

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

“Uso de humedales artificiales superficiales para  
remoción de contaminantes industriales”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presentada por:

María Fernanda Calle Macas

Ramiro Alberto Coello Montoya

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2015

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por concedernos salud, fortaleza y capacidad para mantenernos en la lucha en cada momento de nuestras vidas. A nuestra directora de tesis, M. Sc. Alby Aguilar Pesantes, por su apoyo y dedicación a guiarnos en nuestro trabajo. A nuestros familiares, que de una u otra forma contribuyeron para el desarrollo de la experimentación realizada en este trabajo. Así también hacemos extensivo el agradecimiento a nuestros amigos por su apoyo incondicional y altruista.

**Fernanda y Ramiro**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Jorge y Saida, por su amor y apoyo incondicional. Su incansable sacrificio y educación con valores fueron el puntal para que pudiera con éxito terminar una etapa más de mi formación profesional.

A mis hermanos, Jorge Luis y Lisseth, por su cariño y confianza mostrados durante todos estos años.

A mis abuelitos, que con su amor y consejos siempre me guiaron a un camino de superación en busca de grandes logros.

**Fernanda**

## **DEDICATORIA**

A Nelson y Amalia, mis queridos padres, que gracias a su apoyo y confianza, he logrado avanzar en mi formación humana y profesional. A mis hermanos, por su apoyo incondicional en todo momento. De igual manera a los amigos que supieron ayudarme desinteresadamente.

.

**Ramiro**

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

PhD. Carlos Rodríguez  
PRESIDENTE

---

M. Sc. Alby Aguilar Pesantes.  
DIRECTORA DE TESIS

---

M. Sc. Fabián Peñafiel.  
VOCAL PRINCIPAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

María Fernanda Calle Macas

---

Ramiro Alberto Coello Montoya

## RESUMEN

Este trabajo se realizó con el objetivo de evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes industriales, que se puede alcanzar al utilizar humedales artificiales de flujo superficial. La remoción se produce mediante una serie de mecanismos físicos, químicos y biológicos, que se dan en el interior del humedal. El agua empleada para el proceso de tratamiento provino de un sitio de descarga de efluente minero hacia el Río Calera. En las riberas de este río se asientan plantas de procesamiento minero pertenecientes al Distrito minero Portovelo-Zaruma en la Provincia de El Oro.

Para la experimentación se construyeron tres reactores de vidrio con las especies vegetales acuáticas *Lemna Minor*, *Eichhornia Crassipes* y *Dracaena Sanderiana*, respectivamente. Los sistemas fueron alimentados de forma continua desde tanques sedimentadores primarios. El tiempo de retención hidráulica para esta investigación fue de 15 días.

Antes de ingresar el agua al proceso de tratamiento, se determinaron las concentraciones iniciales de arsénico, cadmio, mercurio y cianuro. Estos fueron los contaminantes que se seleccionaron para evaluar su remoción. Una vez iniciado el tratamiento se realizaron mediciones cada tres días para registrar la variación de las concentraciones de los contaminantes a lo largo del proceso.

Las concentraciones finales se compararon con límites máximos permisibles y criterios de calidad admisibles dispuestos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente. Se logró, en algunos casos que las concentraciones finales de los contaminantes cumplan con los límites y criterios establecidos.

Las mayores eficiencias de remoción obtenidas fueron de 65.51%, 95.21%, 63.38% y 99.97% respectivamente para arsénico, cadmio, mercurio y cianuro. En el caso de arsénico y cadmio, esas remociones se alcanzaron en el reactor que contuvo *Dracaena Sanderiana*. La remoción de mercurio que se ha indicado se consiguió en el reactor que contuvo la *Lemna Minor* y en lo que respecta a cianuro, la eficiencia de remoción se consiguió en el reactor en que se implantó *Eichhornia Crassipes*.

Se determinó el orden de cada reacción y con ello se determinó la constante de velocidad de reacción,  $K$ , para cada contaminante. Las constantes que representaron mayor velocidad de reacción fueron:  $-0.04378 \text{ día}^{-1}$ ,  $-0.1539 \text{ día}^{-1}$ ,  $-0.000081 \text{ (mg/L)/día}$  y  $-0.5286 \text{ día}^{-1}$ , para arsénico, cadmio, mercurio y cianuro respectivamente.

Los resultados obtenidos demostraron que los humedales artificiales de flujo superficial son muy eficientes en la remoción de cadmio y cianuro; y en menor proporción para arsénico y mercurio. Las especies vegetales acuáticas utilizadas en este estudio demostraron ser de buenas características para emplearse en este tipo de tratamiento, especialmente la *Dracaena Sanderiana*, que fue la que menos cambios físicos negativos experimentó después del tratamiento. Se pudo concluir que los humedales artificiales constituyen una opción útil y económica ya que el principal elemento, que son las especies vegetales acuáticas, se encuentran en abundancia en la naturaleza, y a ello se añade que estos sistemas no requieren energía eléctrica para su funcionamiento.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	X
ABREVIATURAS .....	XIII
SIMBOLOGÍA .....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	XIX
CAPÍTULO 1	
1.GENERALIDADES .....	1
1.1. Introducción. ....	1
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Justificación .....	10
1.4. Objetivos: general y específicos. ....	13
CAPÍTULO 2	
2.REVISIÓN LITERARIA .....	14
2.1. Definición y tipos de aguas residuales.....	14
2.1.1. Definición de aguas residuales .....	14
2.1.2. Tipos de aguas residuales. ....	15
2.2. Características de las aguas residuales .....	17
2.2.1. Características físicas .....	17
2.2.2. Características químicas .....	20

2.2.3. Características biológicas .....	20
2.3. Principales contaminantes presentes en aguas residuales .....	21
2.3.1. Contaminación por aguas residuales domésticas .....	21
2.3.2. Contaminación por aguas residuales agrícolas .....	22
2.3.3. Contaminación por agua residual pluvial .....	23
2.3.4. Contaminación por aguas residuales industriales .....	24
2.4. Uso de tratamientos naturales para aguas residuales .....	46
2.4.1. Definición y características de los tratamientos naturales.....	46
2.4.2. Clasificación de los tratamientos naturales .....	46
2.5. Fundamentos sobre humedales artificiales.....	48
2.5.1. Concepto de humedal artificial .....	48
2.5.2. Clasificación de los humedales artificiales .....	49
2.5.3. Humedales artificiales de flujo superficial (FS) .....	52
2.6. Características de las especies vegetales acuáticas utilizadas en humedales .....	80
2.6.1. Clasificación de las especies vegetales acuáticas .....	80
2.6.2. Funciones de las especies vegetales acuáticas como parte de un humedal artificial .....	82
2.6.3. Especies vegetales acuáticas usadas para humedales FS .....	83
 CAPÍTULO 3	
3. METODOLOGÍA .....	99
3.1. Diseño y construcción de humedales artificiales .....	99
3.1.1. Proceso para el diseño de humedales artificiales de flujo superficial.....	99
3.1.2. Selección de la vegetación empleada para los humedales artificiales de flujo superficial .....	103
3.1.3. Material granular empleado para los humedales artificiales de flujo superficial .....	110
3.1.4. Construcción de la unidad de laboratorio.....	110
3.2. Muestreo y monitoreo de efluentes.....	120

3.2.1. Ubicación del sitio de muestreo .....	120
3.2.2. Tipo de muestreo .....	122
3.2.3. Caracterización del agua tomada del efluente industrial minero hacia el Río Calera.....	124
3.2.4. Recolección del agua a tratar y determinación de la concentración inicial.....	125
3.2.5. Monitoreo de efluentes.....	126

#### CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	129
4.1. caracterización.....	129
4.2. Concentración inicial.....	132
4.3. Efluentes.....	133
4.4. Comparación de las concentraciones finales obtenidas, con los límites máximos permisibles y criterios de calidad admisibles, establecidos en el Libro VI Anexo 1 del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente.....	138
4.5. Eficiencia de remoción.....	143
4.6. Manejo estadístico de datos para la determinación de la constante K.....	147
4.7. Especies Vegetales Acuáticas.....	194

#### CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	202
5.1. Conclusiones.....	202
5.2. Recomendaciones.....	209

#### ANEXOS

#### BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

ADN	Ácido desoxirribonucleico
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
Dra.	Doctora
Ec.	Ecuación
Etc.	Etcétera
EPA	Environmental Protection Agency
FS	Flujo Superficial
FSS	Flujo Subsuperficial
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico
LMP	Límite máximo permisible
s.f.	Sin fecha
SDT	Sólidos disueltos totales
ST	Sólidos totales
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
Pág.	Página
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

## SIMBOLOGÍA

#	Número
%	Porcentaje
"	Pulgada
°C	Grados centígrados
$\mu\text{g}/\text{kg}/\text{día}$	Microgramo por kilogramo por día
$\mu\text{m}$	Micrómetro o micra
$\text{Ca}^{2+}$	Ión Calcio
$\text{Cd}^{2+}$	Ión Cadmio
cm	Centímetro
CN	Cianuro
g	Gramo
HCN	Cianuro de hidrógeno
K	Constante de velocidad de reacción
kg	Kilogramo
L	Litro
m	Metro
$\text{m}^3$	Metro cúbico
$\text{m}^3/\text{s}$	Metro cúbico por segundo
mg	Miligramo
mg/L	Miligramo por litro
mm	Milímetro
n	Orden de reacción
nm	Nanómetro
pH	Potencial de hidrógeno
r	Coefficiente de correlación lineal
Ton	Tonelada
vs	Versus

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1. Hidrología de la zona de estudio. (Ríos Calera y Amarillo).....	3
Figura 1.2. Formación de Río Puyango. ....	6
Figura 1.3. Río Tumbes en Perú.....	7
Figura 2.1. Hiperqueratosis e hiperpigmentación.....	31
Figura 2.2. Efectos dañinos del mercurio.....	38
Figura 2.3. Saturnismo.....	41
Figura 2.4. Esquema de la clasificación de los tratamientos naturales.....	47
Figura 2.5. Humedal artificial de flujo superficial.....	49
Figura 2.6. Humedal artificial FS en las instalaciones de la empresa Bahco Argentina S. A. (Santo Tomé, Santa Fe). ....	50
Figura 2.7. Humedal artificial de flujo subsuperficial. ....	50
Figura 2.8 Humedal artificial de flujo subsuperficial en un hotel en Florianópolis, Brasil.....	51
Figura 2.9. Tipos de humedales artificiales.....	52
Figura 2.10. Humedales de flujo superficial en la parte superior con especies vegetales acuáticas flotantes y en la inferior con especies vegetales acuáticas emergentes. ....	54
Figura 2.11. Procesos para remoción de contaminantes.....	76
Figura 2.12. Especies vegetales acuáticas. ....	81
Figura 2.13. Eichhornia Crassipes.....	84
Figura 2.14. Lemna Minor.....	90
Figura 2.15. Dracaena Sanderiana.....	94
Figura 3.1. Especímenes de Eichhornia Crassipes recolectados. ....	104

Figura 3.2. Lemna Minor.....	105
Figura 3.3. Phragmites australis .....	106
Figura 3.4. Typha Angustifolia. ....	107
Figura 3.5. Dracaena Sanderiana.....	108
Figura 3.6. Vista superior de los tres reactores.....	109
Figura 3.7. Esquema del humedal artificial FS. ....	112
Figura 3.8. Reactores de vidrio para los humedales artificiales, presentaron un orificio de 8 mm en una de sus paredes laterales angostas. ....	113
Figura 3.9. Perforaciones hechas en los bidones con la ayuda de un cautil. Esa perforación sirvió para colocar las conexiones. ....	114
Figura 3.10. Regulación y control de caudal.....	115
Figura 3.11. Tanque sedimentador.....	116
Figura 3.12. Colocación de Dracaena Sanderiana en el medio de soporte.....	117
Figura 3.13. Reducción del pH del agua.....	118
Figura 3.14. Limpieza y colocación de Eichhornia Crassipes y Lemna Minor. ....	119
Figura 3.15. Etiquetado de los reactores.....	119
Figura 3.16. Punto de muestreo (A), descarga de efluente hacia el Río Calera. ....	120
Figura 3.17. Punto de muestreo, descarga de efluente hacia el Río Calera, se observa en la ribera del río los linderos de una planta de procesamiento. .	121
Figura 3.18. Zona circundante al punto de muestreo en la descarga de efluente hacia el Río Calera.....	122
Figura 3.19. Inserción del muestreador para la recolección de la muestra. ....	123
Figura 3.20. Se aprecia la tonalidad color café.....	124
Figura 3.21. Recolección de agua para tratamiento. ....	126
Figura 3.22. Muestras recolectadas durante el tratamiento. ....	127
Figura 4.1. Lemna Minor después del tratamiento.....	194
Figura 4.2. Raíces de Lemna Minor después del tratamiento.....	195
Figura 4.3. Lemna Minor antes y después del tratamiento. ....	195
Figura 4.4. Manchas negras en Eichhornia Crassipes.....	196

Figura 4.5. Manchas blancas en Eichhornia Crassipes .....	196
Figura 4.6. Hojas y peciolo de Eichhornia Crassipes necróticos.....	197
Figura 4.7. Cosecha de Eichhornia Crassipes necróticos.....	198
Figura 4.8. Raíces de Eichhornia Crassipes.....	199
Figura 4.9. Eichhornia Crassipes antes y después del tratamiento. ....	199
Figura 4.10. Raíces de Dracaena Sanderiana.....	200
Figura 4.11. Dracaena Sanderiana antes y después del tratamiento. ....	201

## ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

TABLA I. Límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua fría o dulce y criterios de calidad admisibles de acuerdo a su uso. ....	45
TABLA II. Criterios de diseño para humedal artificial de flujo superficial. ....	56
TABLA III. Procesos y mecanismos de remoción respectivos. ....	75
TABLA IV. Funciones de las especies vegetales acuáticas.....	82
TABLA V. Valores de la caracterización. ....	130
TABLA VI. Valores de la concentración inicial. ....	132
TABLA VII. Efluentes del reactor #1, concentración en mg/L .....	133
TABLA VIII. Efluentes del reactor #2, concentración en mg/L .....	134
TABLA IX. Efluentes del reactor #3, concentración en mg/L .....	136
TABLA X. Descarga a un cuerpo de agua dulce.....	139
TABLA XI. Preservación de flora y fauna en aguas dulces.....	140
TABLA XII. Para uso agrícola o riego .....	141
TABLA XIII. Para uso pecuario .....	142
TABLA XIV. Eficiencia de remoción (%) del reactor #1 .....	143
TABLA XV. Eficiencia de remoción (%) del reactor #2 .....	144
TABLA XVI. Eficiencia de remoción (%) del reactor #3 .....	145
TABLA XVII. Resumen de eficiencias obtenidas. ....	146
TABLA XVIII. Constante K para arsénico .....	160
TABLA XIX. Constante K para cadmio .....	172
TABLA XX. Constante K para mercurio .....	183
TABLA XXI. Constante K para cianuro .....	193

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 4.1. C vs. t para el arsénico en el Reactor #1.....	150
Gráfica 4.2. In C vs. t para el arsénico en el Reactor #1.....	151
Gráfica 4.3. C vs. t para el arsénico en el Reactor #2.....	152
Gráfica 4.4. C vs. t para el arsénico en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante .....	153
Gráfica 4.5. In C vs. t para el arsénico en el Reactor #2.....	154
Gráfica 4.6. In C vs. t para el arsénico en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.....	155
Gráfica 4.7. C vs. t para el arsénico en el Reactor #3.....	157
Gráfica 4.8. In C vs. t para el arsénico en el Reactor #3.....	158
Gráfica 4.9. In C vs. t para el arsénico en el Reactor #3, con extracción de dato aberrante.....	159
Gráfica 4.10. C vs. t para el cadmio en el Reactor #1.....	161
Gráfica 4.11. In C vs. t para el cadmio en el Reactor #1 .....	162
Gráfica 4.12. In C vs. t para el cadmio en el Reactor #1, con extracción de dato aberrante.....	163
Gráfica 4.13. C vs. t para el cadmio en el Reactor #2.....	165
Gráfica 4.14. In C vs. t para el cadmio en el Reactor #2.....	166
Gráfica 4.15. In C vs. t para el cadmio en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.....	167
Gráfica 4.16. C vs. t para el cadmio en el Reactor #3.....	169
Gráfica 4.17. In C vs. t para el cadmio en el Reactor #3.....	170
Gráfica 4.18. In C vs. t para el cadmio en el Reactor #3.....	171

Gráfica 4.19. C vs. t para el mercurio en el Reactor #1. ....	173
Gráfica 4.20. C vs. t para el mercurio en el Reactor #1, con extracción de dato aberrante.....	174
Gráfica 4.21. In C vs. t para el mercurio en el Reactor #1. ....	175
Gráfica 4.22. In C vs. t para el mercurio en el Reactor #1, con extracción de dato aberrante.....	176
Gráfica 4.23. C vs. t para el mercurio en el Reactor #2. ....	177
Gráfica 4.24. In C vs. t para el mercurio en el Reactor #2 .....	178
Gráfica 4.25. C vs. t para el mercurio en el Reactor #3. ....	179
Gráfica 4.26. C vs. t para el mercurio en el Reactor #3, con extracción de dato aberrante.....	180
Gráfica 4.27. In C vs. t para el mercurio en el Reactor #3. ....	181
Gráfica 4.28. In C vs. t para el mercurio en el Reactor #3, con extracción de dato aberrante.....	182
Gráfica 4.29. C vs. t para el cianuro en el Reactor #1. ....	184
Gráfica 4.30. In C vs. t para el cianuro en el Reactor #1.....	185
Gráfica 4.31. C vs. t para el cianuro en el Reactor #2. ....	187
Gráfica 4.32. In C vs. t para el cianuro en el Reactor #2.....	188
Gráfica 4.33. In C vs. t para el cianuro en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.....	189
Gráfica 4.34. C vs. t para el cianuro en el Reactor #3. ....	191
Gráfica 4.35. In C vs. t para el cianuro en el Reactor #3.....	192

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Introducción.

El agua es un elemento indispensable para la vida, pero las diversas actividades que a diario se realizan sin un criterio de desarrollo sustentable han hecho que las fuentes de agua, libres de contaminación, sean cada vez más escasas (Morató, Pires y Subirana, s. f.).

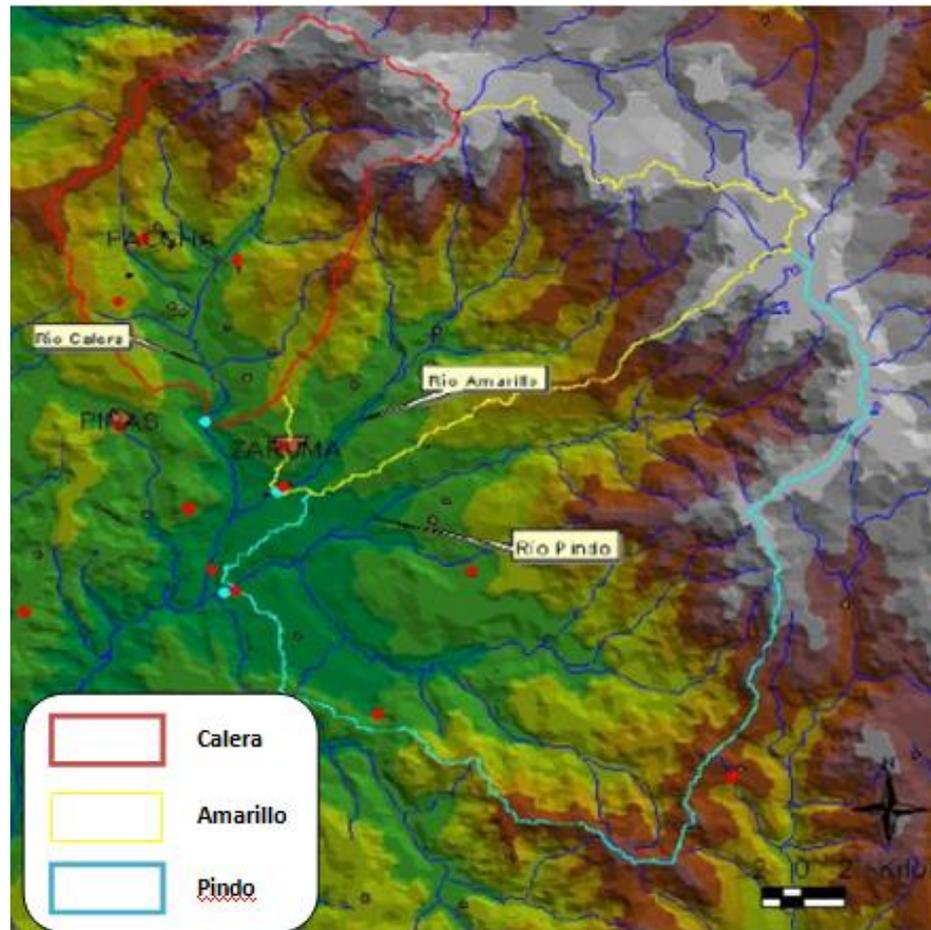
La vida humana, así como la flora y fauna pueden ser afectadas considerablemente por la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, ya que la calidad del agua podría presentar un cambio perjudicial en sus características físicas, químicas y biológicas (Nizama, 2014).

El deterioro de la calidad del agua es notorio, altamente nocivo y de grandes dimensiones cuando se trata del impacto ambiental originado por las actividades industriales extractivistas, principalmente hidrocarburífera y minera. En algunos lugares la explotación se ha realizado sin un plan de manejo ambiental adecuado, lo que ha causado una afectación considerable, con graves y permanentes daños para la salud y la vida de las personas; así como para la biodiversidad acuática (Isch, 2011).

En Ecuador el desarrollo del sector industrial ha venido incrementándose notablemente en los últimos años, se cuenta con industrias de cueros y textiles, pesquera, bananera, minera, etc. En el caso de la minería, esta actividad ha venido desarrollándose en diferentes lugares desde hace ya muchos años de forma artesanal, y uno de los referentes más conocidos es el distrito minero Portovelo-Zaruma, perteneciente a la provincia de El Oro, donde la actividad minera se remonta al siglo XVI (Murillo, 2000).

En el distrito Minero Portovelo-Zaruma existe la confluencia de dos ríos: el río Calera que fluye de Norte a Sur, y el río Amarillo que corre de Este a Sur-Oeste, los mismos que han sido contaminados

por la descarga de desechos provenientes de la actividad minera del sector.



**Figura 1.1.** Hidrología de la zona de estudio. (Ríos Calera y Amarillo).

**Fuente:** (Calle et. al, s. f.)

De acuerdo al Ministerio del Ambiente del Ecuador (2009), a lo largo de la margen de estos ríos se encuentran alrededor de 109 plantas de beneficio que se utilizan para separar minerales como oro, plata, cobre, etc.; mediante procesos que en su mayoría son manejados

con una tecnología de muy bajo rendimiento, generándose de esta manera más de 500 000 Ton de residuos mineros por año, y en los cuales se utilizan componentes químicos que son tóxicos para el medio ambiente como por ejemplo el cianuro (Marín, 2011; Landeta, 2014).

La necesidad de prevenir o remediar la contaminación de un cuerpo de agua ante la evidente escasez y el difícil abastecimiento de la misma, es suficiente para entender la importancia de evaluar alternativas económicas, como usar humedales artificiales superficiales para la remoción de contaminantes industriales. Los humedales artificiales son sistemas construidos para simular los diferentes mecanismos físicos, químicos y biológicos que se producen en un humedal natural (Camacho, Martín y Sanz, s. f.). En los humedales, sean estos de flujo superficial o subsuperficial, las especies vegetales acuáticas desempeñan un papel fundamental en la remoción de contaminantes.

En este trabajo se van a construir tres humedales artificiales de flujo superficial para evaluar la eficiencia para la remoción de contaminantes industriales, cada humedal tendrá una especie vegetal acuática diferente. Los contaminantes que se ensayarán

serán metales pesados y cianuro, lo que nos permitirá comprobar o rechazar la siguiente hipótesis:

*“Los humedales artificiales FS son útiles para la remoción de contaminantes industriales como metales pesados y cianuro”.*

## **1.2. Antecedentes**

En la actualidad, la contaminación de cuerpos de agua por la descarga de aguas residuales industriales sin un adecuado tratamiento, aún continúa siendo un problema que afecta a varias poblaciones (Isch, 2011).

Investigaciones realizadas por instituciones educativas y el Estado, así como de medios de comunicación tanto de Ecuador como de Perú, han demostrado que existe contaminación presente en los ríos Calera y Amarillo, debido a la descarga de aguas residuales industriales provenientes de la actividad del Distrito minero Portovelo-Zaruma. En el caso del cianuro, su concentración en varias muestras tomadas en los ríos mencionados, está por encima de lo permitido por la Organización Mundial de la Salud para agua de consumo humano. Según el Instituto Nacional de Investigación

Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM, 2014) el problema de la disposición de residuos mineros en el distrito Portovelo- Zaruma ha afectado por décadas al recurso hídrico de la cuenca Puyango-Tumbes.

La contaminación de la cuenca mencionada anteriormente se debe a que los ríos Amarillo y Calera se unen con el río Pindo ( Figura 1.1.) y forman el río Puyango en Ecuador, el mismo que pasa a territorio peruano con el nombre de río Tumbes (Figuras 1.2. y 1.3.).



**Figura 1.2.** Formación de Río Puyango.

**Fuente:** Tomado de Google Earth.



**Figura 1.3.** Río Tumbes en Perú.

**Fuente:** Tomado de video. (Contaminación de río Tumbes por Dante Danilo, 2013).

Según un reportaje presentado por el Lic. Jorge Díaz Guevara en el 2011 para canal 21 Tumbes, en el Santuario de Puerto Pizarro, ubicado en Perú y que recibe las aguas de los ríos mencionados anteriormente, ya hay indicios de contaminación en varios crustáceos y mariscos por metales pesados, los mismos que son consumidos por la población de la zona (Contaminación de río Tumbes Canal 21 Tumbes, 2011).

El problema con los metales pesados es que no se disuelven ni precipitan espontáneamente, por ello, aunque en el último par de años ha existido un mayor control y exigencia por parte de las autoridades para controlar que no se contaminen los ríos, toneladas

de sustancias tóxicas ya fueron vertidas tiempo atrás y aún se evidencia su presencia en los cauces de los ríos, en elevadas concentraciones; lo que motiva a realizar este estudio que usa un tratamiento natural por medio de humedales artificiales de flujo superficial para remover contaminantes industriales provenientes de actividades mineras.

En cuanto a tratamientos naturales para remoción de contaminantes, los avances más recientes tratan sobre el uso de humedales artificiales con especies vegetales acuáticas emergentes y flotantes. Varios investigadores observaron el eficiente rendimiento de los humedales naturales, entonces surgió el interés en simular los mecanismos observados mediante humedales artificiales construidos (Metcalf y Eddy, 1995b).

