósforo provenientes de la agricultura, las plantas, los organismos y microorganismos acuáticos del humedal rompen las cadenas químicas de sustancias peligrosas, convirtiéndolas en elementos inofensivos que de otra manera irían a parar al mar o a otros cuerpos de agua. Los humedales también filtran y retienen sedimentos de aguas de escorrentía, ayudando a evitar que éstos tapen las tuberías, ríos y

embalses que nos proveen el agua que usamos cotidianamente en nuestros hogares (EPA, 2001).

Para efectos de esta investigación nos enfocaremos en la eficiencia de una mitigación de humedal en mejorar la calidad de agua por medio del proceso natural de filtración.

### **Justificación del Estudio**

Nosotros, los puertorriqueños, hemos vivido en carne propia la pobre planificación que existe en Puerto Rico, durante todos estos años. Sólo basta con un día de lluvia para que veamos cómo las quebradas y ríos se desbordan causando daños sobre nuestras calles, ciudades, siembras agrícolas; costándonos dinero y, sobre todo, poniendo en riesgo nuestras vidas. Se ha demostrado que las agencias regulatorias han estado cumpliendo con sus tareas al evaluar cada uno de los proyectos propuestos. Sin embargo, ¿quién garantiza que esas “mitigaciones” o restauraciones se han estado llevando a cabo? ¿Cómo sabemos o determinamos cuál es el método o mecanismo utilizado por estas agencias para determinar los valores ecológicos de los humedales a ser impactados? ¿Cómo sabemos o determinamos que una construcción de un humedal puede compensar los valores y funciones perdidas?

En Puerto Rico existen muy pocos estudios científicos sobre la evaluación de las mitigaciones de humedales para corroborar si dichas áreas logran obtener los valores y funciones de un sistema natural. Esta investigación provee información que podrá ser utilizado por las agencias estatales y federales, como la Junta de Calidad Ambiental (JCA), EPA y COE, y el público en general para la evaluación de la efectividad de

filtración de las mitigaciones de humedales en Puerto Rico. De esta manera se generará una herramienta de evaluación adicional para monitorear e identificar la eficiencia de filtración de una mitigación de humedal.

### **Hipótesis formulada**

Los sistemas existentes de mitigación de humedales no contemplan una compensación real de la pérdida de funciones como la filtración de nutrientes y contaminantes.

### **Metas y Objetivos**

Esta investigación tuvo como meta determinar la función de remoción de contaminantes de una mitigación de humedal. Para lograr esta meta se establecieron los siguientes objetivos:

1. Obtener datos analíticos y concentraciones de los siguientes parámetros físico-químicos: pH, conductividad (CE), sólidos suspendidos (SS), amonio ( $\text{NH}_3$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), fosforo ( $\text{PO}_4$ ), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) antes y después de atravesar el sistema.
2. Establecer porcentaje de filtración basado en los parámetros mencionados en el objetivo anterior y determinar la efectividad de remoción de los nutrientes o contaminantes.
3. Hacer recomendaciones al proceso de diseño, construcción y monitoreo de una mitigación de humedal para aumentar la eficiencia de remoción de contaminantes.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### Trasfondo histórico

Hay humedales en todas partes, desde la tundra hasta el trópico, sin embargo no se sabe con exactitud qué porcentaje de la superficie terrestre se compone actualmente de humedales. Según la estimación del Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación sería de unos 570 millones de hectáreas (5.7 millones de km<sup>2</sup>), aproximadamente el 6% de la superficie de la Tierra, de los cuales 2% son lagos, 30% turberas arbustivas o abiertas, 26% turberas de gramíneas o carrizo, 20% pantanos y 15% llanuras aluviales (Ramsar, 2004).

Mitsch y Gosselink, en la 3a. edición de su libro de texto *Wetlands* (2000), opinan que oscila entre 4% y 6% de la superficie de la Tierra. Los humedales figuran entre los medios más productivos del mundo. Son cunas de diversidad biológica y fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir (EPA, 2001). Dan sustento a altas concentraciones de especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados. Los humedales son también importantes depósitos de material genético vegetal. El arroz, por ejemplo, una especie común de los humedales, es el principal alimento de más de la mitad de la humanidad (Pérez, 2003).

Las múltiples funciones de los ecosistemas de humedales y su valor para la humanidad se han llegado a comprender y documentar en grado creciente en los últimos

años (Dahl, 2000). Esto se ha traducido en gastos exorbitantes para restablecer las funciones hidrológicas y biológicas de humedales degradadas o interrumpidas (Dahl, 2000; Pérez, 2003). Con todo, esto no basta, los empeños de los dirigentes mundiales para hacer frente a la aceleración de la crisis hídrica y a los efectos del cambio climático ponen de relieve que se ha iniciado la carrera para mejorar las prácticas apreciablemente a escala mundial y ello en momentos en que todo indica que la población del mundo aumentará en 70 millones de personas por año en los próximos 20 años (Ramsar, 2004).

Las funciones, los valores y atributos en cuestión sólo pueden mantenerse si se permite que los procesos ecológicos de los humedales sigan funcionando (EPA, 2000; MOA, 1990; Ramsar, 2004). Desafortunadamente y a pesar de los progresos realizados en los últimos decenios, los humedales siguen figurando entre los ecosistemas más amenazados del mundo, sobre todo a causa de la continua desecación, conversión, contaminación y sobreexplotación de sus recursos (Fletcher, 2003; Ramsar, 2004). Durante la década de los noventa, cada vez más y más gente se mudó a las costas y zonas ribereñas, incrementando así la presión para urbanizar los humedales. La persistencia para la urbanización de los humedales debe enfrentarse a las leyes estrictas que los protegen (Salzman & Ruhl, 2005).

En los Estados Unidos como en Puerto Rico se utilizan dos definiciones con respecto a los humedales. Uno es la definición de FWS, el cual es utilizada para conducir el inventario nacional de los humedales. La otra es la definición utilizada bajo la reglamentación federal para identificar los humedales conforme a la Ley de Agua Limpia. Dichas definiciones se mencionan a continuación:

1. Para el FWS, un humedal es todo aquel hábitat donde la saturación de agua es el elemento dominante que determina la naturaleza de su desarrollo, así como el de las comunidades de flora y fauna que viven en su suelo y superficie (Cowardin, 1979. P. 4-10).

2. La regulación federal define los humedales como áreas que están inundada o se saturan con frecuencia que bajo circunstancias normales apoyan, un predominio de vegetación típicamente adaptada a vivir bajo las condiciones de suelo saturados.

El Sistema de Clasificación Cowardin (1979), identifica cinco sistemas de humedales de acuerdo a sus características o atributos. Estas son: 1) área con hidrofitos y de suelos hídricos; (2) áreas sin hidrofitos pero con suelos hídricos; como por ejemplo, llanuras donde la fluctuación drástica en el nivel del agua, la acción de la marejada, la turbiedad, o la alta concentración de sales pueden prevenir el crecimiento de los hidrofitos; (3) áreas con los hidrofitos pero sin los suelos hídricos; (4) áreas sin los suelos pero con los hidrofitos, tales como en áreas cubiertas por algas en las orillas rocosas; y, (5) humedales sin el suelo y sin hidrofitos, tales como las playas de grava u orillas rocosas sin la vegetación.

#### *Sistema marino*

Los hábitats marinos se exponen a las olas y las corrientes del océano y de los regímenes del agua que son determinados sobre todo por el reflujos y el flujo de mareas oceánicas. Las salinidades exceden el 30%, con poco o nada de dilución excepto fuera de las bocas de los estuarios (Cowardin, 1979).

### *Sistema estuarino*

Consiste en hábitat de marea profundos y los humedales de marea adyacentes que son generalmente semi-cerrados por tierra pero tiene acceso abierto, en parte obstruido, o esporádico al océano abierto, y en qué agua del océano por lo menos es diluida de vez en cuando por la salida de agua dulce de la tierra. La salinidad se puede aumentar periódicamente sobre el del océano abierto en la evaporación. Las costas con plantas y animales de áreas típicas estuarinas, tales como mangles rojos (*Rhizophora mangle*) son incluidas bajo este sistema (Cowardin, 1979).

### *Sistema ribereño*

Incluye todos los humedales y hábitat profundos que estén contenidos entre un canal, con dos excepciones: (1) los humedales dominados por árboles, arbustos, plantas emergentes persistentes, los musgos, o los líquenes, y (2) hábitat que contengan sales derivadas del océano superior a 0.5 % (Cowarding, 1979).

### *Sistema lacustre*

Incluye los humedales y hábitat profundos con las siguientes características: (1) esté situado en una depresión topográfica o un río; (2) carece de árboles, arbustos, plantas emergentes persistentes, musgos o líquenes con una cobertura mayor de 30% y (3) áreas que exceden las 8 hectáreas (20 acres) (Cowarding, 1979).



### *Sistema palustre*

Incluye todos los humedales “nontidal” dominados por los árboles, arbustos, plantas emergentes, musgos o líquenes, y todo los humedales que ocurren en áreas donde la salinidad está por debajo de 0.5% (Cowarding, 1979).

Bajo la reglamentación federal de la Ley de Agua Limpia, se estableció el MOA entre la EPA y el COE para determinar las mitigaciones necesarias bajo la Sección 404 de la Ley Federal de Agua Limpia. Este MOA provee los mecanismos o procedimientos a seguir con el propósito de cumplir con el objetivo de la Ley para restaurar y mantener la integridad química, física, y biológica de las aguas de los Estados Unidos, incluyendo los humedales (MOA, 1990).

Como parte de los objetivos del MOA, se pretende evaluar los proyectos propuestos para ser desarrollados cerca o sobre estos ecosistemas de manera que se agoten todas las alternativas viables en las cuales éstos pudiesen ser construidos en otros lugares que no causen impactos a los mismos. Durante la evaluación se utilizan unas guías bajo la Sección 404, la cual permite la recopilación de información sobre todas las facetas de un proyecto, incluyendo la mitigación compensatoria propuesta. El proceso consiste en que el COE, primero, hará una determinación de que los impactos potenciales a los humedales han sido evitados. De no poder ser evitados, dichos impactos deberán ser minimizados al mayor grado posible. Finalmente, estos impactos inevitables serán compensados. En la determinación de las medidas “apropiadas y practicables” de compensar los impactos inevitables, significa que estas deben ser del alcance y el grado de los impactos y “practicables” en el término de costo, tecnología existente y logística hacia los propósitos esenciales del proyecto (MOA, 1990).

El COE brindará consideración a los comentarios vertidos por las agencias al momento de realizar una determinación y evaluará lo siguiente: (1) evitar el relleno a los humedales; (2) minimización de los impactos adversos; y, (3) proveer una mitigación compensatoria por los impactos inevitables después de que todas las medidas para minimizarlos se hayan llevado a cabo (MOA, 1990).

Al solicitar un permiso bajo la sección 404, el peticionario tiene que convencer y demostrar al Cuerpo de Ingenieros que no existe alguna otra alternativa razonable que no sea rellenar el área de humedal indicado o que el diseño propuesto ha sido minimizado con el propósito de evitar los impactos (MOA, 1990). De satisfacerse estas dos condiciones, es entonces cuando se requiere la compensación de los humedales impactados por medio de una mitigación compensatoria (J. Salzman & J. B. Ruhl, 2005).

### **Marco teórico**

Una mitigación de humedal es el proceso de convertir un suelo con características típicas de terrenos secos a un ecosistema húmedo. Estas mitigaciones o "humedales construidos" utilizan plantas y/o vegetación nativas de los humedales naturales del área y sus microorganismos asociados para mejorar la calidad del agua y proveer un mejoramiento ambiental (Eulis et al., 2004). De esta manera, se permite el establecimiento de un hábitat de gran beneficio para la vida silvestre y que además ofrece múltiples oportunidades recreativas para las personas.

Una mitigación de humedal se diseña no sólo para cumplir con los requerimientos de las agencias federales y estatales como medida de compensación de los impactos autorizados, sino también para proveer usos y múltiples beneficios. Estos ecosistemas

proveen hábitat para la vida silvestre, sirven como áreas de depósito de agua de inundaciones, mejora la calidad de agua por su capacidad de retención de sedimentos y filtración de nutrientes y/o contaminantes y permiten actividades de recreación pasiva como la observación de aves, caminatas y otro tipo de actividad social como la educación ambiental (EPA, 2001; Mitsch & Gosselink, 2000).

Las mitigaciones de humedales mejoran la calidad del agua a través de una variedad de procesos naturales y biológicos que ocurren en los ambientes húmedos o saturados (Jeppensen et al., 1998). En otra forma, podemos decir que los microorganismos que habitan en las plantas y en los suelos del humedal transforman la materia orgánica y los nutrientes presentes en las aguas, en otros tipos de nutrientes que pasan a formar parte de estas plantas y de la vida acuática (EPA, 2000a).

La habilidad que tienen estos sistemas en reducir y/o remover contaminantes del agua, tales como nutrientes y metales pesados, ha propiciado un incremento en los estudios científicos en los últimos años (EPA, 2000b). Las fuentes de contaminación en los cuerpos de aguas provienen de fuentes naturales y/o antropogénicas (Orosz et al., 2006). Entre las fuentes naturales se atribuye a la vida silvestre como las aves y los mamíferos. Otro ejemplo, es el mercurio que se encuentra naturalmente en la corteza de la Tierra y los hidrocarburos. Normalmente las fuentes de contaminación natural son muy dispersas y no provocan concentraciones altas de contaminación (De Laney, 1995).

Entre las fuentes antropogénicas se incluyen el crecimiento de la industrialización, de la urbanización y de la población humana; lo cual, a su vez, acrecientan los problemas de contaminación de nuestros recursos (Gatts et al., 2003). Por ejemplo: las industrias de construcción, minería, energía, fertilizantes, plaguicidas

(pesticidas) y pinturas entre otros. La actividad doméstica produce principalmente residuos orgánicos, pero el alcantarillado arrastra además todo tipo de sustancias: cómo emisiones de los automóviles (hidrocarburos, plomo, otros metales, etc.), sales, ácidos, etc (De Laney, 1995).

Los ríos, lagos y mares recogen, desde tiempos inmemoriales, la basura producida por la actividad humana. El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación (Angeler & Moreno, 2006). Pero esta misma facilidad de regeneración del agua, y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual en el que arrojamos los residuos producidos por nuestras actividades. Los plaguicidas, desechos químicos, metales pesados, residuos radiactivos, etc., se encuentran, en cantidades mayores o menores, al analizar las aguas de los lugares más remotos del mundo (Maitre & Consandy, 2005; Angeler & Moreno, 2006). Muchas aguas están contaminadas hasta el punto de hacerlas peligrosas para la salud humana (EPA, 2000a).

*Algunos términos sobre contaminación del agua:*

Eutrofización - La eutrofización es el enriquecimiento de las aguas con nutrientes vegetales inorgánicos, encontrándose entre ellos el nitrógeno el cual proviene fundamentalmente de las actividades agrarias o de aguas residuales urbanas (Kiely, 1999). Dicho exceso produce el crecimiento de la vegetación acuática (algas, lirios, etc.) en cuerpos de agua superficiales (lagos, embalses, etc.). Cuando grandes masas de esa vegetación muere, cae al fondo de los mismos, siendo descompuesta por bacterias aeróbicas y produciendo por lo tanto el agotamiento del oxígeno disuelto, lo cual puede

causar la muerte de peces y otros organismos acuáticos que consumen oxígeno (Miller, 1994).

Acidificación - está relacionada con la deposición atmosférica de sustancias acidificantes que conduce a un empobrecimiento de la flora y fauna de los ríos y lagos, disminución de la biodiversidad y muerte de los peces. Como resultado, en la capa superior de las aguas subterráneas debajo de suelos arenosos, se registra un aumento de la concentración de aluminio, sulfatos, iones hidrógeno y nitratos (Miller, 1994).

*Estándares de calidad de agua que fueron monitoreados en las muestras de agua tomadas para esta investigación:*

*Amoniaco* ( $NH_3$ ) – El ión amonio es un producto proveniente de la descomposición de residuos orgánicos nitrogenados (proceso de amonificación) o de la fijación biológica. Debido a que dicho ión posee una carga positiva en su composición química, éste puede retenerse en las partículas de arcilla del suelo cuya carga es negativa; por lo que es relativamente inmóvil en el suelo como consecuencia de ello y por lo general no se incorpora al agua subterránea (Díaz, 1985).

El amoniaco es fácilmente biodegradable ya que las plantas lo absorben con mucha facilidad permitiendo la eliminación del medio ambiente. Es un nutriente importante para el desarrollo de las plantas y/o para cualquier sistema vivo, ya que es una fuente de nitrógeno. Aunque concentraciones muy altas en el agua, como todo nutriente, puede causar graves efectos en un río o quebrada, ya que el amoniaco interfiere en el transporte de oxígeno por la hemoglobina.

*Nitrato (NO<sub>3</sub>)* – El ión nitrato es la base conjugada del ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). El ácido nítrico es un ácido fuerte el cual se disocia en agua produciendo iones nitrato e iones hidroxonio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) (WHO, 1978).

El nitrato es una forma iónica combinada de nitrógeno y oxígeno en condiciones aerobias (EPA, 2004b) y resulta de la oxidación total de los compuestos del nitrógeno. Es un ión estable, soluble en agua, muy móvil, no se absorbe en arcilla o materia orgánica por sus condiciones aniónicas, y por lo tanto, se puede lixiviar a través del suelo y ser transportado por el agua subterránea (Díaz, 1985).

En los sistemas de agua dulce o de estuario, el nitrato puede alcanzar altos niveles que potencialmente pueden causar la muerte de los peces. Aunque el nitrato es mucho menos tóxico que el amoníaco o el nitrito, los niveles sobre 30 ppm puede inhibir el crecimiento de muchas de las especies acuáticas. Altos niveles del nitrato en conjunto con otros nutrientes como el fosfato y potasio puede ocasionar la eutroficación del cuerpo de agua dando por resultado el alto consumo del oxígeno disuelto, causando la muerte de los peces y de otros organismos acuáticos.

*Sólidos suspendidos* - Los sólidos suspendidos, tales como limo, arena y virus, son generalmente responsables de impurezas visibles. La materia suspendida consiste en partículas muy pequeñas, que pueden ser identificadas con la descripción de características visibles del agua, incluyendo turbidez y claridad, gusto, color y olor del agua. En nuestro pensar no vemos que los sólidos suspendidos sean un tipo de contaminación. Sin embargo, esta materia suspendida en el agua absorbe la luz, haciendo que el agua tenga un aspecto nublado. Esto se llama turbidez y puede ocasionar problemas no sólo estéticos y ambientales pero también económicos, ya que puede causar

desperfectos a los equipos utilizados como generadores de energía o plantas de filtración de agua potable. La turbidez se puede medir con varias diversas técnicas, esto demuestra la resistencia a la transmisión de la luz en el agua.

Estos sólidos son eliminados por el proceso de sedimentación, movimiento, filtración y degradación mediante las raíces y rizomas de las plantas y jacintos de los humedales.