Según Vymazal (2011), el empleo de humedales artificiales empezó hace más de 50 años con los ensayos de la Dra. Käthe Seidel del Instituto Max-Planck en Alemania, quien observó la capacidad de estos sistemas de reducir sustancias orgánicas e inorgánicas existentes; así como metales pesados e hidrocarburos, pero fue a finales de 1960 cuando los primeros sistemas a escala real se pusieron en funcionamiento. Desde entonces, los humedales FSS

se han utilizado comúnmente en Europa, mientras que los humedales FS han sido más populares en América del Norte y Australia.

Durante los años 1970 y 1980, se puede decir que fue el trabajo del Doctor Kickuth en este período lo que realmente estimuló el interés en esta tecnología en Europa. Estos estudios se basaban en los procesos de tratamiento del agua que ocurren en la zona de la raíz del *Phragmites Australis* conocido como carrizo común (Aguado, 2013).

En la literatura de Qian, Terry, Yu, Zayed, y Zhu (1999) indican que ensayaron doce especies vegetales acuáticas, para determinar su eficacia al remover trazas de metales tóxicos del agua contaminada, tales como: arsénico, cadmio, cobre, plomo, manganeso, hierro y mercurio. Los autores encontraron que la especie *Polygonum hydroperoides* Michx era la más eficiente debido a su rápido crecimiento.

La Fábrica de Imusa S.A. localizada en el municipio de Río Negro en Antioquía, Colombia, tiene en funcionamiento unos canales sembrados con Jacinto de Agua desde 1988, en donde se

comprobó una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanza más del 97% en los metales pesados (García, 2012).

En Ecuador, se han realizado investigaciones utilizando humedales artificiales para la remoción de mercurio, níquel y bario en muestras de agua sintéticas con tipos de especies vegetales acuáticas como: *Eleocharis Geniculata*, *Eichhornia Crassipes*, *Lemna Minor* y *Setaria Parviflor*, logrando buenos resultados en la remoción del mercurio (Flores y Jaramillo, 2012; Tapia, 2009).

### **1.3. Justificación**

Se puede aún observar la contaminación indiscriminada de cuerpos de agua con contaminantes industriales. Algunas industrias a lo largo de los años han descargado sus efluentes contaminados directamente a los ríos, en la mayoría de los casos sin haber recibido un tratamiento que garantice el cumplimiento de los parámetros exigidos por el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente para descarga de efluentes.

Pineda en el año 2010, evaluó la contaminación en el cauce de los ríos Calera y Amarillo, en cuyas riberas se asientan las empresas de procesamiento pertenecientes al Distrito minero Portovelo-Zaruma. Se compararon los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles para descarga en agua fría/dulce establecidos por la entidad mencionada en el párrafo anterior y se encontró que el 100% de los puntos de muestreo exceden el límite de mercurio, el 17% de plomo y el 12.5% exceden las concentraciones máximas de cianuro.

Esta tesis se desarrolla para que se tome conciencia del daño que se hace al medio ambiente y a las personas de las comunidades que se han asentado alrededor de estas aguas que han sido contaminadas. Este daño no afecta sólo a la flora, fauna y personas que están expuestas a la contaminación hoy en día, sino que los efectos nocivos de los contaminantes afectarán irremediablemente a futuras generaciones. La presencia de contaminantes industriales como algunos metales pesados, en concentraciones elevadas, es altamente tóxicos para los seres vivos atribuyéndoles en ciertos casos propiedades carcinógenas, mutagénicas o teratogénicas.

Por los motivos expuestos se busca demostrar que hay tratamientos innovadores, prácticos y económicos para tratar las aguas de cauces naturales que fueron contaminadas o mejor aún para tratar las aguas residuales industriales antes de ser descargadas y afectar al medio ambiente. Si bien en otros países como Perú y Colombia se han realizado ya estudios, en nuestro país todavía hay un gran camino por recorrer en el estudio de tratamientos, que permitan remover estos contaminantes industriales peligrosos del agua.

La aplicación de tratamientos naturales para la remoción de contaminantes es adecuado para estas industrias, ya que su aplicabilidad es sencilla y relativamente económica comparado con otros tipos de tratamientos como intercambio iónico o filtración por membrana.

Con el uso de humedales artificiales no se necesitaría equipos mecánicos, consumo de energía ni monitoreo constante de operadores calificados; por estos motivos este trabajo se puede aplicar en aquellos lugares que se sirven de estas aguas que fueron afectadas por este tipo de contaminación y en los cuales los recursos económicos no son suficientes como para implementar un

sistema de tratamiento más sofisticado; dando así solución en parte a un problema ambiental, social, político y económico.

#### **1.4. Objetivos: general y específicos.**

##### **Objetivo general.**

- Utilizar humedales artificiales de flujo superficial a escala de laboratorio como tratamiento natural para la remoción de contaminantes industriales provenientes de un efluente minero.

##### **Objetivos específicos.**

- Seleccionar las especies vegetales acuáticas mejor adaptadas para la implementación de tres humedales artificiales de flujo superficial.
- Calcular la eficiencia alcanzada por los humedales artificiales para cada contaminante.
- Determinar la constante de remoción para cada contaminante.
- Determinar cuál humedal artificial removi6 en mayor proporci6n cada contaminante.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. REVISIÓN LITERARIA**

### **2.1. Definición y tipos de aguas residuales**

A continuación se explica brevemente la definición, así como los tipos de aguas residuales que pueden existir.

#### **2.1.1. Definición de aguas residuales**

Se puede definir al agua residual como la combinación de los residuos líquidos o aguas portadoras de residuos, procedentes de residencias, instituciones públicas, compañías industriales y comerciales, a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 1995a).

## **2.1.2. Tipos de aguas residuales.**

De acuerdo a la fuente de las aguas residuales se tiene la siguiente clasificación (Ramalho, 2003):

- Aguas residuales domésticas o urbanas
- Aguas residuales agrícolas
- Aguas pluviales
- Aguas residuales industriales

### **2.1.2.1. Aguas residuales domésticas o urbanas**

Son producto de las actividades cotidianas domésticas. Estos líquidos provienen de viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales; contienen principalmente restos de comida, excretas, detergentes, grasas, etc. (Romero, 1999).

### **2.1.2.2. Aguas residuales agrícolas**

Provenientes de la producción agrícola que arrastran fertilizantes, y pesticidas (Ramalho, 2003).

### **2.1.2.3. Aguas pluviales**

Son las aguas que ingresan al sistema de alcantarillado pluvial y han venido transportando residuos de techos, calles y otras superficies por donde ha circulado. Generalmente el vertido se puede hacer directamente, es decir sin un tratamiento, a los cuerpos receptores de agua (Romero, 1999).

### **2.1.2.4. Aguas residuales industriales**

Son desechos líquidos producto de la actividad industrial (Romero, 1999). El contenido de estas aguas depende del tipo de industria por ejemplo pueden contener metales pesados si se trata de industrias de petróleo, acero y minería (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO, 2009).

## **2.2. Características de las aguas residuales**

Las aguas residuales domésticas difieren de las agrícolas o industriales en cuanto a sus características, por lo que no es posible aplicar los mismos sistemas de tratamiento a estos tipos de agua esperando obtener la misma eficiencia (Cubillos, s. f.). La importancia de conocer las características es evitar o minimizar los efectos dañinos que ocasionaría el verter estas aguas residuales sin un adecuado tratamiento a los cuerpos de agua receptores.

### **2.2.1. Características físicas**

Son varias las características físicas que se pueden mencionar, algunas de ellas se explican a continuación con una breve descripción:

Temperatura.- El aumento de temperatura acelera la descomposición de la materia orgánica, incrementa el consumo de oxígeno pero a la vez disminuye la solubilidad del mismo (Cubillos, s. f.). La descarga de aguas relativamente calientes a un cuerpo receptor puede crear un desequilibrio en el ecosistema de la vida acuática, así

también la temperatura incide en la rapidez de las reacciones químicas (Bonilla, Izurrieta, Mendoza y Paz, 1979).

Sólidos.- Con sólidos, nos referimos a la cantidad total de materia en suspensión, sedimentable, coloidal<sup>1</sup> y disuelta. Los sólidos totales son el residuo tras la evaporación y secado de la muestra de agua a 103°C, los sólidos sedimentables son aquellos que se pueden remover por sedimentación simple y pueden ser medidos como la cantidad de sólidos asentados en el interior de un Cono Imhoff<sup>2</sup> en un lapso de una hora, finalmente los sólidos disueltos representan el material disuelto y coloidal (Romero, 1999).

Turbidez.- Esta propiedad indica indirectamente la concentración de materia suspendida en el agua ya que es una medida de transmisión de la luz a través de esta (Bonilla et al., 1979).

---

<sup>1</sup> El diámetro de los coloides está comprendido entre 1  $\mu\text{m}$  y 1nm.

<sup>2</sup> Instrumento utilizado para la medición de sólidos sedimentables.

Olor.- Se origina normalmente por la presencia de gases producidos o liberados por biotransformación de la materia orgánica. El agua residual fresca tiene un olor ligeramente desagradable, pero en caso de agua residual de varios días el olor puede ser insoportable. El olor más característico de las aguas residuales se debe a la presencia de sulfuro de hidrógeno (Ramos, Sepúlveda y Villalobos, 2003).

Color.- El color es un indicador de la edad de las aguas residuales; un color gris indica que se trata de aguas residuales frescas, mientras que un color más oscuro muestra mayor tiempo del agua residual. El color en las aguas residuales industriales, indica de donde proviene la contaminación, así como el buen estado o deterioro de los procesos de tratamiento. La industria textil y la de pulpa de papel son las de mayor incidencia en cuanto a contaminantes industriales de color fuerte (Romero, 1999).

Conductividad.- Se define como la capacidad que tiene el agua para transportar una corriente eléctrica (Ramos et al., 2003).

### **2.2.2. Características químicas**

En esta categoría se encuentran contaminantes como productos químicos orgánicos e inorgánicos. Con frecuencia estas sustancias no son eliminadas por un tratamiento convencional, debido a su naturaleza química o por presentarse en concentraciones elevadas. En éste grupo se incluyen también los iones de metales pesados presentes en las aguas residuales industriales, dichos contaminantes aún en concentraciones muy pequeñas pueden causar graves problemas. El grupo incluye al arsénico, cadmio, cromo, plomo, etc. (Dorado et al., 2006)

### **2.2.3. Características biológicas**

Bacterias, virus, protozoarios, hongos, rotíferos y otros, son responsables de la transmisión de enfermedades por medio del agua de abastecimiento. Algunas enfermedades que se producen por este medio son el cólera, la tifoidea e

infecciones intestinales causadas por *Entamoeba histolytica*<sup>3</sup> o *Giardia lamblia*<sup>4</sup> (Ramalho, 2003).

### **2.3. Principales contaminantes presentes en aguas residuales**

Día a día se generan subproductos contaminantes en las actividades realizadas por el ser humano, ya sean estas para cumplir con sus necesidades básicas, desarrollo industrial, atención hospitalaria, etc. Generalmente, los contaminantes son la causa más importante de la disminución de la calidad del agua en todo el mundo (UNESCO, 2009). Se puede establecer los tipos de contaminantes de acuerdo a su origen, como se detalla a continuación:

#### **2.3.1. Contaminación por aguas residuales domésticas**

Ecuador es un país con un acelerado crecimiento de las poblaciones, dicho crecimiento repercute con una generación abundante de desechos, que afecta principalmente a lugares de masiva concentración (Isch, 2011).

---

<sup>3</sup> Vectores: moscas y cucarachas.

<sup>4</sup> Parásito propio de regiones tropicales y subtropicales.

En las grandes ciudades es usual observar gran cantidad de personas que han construido sus viviendas de manera ilegal e invasiva. Estos lugares al no contar con los servicios básicos constituyen focos de contaminación, puesto que sus aguas residuales son conducidas a un curso de agua cercano, o depositadas sobre el suelo que puede llegar a contaminar fuentes de agua subterráneas.<sup>5</sup>

### **2.3.2. Contaminación por aguas residuales agrícolas**

En el Ecuador la contaminación por el uso de agrotóxicos es una realidad cotidiana. El afán de obtener productos de mayor competitividad ha dado paso a una sobreexplotación del uso de fertilizantes, plaguicidas y fungicidas (Isch, 2011).

Un problema que se origina es que al contener, las aguas residuales agrícolas residuos de fertilizantes, estas aguas llegarán a un cuerpo receptor con elevadas concentraciones de nitrógeno y fósforo, los mismos que contribuyen al

---

<sup>5</sup> Debido al proceso de infiltración.

crecimiento masivo de algas y pudiera ocasionarse un proceso de eutrofización<sup>6</sup> (Cubillos, s. f.).

El riesgo de estas aguas residuales contaminadas al ser ingeridas o usadas para riego, ya se ha hecho notar con un notable aumento de incidencia en intoxicaciones y tendencia de mortalidad por tumores malignos, como es el cáncer de estómago (Isch, 2011).

### **2.3.3. Contaminación por agua residual pluvial**

Puede constituir una fuente de contaminación en caso de tratarse de lluvia ácida<sup>7</sup>, si sucede puede presentar una aportación sutil de metales al medio ambiente (Márquez, s. f.).

---

<sup>6</sup> La presencia excesiva de materia orgánica en el agua provoca un acelerado crecimiento de algas y otras especies verdes que obstruyen el paso de la luz solar a capas inferiores.

<sup>7</sup> Se forma cuando el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno se combinan con la humedad en la atmósfera para producir ácido sulfúrico y ácido nítrico.

#### **2.3.4. Contaminación por aguas residuales industriales**

Gran parte de las aguas residuales industriales se vierten a los cuerpos de agua natural sin un tratamiento previo y algunas veces estas pueden infiltrar en los acuíferos y contaminar los recursos hídricos subterráneos. La industria genera más presión sobre los recursos hídricos a través de los impactos que producen sus descargas, con un alto potencial contaminante, que por la cantidad de agua utilizada en la producción (UNESCO, 2009).