*Metales* – Las concentraciones altas de sales de los metales como el plomo, zinc, cadmio, cobre, manganeso, magnesio, hierro, calcio y sodio son tóxicas para la flora y la fauna tanto las terrestres como las acuáticas . La contaminación del agua por plomo y estos otros metales no se origina directamente por estos, sino por sus sales solubles en agua. Las mismas son generadas por las fábricas de pinturas y agentes colorantes, en pirotecnia, en la coloración vidriosa por las principales áreas de aplicación que arrojan sus desechos a las alcantarillas, como son el acabado de metales, fábricas de baterías, de plásticos, de plaguicidas (fungicidas), detergentes, entre otros.

*pH* - Es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado el número de iones de hidrógeno presentes. Se mide en una escala a partir de 0 a 14, el cual el valor 7 indica que es una sustancia neutra. Los valores de pH por debajo de 7 indican que una sustancia es ácida y los valores de pH por encima de 7 indican que es básica. Cuando una sustancia es neutra el número de los átomos de hidrógeno y de hidróxido son iguales. Cuando el número de átomos de hidrógeno ( $H^+$ ) excede el número de átomos de hidróxido ( $OH^-$ ), la sustancia es ácida.

*Conductividad* - significa la conducción de la energía por los iones. La medida de la conductividad del agua puede proporcionar una visión clara de la concentración de

iones en el agua, pues el agua es naturalmente resistente a la conducción de la energía. La conducción se expresa en microSiemens y se mide con un conductivímetro o una célula. Es una medida indirecta para identificar la presencia de sólidos inorgánicos disueltos, tales como cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio, calcio, e hierro. Estas sustancias conducen electricidad porque se cargan negativamente o positivamente cuando están disueltas en el agua. La industria agrícola puede incrementar la conductividad debido a la presencia del fosfato y del nitrato.

#### *Enfermedades y su relación con nitratos y nitritos*

Metahemoglobinemia - el nitrato es uno de los factores que produce la metahemoglobinemia o “síndrome del bebe azul”.

La hemoglobina, la cual es una proteína que se encuentra contenida en los hematíes o eritrocitos, sirve como transportador del oxígeno en la sangre. Pero para que ello ocurra, es decir, para que el oxígeno sea captado y por ende sea transportado, el átomo de hierro que se encuentra formando parte del grupo hemo de la hemoglobina debe estar en estado de oxidación ferroso (+2) o forma ferrohemoglobina. Sin embargo, este átomo de hierro también puede estar en estado de oxidación férrico (+3) o forma ferrihemoglobina, también conocida como metahemoglobina; pero en este caso, el oxígeno no podrá ser captado (Stryer, 1993).

En el cuerpo, los nitratos son reducidos a nitritos, causando metahemoglobinemia. La reducción usualmente ocurre a través de la acción microbiana. Cuando los nitratos son ingeridos, la reducción a nitritos ocurre en el tracto intestinal; aunque algunos estudios sugieren que ésta puede comenzar en la cavidad oral (Gupta et al., 1999). Los nitritos



absorbidos reaccionan con la hemoglobina para formar metahemoglobina, oxidando el ión ferroso de la hemoglobina a ión férrico, no pudiendo la misma ser capaz de transportar el oxígeno en la sangre, lo que consecuentemente puede conducir a cianosis y total asfixia de los organismos, en algunos casos (Stryer, 1993).

De acuerdo a lo ya presentado, los riesgos a la salud por la exposición a nitratos están, por lo tanto, relacionados no sólo a su concentración en agua potable y comida, sino también a las condiciones propicias para su reducción a nitritos (Gupta et al., 1999). La correlación entre la cantidad de nitratos ingerida y el riesgo de metahemoglobinemia no es directa (IWSA, 1998). Es realmente muy difícil determinar cuantitativamente la relación dosis-respuesta, es decir, la concentración de nitrato a la que una persona está expuesta, ya sea desde agua o comidas, y niveles de metahemoglobinemia. Esto se debe a que existen numerosas diferencias entre los individuos, encontrándose entre ellas la edad, además de otras variables (WHO, 1978).

El nitrato en sí mismo no es tóxico, solo el nitrito directamente ingerido o formado *in situ* a partir del nitrato causa metahemoglobinemia en humanos. El nitrato necesita que otros factores estén presentes para causar la enfermedad en cuestión (IWSA, 1998). Estudios realizados por diferentes investigadores demostraron que la metahemoglobinemia infantil no se origina cuando los niveles de nitrato en agua son iguales o menores a 10 mg/l de nitrógeno – nitrato (EPA, 2004b).

### *Cáncer*

Los nitritos formados en el organismo a partir de la ingesta de agua de consumo que contiene nitratos, pueden reaccionar en el cuerpo con aminas secundarias, amidas y

carbamatos para formar compuestos N-nitrosos, los cuales podrían causar cáncer en humanos (Pontius, 1993). Se ha encontrado que compuestos N-nitrosos produjeron efectos carcinogénicos en animales; sin embargo, las cantidades producidas por el cuerpo humano son muy inferiores a aquellas que demostraron causar cáncer en animales. Este escenario denota que no hay pruebas clínicas o epidemiológicas para admitir la responsabilidad de los nitratos alimenticios, respecto de originar un riesgo de cáncer para los humanos (IWSA, 1998).

Se han efectuado, además, otras series de investigaciones para establecer la incidencia de los nitratos sobre el incremento del riesgo de contraer cáncer, particularmente cáncer de estómago y de esófago. A pesar de que en algunos casos hubo una correlación positiva entre ingesta de nitratos y muertes por los cánceres ya mencionados, o con el aumento del riesgo de dicha enfermedad, los resultados logrados no alcanzan para afirmar tales correspondencias, es decir para establecer una relación de causa-efecto. Esto se debe a que hay factores que pudieron explicar los resultados observados y que no pueden ser completamente manejados durante las investigaciones; un ejemplo de esto último ha ocurrido en un estudio realizado en Italia, en el que se halló una asociación positiva entre los niveles de nitrato y riesgo de cáncer gástrico, pero no habían sido controlados otros factores de riesgo de esta enfermedad como son el alcohol, la edad, la dieta, entre otros. También surgió en otro estudio llevado a cabo en diferentes áreas del Reino Unido, que existía una baja mortalidad por cáncer de estómago donde los niveles de nitratos en agua eran elevados.

Por otra parte, en varios estudios efectuados, las correlaciones positivas obtenidas no fueron estadísticamente significantes. Estas investigaciones existentes no permiten

demostrar que los nitratos o nitritos causaron un incremento del riesgo de cáncer porque los datos de dosis–respuesta fueron usualmente pobres, pudiendo existir otros agentes responsables de los resultados y por ello la USEPA no ha clasificado a los nitratos y nitritos como carcinógenos; sin embargo, tampoco ha desechado la posibilidad de que éstos puedan serlo (Pontius, 1993). Asimismo, existen normas y límites establecidos en relación al consumo de nitratos y nitritos, con el objetivo de prevenir la metahemoglobinemia y como medida de precaución, principalmente en el caso del cáncer (IWSA, 1998). Las mitigaciones de humedales son especialmente eficaces en la eliminación de problemas y contaminantes tales como amoniaco “ammonia”, nitrato, nitrito, nitrógeno, fósforo, los sólidos suspendidos y metales (Maitre, 2005).

### **Estudio de casos**

Actualmente los ríos y humedales son algunos de los ecosistemas amenazados alrededor del mundo. (Brinson & Malvarez 2002; Malmqvist & Rundle 2002; Tockner & Stanford, 2002). Por tal razón, la restauración de los ríos y humedales han incrementado significativamente como un fenómeno a nivel mundial (Kondolf 1995; Brookes, 1996; Nienhuis, 2001; Shields et al 2003; Bernhardt et al., 2005; Palmer et al., 2005).

Con el rápido aumento de los proyectos de restauración, el conocimiento científico ha ido aumentando simultáneamente. Sin embargo, los científicos están mayormente informados sobre el progreso alcanzado en los Estados Unidos y en Europa. Aunque el número total de los proyectos de restauración en Japón es casi igual de alto como el de los Estado Unidos, la relación de las publicaciones científicas relevantes en revistas internacionales en Japón es cerca de 1:100 (Nakamura et al., 2006).

*Caso # 1 – Humedal Artificial de Flujo Superficial (HFSS), Bogotá, Colombia*

Los humedales construidos de flujo superficial (HFSS) se caracterizan porque su lecho contiene un medio poroso en el cual se encuentran plantadas macrófitas emergentes. Este tipo de humedales se diseña por debajo del nivel del medio poroso con el fin de minimizar los olores, la atracción de vectores y los efectos negativos a la salud pública de las poblaciones aledañas al humedal (EPA, 2000c; EPA, 2004a; García et al., 2002). El diseño inicial se basó en el modelo de flujo de pistón. Las dimensiones fueron de 3 metros de largo, 1 metro de ancho y 1 metro de profundidad. El canal que proveyó la hidrología era de 1.7 m<sup>3</sup> de diámetro con un tiempo de retención de 3 días. Las plantas utilizadas fueron *Polygonum hydropiperoides*, *Bidens labeis* y *Juncus effusus*.

Con el propósito de garantizar la remoción de los contaminantes fue necesario realizar algunas modificaciones al lecho del humedal. Primero, se modificaron las alturas de tal manera que se crearan áreas aerobias, anóxicas y anaeróbicas. Segundo, se modificó la composición del lecho de tal manera que fuera arcilloso para facilitar el intercambio iónico con los metales pesados presente en el agua. Este humedal fue construido como una alternativa eficiente, ecológica y económicamente para el tratamiento de aguas residuales (Rolim, 1999).

Dicha estructura fue construida en lámina de hierro calibre 18 y vidrio templado de 10 mm de espesor. En el lecho del humedal se encuentra una capa de arcilla en forma escalonada, de 40 cm de espesor hasta 10 cm. Dentro de la estructura del HFSS se incluyeron siete puntos de muestreo. Estos puntos se ubicaron estratégicamente con el fin de analizar los efectos de la profundidad sobre los procesos de remoción. El HFSS se

encuentra dividido en tres zonas: zona de entrada, zona de tratamiento y zona de salida. Encima de la arcilla se encuentra una capa de grava (medio poroso). Todas las zonas fueron diseñadas con una longitud, composición de suelo y vegetación determinada.

En este sistema se utilizó agua residual preparada sintéticamente en el Centro de Innovación Tecnológica de la Universidad de los Andes (CITEC), utilizando como componentes agua de grifo, leche en polvo, azúcar, cáscaras de fruta y materia fecal. Durante la investigación se realizaron análisis de fósforo total, nitrógeno total, coniformes fecales, níquel, SST, DBO, DQO a las muestras de entrada y salida. Los análisis mencionados se realizaron bajo los protocolos del “Standard Methods (1985)” y los procedimientos del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de CIIA de la Universidad de los Andes.

Los resultados más significativos fueron la reducción del DQO de una concentración promedio inicial de 499.9 mg/l a una concentración final de 234.7 mg/l, obteniendo una remoción de un 52.4%. La concentración de los SST de 141.3 mg/l a 25 mg/l reduciendo la concentración entre 78 y 85%. El nitrógeno se redujo de 45.6 mg/l a 16.4 mg/l, obteniendo un promedio de remoción de 56.6 mg/l. El fósforo se redujo de 48.4 mg/l a 27.3 mg/l, con un por-ciento de remoción de 44%. El níquel tenía una concentración inicial de 18.3mg/l y salió con una concentración promedio de 1.9 mg/l, alcanzando un porcentaje de remoción de 89.5%.

Estudio de caso # 2 – “Microbial Source tracking of *Escherichia coli* in a Constructed Wetland” (Orosz-Coghlan et al. 2006).

El propósito de este estudio era investigar las colonias de *E. coli* en los humedales del río llamado Tres Ríos, localizados en Tolleson, Arizona. El origen de estas colonias se le han atribuido al nuevo crecimiento de *E. coli* que sobreviven al tratamiento de las aguas usadas. Estos humedales están localizados en la ciudad de Pheonix, en las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas usadas, la cual trata aproximadamente 5.79 billones de litros (1530 millones de galones de agua diarias).

Las muestras de aguas fueron tomadas durante los meses de octubre del 2000 hasta enero de 2001. Estas fueron tomadas en botellas de polietileno y fueron almacenadas de 2 a 8 °C y fueron procesadas dentro de las 24 horas. Otros parámetros como: la temperatura, turbidez, pH y el cloro residual fueron tomadas en cada uno de los puntos de muestreo al momento de las pruebas de campo. Entre algunos de los resultados se observó que las colonias de *E. coli* encontradas en la salida del humedal de los Tres Ríos provienen de fuentes humanas y de aves. Todos los resultados fueron tabulados e ilustrados en la siguiente tabla.

Estudio de caso # 3 – “Removal of Heavy Metals in a Horizontal Sub-Surface Flow Constructed Wetland” (Vymazal 2005).

Este humedal ha estado en operación desde el 2000, la cual sirve una población de aproximadamente 450 personas, contando con una capacidad máxima para 700 individuos. El propósito principal de este humedal es remover los sólidos suspendidos, nutrientes cómo el nitrógeno y fosfato, contaminación microbiana y metales cómo Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, y Zn; y la remoción y retención de bacterias entéricas utilizando vegetación emergentes.

Entro los resultado se observó que el aluminio tuvo un porcentaje de remoción de más de 98.9%, el zinc 94.1% y cromo con 92.8%. El hierro y manganeso aumentaron su concentración en el efluente lo que se sugiere que estos metales son arrastrados fuera del sistema. Este fenómeno es atribuido al hecho que en ausencia del oxígeno disuelto y de nitrato es cuando el hierro férrico es usado por los microorganismo como el terminal de aceptador de electrones durante la respiración (Vymazal, 2005).

### **Marco legal:**

En nuestro país existen leyes y reglamentos, a nivel estatal y federal, que establecen límites máximos para contaminantes como los nitratos, nitritos y amonio en el agua de consumo humano y/o regulaciones que de una manera u otra administran y protegen nuestros sistemas naturales como los humedales. A continuación se mencionan algunas de estas disposiciones legales:

#### *Leyes estatales:*

**Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico;** La Constitución establece “será política pública del Estado Libre Asociado la más eficaz conservación de los recursos naturales, así como el mayor aprovechamiento de los mismos para el beneficio general de la comunidad”.

**La Ley de Arena, Grava y Piedra,** Ley Número 132 del 25 de junio 1968, según enmendada; 28 L.P.R.A. secs. 206 y siguientes: Esta regula lo pertinente a excavaciones, extracciones, remociones y dragados de la corteza terrestre y establece que para realizar actividades de extracción en Puerto Rico se requiere un permiso del

Secretario del Departamento de Recursos Naturales luego de haber cumplido con el proceso de evaluación de un Documento Ambiental.

**Ley Orgánica del Departamento de Recursos Naturales. Ley Núm. 23 del 20 de junio de 1972, según enmendada hasta 1999; 3 L.P.R.A. secs. 151 y siguientes:** El Departamento deberá ejercer la vigilancia y conservación de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo ellas y la zona marítimo-terrestre, conceder franquicias, permisos y licencias de carácter público para su uso y aprovechamiento y establecer mediante reglamento los derechos a pagarse por los mismos.

**Ley de Bosques de Puerto Rico. Ley núm. 133 del 1 de julio de 1975, según enmendada hasta 4 de marzo de 2000; 12 L.P.R.A. secs. 191 y siguientes:** Se prohíbe cortar, talar, descortezar o de cualquier otra forma afectar los siguientes árboles en propiedades públicas o privadas: (1) Aquellos cuyas características sean indispensables o necesarias para uso forestal, incluyendo la protección de cuencas hidrográficas, el control de erosión y el balance ecológico del medio ambiente; (2) especies raras en peligro de extinción; (3) especies protegidas por cualquier razón que esté debidamente justificada mediante reglamento; (4) aquéllos localizados en plazas y parques públicos, y (5) aquellos que sean indispensables para algún fin de utilidad pública esencial. Disponiéndose, además, que las compañías urbanizadoras que desarrollen proyectos de viviendas, comerciales, o de cualquier otra naturaleza, estarán obligadas a cumplir con las disposiciones establecidas en el Reglamento de Siembra, Corte y Forestación para Puerto Rico, adoptado conjuntamente por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales y la Junta de Planificación y aprobado por el Gobernador de Puerto Rico el 1 de marzo de 1996”.



**Ley para la Conservación, el Desarrollo y Uso de los Recursos de Agua de P.R. Ley Núm. 136 del 3 de junio de 1976, efectiva el 3 de junio de 1976, según enmendada hasta el 1998; 12 L.P.R.A. sec. 1501.** “Es política pública del Estado Libre Asociado mantener el grado de pureza de las aguas de Puerto Rico que requiera el bienestar, la seguridad y el desarrollo del país, asegurar el abasto de aguas que precisen las generaciones puertorriqueñas presentes y futuras mediante el establecimiento de áreas de reserva de aguas y aprovechar las aguas y cuerpos de agua de Puerto Rico con arreglo al interés público y a criterios de uso óptimo, beneficioso y razonables. Este término incluye las aguas superficiales, las subterráneas, las costaneras y cualquiera otra dentro de la jurisdicción del Estado Libre Asociado. Excepto que específicamente se indique lo contrario, aguas y cuerpos de agua tendrán el mismo significado.”

**Ley de Vigilantes de Recursos Naturales y Ambientales del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales.** Ley Núm. 1 del 29 de junio de 1977, según enmendada; 12 L.P.R.A. sec. 1201. Este organismo se dedicará mediante todos los medios adecuados accesibles a las funciones de protección, supervisión, conservación, defensa y salvaguarda de los recursos naturales. Asimismo, estará facultado para ofrecer cualquier tipo de orientación, guía y ayuda a los ciudadanos según se desprende de las distintas leyes que administra el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales”.

**Política Pública sobre Humedales en PR, Ley de Tierra.** Ley núm. 314 del 24 de diciembre de 1998; 12 L.P.R.A. secs. 5001 y siguientes: “Se establece como política pública del Estado Libre Asociado de Puerto Rico, la protección de los humedales, entre ellos los pantanos y las ciénagas. A esos fines, se promueve la preservación, conservación, restauración y el manejo de este valioso recurso natural”. El Departamento

de Recursos Naturales y Ambientales identificará y delimitará las áreas anegadas, o que son anegables, pero no lo están por la acción del ser humano, a designarse reservas naturales de acuerdo a la definición de esta Ley y en un término no mayor de dos (2) años lo someterá a la Junta de Planificación para su correspondiente designación. Estas reservas naturales serán administradas y manejadas por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales para cada una de las cuales preparará un plan de manejo. “Para los efectos de esta Ley el término humedal significa un área natural o saturada por aguas superficiales o subterráneas a un intervalo y duración lo suficiente como para sostener y el cual bajo circunstancias normales sostiene o sostendría una vegetación típicamente adaptada a condiciones de suelos saturados, inundados o empozados la cual incluye a humedales tales como los pantanos, ciénagas, las planicies costeras (salitrales y lodazales), los cuerpos de agua abierta, marismas, o áreas similares”.