Como ya se ha expuesto anteriormente en el desarrollo del capítulo I, en Ecuador existe contaminación de cuerpos de agua por descarga de residuos industriales, la actividad en el distrito minero Portovelo-Zaruma es un ejemplo de ello.

El mercurio, plomo y cianuro procedentes de la minería comercial y artesanal ponen en peligro la salud humana y de los ecosistemas (UNESCO, 2009; Guerrero, 2013).

A continuación se indican algunos contaminantes que producen diferentes industrias (Cubillos, s. f.):

Industria textil: Materia en suspensión, turbidez y color.

Industria alimentaria: Materia orgánica biodegradable, grasas, aceites, materia flotante, nitrógeno y fósforo.

Industria química - farmacéutica: Materia en suspensión, compuestos orgánicos persistentes que se combinan con el cloro, metales pesados, ácidos y color.

Industria petrolera: Sólidos, sustancias orgánicas e inorgánicas, temperatura.

Industria minera: Metales pesados, cianuro, ácidos, agentes reductores inorgánicos como sulfitos, sulfatos, sales ferrosas, color y turbiedad.

A fin de tener un claro sustento teórico, se explica más a fondo las propiedades de dos tipos de contaminantes que serán objeto de estudio en esta investigación:

- Metales pesados
- Cianuro

#### **2.3.4.1. Metales pesados**

Antes de conocer las particularidades de cada metal es preciso indicar ciertas definiciones. Se conoce como “traza de metales” a aquellos que están presentes en el cuerpo humano y medio ambiente en concentraciones muy bajas; tal es el caso de cobre, hierro y zinc. Por otro lado, por “metales pesados” se entiende aquellos cuya densidad sea mayor a cinco veces la del agua, se tiene como ejemplo plomo, cadmio y mercurio. Finalmente “metales tóxicos” son aquellos cuyas concentraciones en el medio ambiente se consideran dañinas (Márquez, s. f.). La mayor parte de estos metales se encuentran en el ambiente en cantidades muy pequeñas que no se pueden eliminar y que por tanto penetran a diario en los organismos de los seres vivos (Ruiz, s. f.).

Es importante saber que los efectos sobre la salud de la exposición a una sustancia tóxica dependen de la dosis, el tiempo y la forma de exposición y de

la presencia de otras sustancias químicas (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR, 2012). La liberación de una sustancia en el ambiente no siempre conduce a exposición, usted puede exponerse a una sustancia solamente cuando entra en contacto con esta, ya sea por inhalar, comer o beber la sustancia o por contacto con la piel (ATSDR, 2007a).

Los metales tienen muchas propiedades que influyen positiva o negativamente en la salud del ser humano, varios metales son esenciales para las células como el cobre, hierro y zinc. Se pueden presentar situaciones en que la falta de hierro ocasiona anemia, por el contrario la exposición al plomo puede provocar daños internos ya que este no cumple función alguna dentro del cuerpo (Márquez, s. f.; Tejeda, 2010).

El acelerado aumento de la industrialización de los países y más de aquellos en vías de desarrollo, ha hecho que los metales vayan adquiriendo grandes

concentraciones en el ambiente de forma antropogénica. El problema con los metales pesados es que son persistentes durante cientos de años, es decir pueden ser sepultados como parte de un relleno sin que se pierda la posibilidad de ser removidos en un futuro y ocasionar daños (Márquez, s. f.; Díaz, 2013)

### **Arsénico**

#### **Descripción**

El arsénico se clasifica químicamente como un metaloide<sup>8</sup>, pero ha sido mayormente referido como un metal. Es un material sólido de color gris acero (ATSDR, 2007a).

---

<sup>8</sup> Presentan características tanto de metales como no metales.

### **Fuentes naturales y antropogénicas.**

Se encuentra en la naturaleza ampliamente distribuido, asociado a otros elementos como oro, plata, cobre y hierro. En el agua se suele encontrar en forma de arsenato o arsenito, ambas muy hidrosolubles (Ferrer, 2003). Debido a la extracción y producción de los metales anteriormente mencionados se ha llegado a una extensa contaminación del arsénico en un gran número de regiones mineras alrededor del mundo (Nriagu, 1994, citado en Tejeda, 2010).

### **Exposición y absorción**

Es acumulable en el organismo por exposición crónica. La ingesta e inhalación son las principales rutas de exposición. En el caso de ingestión el sistema gastrointestinal absorbe en promedio el 80% del arsénico y este porcentaje varía dependiendo de las características del compuesto y

el individuo (Báez, Gaytán, Prieto, Scoot y Zuñiga, 2006; Castro, 2006).

### **Efectos**

El arsénico en dosis bajas puede causar una gran variedad de alteraciones respiratorias, náuseas, vómitos, disminución de glóbulos rojos y blancos (ATSDR, 2007a).

A ciertas concentraciones ocasiona alteraciones en el sistema nervioso, se acumula en los huesos y músculos, y en menor grado en hígado y riñones. (Castro, 2006).

Puede, dependiendo del tipo y tiempo de exposición, causar problemas gastrointestinales, irritaciones de la piel y mucosas, anemia o la inducción de alteraciones cromosómicas. Una ingesta superior a 0.3  $\mu\text{g}/\text{Kg}/\text{día}$  de arsénico

inorgánico provoca hiperpigmentación<sup>9</sup>, hiperqueratosis palmoplantar<sup>10</sup> y complicaciones vasculares. Si el rango supera de 1 a 3 mg/kg tiene consecuencias fatales en los seres humanos (Howard y Vanderbrink, 1999, citado en Pérez, 2005).



**Figura 2.1.** Hiperqueratosis e hiperpigmentación

**Fuente:** (Alvarado-De la Peña et al., 2012)

El arsénico es conocido como un agente carcinógeno<sup>11</sup>. También existen evidencias de

---

<sup>9</sup> Apariencia de gotas de lluvia en piel de tronco y cuello.

<sup>10</sup> Pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de pies y manos.

<sup>11</sup> Cualquier sustancia o agente capaz de desencadenar un cáncer en las células sanas.

bioacumulación<sup>12</sup> en cangrejos, pez cebra y otros animales; así como en su desarrollo embrionario afectando directamente la reproducción de las mencionadas especies (Báez et al., 2006).

## **Cadmio**

### **Descripción**

El cadmio es un metal muy dúctil y maleable, presenta un color azulado, se encuentra presente en el carbón y abonos minerales (Tejeda, 2010).

### **Fuentes naturales y antropogénicas.**

El cadmio se libera al ambiente de forma natural durante actividades volcánicas, incendios forestales y la lixiviación de las rocas (Rodríguez, 2011).

Fuentes antropogénicas son la minería, industria y la quema de carbón que liberan cadmio a la

---

<sup>12</sup> El término hace referencia a la acumulación neta, con el paso del tiempo, del aumento de la concentración de una sustancia en el organismo expuesto.

atmósfera, el cual posteriormente va a depositarse en el suelo o el agua. (Tejeda, 2010).

### **Exposición y absorción**

El cadmio no es un metal que se biomagnifique<sup>13</sup>, pero si es acumulativo (Ruiz, s. f.).

La exposición ocurre al beber agua contaminada y comer alimentos que lo contengan. Así mismo las personas están expuestas al cadmio al vivir cerca de las industrias que lo liberan (ATSDR, 2012).

### **Efectos**

Si se respira cadmio, los pulmones pueden ser severamente dañados, causando incluso la muerte.

Otros efectos del cadmio son: diarreas, dolor de

---

<sup>13</sup> Tendencia de algunos productos químicos a acumularse a lo largo de la cadena trófica, exhibiendo concentraciones sucesivamente mayores al ascender el nivel trófico.

estómago, vómitos severos, debilitamiento óseo<sup>14</sup>. También produce fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, desórdenes psicológicos y posible daño en el ADN (Díaz, 2013).

Una dosis aproximadamente de un gramo de este metal es letal. Recientes experiencias con animales han demostrado que el cadmio posee efecto carcinógeno (Ruiz, s. f.).

## **Hierro**

### **Descripción**

Elemento esencial para el organismo. En el hombre la cantidad total es aproximadamente 4 g. Es un mineral importante que ayuda el mantenimiento de las funciones vitales; se combina con proteínas y

---

<sup>14</sup> Debido a la semejanza química con el catión  $\text{Ca}^{2+}$ , el  $\text{Cd}^{2+}$  desplaza al catión calcio y se incorpora a los tejidos óseos, originando en los mismos gran fragilidad así como deformaciones importantes y dolorosas.

cobre para producir hemoglobinas (ATSDR, 2006a; García G., García M. y Ballesteros, 1995).

### **Fuentes antropogénicas y naturales**

Se utiliza en la industria para la fabricación de piezas de hierro, acero fundido y aleaciones con otros metales. Otro uso del hierro es en la industria petrolera para las perforaciones (Nordberg, s. f.).

### **Exposición y absorción**

Este metal no ha sido aún ampliamente estudiado, la literatura revisada indica que la exposición puede ser por inhalación e ingestión.

### **Efectos**

El hierro es un irritante local para los pulmones, la exposición prolongada a una mezcla de polvo de hierro y otros metales puede afectar a la función de

estos y también al tracto gastrointestinal (Nordberg, s. f.).

## **Mercurio**

### **Descripción**

Se encuentra naturalmente en el ambiente y existe en varias formas, las cuales pueden ser: mercurio metálico<sup>15</sup>, mercurio inorgánico y mercurio orgánico. El mercurio metálico se presenta en forma líquida a temperatura ambiente y es brillante de color blanco-plateado (ATSDR, 1999).

### **Fuentes naturales y antropogénicas**

Las fuentes naturales incluyen a la actividad de volcanes, erosión de la corteza terrestre y evaporación de minerales y aguas. Las principales

---

<sup>15</sup> También llamado mercurio elemental.

fuentes antropogénicas son la minería,<sup>16</sup> metalurgia y el uso industrial (Español, 2001).

### **Exposición y absorción**

Es posible su absorción por contacto con la piel, vías respiratoria y digestiva. Una vez inhalado el gas puede alcanzar la sangre con una eficiencia del 80% y en la vía digestiva el mercurio inorgánico se absorbe en cantidades menores al 0.01% en el tracto gastrointestinal (Ramírez, 2008).

### **Efectos**

Entre las intoxicaciones por mercurio se tiene entumecimiento en varias partes del cuerpo y pérdida de capacidades sensoriales. En casos de gran exposición se pierde la capacidad de coordinación, causa sordera, afonía, puede complicarse con convulsiones, parálisis y provocar

---

<sup>16</sup> Constituye el 50 % de las fuentes antropogénicas.

la muerte (Ruiz, s. f.). Otros efectos incluyen problemas en riñones e hígado, sistema nervioso central por lo que ocasiona trastornos mentales y pérdida de la memoria, se acumula en los tejidos de los peces u otros animales y luego pasa a las personas como parte de su alimentación (Ferrer, 2003).

Al mercurio se le atribuyen efectos teratógenos<sup>17</sup> y cancerígenos cuando existe exposición a los compuestos orgánicos (Ramírez, 2008).



**Figura 2.2.** Efectos dañinos del mercurio.

**Fuente:** (Johnson y Olivero, 2002)

---

<sup>17</sup> Cualquier agente ambiental capaz de producir una anomalía o malformación congénita.

## **Plomo**

### **Descripción**

El plomo es un elemento moldeable, denso y de color azul grisáceo cuya presencia es común en nuestra dieta, no tiene una función particular dentro del organismo, pero se considera un metal persistente y con potencial de bioacumulación (Mendiola, Mínguez-Alarcón, Torres-Cantero, 2014).

### **Fuentes naturales y antropogénicas**

Rara vez se lo encuentra en la naturaleza en forma de metal. Mayormente se lo encuentra combinado con otros elementos formando compuestos de plomo. En Ecuador el uso de gasolina con plomo se extendió hasta 1999, siendo hasta el momento de su restricción la combustión de esta, uno de los mayores contaminantes ambientales (ATSDR, 2007b).

## **Exposición y absorción**

El plomo puede ingresar al organismo de los seres vivos por diferentes vías. En la sangre la mayor parte del plomo absorbido se encuentra en el interior de los hematíes, desde ahí se distribuye a los tejidos de órganos como hígado, pulmón, riñón, bazo; también en huesos, y cerebro alcanzando una mayor concentración (Ferrer, 2003).

## **Efectos**

Dependiendo el tipo y tiempo de exposición se pueden presentar diversos efectos como alteraciones del sistema nervioso, problemas gastrointestinales y renales. La intoxicación por plomo se conoce como saturnismo<sup>18</sup> (Pérez, 2005).

El plomo es de alta peligrosidad ya que puede atravesar la placenta, provocar abortos, nacimientos

---

<sup>18</sup> Envenenamiento que produce el plomo al acumularse en el cuerpo.

prematurales y anomalías congénitas. Aunque se comporta como carcinógeno en modelos experimentales, no hay evidencia de un efecto carcinógeno en humanos (Ferrer, 2003).



**Figura 2.3.** Saturnismo

**Fuente:** (Fernández, González, López y Martín, 2001)

#### **2.3.4.2. Cianuro**

##### **Descripción**

El término general “cianuro” se refiere a los numerosos compuestos, tanto naturales como sintéticos, que contienen el grupo químico CN, constituido por un átomo de carbono y un átomo de nitrógeno. El cianuro efectivamente se combina con

la mayoría de los metales y con aquellos que se encuentran en pequeñas trazas, siendo esta una propiedad que lo hace útil en el proceso de extracción de metales (Moran, s. f.).

### **Fuentes naturales y antropogénicas**

El cianuro puede ser producido de forma natural por ciertas bacterias, hongos y algas. Varias plantas también lo producen, como las raíces de casabe. De forma antropogénica son fuentes de cianuro las industrias mineras, de metalurgia y limpieza de metales (ATSDR, 1997).