**Ley para la Reclamación de Tierras Áridas en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico. Ley Núm. 40 de 9 de junio de 1948, según enmendada; 28 L.P.R.A. secs. 71 y siguientes; y, Ley para la Reclamación de Manejo de Tierras pantanosas. Ley 317 del 24 de diciembre de 1998.** La presente Ley es con el propósito de enmendar aquellos aspectos referentes a humedales de la Ley Núm. 40 del 9 de junio de 1948, según enmendada, y conocida como "Ley para la Reclamación de Tierras Pantanosas o Áridas en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico". Esta Ley fue aprobada cuando no se tenía pleno conocimiento científico de la importancia de los humedales, y se les adjudicaba casi con exclusividad el ser focos de infección o criaderos de mosquitos transmisores de la malaria que deben ser eliminados", según reza la Exposición de Motivos de la misma. La Ley Núm. 40 de 9 de junio de 1948, según enmendada, faculta a

la Autoridad de Tierras a delimitar, adquirir y llevar a cabo construcciones y trabajos necesarios para drenar humedales.

**Ley para crear el Programa de Reforestación, Administración y Conservación de Recursos Vivos en la Administración de Recursos Naturales.**

**Ley núm. 195 de 7 de agosto de 1998, según enmendada; 12 L.P.R.A. secs. 211 y**

**siguientes:** “La misión de este Programa es atender la necesidad apremiante de la siembra, cuidado y manejo de árboles en las zonas rurales y urbanas de Puerto Rico como medio para promover “el desarrollo forestal para el beneficio de éstas y futuras generaciones”. De esta forma, se aspira a aumentar sustancialmente la cubierta vegetal de las cuencas hidrográficas, los bosques estatales, las reservas naturales, los refugios de vida silvestre, las áreas de planificación especial, los estuarios, los humedales, los terrenos forestales privados y los de las zonas urbanas que así lo ameriten”.

**Nueva Ley de Vida Silvestre de Puerto Rico.** Ley núm. 241 del 15 de agosto de 1999, según enmendada; 12 L.P.R.A. secs. 107 y siguientes: “Para establecer la Nueva Ley de Vida Silvestre de Puerto Rico, con el propósito de proteger, conservar y fomentar las especies de vida silvestre tanto nativas como migratorias; para declarar propiedad de Puerto Rico todas las especies de vida silvestre en su jurisdicción; para definir las facultades, poderes y deberes del Secretario del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales; para reglamentar la caza, el uso de armas de caza y la inscripción de las armas de caza; para expedir, renovar y revocar licencias de caza, permisos para operar coto de caza y permisos de caza o colección con propósitos científicos, educacionales, de recuperación o control poblacional; para establecer reglamentación para la introducción de especies exóticas a Puerto Rico; para fijar las penalidades por la violación a las

disposiciones de esta Ley y de los reglamentos promulgados en virtud de la misma, y para derogar la Ley Núm. 70 de 30 de mayo de 1976, según enmendada”.

**Ley sobre Política Pública Ambiental de 2004.** Ley Núm. 416 de 22 de septiembre de 2004; 12 L.P.R.A. secs. 8001 y siguientes: “Esta Ley tiene como propósitos el actualizar las disposiciones de la Ley Sobre Política Pública Ambiental del Estado Libre Asociado de Puerto Rico; promover una mayor y más eficaz protección del ambiente; crear un banco de datos ambientales y sistema de información digitalizada; asegurar la integración y consideración de los aspectos ambientales en los esfuerzos gubernamentales por atender las necesidades sociales y económicas de nuestra población, entre otras; promover la evaluación de otras políticas, programas y gestiones gubernamentales que puedan estar impidiendo el logro de los objetivos de esta Ley; crear la Comisión para la Planificación de Respuestas a Emergencias Ambientales adscrita a la Junta de Calidad Ambiental, la cual existe desde 1987 por disposición de Orden Ejecutiva para cumplir con requisitos federales y establecer sus deberes y responsabilidades”.

“Estado Libre Asociado de Puerto Rico procurará lograr su desarrollo sustentable basándose en los siguientes cuatro amplios objetivos: (1) la más efectiva protección del ambiente y los recursos naturales; (2) el uso más prudente y eficiente de los recursos naturales para beneficio de toda la ciudadanía; (3) un progreso social que reconozca las necesidades de todos; y, (4) el logro y mantenimiento de altos y estables niveles de crecimiento económico y empleos”.

*Reglamentos:*

**Reglamento para el aprovechamiento, vigilancia, conservación y administración de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo éstas y la zona marítima terrestre.** Reglamento Núm. 4860 de 29 de diciembre de 1992. Este Reglamento es para aprovechamiento, vigilancia, conservación y administración de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo éstas y la zona marítima terrestre. Este Reglamento tiene el fin de evitar, o reducir considerablemente, los daños que puedan sufrir los sistemas naturales, especialmente en las zonas de las Reservas Naturales, y fomentar su conservación. Conforme a dicha ley, el DRNA debe autorizar de antemano toda actividad que genere lucro o sea peligroso para la salud, los bienes o el medio ambiente. Conforme a una enmienda del 14 de enero de 2000 a la Ley Orgánica, el Secretario del DRNA tiene autoridad para reglamentar la protección, gestión y conservación de los humedales de Puerto Rico”.

**Reglamento para el Control de la Erosión y Prevención de la Sedimentación.**

Este Reglamento ha sido promulgado mediante Resolución R-97-46-2 para controlar la erosión causada por las actividades humanas y prevenir la sedimentación y contaminación de los cuerpos de agua de Puerto Rico. 30 de diciembre de 1997.

La Junta de Calidad Ambiental, en coordinación con el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, y en consulta con el Comité Interagencial para la Revisión del Programa de Control de la Erosión y Sedimentación, determinó la necesidad de desarrollar y adoptar este Reglamento para prevenir y controlar la contaminación de las aguas de Puerto Rico y de otros recursos. El Comité Interagencial para la Revisión del Programa de Control de la Erosión y Sedimentación está compuesto por representantes de

las siguientes agencias y organizaciones: Junta de Planificación, la Administración de Reglamentos y Permisos, los Distritos de Conservación de Suelos de Puerto Rico, el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de agricultura Federal, el Servicio de Extensión Agrícola de la Universidad de Puerto Rico, el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales y la Junta de Calidad Ambiental.

Estas actividades incluyen pero no se limitan a: desmontes; remoción de la cubierta vegetativa de los suelos; la construcción o demolición de estructuras; la extracción, almacenaje o disposición de terreno, incluyendo productos de dragado; o cualquier otra actividad que conlleve la alteración de las condiciones del terreno o suelo.

**Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico.** Versión enmendada Marzo 2003. Ha sido promulgado por la Resolución R-03-05 para mejorar, mantener y preservar la calidad de las aguas de Puerto Rico de manera que sean compatibles con las necesidades sociales y económicas de Puerto Rico.

Los propósitos de este Reglamento son: (1) designar los usos para los cuales la calidad de los cuerpos de agua de Puerto Rico deberá ser mantenida y protegida; (2) prescribir los estándares de la calidad de agua a fin de conservar los usos designados; (3) identificar otras reglas y reglamentos aplicables a las fuentes de contaminación que puedan afectar la calidad de las aguas sujetas a este Reglamento y (4) prescribir medidas adicionales necesarias para alcanzar y mantener la calidad del agua.

El cuerpo de agua donde se llevó a cabo la construcción de humedal está clasificado como Clase SD, bajo el presente reglamento.

Clase SD - Las aguas superficiales destinadas a utilizarse como fuente de abasto para el suministro de agua potable, la propagación y preservación de especies deseables,

incluyendo especies amenazadas o en peligro de extinción así como para recreación de contacto primario y secundario. La recreación de contacto primario en cualquier cuerpo de agua o segmento que no cumpla con la Sección 3.2.4(B) 12 de este Artículo está restringido hasta tanto el cuerpo de agua o segmento afectado logre cumplir con la referida sección.

***Estándares:***

1. Oxígeno Disuelto - contendrá no menos de 5.0 mg/L excepto cuando causas naturales ocasionen una depresión en este valor.
2. Coliformes - La media geométrica de una serie representativa de muestras, (por lo menos 5 muestras) de las aguas tomadas secuencialmente no deberá exceder de 10,000 colonias/100 mL de coliformes totales o 200 colonias/100 mL de coliformes fecales. No más de 20 por ciento de las muestras deberá exceder de 4,000 colonias/100 mL de coliformes fecales.
3. pH - Deberá siempre permanecer entre 6.0 y 9.0 excepto cuando fenómenos naturales ocasionen que el valor de pH salga fuera de este rango.
4. Color - No excederá de 15 unidades de acuerdo con los estándares colorimétricos del estándar platino-cobalto, excepto a causas naturales. Disponiéndose que, en casos donde el cuerpo de agua normalmente excede este valor, se podrá utilizar el mecanismo provisto bajo la sección 6.10 de este Reglamento para desarrollar criterios para un sitio específico.
5. Turbiedad - No excederá de las 50 unidades nefelométricas de turbiedad (NTU), excepto a causa de fenómenos naturales.

6. Sólidos disueltos totales - No excederán 500 mg/l excepto por causa de fenómenos naturales.
7. Substancias que provocan sabor u olor.
8. Fósforo total - Fósforo total no excederá 1 ppm (mg/L), en cuerpos de aguas superficiales, aguas arriba de los embalses, en segmentos de cuerpos de aguas superficiales con tomas de agua potable o en aguas estuarinas excepto cuando sea demostrado a la satisfacción de la Junta que un valor más alto de fósforo total en combinación con nutrientes derivados de nitrógeno prevalecientes no contribuirán a condiciones eutróficas en el cuerpo de agua.
9. Amoniac Total - El amoniaco total no excederá 1 mg/l aguas arriba.

**Reglamento para regir la extracción, excavación, remoción y el dragado de los componentes de la corteza terrestre; Diciembre 2004.** Este Reglamento faculta al Secretario del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales a autorizar bajo los criterios de evaluación adoptados la excavación, extracción, remoción y dragado de los componentes de la corteza terrestre como la arena, grava, piedra, tierra, sílice, calcita, arcilla y cualquier otro componente similar a la corteza.

*Leyes federales:*

Al ser Puerto Rico un territorio de los Estados Unidos, está sujeto a las leyes y reglamentos de los Estados Unidos que no sean localmente inaplicables, teniendo estas la misma fuerza y efecto que en los Estados Unidos. Las leyes y reglamentos federales aplicables en Puerto Rico respecto a los humedales son:

**La Ley de Manejo de la Zona Costanera de 1972. [Coastal Zone Management Act, 16 U.S.C. § 1451 et seq (1972)].** Compatibilidad Federal con el Plan



de Manejo de la Zona Costanera. La Ley de Manejo de la Zona Costanera de 1972 se promulgó con el fin de establecer un programa nacional para gestionar y equilibrar los usos de los recursos costaneros y moderar sus efectos. Conforme a esta ley, las actividades para las que se requiere un permiso federal deben ser compatibles con el programa aprobado de Manejo Costanero del estado correspondiente o del Estado Libre Asociado. Para todo uso de un humedal se necesita una notificación de que dicho uso está de conformidad con la Ley de Manejo de la Zona Costanera o una renuncia a dicha notificación. En Puerto Rico, la notificación la expide la Junta de Planificación.

**Ley de Agua Limpia Federal “Clean Water Act”, 1972; 33 U.S.C. secs. 1251 y siguientes:** La Ley de Agua Limpia Federal tiene la finalidad de mantener o restablecer las características físicas, químicas y biológicas de las aguas de la nación. La sección 404 de la misma ley sirve específicamente para reglamentar las descargas de material de relleno o dragado en las aguas de los Estados Unidos, los humedales inclusive.

#### **Sección 401**

Según la sección 401 de la Ley de Agua Limpia Federal (*Clean Water Act*), la aprobación de un permiso federal de uso de humedales se condiciona a que se certifique que la propuesta de permiso satisface las normas de calidad del agua del Estado Libre Asociado. Esas certificaciones de la calidad del agua las concede la Junta de Calidad Ambiental.

#### **Sección 404**

Esta sección de la Ley de Agua Limpia reglamenta la descarga de materiales en las aguas de los Estados Unidos, por ejemplo, la descarga de relleno y el movimiento de terrenos, así como la instalación de pilotes en los humedales.

También establece un sistema para la concesión de permisos a fin de asegurar que esas descargas cumplan con los requisitos de protección del medio ambiente. Están reglamentadas las descargas de material de relleno y dragado en cualquier cuerpo de agua o humedal, del tamaño que sea.

Se pueden conceder permisos anticipados de carácter general o nacional, para llevar a cabo determinadas actividades menores en los humedales. El establecimiento de nuevos humedales, como compensación para mitigar los que se hubieran impactado es sólo aceptable cuando la pérdida de los humedales haya sido tramitada a través de una solicitud de permiso y la misma resultase inevitable.

Nueva Regla de Mitigación (*New Mitigation Rule CFR 33 Part 332 Vol. 73, No. 70, April 10, 2008.*) El propósito de esta regla es establecer los estándares y criterios para el desarrollo de todos los tipos de mitigación que compensen por los impactos inevitables en aguas de los Estados Unidos autorizados a través de la emisión de un permiso del Departamento bajo la Sección 404 de la Ley de Agua Limpia.

Carta de Guía Regulatoria No. 08-03 del 10 de octubre de 2008. El propósito de esta carta de guía regulatoria (RGL, por sus siglas en inglés) es proveer a los Distritos y al público regulado los requerimientos mínimos de monitoreo para los proyectos de mitigación compensatoria, incluyendo la información mínima requerida en los informes de monitoreo.

**Sección 10 de la Ley de Ríos y Puertos. (*Rivers and Harbors Act, 1899; 33 U.S.C. secs. 403 y siguientes*)** Esta sección reglamenta toda actividad que afecte la

ubicación y el caudal de un cuerpo de agua navegable, o que suceda en esa agua navegable o sobre o bajo la misma. Cada distrito del Cuerpo de Ingenieros tiene una lista de las aguas navegables que reglamenta la Sección 10.

**National Environmental Policy Act (NEPA, 1969);** 42 U.S.C. secs. 4321 y siguientes; La Ley de Política Ambiental Nacional de 1969 (NEPA, por sus siglas en inglés), creo el Consejo de Calidad Ambiental (CEQ, por sus siglas en inglés) y dio un gran impulso a la creación de la EPA. En ella se estipula que el gobierno federal tiene responsabilidad de “restaurar y mantener la calidad del ambiente”. Esta legislación requiere que cualquier agencia del gobierno, con excepción de la EPA, formule una declaración de impacto ambiental (DIA) o bien, una evaluación ambiental (EA) para cualquier proyecto que pueda tener como consecuencia una alteración importante del medio ambiente.

**Ley de Especies en Peligro de Extinción,** (ESA por las siglas en inglés) en 1973; 16 U.S.C. secs. 1531 y siguientes: El objeto de la ESA es conservar "los ecosistemas de los que dependen las especies amenazadas y en peligro de extinción" y conservar y recuperar las especies catalogadas en la lista correspondiente. En virtud de la ley, las especies pueden considerarse "en peligro de extinción" o "amenazadas". Por especies en peligro de extinción se entiende aquellas especies que corren peligro de extinguirse en casi su totalidad o en una gran parte de su área de distribución. Por especies amenazadas se entiende aquellas especies que tienen probabilidades de correr peligro en un futuro cercano.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

Como se ha mencionado anteriormente uno de los objetivos primordiales de una mitigación de humedal es lograr que ésta obtenga los valores y funciones de un sistema natural. Esto requiere que se realicen monitoreos periódicos en dicha área para documentar los avances o retrocesos que puedan ocurrir durante el término establecido por el Cuerpo de Ingenieros (MOA, 1990). Para efectos de esta investigación evaluamos cómo una mitigación de humedal mejora la calidad de agua por medio del proceso natural de filtración.

Esta investigación tuvo como meta determinar la función de remoción de contaminantes de una mitigación de humedal. Esta mitigación de humedal es una medida compensatoria de los impactos autorizados bajo la Sección 404 de la Ley de Agua Limpia Federal.

#### **Área de estudio**

El humedal bajo estudio comprende un área de aproximadamente 2 acres y 1.43 acres de una quebrada intermitente sin nombre, localizado en la Carretera PR-167, Km. 14.6, Barrio Ortiz, Municipio de Toa Alta, Puerto Rico (Figura 1). Dicha mitigación fue construida en el 2002 para compensar los impactos en un total de 1.97 acres en aguas de los Estados Unidos. El área del humedal fue sembrada con plantas herbáceas de las siguientes especies: (3800) *Cyperus haspan*; (1800) *Polygornum spp.*; (1800) *Scirpus americanus*; (600) *Eleocharis spp.*; (500) *Canna glauca* y *Thailia geniculata*. En las áreas transitorias se sembraron los siguientes árboles: (150) *Enallagma latifolia*; (100)

*Pterocarpus officinalis*; (100) *Annona glabra*; (460) *Cecropia peltata*; (460) *Busera simaruba*; (460) *Citharexylum fruticosum*; y (460) *Eugenia jambos*.

### **Diseño metodológico**

Para lograr la meta establecida y alcanzar cada uno de los objetivos identificados fue necesario desarrollar una metodología y/o protocolo a seguir durante el proceso de investigación. Estos se detallan a continuación:

Objetivo # 1 - Colección de muestras de agua a la entrada (aguas arriba) y salida del humedal (aguas abajo) para la obtención de datos analíticos y concentraciones de los siguientes parámetros físicos-químicos: pH, conductividad (CE), sólidos suspendidos (SS), amonio ( $\text{NH}_3$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), fosforo ( $\text{PO}_4$ ), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), zinc (Zn), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), cadmio (Cd) y plomo (Pb) antes y después de atravesar el sistema.

- a. Tomamos un total de 8 muestras de agua superficial distribuyéndose en 4 muestras en el punto seleccionado aguas arriba de la mitigación identificado como zona de entrada (E) y 4 muestras en un punto aguas abajo de la misma identificada como zona de salida (S).
- b. Establecimos los puntos de muestreo en áreas donde el agua fluía de forma continua.
- c. El periodo de estudio comenzó el 28 de enero y terminó el 18 de febrero de 2009.
- d. Utilizamos envases de plásticos de 1,000 ml para almacenar cada una de las muestras de agua. Transportamos las muestras utilizando una nevera

portátil y hielo para mantener la temperatura de 4° C hasta llegar a las instalaciones del Laboratorio Analítico Central en la Estación Experimental Agrícola ubicadas en el Jardín Botánico en el Municipio de San Juan para los debidos análisis.

Objetivo # 2 - Establecer porcentaje de filtración basado en los parámetros bajo estudio y determinar la efectividad de remoción de los nutrientes o contaminantes.

- a. Procedimos a tabular los resultados de los análisis realizados por el Laboratorio de Extensión Agrícola, de acuerdo a las fechas de toma de muestras.
- b. Asignamos un valor porcentual tomando en consideración las cuatro muestras en el punto de entrada y las cuatro muestras tomadas en el punto de salida del humedal.
- c. Procedimos a realizar una comparación cuantitativa de los valores aguas arriba y aguas abajo de la mitigación para estimar la efectividad del proceso de remoción.

Objetivo # 3 - Hacer recomendaciones al proceso de diseño, construcción y monitoreo de una mitigación de humedal para aumentar la eficiencia de remoción de contaminantes y obtener una nueva herramienta para las agencias al momento de evaluar las mitigaciones de humedales.