### **Exposición y absorción**

De acuerdo a (ATSDR, 2006b) algunas maneras de exposición al cianuro son al beber agua con cianuro, ingerir alimentos contaminados, por inhalación y por contacto dérmico con suelo o agua contaminada.

## **Efectos**

El cianuro es una sustancia química sumamente venenosa. La exposición a niveles bajos por largo tiempo puede producir dificultad para respirar, dolor al corazón, vómitos, dolor de cabeza y dilatación de la glándula tiroides, cuando ya se trata de altas concentraciones puede sufrir daño el cerebro y corazón, así como producir coma y la muerte (ATSDR, 1997).

El cianuro no se acumula en los tejidos y tampoco es conocido que cause cáncer, defectos congénitos o anomalías en la reproducción. (Hagelstein, Logsdon y Mudder, 2001).

El cianuro produce efectos tóxicos a niveles de 0.5 miligramos de cianuro por litro de sangre o mayores, y casos fatales han ocurrido a niveles de 3 miligramos de cianuro por litro o mayores, la ingestión oral de HCN es letal para los humanos en dosis que oscilan entre los 50 y los 200 mg

(ATSDR, 2006b; Stanton, 1986, citado en Moran, s. f.).

Estudios en animales han demostrado que el cianuro y el tiocianato<sup>19</sup> pueden pasar a la leche materna y con ello a las crías que lactan, lo que sugiere que lo mismo puede ocurrir en seres humanos (ATSDR, 2006b).

#### **2.3.4.3. Límites máximos permisibles y criterios de calidad establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente para metales pesados y cianuro.**

La actual legislación ambiental establece los límites máximos permisibles para descarga de efluentes a un cuerpo receptor de agua dulce, así como los criterios de calidad admisibles en el agua de acuerdo al uso que se le vaya a dar. A continuación se presenta la Tabla I, donde se resume los

---

<sup>19</sup> Producto principal que el cuerpo forma con el cianuro que entra al cuerpo, y es la manera en que el cuerpo se deshace del cianuro.

parámetros mencionados, para los contaminantes industriales revisados en 2.3.4.1 y 2.3.4.2.

**TABLA I**

**Límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua fría o dulce y criterios de calidad admisibles de acuerdo a su uso.**

<b>DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE.</b>			
<i>Contaminante</i>	<i>Simbología</i>	<i>Unidad</i>	<i>LMP</i>
Arsénico	As	mg/L	0.1
Cadmio	Cd	mg/L	0.02
Mercurio	Hg	mg/L	0.005
Cianuro Total	CN	mg/L	0.1
<b>PARA PRESERVACION DE FLORA Y FAUNA</b>			
<i>Contaminante</i>	<i>Simbología</i>	<i>Unidad</i>	<i>LMP</i>
Arsénico	As	mg/L	0.05
Cadmio	Cd	mg/L	0.001
Mercurio	Hg	mg/L	0.0002
Cianuro Total	CN	mg/L	0.01
<b>PARA USO AGRICOLA O RIEGO</b>			
<i>Contaminante</i>	<i>Simbología</i>	<i>Unidad</i>	<i>LMP</i>
Arsénico	As	mg/L	0.1
Cadmio	Cd	mg/L	0.01
Mercurio	Hg	mg/L	0.001
Cianuro Total	CN	mg/L	0.2
<b>PARA USO PECUARIO</b>			
<i>Contaminante</i>	<i>Simbología</i>	<i>Unidad</i>	<i>LMP</i>
Arsénico	As	mg/L	0.2
Cadmio	Cd	mg/L	0.05
Mercurio	Hg	mg/L	0.01
Cianuro Total	CN	mg/L	0.2

**Fuente:** Elaborado por los autores con información tomada del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio Ambiente TULSMA, Libro VI, Anexo I.

## **2.4. Uso de tratamientos naturales para aguas residuales**

En esta sección se expone la definición de los tratamientos naturales para aguas residuales, así como las características de los mismos.

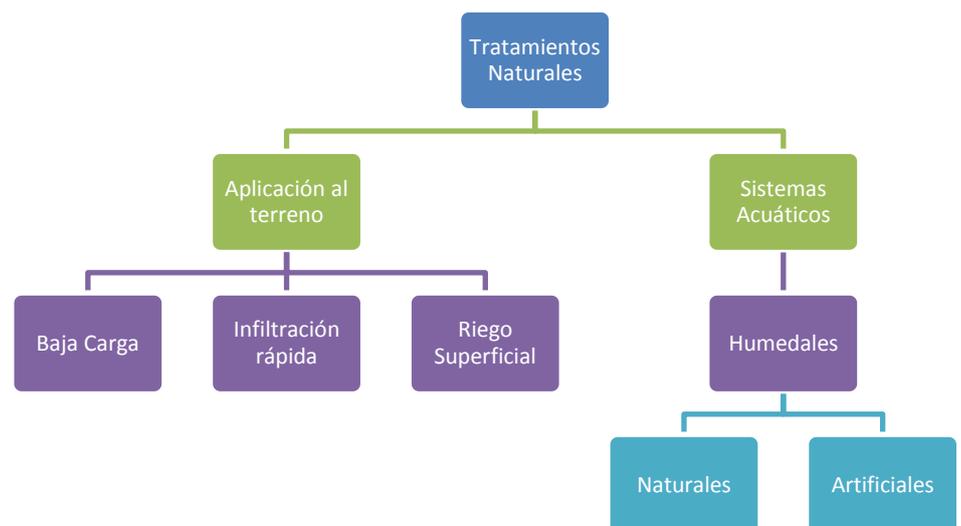
### **2.4.1. Definición y características de los tratamientos naturales**

Los sistemas de tratamiento natural aprovechan los procesos de depuración que se dan de forma espontánea en la naturaleza. La depuración en el medio ambiente natural se da mediante procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren cuando interaccionan el agua, el suelo, las especies vegetales, los microorganismos y la atmósfera. Estos sistemas utilizan la energía solar, energía del viento, energía química acumulada en la biomasa y en el suelo para la degradación de los contaminantes (Camacho et al., s. f.).

### **2.4.2. Clasificación de los tratamientos naturales**

Los sistemas de tratamiento natural se clasifican en sistemas de aplicación al terreno y en sistemas acuáticos. En los

sistemas de aplicación al terreno encontramos el de baja carga, infiltración rápida y riego superficial. En estos sistemas el agua a tratar es aplicada al suelo, en algunos casos con presencia de vegetación y en otros casos no. En los sistemas acuáticos están los humedales que pueden ser naturales o artificiales; en donde se utilizan especies vegetales acuáticas como parte del tratamiento (Metcalf y Eddy, 1995b).



**Figura 2.4.** Esquema de la clasificación de los tratamientos naturales.

**Fuente:** Elaborado por los autores con información tomada de (Metcalf y Eddy, 1995b)

## **2.5. Fundamentos sobre humedales artificiales**

A continuación se exponen varios aspectos importantes de conocer acerca de los humedales artificiales.

### **2.5.1. Concepto de humedal artificial**

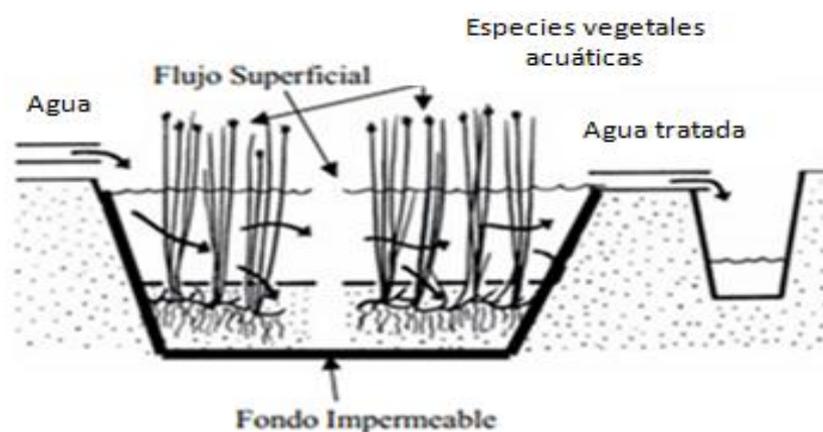
Los humedales artificiales se consideran sistemas de depuración de poca profundidad que simulan los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en un humedal natural pero confinándolo con alguna cubierta impermeable como una geomembrana. Son sistemas que básicamente se forman por agua, relleno sólido como grava y especies vegetales acuáticas. Las comunidades de microorganismos aparecen de forma espontánea durante el uso del humedal (Camacho et al., s. f.).

Como tratamiento de ingeniería el uso de humedales artificiales está recibiendo cada vez más atención para la remediación de aguas contaminadas (Gessner et al., 2005).

## 2.5.2. Clasificación de los humedales artificiales

Según (Environmental Protection Agency, 2000a, citado en Lahora, 2003) la clasificación de los humedales artificiales está en función de si hay o no presencia de una superficie libre de agua que esté en contacto con la atmósfera. De acuerdo a lo expuesto se puede mencionar dos tipos de humedales artificiales:

### Humedales artificiales de flujo superficial (FS)



**Figura 2.5.** Humedal artificial de flujo superficial.

**Fuente:** (Camacho et al., s. f.)

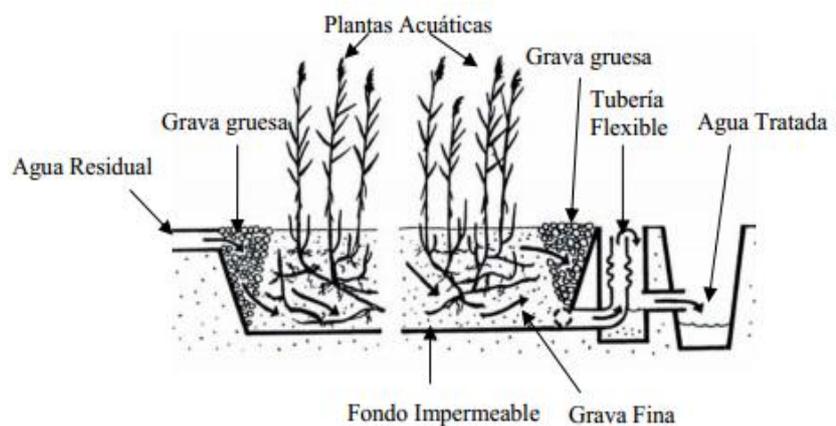
Como se aprecia en la Figura 2.5., en este caso la superficie libre del agua se encuentra en contacto con la atmósfera (Environmental Protection Agency EPA, 2000).



**Figura 2.6.** Humedal artificial FS en las instalaciones de la empresa Bahco Argentina S. A. (Santo Tomé, Santa Fe).

**Fuente:** (Hadad y Maine, 2008)

### Humedales artificiales de flujo subsuperficial (FSS)



**Figura 2.7.** Humedal artificial de flujo subsuperficial.

**Fuente:** (Camacho et al., s. f.)

Como se muestra en la Figura 2.7., la característica de este humedal es que lámina de agua no es visible debido a la

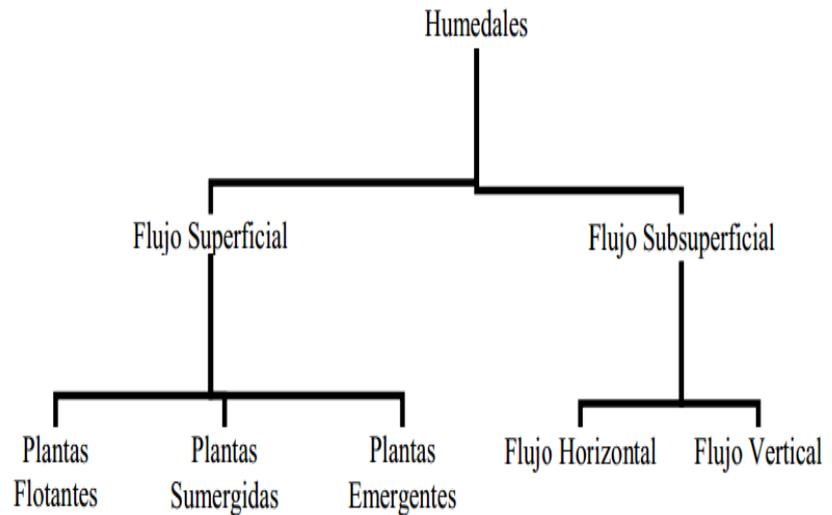
presencia de un lecho de material granular (Environmental Protection Agency, 1993, citado en Lahora, 2003).



**Figura 2.8.** Humedal artificial de flujo subsuperficial en un hotel en Florianópolis, Brasil.

**Fuente:** (Hoffmann, Platzer, Von Muench y Winker, 2011)

La clasificación de los humedales artificiales se presenta resumida en la Figura 2.9.



**Figura 2.9.** Tipos de humedales artificiales

**Fuente:**(Angarita, 2010)

### 2.5.3. Humedales artificiales de flujo superficial (FS)

Es importante conocer diferentes aspectos respecto a los humedales artificiales FS, se explican a continuación algunos de ellos.