- a. Procedimos hacer revisión de literatura de otros casos donde se haya alcanzado mayor remoción de contaminantes por medio de la filtración.

- b. Hicimos revisión de literatura de tecnologías innovadoras para aumentar filtración de nutrientes y contaminantes en cuerpos de aguas.
- c. Analizamos los diseños encontrados en dichos estudios de casos para seleccionar los más aptos para Puerto Rico y poder optimizar los diseños utilizados en el presente para aumentar el porcentaje de filtración.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los hallazgos que se generaron de los análisis realizados a las 8 muestras de agua.

#### **Resultados de los parámetros:**

1. pH – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 7.79 y en la salida 7.59. Durante esta muestra se pudo observar una disminución de 0.29 manteniendo un poco más neutral el agua en la salida del humedal. En el segundo día el punto E2 dio un pH de 7.43 y su salida 7.73. Contrario a la muestra anterior esta vez hubo un aumento en el pH, sin embargo el agua aun es considerada neutral. En el tercer día el punto E3 dio 7.90 y en su salida 7.16. En el último día de muestreo el pH dio en el punto de entrada 7.36 y en su salida 7.60.

El valor promedio del pH en el agua en el punto de entrada hacia el humedal es de 7.62, y el valor promedio en el punto de salida es de 7.67 (Tabla 1).

2. Conductividad – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 427  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en la salida 496  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Durante esta muestra se pudo observar un aumento en la conductividad. En el segundo día el punto E2 hubo una conductividad de 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en la salida 526  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el tercer día el punto E3 dio 407  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y en su salida 315  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el último día de



muestreo la conductividad en el punto de entrada fue de 326 y en su salida 474  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La conductividad del cuerpo de agua depende de la presencia de iones, su movilidad, nivel de valencia, concentraciones relativas y la temperatura a la hora de tomar la medición. Otro factor que incluye en los valores de conductividad es la presencia de calcio y magnesio en el medio, los cuales se discutirán más adelante (Tabla 2).

3. Sólidos Suspendedos - Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 11 mg/l y en la salida 8 mg/l con un porcentaje de filtración de un 28%. En el segundo día el punto E2 dio 10 mg/l y su salida 7 mg/l aumentando el porcentaje de filtración a un 30%. En el tercer día el punto E3 dio 3 mg/l y en su salida 14 mg/l. Contrario a los primeros dos días de muestreo la concentración de sólidos en la salida del humedal fue cuatro veces más que la concentración en la entrada. En el último día de muestreo en el punto de entrada dio 14 mg/l y en el punto de salida no pudo ser detectable la concentración por lo que se entiende que el mismo está por debajo del primer punto de calibración o debajo del límite de detección del instrumento utilizado en el laboratorio.

Para propósitos de cálculos hemos decidido otorgar el valor de uno (1) a la muestra que no pudo ser detectado para hacer una estimación comparativa, lo que demostraría un porcentaje de filtración de un 93%.

Tomando en consideración lo antes mencionado, el promedio de remoción de sólidos suspendidos del humedal es un 21%. La remoción de los SS fue posiblemente por la sedimentación en el sistema (Tabla 3, Figura 2 y 3).

4. Amonio (NH<sub>3</sub>) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 0.07 ppm y en la salida 0.36 ppm aumentando la concentración más de cinco veces en la salida del humedal. En el segundo día el punto E2 dio 0.24 ppm y su salida 0.19 ppm lo que refleja un porcentaje de filtración de 21%. En el tercer día el punto E3 dio 0.17 ppm y en su salida 0.40 ppm aumentando su concentración dos veces más que en la entrada de humedal. En el último día de muestreo en el punto de entrada dio 0.26 ppm y en su salida 0.40 ppm lo que resulta en un aumento de su concentración de 1.5 veces su valor.

A base de los resultados las concentraciones de amoniacos no fueron reducidas por el humedal sino aumentadas según los datos obtenidos aguas abajo. Las altas concentraciones del amoniaco puede ser producto de la materia orgánica proveniente de los animales presentes como gansos, gallinas, patos, entre otros. (Tabla 4, Figuras 4, 5 y 27).

5. Nitrato – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 4 ppm y en la salida 1 ppm con un porcentaje de filtración de 75%. En el segundo día el punto E2 dio 1 ppm y su salida 4 ppm aumentando su concentración cuatro veces. En el tercer día el punto E3 dio 1 ppm y en su salida 5 ppm aumentando su concentración cinco veces más. En el último día de muestreo en el punto de entrada 3 ppm y en su salida 2 ppm con un porcentaje de filtración de 34%.

Esto refleja que las concentraciones de nitrato no fueron reducidas por el humedal sino aumentadas según los datos obtenidos aguas abajo El aumento en las concentraciones de nitrato o nitrato a la salida del humedal se puede atribuir a la

oxidación de la materia orgánica presente en el cuerpo de agua. (Tabla 5, Figuras 6 y 7).

6. Fósforo (PO<sub>4</sub>) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 0.04 ppm y en la salida 0.17 ppm aumentando la concentración más de cuatro veces la concentración en la entrada. En el segundo día el punto E2 dio 0.03 ppm y su salida 0.20 ppm teniendo otro aumento de más de seis veces la concentración inicial pero en el tercer día el punto E3 dio 0.15 ppm y en su salida 0.11 ppm mostrando un porcentaje de filtración de 27%. En el último día de muestreo E4 dio 0.02 ppm y en la salida S4 dio 0.15 ppm lo que resulta en un aumento de más de siete veces la concentración a la entrada de humedal.

A base de los resultados antes mencionados las concentraciones de fosfato no fueron reducidas por el humedal sino aumentadas según los datos obtenidos aguas abajo. El aumento en las concentraciones de fósforo a la salida del humedal se puede atribuir por la oxidación de la materia orgánica presente en el cuerpo de agua. El valor promedio de aumento de la concentración de fosfato es más de dos veces la concentración inicial a la entrada del humedal. La remoción de fosforo se da por captación por parte de las plantas, la absorción al medio y la sedimentación (Hunt & Poach, 2000; Brix, 2000). El principal medio de remoción de fosforo a largo plazo es su acumulación en los sedimentos (Tanner, 2000; EPA, 1993) (Tabla 6, Figuras 8 y 9).

7. Calcio (Ca) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 39 ppm y en la salida 40 ppm aumentando la concentración aguas abajo. En el segundo día el punto E2 dio 46 ppm y su salida 40

ppm lo que resulta en un porcentaje de filtración de 13%. En el tercer día el punto E3 dio 29 ppm y en su salida 26 ppm lo que refleja un porcentaje de filtración de un 10%. En el último día de muestreo en el punto de entrada dio 31 y en su salida 42 ppm lo que refleja un aumento en aguas abajo.

Las concentraciones de calcio en el agua provienen mayormente de procesos geoquímicos naturales por las rocas sedimentarias, por lo que el aumento de las concentraciones aguas abajo se puede atribuir a procesos naturales en el sistema (Tabla 7, Figuras 10 y 11).

8. Magnesio (Mg) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 13 ppm y en la salida 20 ppm lo que resulta en un aumento en la concentración aguas abajo. En el segundo día el punto E2 dio 20 ppm y su salida 22 ppm resultando otro aumento en la concentración aguas abajo del humedal. Sin embargo en el tercer día el punto E3 dio 16 ppm y en su salida 8 ppm teniendo un porcentaje de filtración de un 50%. En el último día de muestreo en el punto de entrada dio 6 ppm y en su salida 5 ppm lo que refleja un porcentaje de filtración de un 17%.

El valor promedio de magnesio en el humedal mantuvo un valor igual a la entrada del sistema que la concentración en su salida. Igualmente que otros metales las concentraciones de magnesio en el agua provienen en su mayoría como resultado de los procesos geoquímicos naturales (Tabla 8, Figuras 12 y 13).

9. Potasio (K) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 3 ppm y en la salida 2 ppm teniendo un porcentaje de filtración de 34%. En el segundo día el punto E2 dio 2 ppm y su salida

1 ppm teniendo un porcentaje de 50% de filtración. En el tercer día el punto E3 dio 2 ppm y en su salida 3 ppm teniendo un aumento en la salida del humedal. En el último día de muestreo en el punto de entrada dio 3 ppm y en su salida 2 ppm nuevamente reflejando un porcentaje de un 34%.

El promedio de remoción de potasio en el humedal es un 20%. El potasio es uno de los metales más abundante de la corteza terrestre por lo que se encuentra en muchos procesos naturales, ya que es necesario para que dichos procesos se lleven a cabo (Tabla 9, Figuras 14 y 15).

10. Sodio (Na) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 27 ppm y en la salida 32 ppm lo que refleja un aumento en la salida. En el segundo día el punto E2 dio 31 ppm y su salida 35 ppm lo que resulta en otro aumento en la concentración en la salida del humedal. En el tercer día el punto E3 dio 28 ppm y en su salida 22 ppm lo que refleja en un porcentaje de filtración de 22%. En el último día de muestreo dio en el punto de entrada 27 ppm y en su salida 32 ppm lo que refleja otro aumento en la concentración durante la salida de la mitigación.

Esto refleja que las concentraciones de sodio no fueron reducidas por el humedal sino aumentadas según los datos obtenidos aguas abajo. El aumento de las concentraciones de sodio también son resultados de procesos naturales (Tabla 10, Figuras 16 y 17).

11. Zinc (Zn) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

Durante los cuatro días de muestro no pudo ser detectado la concentración de cadmio en las muestras de aguas arriba o aguas abajo del humedal. Nos referimos a

No Detectable, ya que su valor es mucho menor que el primer punto de calibración del instrumento del Laboratorio (Tabla 11).

12. Manganeso (Mn) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 0.05 ppm y en la salida 0.05 ppm, manteniendo la misma concentración en la entrada y salida del humedal. En el segundo día el punto E2 dio 2.87 ppm y su salida 0.28 ppm lo que refleja en un porcentaje de filtración de un 91%. En el tercer día el punto E3 dio 0.16 ppm y en su salida 0.16 ppm manteniendo la misma concentración en la entrada y salida. En el último día de muestreo no pudo ser detectado la concentración de manganeso en ninguno de los dos puntos.

El promedio de remoción de manganeso en el humedal es un 85%. El manganeso también es un metal abundante en la naturaleza y en suelos con alto contenido de materia orgánica. Su concentración también puede aumentar a causa de la introducción de plaguicidas y fertilizantes de la industria agrícola o por las descargas no autorizadas de las comunidades aledañas manteniendo una concentración proporcionada o reducida por el humedal (Tabla 12, Figuras 18 y 19).

13. Hierro (Fe) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

En el punto E1 el resultado fue 0.10 ppm y en la salida 0.04 ppm lo que refleja un porcentaje de filtración de 60%. En el segundo día el punto E2 dio 0.15 ppm y su salida 0.14 ppm con un porcentaje de filtración de 7%. En el tercer día el punto E3 dio 0.11 ppm y en su salida 1.36 ppm lo que resulta en un aumento en su concentración de más de 12 veces el valor de entrada. En el último día de muestreo en

el punto de entrada 0.14 ppm y en su salida 0.07 ppm con un porcentaje de filtración de un 50%.

A base de los resultados, el promedio de filtración del hierro en el humedal es un 36%. Sin embargo, durante el tercer día de muestreo la concentración del hierro en la salida del humedal era 12 veces la concentración de la entrada (Tabla 13, Figuras 20 y 21).

14. Cadmio (Cd) - Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

Durante los cuatro días de muestro no pudo ser detectado la concentración de cadmio en las muestras de aguas arriba o aguas abajo del humedal. Nos referimos a No Detectable, ya que su valor es mucho menor que el primer punto de calibración del instrumento del Laboratorio (Tabla 14).

15. Cobre (Cu) - Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

Durante los primeros tres días de muestro no pudo ser detectado la concentración de cobre en las muestras de aguas arriba o aguas abajo del humedal. En el cuarto día de muestreo el punto E4 dio 0.02 ppm y su salida 0.02 ppm manteniendo una concentración igual lo que puede indicar que el humedal no tiene la capacidad de filtrar el cobre (Tabla 15, Figuras 22 y 23).

16. Plomo (Pb) – Las muestras de entrada y salida arrojaron lo siguiente:

Durante el primer día de muestro la concentración de plomo no fue detectado en ningunas de las dos muestras. En el segundo día el punto E2 dio 0.02 ppm y su salida 0.02 ppm. Nuevamente en el tercer día no fue detectable la presencia de plomo en las muestras de agua En el último día de muestreo dio en el punto de entrada 0.18 ppm y en su salida 0.23 ppm.

Tomando en consideración los resultados de las concentración de plomo durante los dos días que pudo ser detectado, se observó que la concentración es proporcionado o mayor a su valor en la entrada al sistema. La concentración de plomo en la muestra puede ser atribuida a que es un metal que se encuentra en suelos con poca cantidad de arcilla y materia orgánica (Tabla 16, Figuras 24 y 25).

A base de los resultados de las concentraciones se procedió a establecer el porcentaje de filtración por parámetro analizado con el propósito de establecer una comparación entre estos para lograr aceptar o rechazar la hipótesis formulada.



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La construcción o restauración de humedales en Puerto Rico ha aumentado como resultado de las políticas públicas de las leyes federales y estatales para alcanzar la pérdida no neta de un recurso acuático (Ambrose, 2000). Este estudio puede ser utilizado para promover o requerir que se realicen monitoreos más allá de establecer cobertura vegetativa de una mitigación de humedal. Estudios recientes realizados por el Concilio Nacional de Investigación (NRC, por sus siglas en inglés) y por la Oficina de Responsabilidad del Gobierno (GAO, por sus siglas en inglés) indican que el COE no estaba proveyendo un informe adecuado que asegure que las mitigaciones de humedales estaban compensando exitosamente las funciones perdidas como parte de las actividades autorizadas (RGL No.08-03). El estudio de la NRC documentó que la falta de objetivos o estándares de cumplimiento bien definidos en los planes de mitigación dificulta alcanzar compensación de los recursos acuáticos. Por esta razón, es que el 10 de abril de 2008, se publicó la Nueva Regla de Mitigación para la Compensación Mitigatoria para la Pérdida de Recursos Acuáticos “Mitigation Rule”.

Los resultados de esta investigación demuestran que el sistema de mitigación de humedal no sobrepasa el 14% de filtración. Lo que resulta que nuestra hipótesis de que los sistemas existentes de mitigaciones de humedales no contemplan una compensación real de la pérdida de funciones como la filtración de nutrientes y contaminantes, es aceptada. No obstante, tres de los parámetros analizaron lograron obtener un porcentaje

filtración durante los días de muestreo; los sólidos suspendidos obtuvo un porcentaje de filtración de 21%, el potasio 20% y el manganeso un 85% (Figura 26).

Sin embargo, también observamos que en algunos días se logró filtrar el 50% de los parámetros, lo que refleja que optimizando el diseño de la mitigación de humedal se puede lograr obtener una mejor eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes del cuerpo de agua. En la salida del humedal encontramos que algunas concentraciones aumentaron. Esto puede ser por varios factores, uno es que aguas abajo del sistema encontramos varios animales como patos, gansos y gallinas aumentando la descomposición de materia orgánica en comparación con la encontrada en aguas arriba.

La presente investigación brinda una alternativa que puede ser incluida en el proceso de construcción y monitoreo de una mitigación de humedal, ya que actualmente no se realizan monitoreo de la calidad de agua en las mitigaciones de humedales en Puerto Rico. La construcción de un humedal debe enfatizarse en un contexto amplio tomando en consideración la cuenca hidrográfica donde será construida o restaurada para que sean incorporados todos los beneficios sociales, como el control de contaminación, para lograr el éxito de la mitigación (Zedler, 2000). Entre los factores que deben ser considerados están el sustrato, elevaciones, clima, vegetación, y cualquier actividad humana o natural en aguas arriba y aguas debajo de dicha cuenca.

## **Recomendaciones**

El proceso de monitoreo que se realiza actualmente en Puerto Rico por el Cuerpo de Ingenieros, se basa en una evaluación cualitativa y/o cuantitativa de cobertura de las especies sembradas. Esto se logra por medio de identificación de líneas reales o

imaginarias conocidas como transectos o por la delimitación de áreas específicas utilizando líneas horizontales o verticales creando cuadrículas para establecer y/o extrapolar porcentajes de cobertura vegetativa en una mitigación por un área específica. Sin embargo, no se puede garantizar que dichos datos recopilados representen significativamente lo que está ocurriendo en la mitigación, ya que en la mayoría de las veces esta información puede ser obtenida por fotografía aérea.

Sí como biólogos, ambientalistas, ecólogos, ingenieros y seres humanos que somos deseamos aumentar las áreas de humedales y/o las funciones de estos ecosistemas tenemos que expandir nuestros esfuerzos para construir y monitorear dichas áreas construidas o restauradas para garantizar la obtención de funciones de filtración de nutrientes y contaminantes.

Bedford (1999), Zedler & Callaway (1999), Lewis et al. (1994), Barton et al. (2000) y Peadenhauer (2001) establecieron una lista de algunos atributos que deben ser evaluados en una restauración o construcción de los humedales. Algunos de estos criterios son: topografía, especies invasoras, crecimiento vegetativo, hidrología, mineralización de los nutrientes, tipo de hábitat, banco de semillas, supervivencia, fauna terrestre y acuática, disturbios, retención de agua, nitrógeno en el suelo, competencia, erosión, entre otros.

A base de los resultados, las conclusiones de esta investigación y los estudios de casos analizados, hacemos las siguientes recomendaciones para el proceso de diseño, construcción, y monitoreo de una mitigación de humedal. Estas recomendaciones no sólo permitirán crear un hábitat para las especies terrestres y/o acuáticas sino que estos humedales lograrán obtener funciones de filtración o fijación de nutrientes y

contaminantes mejorando la calidad de agua. Manteniendo estos criterios y recomendaciones los humedales construidos pueden ser capaces de reducir contaminantes como bacterias, virus, parásitos, sólidos suspendidos, nitrógeno entre otros (Nokes et al., 2003).

Las recomendaciones se han dividido de acuerdo a lo siguiente: investigación; diseño, construcción y monitoreo de una mitigación de humedal.

1. Investigación:

- a. Realizar más estudios para lograr establecer una comparación entre una mitigación de humedal y/o con un sistema natural.
- b. Recomendamos que en investigaciones futuras se evalúen variables como profundidad, tipo de suelo, vegetación y el tamaño de la mitigación de humedal para establecer eficiencia de filtración.

2. Diseño:

- a. Hacer un análisis exhaustivo al momento de seleccionar las plantas o árboles que formaran parte del sistema a crearse. Se debe visualizar más allá de que esta especie sea común en las áreas circundantes del lugar donde se propone la creación, sino que también tenga propiedades físicas, químicas y/o biológicas que puedan aumentar la remoción de nutrientes y contaminantes. Ejemplo; plantas herbáceas como la *Canna glauca*, *Scirpus spp.*, que sirven para remover metales y nutrientes en un cuerpo de agua.

- b. Tipo de suelo en donde se realizará la mitigación de humedal. Ejemplo: si tenemos suelo arcilloso es más fácil el intercambio iónico de los metales presentes en el agua.

3. Construcción:

- a. Tomar en consideración al momento de construir un área de humedal, el sustrato, conexión hidráulica con otros cuerpos de aguas superficiales o subterráneos, inyección de nutrientes por causas naturales o antropogénicas, tamaño, profundidad y vegetación (Angeler et al., 2006; Mitsch & Gosselink 2000; Euliss et al. 2004). Las funciones que se deseen obtener de estos ecosistemas construidos dependerá del diseño y su construcción.
- b. Tomar en consideración (establecer) la variación en las alturas (niveles escalonados) de tal manera que se establezcan áreas aerobias, anóxicas y anaeróbicas (Rolim, 1999).
- c. En áreas donde se mantengan aguas abiertas se puede utilizar lechos flotantes. Estos lechos o “camas” flotantes se utilizan plantas herbáceas acuáticas en tiestos perforados por lo que pueden ser suspendidas en el humedal. Estas plantas ayudaran en aumentar el oxígeno disuelto, tomar los nutrientes y plaguicidas del agua y proveer un hábitat para la vida silvestre.
- d. Seleccionar un tamaño razonable para la creación del humedal. La remoción de nutrientes y la absorción de sedimentos depende del tiempo de retención de las aguas en los humedales siendo el tamaño del humedal

a construirse un factor determinante para realizar la función de filtración (EPA, 2001).

#### 4. Monitoreo

- a. Establecer como requisito en el momento de otorgar un permiso un análisis de calidad de agua con unos parámetros ya establecidos para identificar la eficiencia y éxito de una mitigación compensatoria. Esto deberá ser evaluado por proyecto o actividad autorizada “case by case”.
- b. Durante el proceso de monitoreo y muestreo recomendamos tomar una muestra en el centro del ecosistema para tener una concentración promedio de filtración o remoción durante el proceso de atravesar el humedal.

Luego de analizar los resultados obtenidos de esta investigación se sugiere que para que una mitigación de humedal logre alcanzar funciones de filtración es necesaria la intervención humana. Como Zedler (2000) recalcó, “se necesita más que agua para restaurar un humedal”. Dicha intervención en los procesos de diseño, construcción y monitoreo de un humedal construido permitirá mejorar la calidad de agua a corto y largo plazo y por consiguiente minimizando la contaminación de estos recursos.

## **Limitaciones de investigación**

Como toda investigación científica a nivel de estudios graduados nos encontramos con limitaciones que de una manera u otra dificultaron el proceso. A continuación le mencionamos dichas limitaciones:

1. No hay estudios anteriores o investigaciones publicadas en Puerto Rico que evalúen la eficiencia de filtración de las mitigaciones de humedales.
2. Falta de recursos económicos para realizar un muestreo más profundo en cuanto a la fijación de nutrientes y contaminantes presentes en el humedal o poder realizar una comparación por porcentaje de filtración entre una mitigación de humedal con un sistema natural.
3. Esta investigación amerita un periodo de tiempo más extenso para realizar los muestreos.
4. En aguas abajo del humedal encontramos una alta concentración de animales caseros propiedades de los vecinos del área de mitigación lo que pudo alterar los resultados. Recomendamos que en investigaciones futuras se establezca un punto de muestreo en el centro del humedal.
5. Confrontamos retraso para acceder al área debido a que la mitigación se encuentra en propiedad privada. También al área se le tuvo que brindar un mantenimiento para poder acceder al área de humedal, ya que por la altura del pasto se nos dificultaba la entrada.
6. Dos de los instrumentos o equipos utilizados por el Laboratorio Central sufrieron desperfectos, lo cual atrasó el análisis de las muestras.

## LITERATURA CITADA

- Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera (2007). *Humedales y peces: una conexión vital*. Oficina de Pesquerías de NOAA. División de Conservación de Hábitaculo. Recuperado de [www.nmfs.noaa.gov/habitat/habitatconservation/publications/SpanishWetlands\\_0514.pdf](http://www.nmfs.noaa.gov/habitat/habitatconservation/publications/SpanishWetlands_0514.pdf).
- Ambrose, R. F. (2000). Wetland mitigation in the United States: assessing the success of mitigation policies. *Wetland (Australia)*. *Restoration Ecology* 19:1-27.
- Angeler, D. & Moreno J. (2006). Impact – recovery patterns of water quality in temporary wetlands after fire retardant pollution. *Review of Scientific Instruments*. 74 (1) Doi: 10.1139/F06-062.
- Bedford, B.L. (1999). Cumulative effects on wetland landscapes: links to wetland restoration in the United States and southern Canada. *Wetlands*, 19(4), 775-788.
- Barton, C. Nelson, E.A. Kolka, R.K. McLeod, K.W. Conner, W.H. Lakly, M. Martin, D. Wigginton, J. Trettin, C.C. & Wisnieeski, J., (2000). Restoration of a severely impacted riparian wetland system – the Pen Branch Project. *Ecological Engineering*, 15, S3-S15.
- Bernhardt E.S. (2005). Synthesizing U.S. River restoration efforts. *Science* 308: 636-637.
- Brinson, M.M. & A.I. Malvarez. (2002). Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. *Environmental Conservation* 29:115-133.
- Brix, H. (2000). How can phosphorus removal be sustained in subsurface-flow constructed wetland?. *7<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for water Pollution Control*. 2:911-918.
- Brookes, A. & Shields F.D. (1996). River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects. *J. Enviro. Qual.* Chichester (United Kingdom): Wiley.



- Cowardin, L., Golet, F., & La Rose E. (1979). Clasificación de wetlands deep water habitats of the United States. *US Fish and Wildlife Service*. Recuperado de [www.fws.gov](http://www.fws.gov).
- Dahl, T. E. (1990). Wetland losses in the United States: 1780's to 1980's. *U.S. Fish and Wildlife Service*, Washington, DC. 13 p.
- Dahl, T. E. (2000). Status and trends of wetlands in the conterminous United States 1986 to 1997. *U.S. Fish and Wildlife Service*, Washington, DC. 82 p.
- De Laney, T. A. (1995). Benefits to downstream flood attenuation and water quality as a result of constructed wetlands in agricultural landscapes. *Journal of Soil and Water Conservation* 50: 620-626.
- Días, F. M. (1985). Contaminación de las aguas subterráneas por nitratos – situación existente en el Aglomerado Bonaerense, *Anales del XII Congreso Nacional del Agua, Tomo III (a), CONAGUA 85, Mendoza, República Argentina*, 1985, 21.
- Environmental Protection Agency. (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. A new technology assessment*. Washington, D.C. Recuperado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- Environmental Protection Agency. (2000a). *Constructed wetlands: treatment of municipal wastewaters*, EPA-625/R-99-010. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development: Cincinnati, Ohio. Recuperado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- Environmental Protection Agency. (2000b). *Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales humedales de flujo superficial*. Recuperado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- Environmental Protection Agency. (2000c). *Manual of constructed wetlands: treatment of municipal wastewater*. Cincinnati, Ohio.
- Environmental Protection Agency. (2001). *Function and values of wetlands*, EPA 843-F-01-002. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. Recuperado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov).

- Environmental Protection Agency. (2004a). *A handbook of constructed wetlands, Volume 2, Domestic Wastewater*. Recuperado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- Environmental Protection Agency. (2004b). *Nitrate*. IRIS (Integrated Risk Information System). Recuperado de <http://www.epa.gov/iris/subst/0076.htm>.
- Eulis, N. H., Jr., LaBaugh, J.W., Fredrickson, L.H., Mushet, D.M., Laubhan, M.K., Swanson, G.A., (2004). The wetland continuum: a conceptual framework for interpreting biological studies. *Wetlands*, 24:448-458.
- Fairbairn, S. E., & J. J. Dinsmore. (2001). Local and landscape-level influences on wetland bird communities of the Prairie Pothole Region of Iowa, USA. *Wetlands*, 21:41-47.
- Fletcher, R. (2003). La pérdida de los humedales: ¿Cómo se ven afectadas las Comunidades de Aves? *Journal of Wildlife Management*, 65:676-684.
- García, J. (2002). Depuración con sistemas naturales; humedales construidos. *Universidad de los Andes*, Bogotá, Colombia.
- García, T. (2001). Construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial. *Universidad de los Andes*, Bogotá, Colombia.
- Gatts, C., R. T. Faria, & H. Vargas. (2003). On the use of photothermal techniques for monitoring constructed wetlands. *Review of Scientific Instruments*, 74 (1).
- Gupta, S. K., R. C. Gupta, A. K. Seth, A. B. Gupta, J. K. Bassin & A. Gupta. (1999). Adaptation of cytochrome – b<sub>5</sub> reductase activity and methaemoglobinemia in areas with a high nitrate concentration in drinking – water. *Bulletin of the World Health Organization* 77 (9), 749. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org>.
- Hunt, P.G & Poach, M. E. (2000). State of the art for animal wastewater treatment in constructed wetlands. *7<sup>th</sup> International Conference on Wetland systems for Water Pollution Control*. (1):469-479.

- Jeppensen, E., Jensen, J.P., Sondergaard, M., & Cristoffersen, K. (1998). The structuring role of submerged macrophytes in lakes. *J. Enviro. Qual*, 30:254-261.
- Salzman, J. & Ruhl J.B. (2005). Pagos por la protección de los servicios de las cuencas hidrográficas: la banca de humedales de los Estados Unidos. *Ecosystems*, 6:20-30.
- Kiely, G. (1999). Traducción castellana por Mcgraw-Hill / Interamericana de España, Ingeniería Ambiental – Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. *Geoderma* 59:1-20.
- Kondolf, GM. (1995). Five elements for effective evaluation of stream restoration. *Restoration. Ecology*, 3:133-136.
- Lewis, R.R. Kusler, J.A. & Erwin, K.L., (1994). Lessons learned from five decades of wetland restoration and creation in north America. *Proceedings of the 1994 Marine Technology Conference*. pp. 233-240.
- Miller, T. (1992). Living in environment – An introduction to environment science. Seventh edition. (Estados Unidos: Wadsworth Publishing Company). Traducción castellana por I. de León Rodríguez y V. González Velásquez. *Ecología y medio ambiente*. (México: Grupo Editorial Iberoamericana, 1994).
- Mitsch, W.J., & Gosselink, J.G. (2000). *Wetlands*. 3<sup>rd</sup> ed. Wiley and Sons, New York.
- Malmqvist, B. & Rundle, S. (2002). Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, 29: 134-153.
- Nakamura, K., Klement T. & Kunihiro A. (2006). River and Wetland Restoration; Lessons from, Japan. *Vol. 56 No. 5. BioScience*, p. 419-429.
- Nienhuis, P. & Leuven, R. (2001). River restoration and flood protection: Controversy or synergism? *Hydrobiologia*, 444: 85-99.
- Nokes, R.L., Charles P. & Martin M. (2003). Microbial water quality improvement by small scale on-site subsurface wetland treatment. *Journal of Environmental Science and Health*. Vol. A38, No. 9, pp.1849-1855. DOI: 10.1081.

- Orosz, P., Rusin P., Martin M., & Charles P. (2006). Microbial source tracking of *Escherichia coli* in a constructed wetland. *Water Environment Research*, 78 (3). DOI: 10.2175/106143005X89995.
- Palmer, M. (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42: 208-217.
- Perez, J. (2003). *Mitigación de Humedales en Puerto Rico Bajo el “Joint Permit Application”*: La Sección 404 del Clean Water Act y la meta de cero pérdida neta. Disertación de tesis de maestría no publicada. Escuela de Asuntos Ambientales, Universidad Metropolitana, San Juan, PR.
- Peadenhauer, J., (2001). Some remarks on the socio-cultural background of restoration ecology. *Restoration Ecology*, 9(2), 220-229.
- Pontius, F. W. (1993). Nitrate and Cancer: Is There a Link?, *Journal American Water Works Association*, 85: 12-14.
- Ramsar (2004). *Convention on Wetlands*. The Ramsar Convention Bureau. 3a. edición.
- Rolim, S. (1999). Alcantarillados condominiales, una alternativa para los municipios saludables. *III Congreso de las Américas de Municipios Saludables y Comunidades Saludables*. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Seabloom, E. W., & Valk, A. G. (2003). Plant diversity, composition, and invasion of restored and natural prairie pothole wetlands: implications for restoration. *Wetlands* 23:1-12.
- Shields, F.D., Cooper C.M., Knight S.S. & Moore M.T. (2003). Stream corridor restoration research: A long and winding road. *Ecological Engineering* 20:441-454.
- Stryer, L. (1993). Principios básicos de la bioquímica. *Biochem.* 11:262-267.

- Tanner, C.C. (2000). Plants as ecosystem engineers in subsurface flow treatment wetlands. *7<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. (1):13-22.
- Teal, J.M. & Peterson S. (2005). Restoration benefits in a watershed context. *Journal of coastal research*, 132-140.
- Tenenbaum, D. (2004). Constructed wetlands, borrowing a concept from nature. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 112 Num. 1.
- Tockner, K. & Stanford, J.A. (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29:308-330.
- United States Corps of Engineers. (1990) Memorandum of agreement, *MOA*. Recuperado de [www.usace.army.mil](http://www.usace.army.mil).
- Vymazal, J. (2005) Removal of heavy metals in a horizontal sub-surface flow constructed wetland. *Journal of Environmental Science and Health*, 40:1369–1379. DOI:10.1081/ESE-200055851.
- Wilde, F.D., Radtke, D.B., Gibs, J. & Iwatsubo, R.T. (1999). Collection of water samples: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. Recuperado de A4. <http://pubs.water.usgs.gov/twri9A4/>.
- Zedler, J.B. & Callaway, J.C., (1999). Tracking wetland restoration: do mitigation sites follow desired trajectories? *Restoration Ecology*, 7(1), 69-73.
- Zedler, J.B., (2000). Progress in wetland restoration ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(10), 402-407.

## **TABLAS**

Tabla 1

*Resultados del pH en los puntos de muestreo por día*

Día muestreo	pH aguas arriba	pH aguas abajo	Promedio
1	7.79	7.59	7.69
2	7.43	7.73	7.58
3	7.90	7.76	7.83
4	7.36	7.60	7.48

n=8 (4 entrada – 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 2

*Resultados de la conductividad en los puntos de muestreo*

Día muestreo	Conductividad aguas arriba	Conductividad aguas abajo	Unidad	Promedio
1	427	496	μS/cm	461.5
2	550	526	μS/cm	538
3	407	315	μS/cm	361
4	326	474	μS/cm	400

n=8 (4 entrada – 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009



Tabla 3

*Ilustración de los resultados de los sólidos suspendidos*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	11	8	28%
2	10	7	30%
3	3	14	*
4	14	1	93%

n=8 (4 entrada = 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009      \* = aumentó

Tabla 4

*Ilustración de los resultados del amonio*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	0.07	0.36	*
2	0.24	0.19	21%
3	0.17	0.40	*
4	0.26	0.40	*

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 5

*Ilustración de los resultados del nitrato*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	4	1	75%
2	1	4	*
3	1	5	*
4	3	2	34%

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 6

*Ilustración de los resultados del fósforo*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	0.04	0.17	*
2	0.03	0.20	*
3	0.15	0.11	27%
4	0.02	0.15	*

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 7

*Ilustración de los resultados del calcio*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	39	40	*
2	46	40	13%
3	29	26	10%
4	31	42	*

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 8

*Ilustración de los resultados del Magnesio*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	13	20	*
2	20	22	*
3	16	8	50%
4	6	5	17%

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 9

*Ilustración de los resultados del potasio*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	3	2	34%
2	2	1	50%
3	2	3	*
4	3	2	34%

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 10

*Ilustración de los resultados del sodio*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	27	32	*
2	31	35	*
3	28	22	22%
4	27	32	*

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009



Tabla 11

*Ilustración de los resultados del Zinc*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND

ND – No detectable                      n=8 (4 entrada = 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 12

*Ilustración de los resultados del Manganeso*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	0.05	0.05	Cero
2	2.87	0.28	91%
3	0.16	0.16	Cero
4	ND	ND	ND

ND – No detectable                      n=8 (4 entrada = 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 13

*Ilustración de los resultados del hierro*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	0.10	0.04	60%
2	0.15	0.14	7%
3	0.11	1.36	*
4	0.14	0.07	501%

n=8 (4 entrada = 4 salida) \* = aumentó

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 14

*Ilustración de los resultados del cadmio*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND
4	ND	ND	ND

ND – No detectable                      n=8 (4 entrada = 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

Tabla 15

*Ilustración de los resultados del cobre*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	ND	ND	ND
2	ND	ND	ND
3	ND	ND	ND
4	0.02	0.02	Cero

ND – No detectable n=8 (4 entrada = 4 salida)

1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009

4 – 18 de febrero de 2009

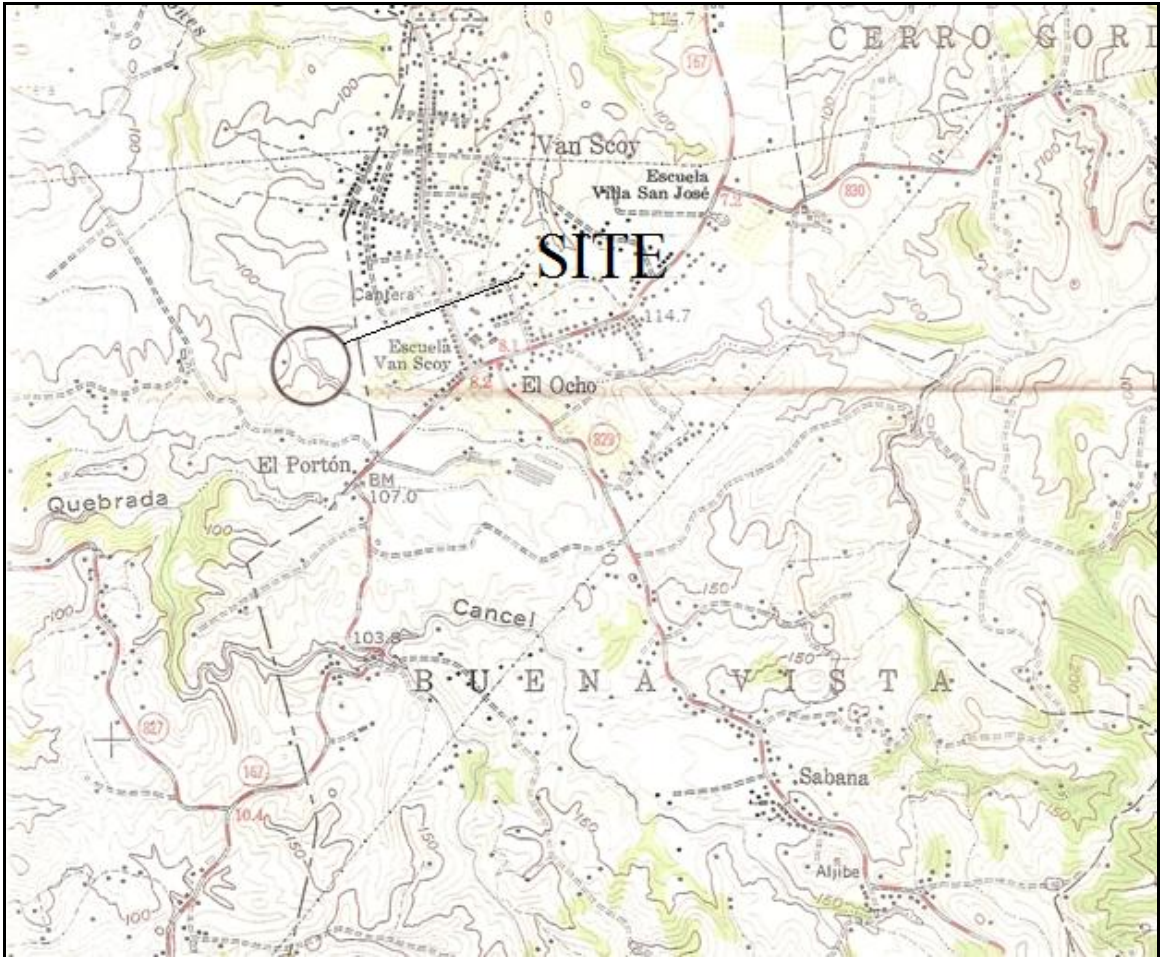
Tabla 16

*Ilustración de los resultados del plomo*

Día muestreo	Entrada aguas arriba (E) ppm	Salida aguas abajo (S) ppm	Porcentaje de filtración
1	ND	ND	ND
2	0.02	0.02	Cero
3	ND	ND	ND
4	0.18	0.23	*