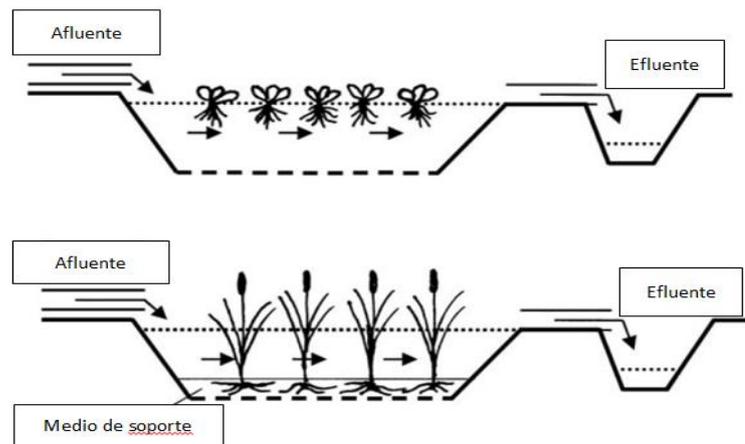
#### 2.5.3.1. Descripción de un humedal artificial FS

Los humedales artificiales FS presentan una capa de agua poco profunda que por lo general oscila entre 0.2 y 0.4 m., el agua fluye a través del sistema

con un tiempo de retención hidráulica de 10 días como mínimo (Meuleman y Verhoeven, 1999).

La profundidad baja del agua, la velocidad lenta del flujo y la presencia de las especies vegetales acuáticas regulan el flujo del agua a tratar, teniendo un régimen esencialmente laminar que proporciona una remoción muy efectiva de material particulado al inicio del sistema (EPA, 2000).

Es importante mencionar que debe ingresar agua tratada, ejemplo con un proceso previo de sedimentación. Los mecanismos de remoción que se detallarán más adelante se ejecutarán al pasar el agua lentamente a través de los tallos en caso de vegetación emergente y las raíces si se trata de vegetación flotante como se muestra en la Figura 2.10. (Guadalupe y Llagas, 2006).



**Figura 2.10.** Humedales de flujo superficial en la parte superior con especies vegetales acuáticas flotantes y en la inferior con especies vegetales acuáticas emergentes.

**Fuente:**(Vymazal, 2007)

Las especies vegetales acuáticas con sus tallos, hojas sumergidas y raíces forman un medio de soporte para el crecimiento de las bacterias y en algunos casos permite la oxigenación (Romero, 1999).

El oxígeno se encuentra disponible en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de las especies vegetales acuáticas, así como en

superficie de raíces y rizomas<sup>20</sup>, lo cual permite que se produzca actividad aeróbica en el humedal. Sin embargo, se puede asumir que la mayor parte del líquido en el humedal FS es anaeróbico, lo cual limita la remoción de amoníaco pero estos humedales sí son efectivos para la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos (EPA, 2000).

#### **2.5.3.2. Consideraciones de diseño y construcción de un humedal FS**

Un parámetro muy importante en el diseño de humedales es la temperatura, ya que afecta las condiciones físicas y biológicas del sistema (Márquez, 2013).

Según (Crites y Tchobanoglous, 2001, citado en Villarroel, 2005), los parámetros son:

---

<sup>20</sup> Tallo subterráneo de ciertas especies vegetales, generalmente horizontal, que por un lado echa ramas aéreas verticales y por el otro raíces.

- Tiempo de retención hidráulica
- Profundidad del agua
- Relación largo-ancho

A continuación se presenta la siguiente tabla que indica ciertos valores para los parámetros respectivos.

**TABLA II**  
**Criterios de diseño para humedal artificial de flujo superficial.**

Criterio	Unidad	Valor
Tiempo de retención hidráulica	d	4 a 15
Profundidad del agua	cm	10 a 60
Relación de longitud/ancho	adimensional	2:1 a 4:1

**Fuente:** Adaptado de (Metcalf y Eddy, 1995b; Crites y Tchobanoglous, 2000)

Tiempo de retención hidráulica: Se define como la relación existente entre el volumen efectivo<sup>21</sup> de agua y el caudal. Sin embargo, debido a la existencia de flujos preferenciales, el tiempo de retención teórico no tiene por qué coincidir con el

---

<sup>21</sup> Considera la disminución en la sección transversal del humedal debido a la presencia de la vegetación.

real, por lo general los tiempos medidos son inferiores al teórico (Kadlec et al., 2002, citado en Angarita, 2010).

Profundidad de agua: La profundidad va a depender de la altura que la vegetación permita alcanzar antes de ser inundada, máximo suele ser de 0.6 m (Angarita, 2010).

A manera de recomendación (Skousen et al., 1998, citado en Aduvire, Baretino y López, 2002) indica que la profundidad de agua no debe superar los 30 cm para ayudar a que la vegetación emergente cumpla con sus funciones.

Relación largo-ancho: La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema (Márquez, 2013).

### **Diseño hidráulico de un humedal artificial FS.**

El diseño hidráulico de un humedal se basa en un flujo a pistón uniforme que pasa a través de la sección del humedal (Márquez, 2013).

Resulta conveniente revisar la teoría y las ecuaciones existentes para un reactor de flujo a pistón.

(Romero, 1999) dice que en un reactor de flujo a pistón, bajo condiciones ideales, las partículas de fluido que ingresan al reactor serán descargadas en la misma secuencia de entrada y sin haberse mezclado. Se considera también nula la difusión longitudinal así como la dispersión. Se dice que todas las partículas viajan a la misma velocidad, permaneciendo en el reactor un tiempo igual al de retención teórico.

En la práctica estas condiciones se obtienen aproximadamente, con estanques largos, que

tengan una relación longitud-ancho grande, para así mantener la dispersión longitudinal en un valor mínimo, pero de acuerdo con investigaciones, una relación largo-ancho menor o igual a 3:1 suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo-eficiencia. (Romero, 1999; Márquez, 2013).

Las ecuaciones se determinan a partir de un Balance de Masas.

$$V \frac{dC}{dt} = QC_o - QC_e - VKC^n \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

V = volumen efectivo del reactor

Q = caudal medio que fluye por el reactor

C<sub>o</sub> = concentración inicial de contaminante

C<sub>e</sub> = concentración final de contaminante

K = constante de velocidad de reacción.

De acuerdo con (Romero, 1999) en flujo a pistón, a medida que el fluido va llegando al reactor, este es

encerrado en paquetes herméticos que viajan a lo largo del tanque sin transferir ninguna sustancia de un paquete a otro. Aunque exista mezcla completa dentro de cada paquete, se puede considerar que cada paquete es un mini reactor de cocheda en mezcla completa. En dicho reactor la composición y distribución relativa de los reactantes y productos cambia con el tiempo, pero la mezcla hace que la concentración sea uniforme en todo el reactor, no existiendo así entrada ni salida del flujo, entonces el balance se puede expresar de la siguiente manera:

$$V \frac{dC}{dt} = -VKC^n \quad \text{Ec. 2}$$

$$\frac{dC}{dt} = -KC^n \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $n$ <sup>22</sup> va a corresponder al orden de la reacción, a partir de Ec. 3 se puede tener las siguientes posibilidades:

---

<sup>22</sup> Cuando se realice la experimentación, se deberá obtener los datos correspondientes para realizar una gráfica Concentración vs. Tiempo y con ello determinar la tendencia de la gráfica y así determinar el orden de la reacción para obtener la ecuación respectiva

- n=0

$$\frac{dC}{dt} = -K$$

$$\int_{C_o}^{C_e} dC = -K \int_0^t dt$$

$$C_e - C_o = -Kt \quad \text{Ec. 4}$$

- n=1

$$\frac{dC}{dt} = -KC$$

$$\int_{C_o}^{C_e} \frac{dC}{C} = -K \int_0^t dt$$

$$\ln \left( \frac{C_e}{C_o} \right) = -Kt \quad \text{Ec. 5}$$

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-Kt} \quad \text{Ec. 6}$$

De acuerdo con la definición de tiempo de retención hidráulica se tiene:

$$t = \frac{V}{Q} \quad \text{Ec. 7}$$

En (Metcalf y Eddy, 1995b) se indica la Ec. 7 pero considerando el volumen efectivo:

$$t = \frac{LWNd}{Q} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

L= longitud del reactor (m)

W= ancho del reactor (m)

N= fracción del área transversal no ocupada por las especies vegetales.

d= profundidad del agua (m)

Q= caudal medio que circula a través del sistema (m<sup>3</sup>/s)

De acuerdo a (Romero, 1999) la eficiencia está determinada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{C_o - C_e}{C_o} \quad \text{Ec. 9}$$

### **Consideraciones generales para la construcción de un humedal FS.**

Para la construcción de un humedal hay que tener en cuenta ciertos requerimientos generales que son importantes:

Lo principal es contar con suficiente espacio, de preferencia se debe usar en lugares donde los períodos de heladas no sean prolongados y que permita condiciones mayoritarias de luz. Las especies vegetales que se vayan a emplear deben ser adaptadas a las condiciones de aquel lugar. (Jenssen et al., 2008, citado en Hoffmann et al., 2011).

Otras recomendaciones dadas por (Hoffmann et al., 2011) incluyen dejar 15 cm de borde libre<sup>23</sup>, tener la superficie del humedal totalmente plana para asegurar una distribución uniforme del flujo y que el

---

<sup>23</sup> En caso que se presentes acumulaciones inesperadas de agua.

vertido del agua a tratarse se haga mediante tuberías con pequeñas perforaciones ubicadas uniformemente a lo largo de toda su longitud.

### **2.5.3.3. Mecanismos de remoción en humedal FS**

Como se mencionó anteriormente, un humedal artificial consiste en modelar los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en un humedal natural.

En este caso se indicarán los mecanismos de remoción que intervienen cuando se trata de metales pesados y cianuro, que son los contaminantes que en este estudio se pretenden remover.

#### **Mecanismos de remoción de metales pesados.**

Las estrategias para remoción de metales están basadas en la estabilización, acumulación y, en algunos casos, la volatilización de algunos

elementos. (Salt et al., 1998; Pilon-Smits y Pilon, 2002, citados en Tejeda, 2010).

La disminución de la concentración de metales pesados que tiene lugar en los humedales es producto de la interacción de varios procesos como son: sedimentación, adsorción, precipitación y co-precipitación, intercambio catiónico, biodegradación y absorción por parte de la especie vegetal acuática; pero lo que realmente ocurre o que reacciones tiene lugar en el humedal son difíciles de ilustrar (Dunbabin y Bowmer, 1992; Matagi et al., 1998; Collins et al., 2005, citados en Sheoran<sup>a</sup> y Sheoran<sup>b</sup>, 2006).

Los diferentes mecanismos que se producen en el humedal se pueden explicar en tres categorías: físicos, químicos y biológicos.

## **Mecanismos físicos**

Los humedales artificiales están en capacidad de lograr una alta eficiencia física para la remoción de contaminantes (Frers, 2008).

- **Decantación y sedimentación:** La sedimentación se reconoce como el mecanismo inicial en la remoción de metales pesados en los humedales naturales y artificiales. Normalmente en aguas estancadas las partículas que tengan una densidad mayor a la del agua se asentarán. El humedal funciona como un filtro para sedimentos, ya que el agua superficial se mueve lentamente debido a la característica de flujo laminar y la resistencia proporcionada por las especies vegetales acuáticas emergentes y flotantes (Sheoran<sup>a</sup> y Sheoran<sup>b</sup>, 2006). Procesos químicos como la precipitación y la co-precipitación tienen que ocurrir antes de la sedimentación puesto que este proceso físico tiene lugar cuando ya se han agregado metales

pesados en partículas lo suficientemente grandes que son los flóculos, los mismos que debido a su tamaño podrán hundirse (Walker y Hurl, 2002, citados en Sheoran<sup>a</sup> y Sheoran<sup>b</sup>, 2006). En los humedales la floculación se ve reforzada por altos valores de pH, concentración de materias en suspensión y fuerza iónica (Sholkovitz, 1978; Hakanson y Jansson, 1983; Matagi et al., 1998, citados en Sheoran<sup>a</sup> y Sheoran<sup>b</sup>, 2006).

### **Mecanismos químicos**

El mecanismo químico más importante que ocurre en un humedal es la absorción, que describe un grupo de procesos que incluye reacciones de adsorción y de precipitación, el mismo da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes (Guadalupe y Llagas, 2006).

- **Adsorción:** La adsorción se refiere a la unión de iones de metales pesados a las partículas del suelo que se encuentran en la superficie del sustrato por intercambio catiónico (Guadalupe y Llagas, 2006).
- **Precipitación y co-precipitación:** La precipitación y co-precipitación son importantes mecanismos de adsorción en la eliminación de metales pesados. La precipitación depende de factores como: constante de solubilidad  $K_{ps}^{24}$ , naturaleza del metal involucrado, pH del humedal y concentración de iones metálicos pertinentes. La precipitación se produce cuando la concentración de cationes y aniones se presenta de tal manera que su producto excede la constante de solubilidad  $K_{ps}$  (Sheoran<sup>a</sup> y Sheoran<sup>b</sup>, 2006). Otra reacción importante de precipitación que ocurre en la superficie del sustrato de los humedales es la formación de

---

<sup>24</sup> Indica la solubilidad de un compuesto iónico.

sulfuros de metales. Tales compuestos son altamente insolubles y representan los medios eficaces para inmovilizar muchos metales tóxicos en los humedales (Guadalupe y Llagas, 2006).

- **Intercambio catiónico:** El intercambio catiónico ocurre cuando los iones metálicos cargados positivamente se unen a los grupos funcionales con cargas negativas de la superficie del material adsorbente, como los de tipo carboxilo presentes en los ácidos de los tejidos de las raíces (Kadlec et al., 2000, citado en Márquez, 2013).

### **Mecanismos Biológicos.**

De suma importancia en los humedales son los mecanismos que se detallan a continuación:

- **Adsorción por las especies vegetales acuáticas:** Para la remoción de metales

pesados es reconocida la captación por parte de las especies vegetales acuáticas, muchas de ellas son capaces de absorber y acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo, siendo las raíces la principal vía para ello. La velocidad de remoción que proporcione este mecanismo va a depender de la velocidad de crecimiento de las especies y de la concentración de los metales pesados en los tejidos de las mismas (Guadalupe y Llagas, 2006).

- **Biodegradación:** Se produce a través de la asimilación y el metabolismo de los microorganismos que viven en y alrededor de las especies vegetales acuáticas, la rizósfera ofrece una zona de cultivo para los microorganismos implicados en la degradación (Sheoran<sup>a</sup> y Sheoran<sup>b</sup>, 2006). Las bacterias que oxidan metales se ubican regularmente en la zona aeróbica, donde ocurre su precipitación en forma de óxidos, en cambio las bacterias sulfato

reductoras se encuentran presentes en las zonas anaerobias donde ocurre la precipitación en forma de sulfuros metálicos (Choi et al., 2006, citado en Márquez, 2013). Una vez descritos algunos de los procesos que intervienen en la remoción de metales pesados en los humedales artificiales se puede decir que es el resultado de mecanismos biológicos, físicos y químicos que son dependientes entre sí. Los mecanismos se resumen en decantación y sedimentación, filtración, adsorción, intercambio catiónico, precipitación, co-precipitación en compuestos insolubles y biodegradación.

### **Mecanismos de remoción de cianuro.**

Las formas más tóxicas del cianuro son los cianuros libres HCN y CN que corresponden al cianuro de hidrógeno e ión de cianuro respectivamente (Gessner, Kadlec y Reaves, 2005).

Estudios preliminares indicaron poca volatilización del cianuro, pero la degradación microbiana fue significativa y lo más importante sin subproductos nocivos. De acuerdo con (Hinchee et al., 1995; Goncalves et al., 1998; Alexander, 1999, citados en Gessner et al., 2005) tanto microorganismos aerobios como anaerobios son capaces de destruir el cianuro.

Los mecanismos que intervienen son: formación de complejos, adsorción, oxidación, volatilización del cianuro libre, la biodegradación, etc. (García, 2003, citado en Gessner et al., 2005).

- **La volatilización:** La volatilización, que implica la propagación de un compuesto disuelto en el agua hacia la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante en los humedales (Guadalupe y Llagas, 2006). En algunos casos la volatilización puede ser indeseable debido al potencial para contaminar el aire con los mismos contaminantes (Benefield

y Randall, 1980, citado en Guadalupe y Llagas, 2006).

- **La complejación:** Hay 28 elementos capaces de formar complejos con cianuro, con 72 posibles complejos de metal-cianuro. Las solubilidades de estos complejos pueden ser desde muy soluble a insoluble. Sin embargo, algunos de estos compuestos no son muy estables y se descomponen liberando cianuro libre (Smith y Mudder, 1991, citado en Rodríguez, 2003).
- **La precipitación de complejo de cianuro:** La precipitación del cianuro se consigue mediante la formación de complejos de cianuro. Se reduce la concentración de cianuro libre y también la de otros metales que pueden estar presentes. Un caso es la formación de cianuros de hierro que pueden originar precipitados sólidos cuando reaccionan con otras sustancias químicas presentes en la solución, logrando de esta

manera la remoción del cianuro (Hagelstein et al., 2001).

- **La biodegradación:** La biodegradación<sup>25</sup> de cianuro aprovecha la capacidad de ciertos microorganismos, en su mayoría bacterias, de utilizar el cianuro como una fuente de carbono y nitrógeno convirtiendo el compuesto tóxico en una sustancia inofensiva (Salomons y Forstner, 1987, citado en Aguirre, Amaya, Marchevsky, Mas y Torres, s. f.). Entre los mencionados microorganismos se encuentran bacterias como *Escherichia coli*<sup>26</sup> y *Bacillus*<sup>27</sup>; así como también algunos hongos los mismos que asimilan cianuro y lo usan como fuente de nitrógeno y/o carbono, teniendo como intermediario el amoníaco (Aguirre et al., s. f.).

---

<sup>25</sup> También llamada degradación biológica.

<sup>26</sup> Bacteria que vive en el intestino.

<sup>27</sup> Bacteria en forma de bastón, generalmente se encuentra en muestras de suelo.

**Procesos y mecanismos involucrados correspondientes.**

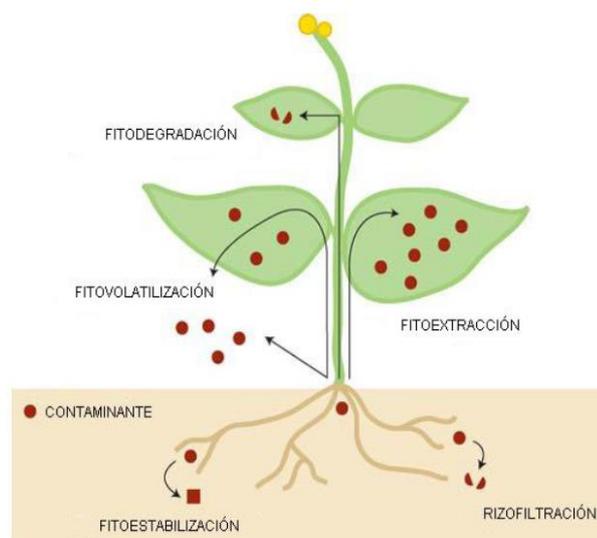
Cada uno de los mecanismos explicados ocurre debido a ciertos procesos que son realizados por las especies vegetales. A continuación la Tabla III los resume.

**TABLA III**  
**Procesos y mecanismos de remoción respectivos.**

<b>Proceso</b>	<b>Mecanismos involucrados</b>
Fitoextracción o Fitoacumulación	Absorción y acumulación de elementos tóxicos en el tejido radicular y/o aéreo seguido de su cosecha.
Rizofiltración	Las raíces de las especies vegetales y los organismos encontrados en la rizósfera, actúan como filtros para luego ser cosechados.
Fitoestabilización	Retención como formas químicas estables en la rizósfera. Solamente lo inmoviliza más no disminuye su concentración.
Fitovolatilización	Las especies vegetales acuáticas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.
Fitodegradación	Las especies vegetales acuáticas captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.

**Fuente:** Adaptado de (Frers, 2008; Muñoz, 2013)

Los procesos descritos anteriormente tienen lugar a través de una parte específica de las especies vegetales, esto se ilustra continuación en la Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Procesos para remoción de contaminantes.

**Fuente:** (Tejeda, 2010)

#### 2.5.3.4. Ventajas del uso de humedal FS

- Minimizan o reducen la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores capacitados, por ejemplo no se requiere un sistema de aireación que demande un gasto de energía ya que en el tratamiento

los diferentes procesos ocurren bajo condiciones anaerobias, facultativas y/o aerobias en las cuales se aporta de manera espontánea el oxígeno desde la atmósfera (Camacho et al., s. f., EPA, 2000)

- No requieren adición de reactivos químicos, todo el proceso se basa en una interacción de mecanismos físicos, químicos y biológicos (Camacho et al., s. f.)
- Uso de recursos naturales, hasta ahora no aprovechados (Arroyave, 2004).
- Constituyen un espacio verde estéticamente agradable para la comunidad, incorporan un hábitat para la vida silvestre y oportunidades para la recreación pública (Guadalupe y Llagas, 2006).

- Menor costo de construcción, operación y mantenimiento, que un tratamiento con procesos mecánicos (Frers, 2008; EPA, 2000).
- No producen lodos residuales que demandarían un posterior tratamiento y disposición final (EPA, 2000).
- La remoción de contaminantes de las aguas residuales domésticas es muy efectiva con tiempos de retención razonables (EPA, 2000).

#### **2.5.3.5. Limitaciones de los humedales FS**

- Pueden traer problemas de mosquitos y otros insectos causantes de enfermedades (EPA, 2000).
- Los metales, el fósforo y algunos compuestos orgánicos persistentes se acumulan en el humedal con el tiempo, debido a que

permanecen ligados al sedimento de la superficie del sustrato (EPA, 2000).

- Debido a que el proceso es lento, el tiempo que dure el proceso puede ser largo (Frers, 2008).
- En algunos casos la mayor limitación de los humedales FS es el requerimiento de grandes superficies de terreno, para permitir el mayor tiempo de retención y permitir así la adsorción y el intercambio catiónico al igual que la oxidación y precipitación de los metales (Aduvire, 2012).
- El aumento del tamaño del humedal y consecuentemente el tiempo de retención puede hacerse en forma compensatoria, pero puede no ser eficiente en términos económicos (EPA, 2000).

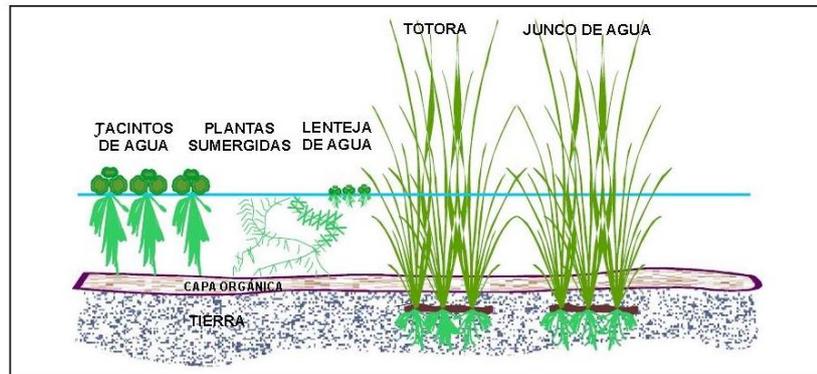
- Requiere instalar plantas piloto para evaluar las variables de diseño que son específicas a cada región (Arroyave, 2004).
- La biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante en la captación (Frers, 2008).

## **2.6. Características de las especies vegetales acuáticas utilizadas en humedales**

Siendo las especies vegetales acuáticas un elemento primordial en los humedales artificiales es importante revisar literatura respecto a las mismas, a continuación se presenta la clasificación, las funciones y características de *Eichhornia Crassipes*, *Lemna Minor* y *Dracaena Sanderiana*.

### **2.6.1. Clasificación de las especies vegetales acuáticas**

Las especies vegetales acuáticas que se pueden emplear en un humedal artificial son: flotantes, emergentes y sumergidas, tal como se muestra en la Figura 2.12.



**Figura 2.12.** Especies vegetales acuáticas.

**Fuente:** (Metcalf y Eddy, 1995b)

**Flotantes:** se caracterizan por su habilidad para derivar el dióxido de carbono y satisfacer las necesidades de oxígenos directamente de la atmósfera, estas toman los nutrientes minerales del agua (Guadalupe y Llagas, 2006).

**Sumergidas:** se caracterizan por la habilidad de absorber oxígeno, dióxido de carbono y minerales de la columna de agua (Guadalupe y Llagas, 2006).

**Emergentes:** Aportan con la difusión de oxígeno desde la parte aérea hacia la zona radicular permitiendo así la aireación del sistema. (Brix, 1994 y Kadlec, 2000, citados en Barrera-Godínez, Durán-Domínguez-de-Bazúa, González-

Sandoval, Moeller-Chávez, Ramírez-Camperos y Ruiz-López, 2010).

### 2.6.2. Funciones de las especies vegetales acuáticas como parte de un humedal artificial

La vegetación juega un papel importante ya que la difusión de oxígeno de las raíces crea condiciones necesarias para el desarrollo de microorganismos, que participan en la descomposición aeróbica de la materia orgánica (Brix, 1993, citado en Bulc, Vrhovšek, y Kukanja, 1996).

Tanto raíces, hojas y tallos cumplen una función que se detalla a continuación en la Tabla IV.

**TABLA IV**

**Funciones de las especies vegetales acuáticas.**

Raíces y/o tallos en la columna de agua.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Será la superficie donde las bacterias crezcan.</li> <li>2. Constituye un medio filtración y adsorción de sólidos.</li> </ol>
Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Previenen el crecimiento de algas.</li> <li>2. Reducen la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua.</li> </ol>

**Fuente:** (Guadalupe y Llagas, 2006).

Según Olguín, 1998, citado por Arroyave, 2004; las características que deben poseer las especies vegetales acuáticas empleadas en un humedal artificial son las siguientes:

- Alta productividad.
- Alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes.
- Buenas condiciones de supervivencia ante condiciones adversas.
- Facilidad para ser cosechada.<sup>28</sup>

### **2.6.3. Especies vegetales acuáticas usadas para humedales FS**

Seguidamente se incluye información sobre taxonomía, desarrollo, plagas, entre otros aspectos importantes de cada especie vegetal acuática.

---

<sup>28</sup> Una vez cosechadas las especies vegetales acuáticas pueden ser incineradas.

### 2.6.3.1. EICHHORNIA CRASSIPES



**Figura 2.13.** Eichhornia Crassipes

**Fuente:** (Invasive Species Specialist Group ISSG, 2006.)

#### **Taxonomía científica**

De acuerdo con (Cristobal y Lacuesta, 2013):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Commelinales

Familia: Pontederiaceae

Género: Eichhornia

Especie: Crassipes

### **Descripción**

También se las conoce como lirio de agua, camalote o lechuguín. Es una especie vegetal acuática, perenne<sup>29</sup>, vascular, flotante con raíces sumergibles, de clima cálido y frío. Puede sobrevivir y extenderse en muchos sitios gracias a su habilidad de crecimiento y adaptación. Logra duplicar su tamaño en diez días y durante ocho meses de normal crecimiento es capaz de producir 70 000 hijas; llegando a medir entre 0.5 a 1.2 metros desde la parte superior a las raíces cuando crecen en agua residual (Metcalf y Eddy, 1995b; Romero, 1999).