ND – No detectable                      n=8 (4 entrada = 4 salida)                      \* = aumentó  
 1 – 28 de enero de 2009; 2 – 4 de febrero de 2009; 3 – 11 de febrero de 2009  
 4 – 18 de febrero de 2009

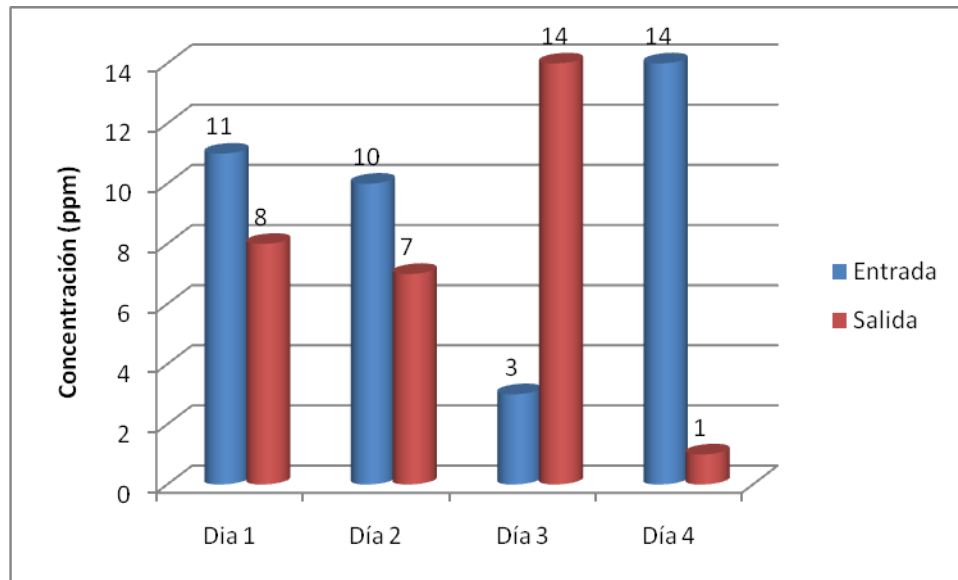
## **FIGURAS**



Escala 1:20000

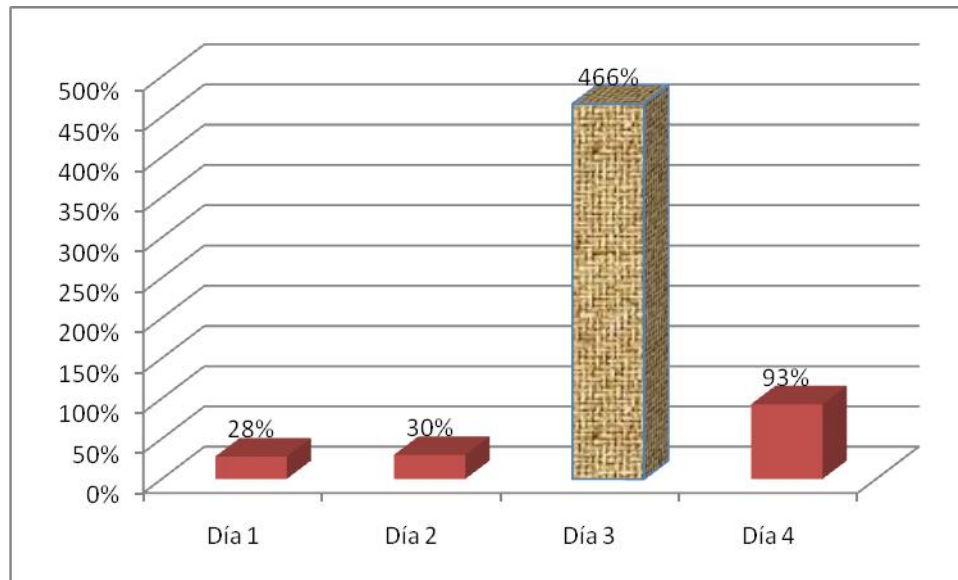
Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.





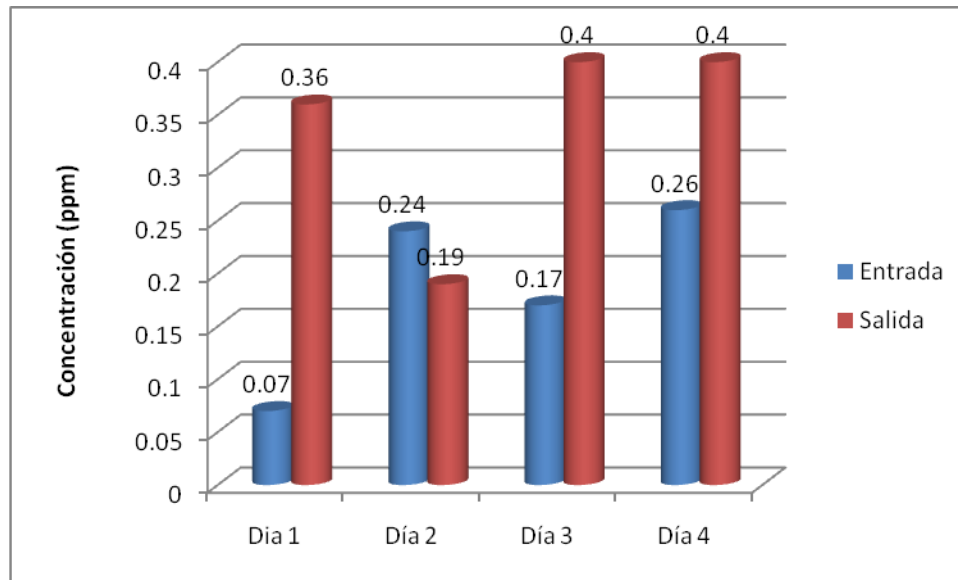
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 2.* Concentraciones de los sólidos suspendidos



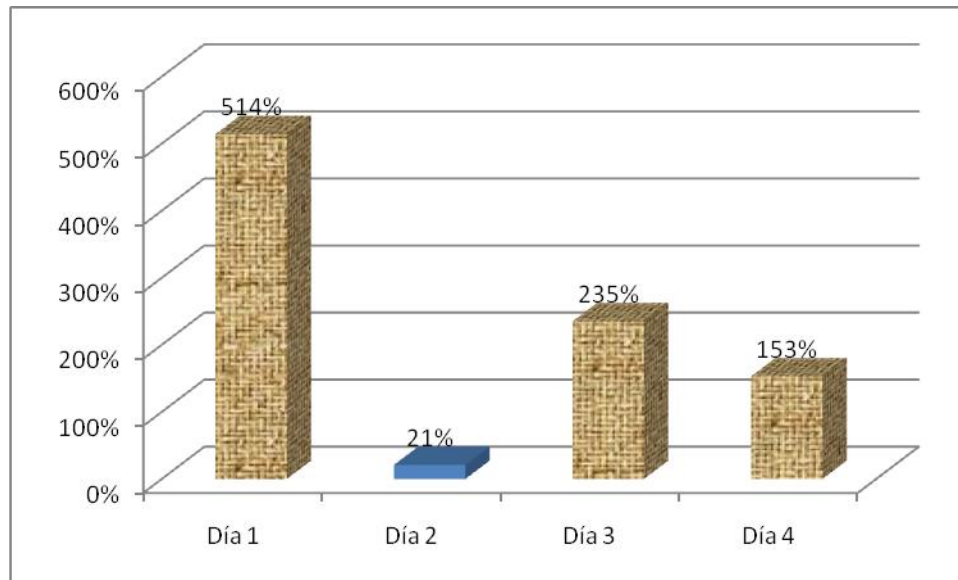
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 3.* Porcentaje de filtración de los sólidos suspendidos



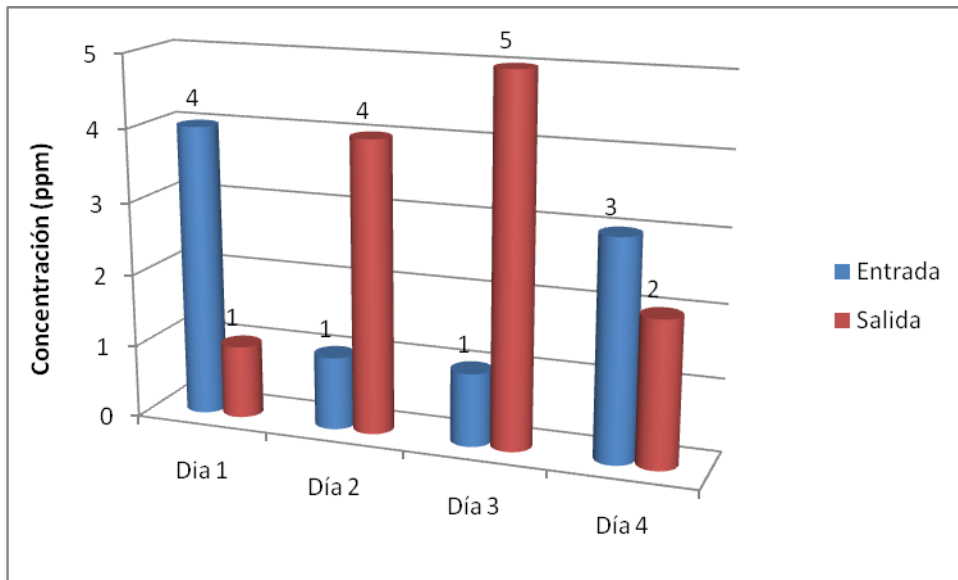
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 4.* Concentraciones del amonio



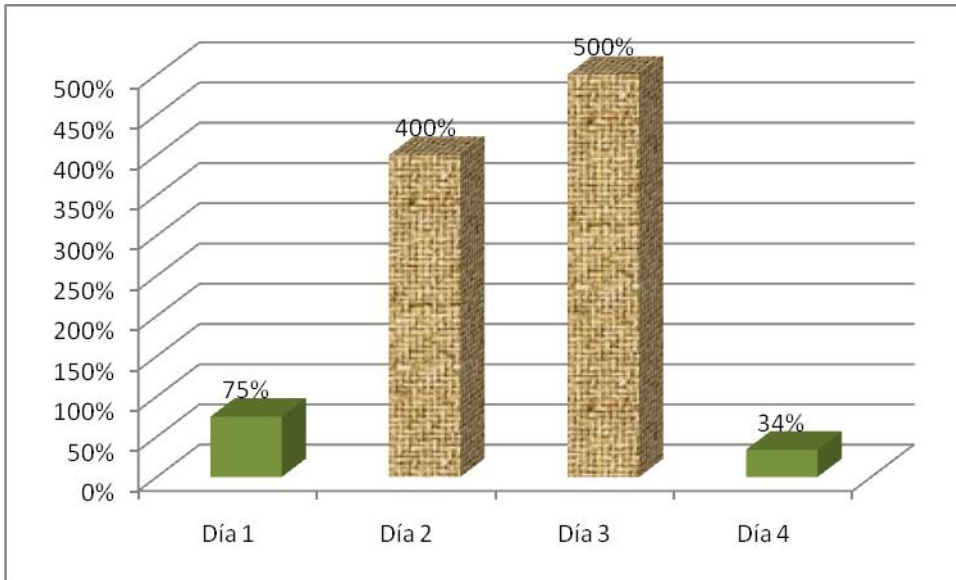
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 5.* Porcentaje de filtración del amonio



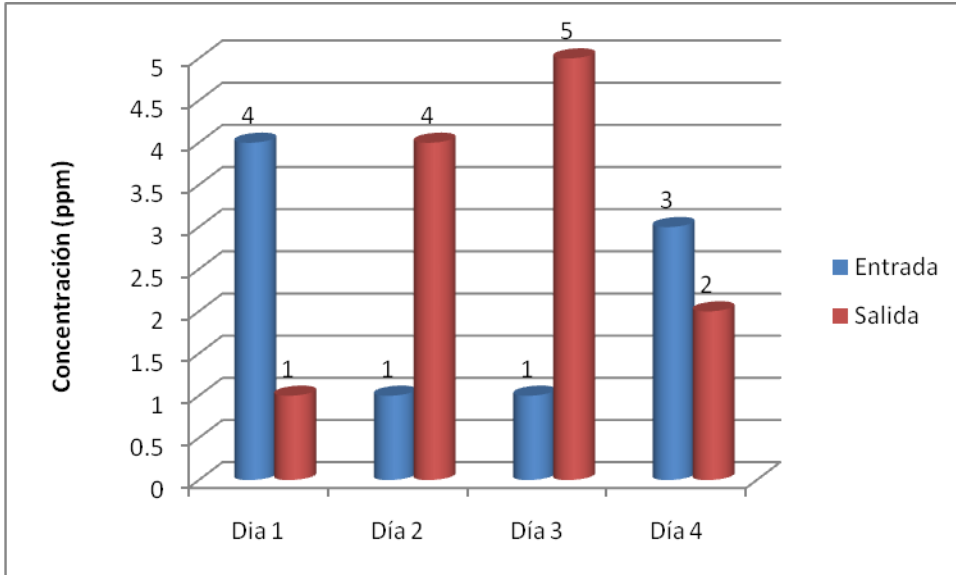
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 6.* Concentraciones del nitrato



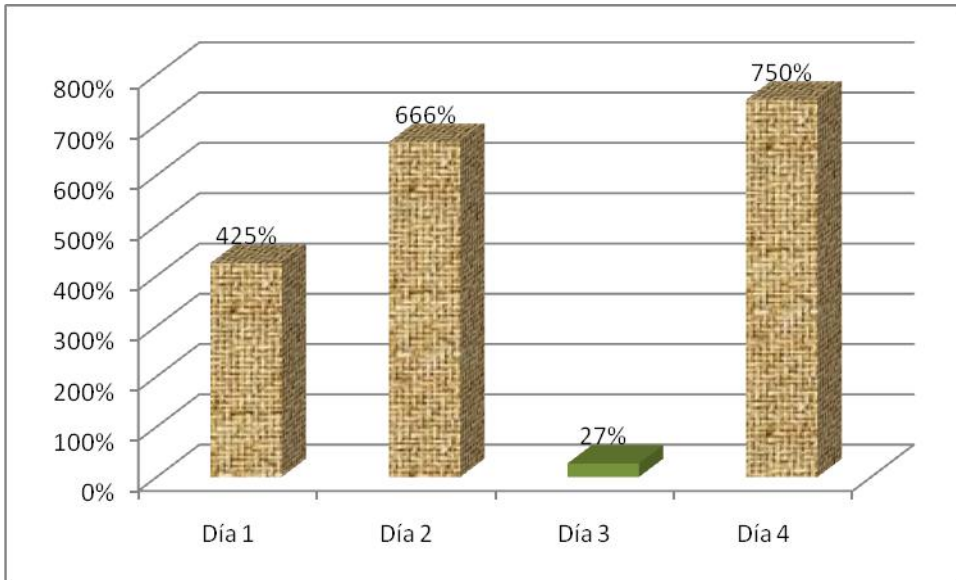
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 7.* Porcentaje de filtración del nitrato



Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

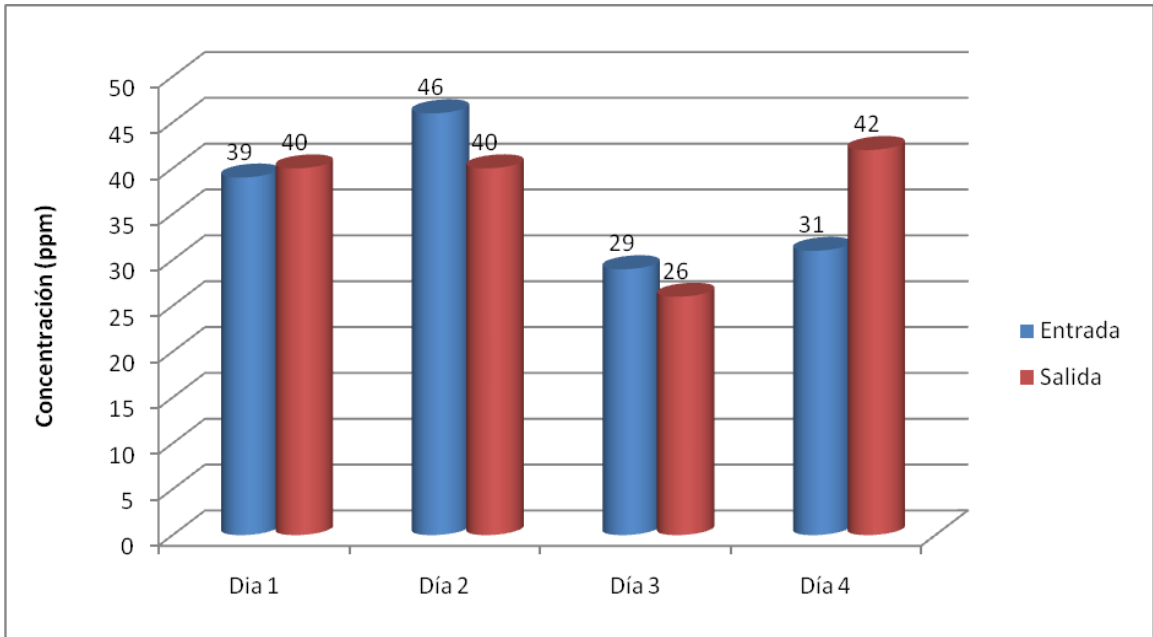
*Figura 8.* Concentraciones del fósforo



Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

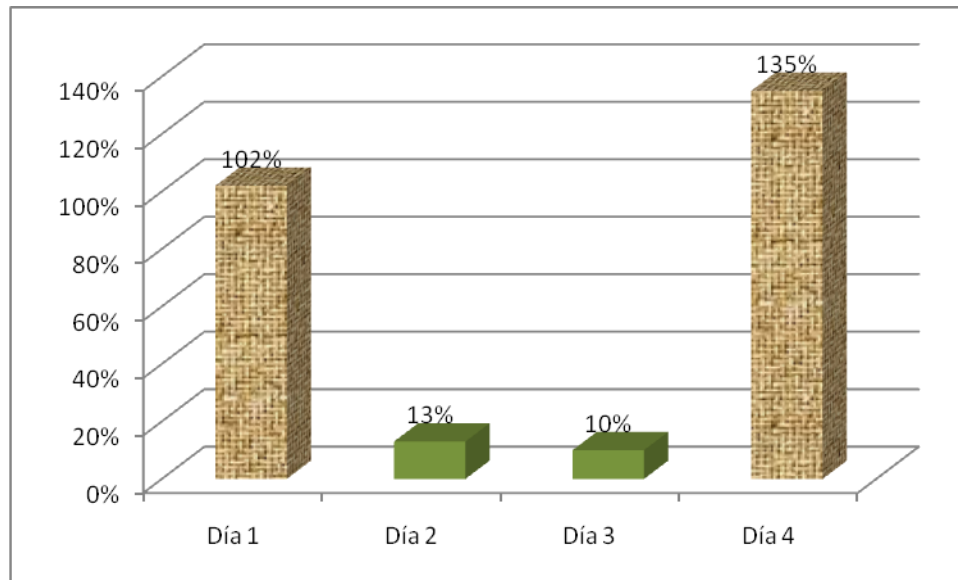
*Figura 9.* Porcentaje de filtración del fósforo





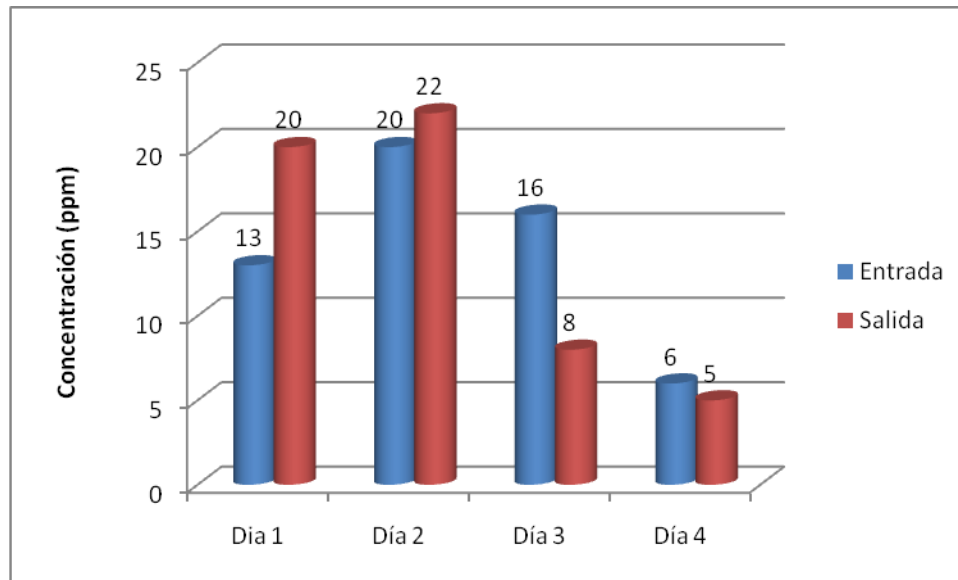
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 10.* Concentraciones del calcio



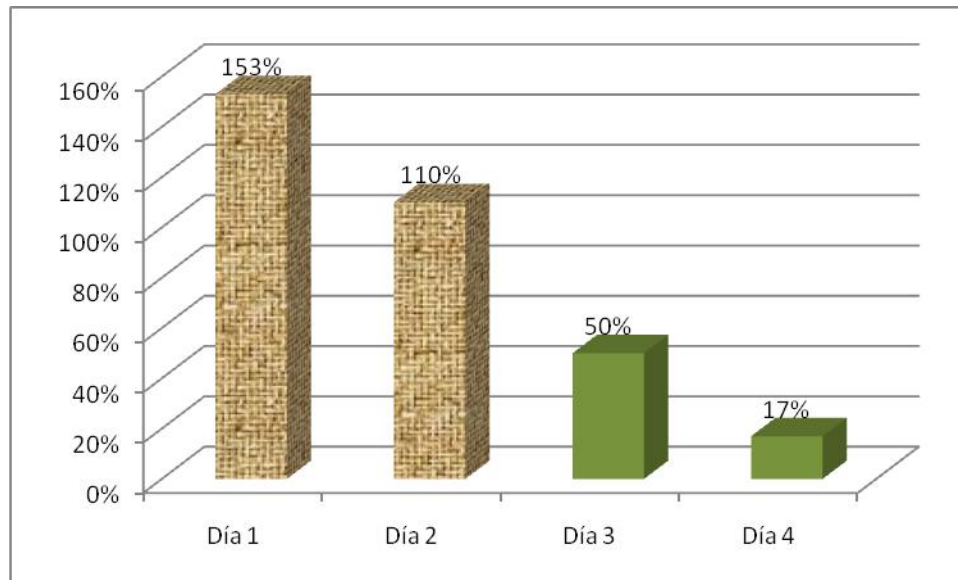
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 11.* Porcentaje de filtración del calcio



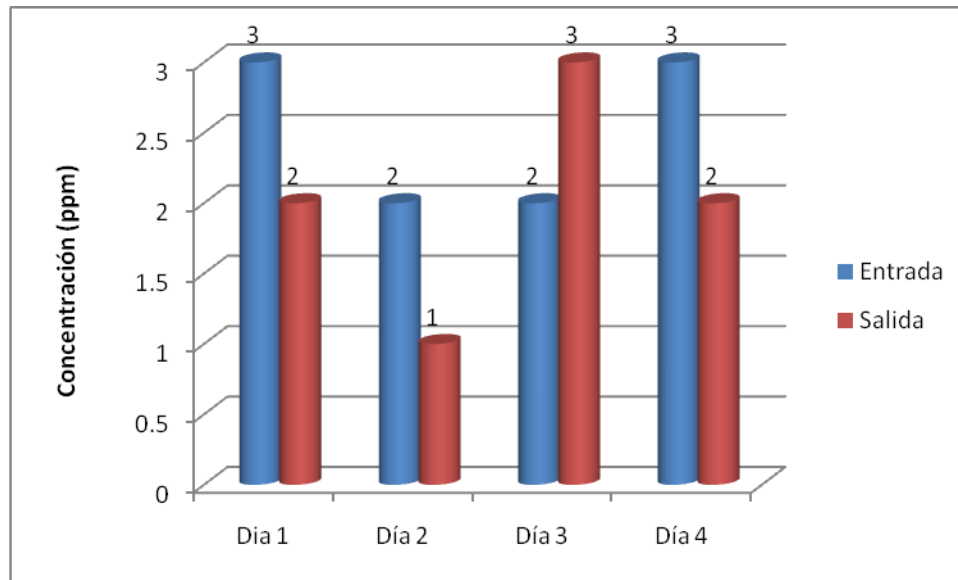
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 12.* Concentraciones del magnesio



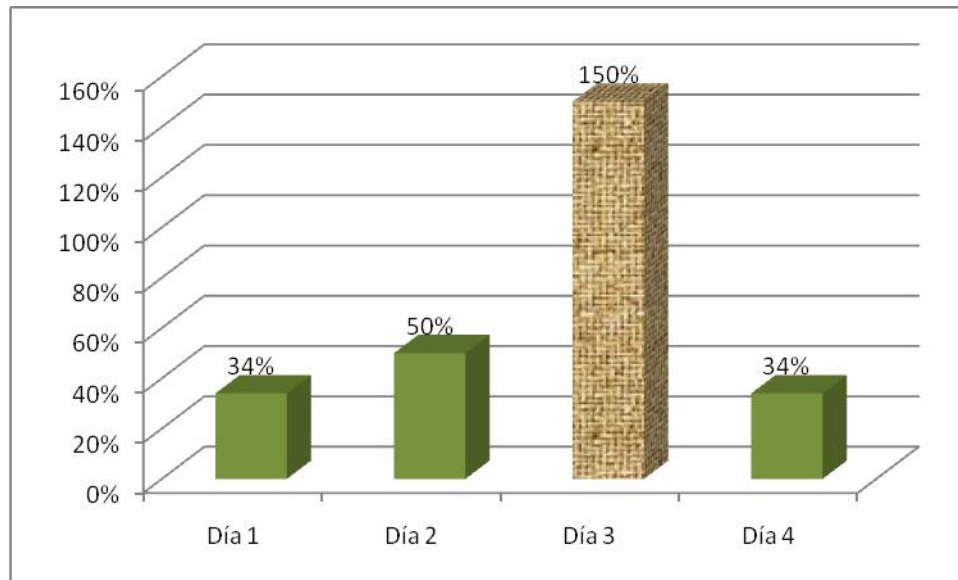
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 13.* Porcentaje de filtración del magnesio



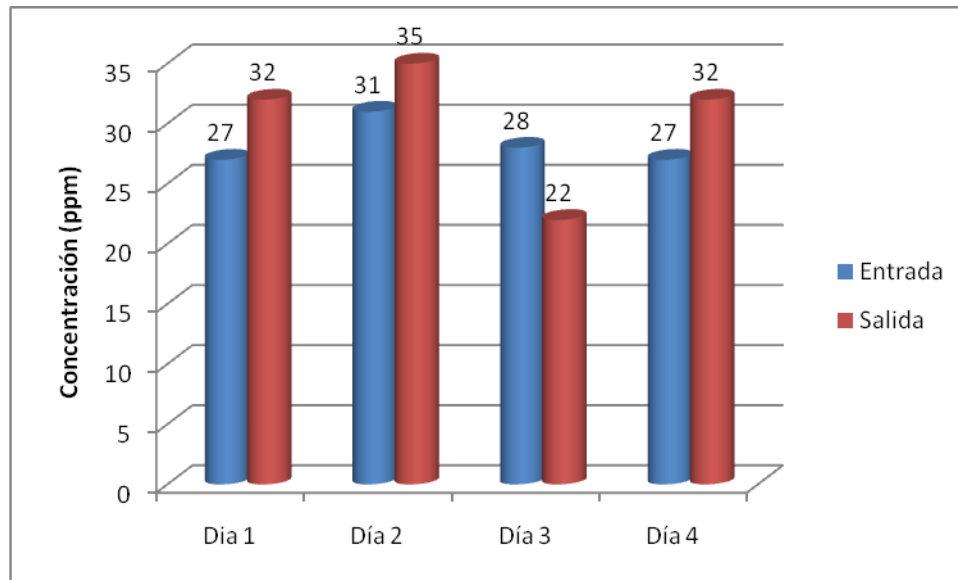
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 14.* Concentraciones del potasio



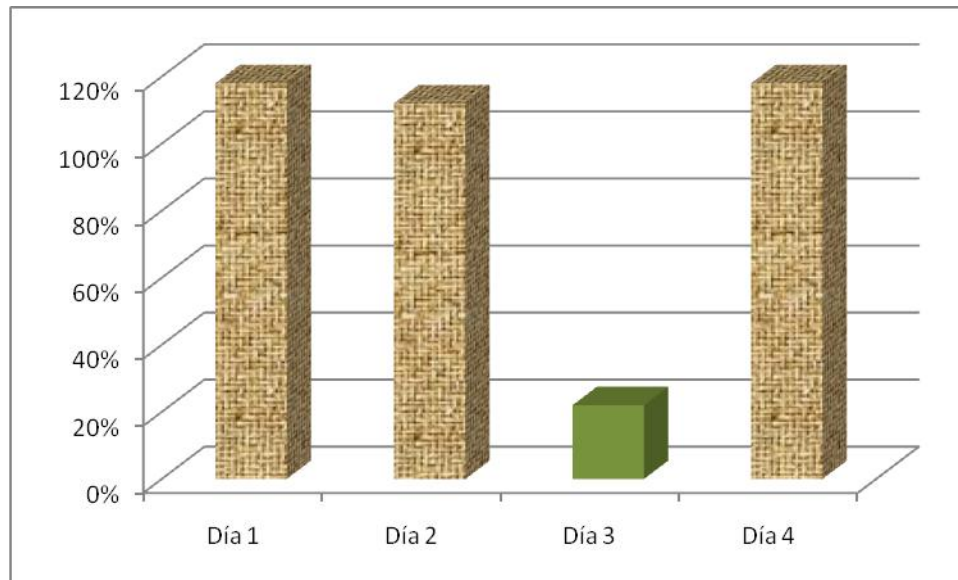
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 15.* Porcentaje de filtración del potasio



Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

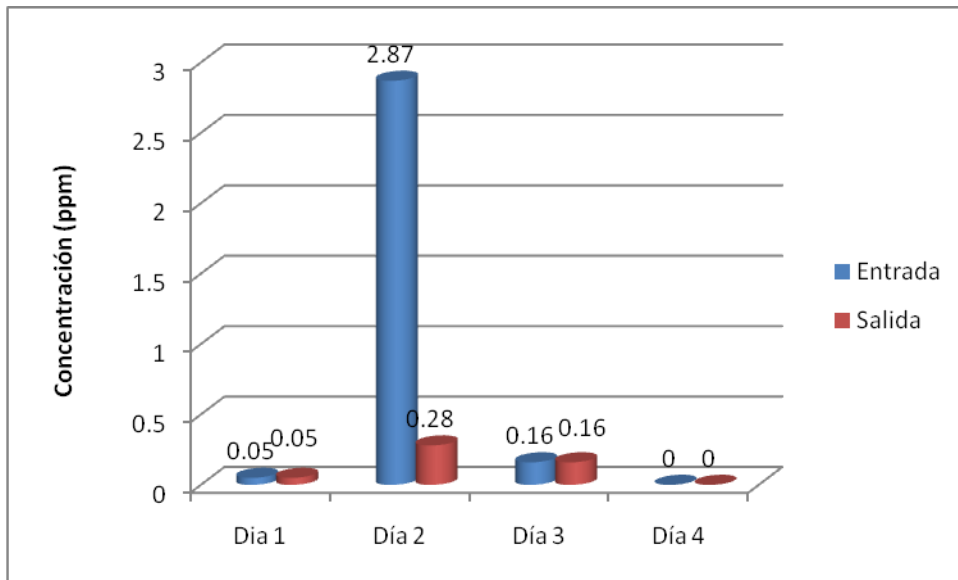
*Figura 16.* Concentraciones del sodio



Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

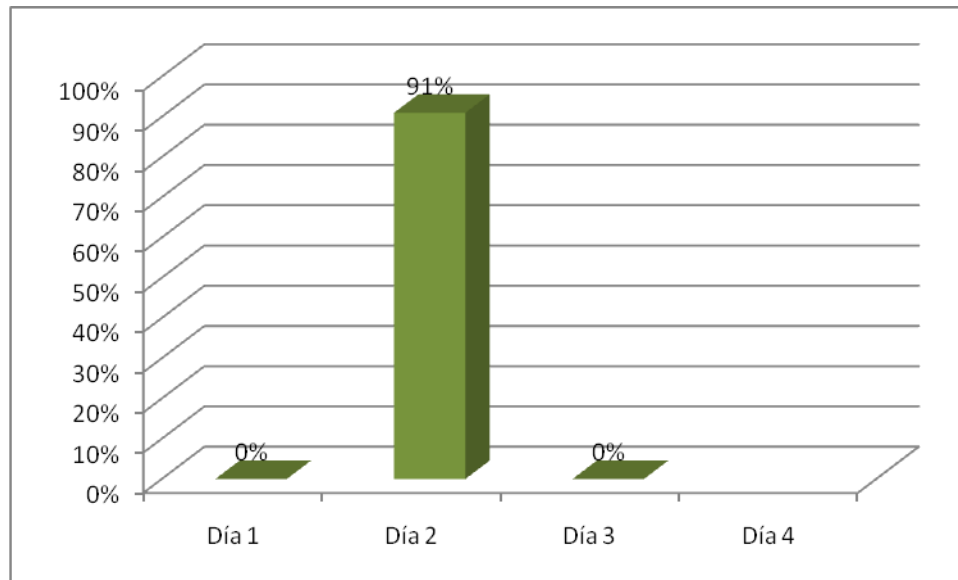
*Figura 17.* Porcentaje de filtración del sodio





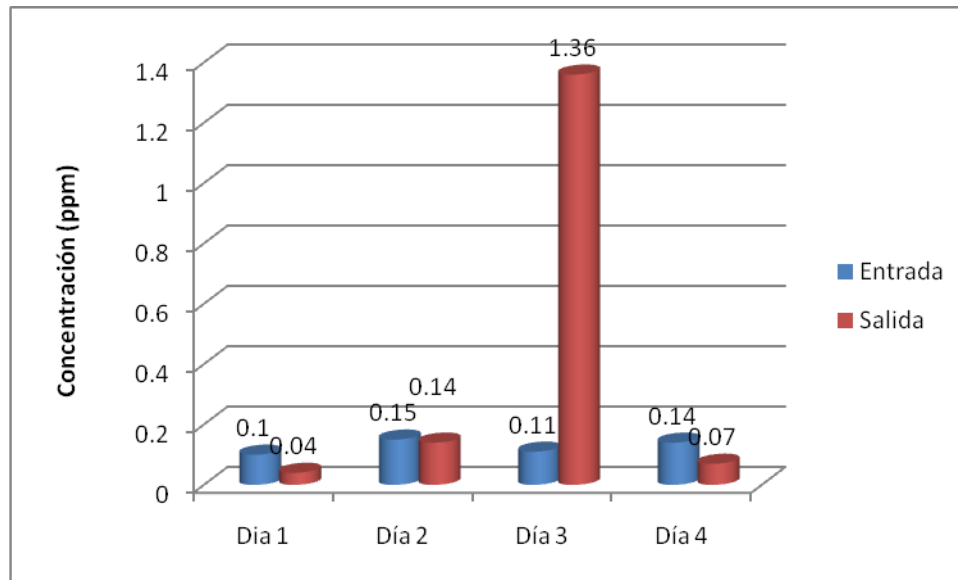
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 18.* Concentraciones del manganeso



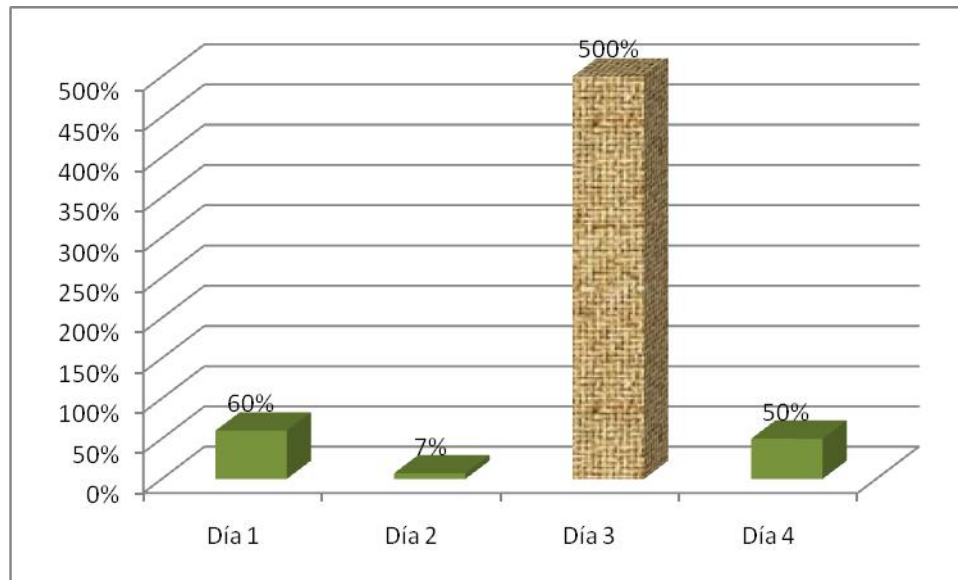
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 19.* Porcentaje de filtración del manganeso



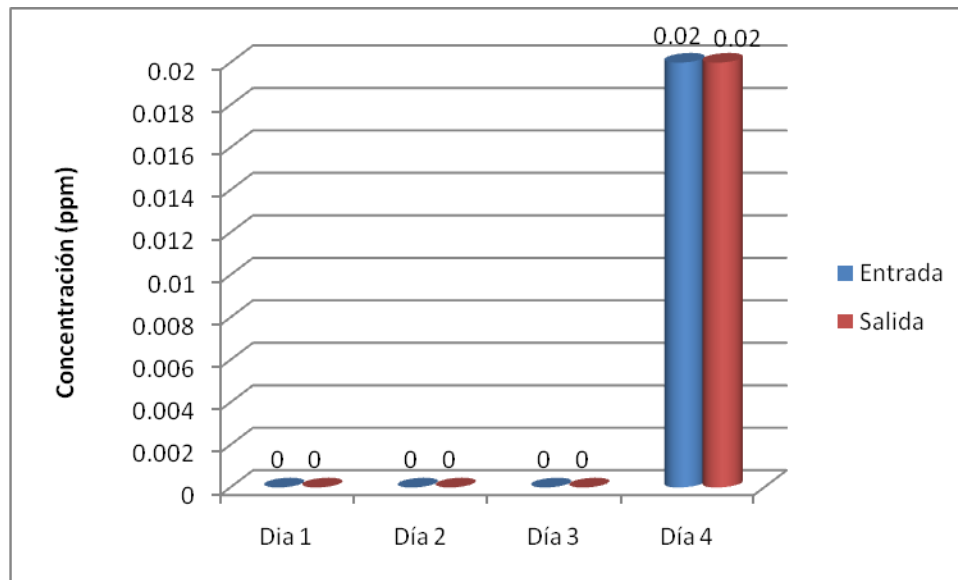
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 20.* Concentraciones del hierro



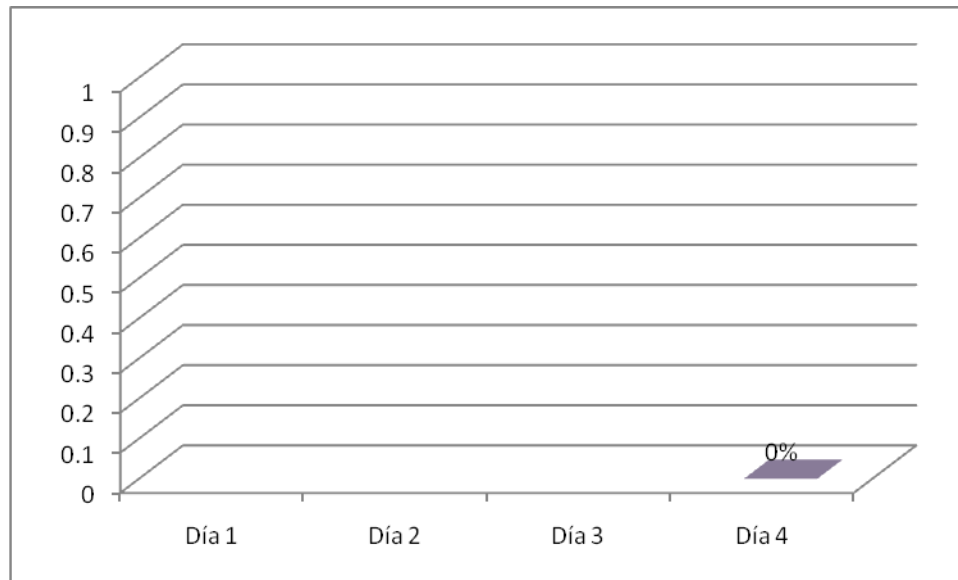
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 21.* Porcentaje de filtración del hierro



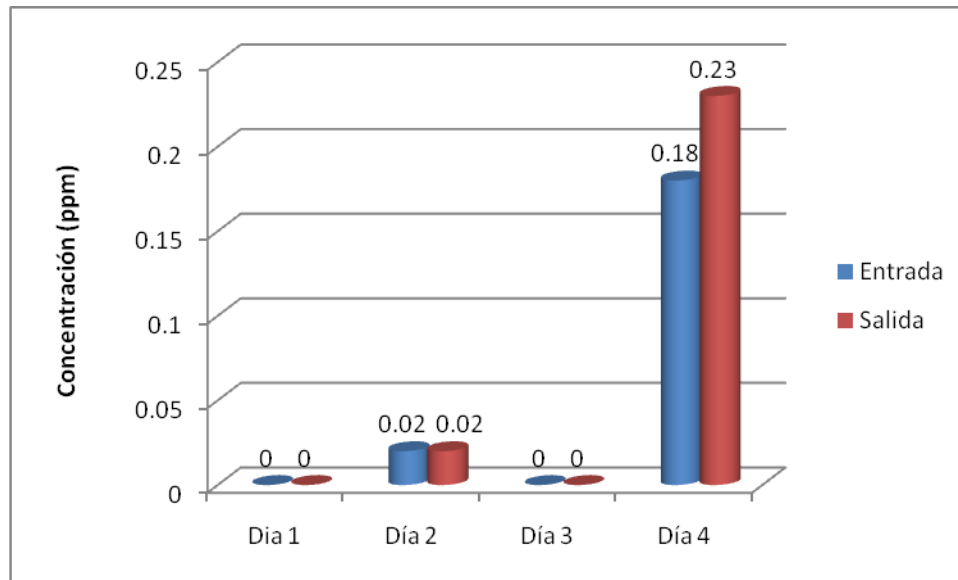
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

Figura 22. Concentraciones del cobre



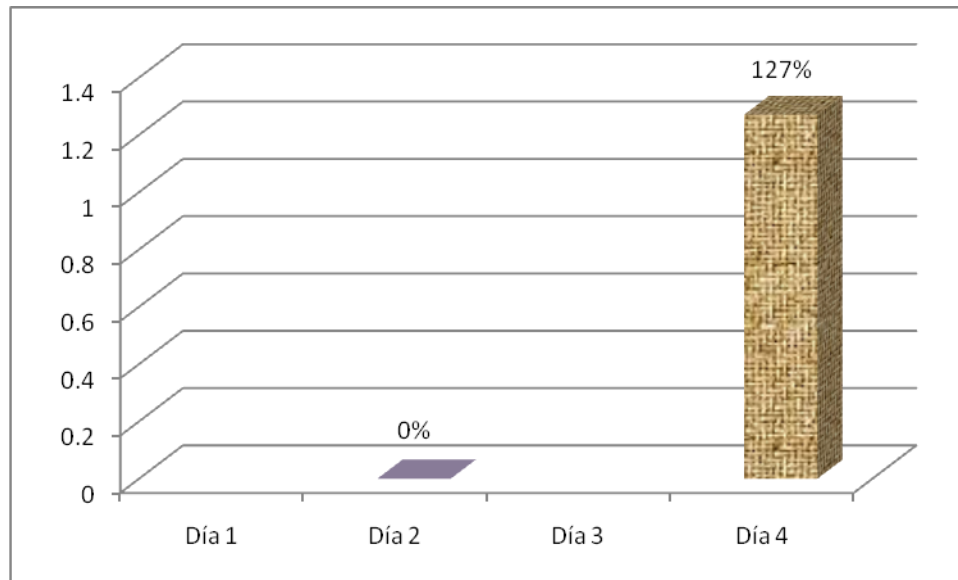
Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 23.* Porcentaje de filtración del cobre



Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
 Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

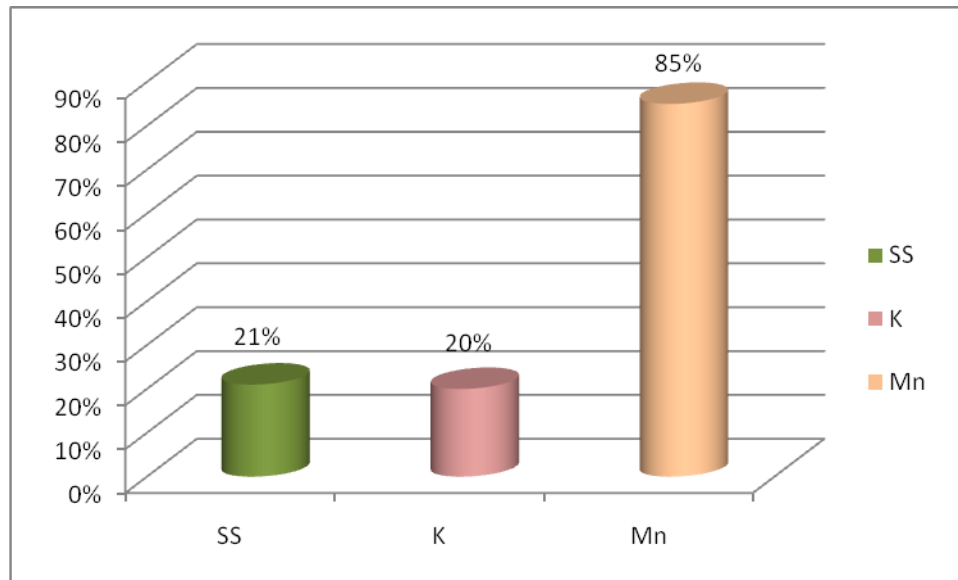
*Figura 24.* Concentraciones del plomo



Día 1 – 28 de enero de 2009; Día 2 – 4 de febrero de 2009;  
Día 3 – 11 de febrero de 2009; Día 4 – 18 de febrero de 2009

*Figura 25.* Porcentaje de filtración del plomo





*Figura 26.* Porcentaje de filtración de la mitigación de humedal



*Figura 27. Vista aguas debajo de la mitigación de humedal*

## **APÉNDICES**

**APÉNDICE I**  
**INFORMES DE RESULTADOS**  
**LABORATORIO CENTRAL ANALÍTICO**

**INFORME DE RESULTADOS**

**Laboratorio Central Analítico**

Estación Experimental Agrícola  
 Universidad de Puerto Rico  
 Recinto Universitario de Mayagüez  
 1193 Calle Guayacán Jardín Botánico Sur San Juan, PR 00926-1118  
 (787) 767-9705 Ext. 2134, 2136 Fax: (787) 753-2712



Número de Solicitud:	<b>L-09-009</b>
Líder / Solicitante:	Rosaída Burgos
Compañía / núm. Proyecto EEA:	Rosaída Burgos
Número LCA:	<b>A-09-064--A-09-065</b>
Analista LCA:	P.Casanova, N. Corchado, Y. Ocasio
Revisor:	
Fecha de informe:	03/11/2009

*Julia M. O'Hallorans*

Dra. Julia O'Hallorans, Directora LCA

*Rafael Montalvo Zapata*

Lic. Rafael Montalvo Zapata, Químico Lic. 653

**ANÁLISIS DE AGUA**

ID No. LCA	ID No. Proyecto	pH	CE µS/cm	ST mg/L	NH3 ppm	NO3 ppm	P-PO4 ppm	CA ppm	MG ppm	K ppm
A-09-064	E1	7.79	427	11	0.07	4	0.04	39	13	3
A-09-065	S1	7.59	496	8	0.36	1	0.17	40	20	2

CE=CONDUCTIVIDAD ST=SOLIDOS TOTALES NH3=AMMONIA NO3=NITRATO P-PO4=FOSFORO COMO FOSFATO CA=CALCIO MG=MAGNESIO K=POTASIO

ID No. LCA	ID No. Proyecto	NA ppm	ZN ppm	MN ppm	FE ppm	CU ppm	PB ppm
A-09-064	E1	27	ND	0.05*	0.10*	ND	ND
A-09-065	S1	32	ND	0.05*	0.04*	ND	ND

NA=SODIO ZN=ZINC MN=MANGANESO FE=HIERRO CU=COBRE CD=CADMIO PB=PLOMO ND=NO DETECTABLE

\*Valor por debajo del primer punto de calibración.

Nota: Los resultados de este Informe son para uso exclusivo del cliente.

**INFORME DE RESULTADOS**

**Laboratorio Central Analítico**

Estación Experimental Agrícola  
 Universidad de Puerto Rico  
 Recinto Universitario de Mayagüez  
 1193 Calle Guayacán Jardín Botánico Sur San Juan, PR 00926-1118  
 (787) 767-9705 Ext. 2134, 2136 Fax: (787) 753-2712



Número de Solicitud:	L-09-014
Líder / Solicitante:	Rosaida Burgos
Compañía / núm. Proyecto EEA:	Rosaida Burgos
Número LCA:	A-09-089--A-09-090
Analista LCA:	P.Casanova, N. Corchado, Y. Ocasio
Revisor:	E. Rivera
Fecha de informe:	04/03/2009

*Julia M. O'Hallorans*

Dra. Julia O'Hallorans, Directora LCA

*Rafael Montalvo Zapata*

Lic. Rafael Montalvo Zapata, Químico Lic. 653

**ANALISIS DE AGUA**

ID No.	ID No.	pH	CE	SS	NH3	NO3	P-PO4	CA	MG	K
LCA	Proyecto		µS/cm	mg/L	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A-09-089	E2	7.43	550	10	0.24	1	0.03	46	20	2
A-09-090	S2	7.73	526	7	0.19	4	0.20	40	22	1

CE=CONDUCTIVIDAD ST=SOLIDOS TOTALES NH3=AMMONIA NO3=NITRATO P-PO4=FOSFORO COMO FOSFATO CA=CALCIO MG=MAGNESIO K=POTASIO

ID No.	ID No.	NA	ZN	MN	FE	CU	CD	PB
LCA	Proyecto	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
A-09-089	E2	31	ND	2.87	0.15*	ND	ND	0.02**
A-09-090	S2	35	ND	0.28	0.14*	ND	ND	0.02**

NA=SODIO ZN=ZINC MN=MANGANESO FE=HIERRO CU=COBRE CD=CADMIO PB=PLOMO ND=NO DETECTABLE

\*Valor por debajo del primer punto de calibración.

\*\*Valor por debajo del límite de detección.

Nota: Los resultados de este informe son para uso exclusivo del cliente.

**INFORME DE RESULTADOS**

**Laboratorio Central Analítico**

Estación Experimental Agrícola  
 Universidad de Puerto Rico  
 Recinto Universitario de Mayagüez  
 1193 Calle Guayacán Jardín Botánico Sur San Juan, PR 00926-1118  
 (787) 767-9705 Ext. 2134, 2136 Fax: (787) 753-2712



Número de Solicitud: Lider / Solicitante: Compañía / n.ºm. Proyecto EEA:	L-09-017 Rosaida Burgos Rosaida Burgos
Número LCA: Analista LCA: Revisor: Fecha de informe:	A-09-094--A-09-095 P.Casanova, N. Corchado, Y. Ocasio E. Rivera 04/03/2009

*Julia M. O'Halloran*

Dra. Julia O'Halloran, Directora LCA

*Rafael Montalvo Zapata*

Lic. Rafael Montalvo Zapata, Químico Lic. 653

**ANÁLISIS DE AGUA**

ID No. LCA	ID No. Proyecto	pH	CE µS/cm	ST mg/L	NH3 ppm	NO3 ppm	P-PO4 ppm	CA ppm	MG ppm	K ppm
A-09-094	S3	7.9	407	3	0.17	1	0.15	29	16	2
A-09-095	E3	7.76	315	14	0.40	5	0.11	26	8	3

CE=CONDUCTIVIDAD ST=SOLIDOS TOTALES NO3=NITRATO NH3=AMONIA P-PO4=FOSFORO COMO FOSFATO CA=CALCIO MG=MAGNESIO K=POTASIO

ID No. LCA	ID No. Proyecto	NA ppm	ZN ppm	MN ppm	FE ppm	CU ppm	CD ppm	PB ppm
A-09-094	S3	28	ND	0.16	0.11*	ND	ND	ND
A-09-095	E3	22	ND	0.16	1.36	ND	ND	ND

NA=SODIO ZN=ZINC MN=MANGANESO FE=HIERRO CU=COBRE CD=CADMIO PB=PLOMO ND=NO DETECTABLE

\*Valor por debajo del primer punto de calibración.

Nota: Los resultados de este Informe son para uso exclusivo del cliente.

INFORME DE RESULTADOS



**Laboratorio Central Analítico**

Estación Experimental Agrícola  
 Universidad de Puerto Rico  
 Recinto Universitario de Mayagüez  
 1193 Calle Guayacán Jardín Botánico Sur San Juan, PR 00926-1118  
 (787) 767-9705 Ext. 2134, 2136 Fax: (787) 753-2712

*Julia M. O'Hallorans*

Dra. Julia O'Hallorans, Directora LCA

Número de Solicitud: Lider / Solicitante: Compañía / Inúm. Proyecto EEA:	L-09-018 Rosaída Burgos Rosaída Burgos
Número LCA: Analista LCA: Revisor: Fecha de informe:	A-09-096--A-09-097 P.Casanova, N. Corchado, Y. Ocasio E. Rivera 04/03/2009

*Rafael Montalvo Zapata*

Lic. Rafael Montalvo Zapata, Químico Lic. 653

ANALISIS DE AGUA

ID No. LCA	ID No. Proyecto	pH	CE µS/cm	SS mg/L	NH3 ppm	NO3 ppm	P-PO4 ppm	CA ppm	MG ppm	K ppm
A-09-096	E4	7.36	326	14	0.26	3	0.02	31	6	3
A-09-097	S4	7.6	474	ND	0.40	2	0.15	42	5	2

CE=CONDUCTIVIDAD SS=SOLIDOS TOTALES NH3=AMONIO NO3=NITRATO P-PO4=FOSFORO CA=CALCIO MG=MAGNESIO K=POTASIO ND=NO DETECTABLE

ID No. LCA	ID No. Proyecto	NA ppm	ZN ppm	MN ppm	FE ppm	CU ppm	CD ppm	PB ppm
A-09-096	E4	27	AEP	AEP	0.14	AEP	ND	0.18*
A-09-097	S4	32	AEP	AEP	0.07*	AEP	ND	0.23*

NA=SODIO ZN=ZINC MN=MANGANESO FE=HIERRO CU=COBRE CD=CADMIO PB=PLOMO ND=NO DETECTABLE

\*Valor por debajo del primer punto de calibración.  
 AEP=Analisis en progreso.

Nota: Los resultados de este Informe son para uso exclusivo del cliente.



**APÉNDICE II**  
**FOTOGRAFÍAS DEL ÁREA DE ESTUDIO**

*Vista general del área de humedal luego de sembrar las plantas y árboles en el año 2002*



**Foto 1**



**Foto 2**

*Vista general del área de humedal luego de siete años de construida*



**Foto 3**



**Foto 4**