Tiene un extenso sistema de raíces que le permite alcanzar una gran capacidad de filtración y absorción de contaminantes como metales pesados que se nombran a continuación: níquel, cadmio, plomo, mercurio, arsénico, cromo, plata, cobre,

---

<sup>29</sup> Se refiere a una especie vegetal que vive más de dos años.

entre otros. (Romero, 1999). El mecanismo de remoción que actúa se cree que es a través de la formación de complejos entre el metal pesado con los aminoácidos presentes dentro de la célula, previa absorción de estos metales a través de las raíces (Metcalf y Eddy, 1995, citado en Celis, Junod y Sandoval, 2005).

El sistema de raíces del Jacinto de agua puede incorporar a ellas microorganismos que favorecen la depuración en el sistema (Novotny y Olem, 1994, citado en Celis et al., 2005).

### **Reproducción**

Se reproducen tanto sexual como vegetativamente. La principal forma de reproducción es la vegetativa, mediante el brote de estolones<sup>30</sup> que forman nuevas plántulas<sup>31</sup> (ISSG, 2006). También se

---

<sup>30</sup> Tallos rastreros que nacen de la base de los tallos principales.

<sup>31</sup> Planta en sus primeros estadios de desarrollo, desde que germina hasta que se desarrollan las primeras hojas verdaderas.

pueden reproducir mediante semilla, siendo este método una fuente de reinfestación cuando se erradica la población (Curt, 2005).

### **Desarrollo**

Su crecimiento es rápido en temperaturas de 20 a 30 °C pero se estanca en temperaturas de 8 a 15 °C. La formación del fruto también está relacionada con las condiciones ambientales, siendo muy reducida cuando las temperaturas son muy altas y la humedad relativa es baja. Para su óptimo desarrollo la humedad relativa debe ser de 90% y la temperatura debe estar entre 22.5 y 35 °C (Curt, 2005). Para su desarrollo se requiere un hábitat que presente un pH entre 5.5 a 9 (Aquabase, 2002a).

Un Jacinto de agua grande puede requerir entre 1.5 a 2.15 mg/L de nitrógeno y entre 0.38 a 0.56 mg/L de fósforo (García, 2012).

### **Desventajas o problemas**

Obstruyen canales de riego, impiden la navegación y crean un problema sanitario al ser un hábitat adecuado para los mosquitos (ISSG, 2006).

Causan problemas ambientales, debido a que por su fácil reproducción cubren toda la superficie del agua. La Eichhornia Crassipes impide que la luz del sol llegue a las especies vegetales acuáticas nativas y reduce el nivel de oxígeno del agua (ISSG, 2006). Sin embargo, estas características son muy ventajosas cuando se utiliza en ambientes controlados para tratamiento como los humedales artificiales (Curt, 2005).

### **Características**

Tiene un rizoma<sup>32</sup> del que se abre un rosetón de hojas que tienen una superficie esponjosa

---

<sup>32</sup> Tallo subterráneo de ciertas plantas, generalmente horizontal, que por un lado echa ramas aéreas verticales y por el otro raíces.

notablemente inflada como una vejiga de aire llamada peciolo, que le permite flotar sobre el agua (Cristobal y Lacuesta, 2013).

En la parte sumergida están las raíces, que tienen aspecto plumoso, muy densas, y de color blancas cuando son jóvenes y negro-púrpura cuando son adultas. Además en la parte sumergida se desarrollan estolones de hasta 30 cm de longitud (Curt, 2005).

### **Accidentes, plagas o enfermedades**

No posee plagas ni enfermedades. En lugares en los que no son deseables se ha intentado su control biológico mediante enemigos naturales importados de su área de distribución natural como coleópteros, lepidópteros, hongos y peces predadores (Curt, 2005).

### 2.6.3.2. LEMNA MINOR



**Figura 2.14.** Lemna Minor  
**Fuente:** (Menéndez, 2006)

#### Taxonomía científica

De acuerdo con (Menéndez, 2006):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Arales

Familia: Lemnaceae

Género: Lemna

Especie: Lemna Minor

### **Descripción**

También conocida como lenteja de agua, es una especie vegetal acuática flotante de muy pequeño tamaño, con forma de discos planos que crecen formando una capa sobre el agua (Romero, 1999).

Se adapta muy bien a cualquier condición de iluminación. Es una especie que puede ser usada como alimento, materia prima para la industria y lo principal se usa para biorremediación ya que cuenta con la particularidad de absorber algunas sustancias disueltas y proveer oxígeno al agua cuando realiza la fotosíntesis (Arroyave, 2004).

### **Reproducción**

La forma más común de reproducción es la asexual por gemación, en los bordes de la especie vegetal aparece una yema que da origen a una nueva planta que se separará posteriormente de su

progenitora (Instituto Gallach, 1984, citado en Arroyave, 2004).

Cada brote puede producir, al menos, 10 a 20 brotes a lo largo de su ciclo de vida. Se tiene estimado que la Lemna Minor puede crecer un 30% más rápido que la Eichhornia Crassipes. (Metcalf y Eddy, 1995b).

### **Desarrollo**

Según Rook, 2002, citado en Arroyave, 2004, las lentejas de agua forman colonias pequeñas que crecen con rapidez en aguas tranquilas y ricas en nutrientes como nitrógeno y fosfatos. Pueden tolerar un rango de pH amplio, pero se considera el óptimo entre 4.5 y 7.5. En cuanto a temperatura la especie puede desarrollarse en un rango de temperatura entre 5 y 30°C (Arroyave, 2004).

La Lenteja de agua requiere 4.83 mg/L de nitrógeno y 4.83 mg/L de Fósforo (García, 2012).

### **Desventajas o problemas**

Si se permite un excesivo crecimiento de la Lemna Minor se puede originar problemas ambientales. Al formar una capa en la superficie del agua impide el paso de la luz del sol, inhibiendo el crecimiento de otros organismos fotosintéticos y provocando problemas de eutrofización (Arroyave, 2004).

### **Características**

El tamaño es reducido, de 2 a 4 mm de longitud y 2 de mm de ancho; siendo una de las especies de angiospermas<sup>33</sup> más pequeñas que existen en el reino de las plantas. Presentan una forma taloide<sup>34</sup> y tiene una sola raíz de color blanco que puede alcanzar los 2 cm (Arroyave, 2004).

---

<sup>33</sup> Plantas que tiene flores.

<sup>34</sup> Indica que no se diferencia en el cuerpo de la planta las hojas del tallo.

### **Accidentes, plagas o enfermedades**

Las bajas temperaturas afectan el crecimiento de esta especie. Otro efecto de las bajas temperaturas es una pigmentación rojiza que aparece en las plantas. El viento también ocasiona problemas, ya que debido a su tamaño se dejan desplazar fácilmente (Curt, 2005).

#### **2.6.3.3. DRACAENA SANDERIANA**



**Figura 2.15.** Dracaena Sanderiana

**Fuente:** (Mazza, s. f.)

### **Taxonomía científica**

De acuerdo con (Engler, 2011):

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Asparagales

Familia: Agavaceae

Género: Dracaena

Especie: D. Sanderiana

### **Descripción**

Nativa de Camerún y el Congo, se trata de la especie más común del género *Dracaena* (Bryan, Ramírez, Ribera y Rodríguez, 1976). La *Dracaena Sanderiana* se conoce como bambú de la suerte. Se distribuye en las zonas tropicales y subtropicales de la India y África, aunque actualmente se ha extendido por todo el mundo excepto en Europa, el género *Dracaena* es bien conocido como una planta ornamental que requiere de lugares sombríos sin recibir luz directa del sol (Aslam y Prasad, 2013).

### **Reproducción**

Cabe el término propagación ya que se multiplican por medio de esquejes terminales de tallo que tienen una longitud entre 5 y 8 cm. Una Dracaena adulta puede producir hasta 3 o 4 plantas por medio de esquejes, tienen un período de vida como mínimo de 5 o 6 años (Infoagro, s. f.; Beura, Jagadev y Samal, 2007).

### **Desarrollo**

El desarrollo de las Dracaenas normalmente es bastante lento, alcanzan alturas que van desde los 40 a 60 cm hasta los 120 cm. La temperatura adecuada para su desarrollo está entre los 20 y 28 °C. En caso de encontrarse las Dracaenas en agua, el pH de esta debe estar en un rango entre 6 y 8 (Infoagro, s. f.; Aquabase, 2002b).

### **Características**

La especie vegetal es delgada, alcanzando entre 90 a 100 cm de alto, con tallo leñoso y ramificado donde sus hojas están dispuestas a lo largo del mismo alternadamente a modo de roseta. Sus hojas son lanceoladas<sup>35</sup>, onduladas, de 3 a 4 cm de ancho por 15 a 25 cm de largo; de color verde y con los márgenes provistos de una banda blanquecina (Bryan et al., 1976).

### **Accidentes, plagas o enfermedades**

A pesar de que las Dracaenas viven con pocos requerimientos de cuidado puede eventualmente presentar algunos problemas como manchas foliares causadas por algunos hongos o bacterias. Otro problema es un proceso de putrefacción en los tallos durante el enraizamiento. En cuanto a las hojas puede presentar un color amarillento que si se

---

<sup>35</sup> Hojas largas y más anchas en la mitad.

produce lentamente, se debe al proceso natural de envejecimiento, pero si las hojas comienzan a caer rápidamente puede darse el caso de exceso de sequedad. Si en las hojas aparecen márgenes y ápices<sup>36</sup> foliares necróticos, la causa más probable es sequedad del aire, ya requieren un alto porcentaje de humedad en el ambiente y tampoco resisten temperaturas cercanas a cero (Infoagro, s. f.).

---

<sup>36</sup> Extremos superiores o puntas de las hojas.

# **CAPÍTULO 3**

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Diseño y construcción de humedales artificiales**

Se procede a presentar el proceso seguido durante la investigación para el diseño y la construcción de los humedales artificiales a escala de laboratorio.

#### **3.1.1. Proceso para el diseño de humedales artificiales de flujo superficial**

El proceso para diseñar los humedales artificiales fue experimental, tal como se describe a continuación:

1. De acuerdo a la Tabla II, se escogió un tiempo de retención de 15 días para realizar la experimentación.

2. En la Tabla II se indica un rango para la profundidad entre 10 y 60 cm, con base en esto y a literatura que recomienda una altura de 30 cm, se tomó este último valor como la profundidad de agua para experimentar en los reactores #1 y #2. Para el reactor #3 el agua llegó a una altura de 30 cm, pero con un sustrato de 8 cm.
  
3. Con las dimensiones de largo y ancho del humedal así como la profundidad del agua, se determinó el volumen del reactor. En el caso de la vegetación emergente se consideró el valor de  $n$ , determinando así el volumen efectivo.
  
4. En la sección 2.5.3.2. se indicó que el tiempo de retención hidráulico es igual a la relación entre el volumen efectivo del reactor y el caudal, despejando de la Ec. 8 se obtuvo el valor del caudal para cada reactor.

Los cálculos realizados para determinar el caudal que era necesario regular en cada reactor se presentan a continuación:

- Tiempo de retención hidráulico: 15 días
- Relación largo-ancho: 3:1
- Largo: 90 cm
- Ancho: 30 cm
- Profundidad del agua (Reactor #1 y Reactor #2): 30 cm
- Profundidad del agua (Reactor #3): 22 cm

Para el reactor #1 y reactor #2, en los que no se emplea vegetación emergente, no se considera valor para  $n$ , entonces se tiene:

$$V = L \times w \times d$$

$$V = 0.90 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} = 0.081 \text{ m}^3 = 81 \text{ litros.}$$

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{81 \text{ litros}}{15 \text{ día}} = 5.4 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

Para el reactor #3 en donde se emplea vegetación emergente, se debe considerar el valor de  $n$ , entonces se tiene:

La sección transversal del humedal tiene una longitud de 30 cm, en la sección transversal se colocaron 2 hileras de *Dracaena Sanderiana*, cada uno de los tallos en promedio tiene un valor de diámetro igual a 1.5 cm.

$$n = \left(1 - \frac{3}{30}\right)$$

$$n = 0.90$$

$$V = L \times w \times d \times n$$

$$V = 0.90 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 0.22 \text{ m} \times 0.9 = 0.053 \text{ m}^3 = 53 \text{ litros.}$$

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{53 \text{ litros}}{15 \text{ día}} = 3.53 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

El caudal que tiene que entrar a cada reactor se reguló mediante el uso de válvulas de bola.

### **3.1.2. Selección de la vegetación empleada para los humedales artificiales de flujo superficial**

Antes de iniciar el proceso de construcción de los humedales artificiales, fue de suma importancia tener listas las especies vegetales acuáticas que se emplearían para el tratamiento.

#### **Proceso de adaptación**

Se realizó un proceso de adaptación de las especies vegetales fuera de su hábitat natural, para poder elegir las adecuadas para ser utilizadas en los humedales artificiales FS.

En el mes de octubre se recolectaron varias especies vegetales acuáticas que se mencionan a continuación:

### Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*)

La especie *Eichhornia Crassipes* fue recolectada de los canales de agua lluvia que desembocan al río Daule. Previo a la colocación en las diferentes tinas se procedió a lavarlas para quitarles el lodo de sus raíces.



**Figura 3.1.** Especímenes de *Eichhornia Crassipes* recolectados.

**Fuente:** Los autores

### Lenteja de agua (Lemna Minor)

Estas especies acuáticas fueron adquiridas en un acuario de la ciudad. Se colocó una pequeña cantidad en tinas para su reproducción.



**Figura 3.2.** Lemna Minor.

**Fuente:** Los autores

### **Carrizo (*Phragmites australis*)**

Estas especies vegetales acuáticas fueron recogidas en la ciudad de Zaruma, donde se las lavó y se colocó en tinas con agua y una capa de material granular como medio de soporte. Al ser transportada a la ciudad de Guayaquil, luego de unos días se marchitó.



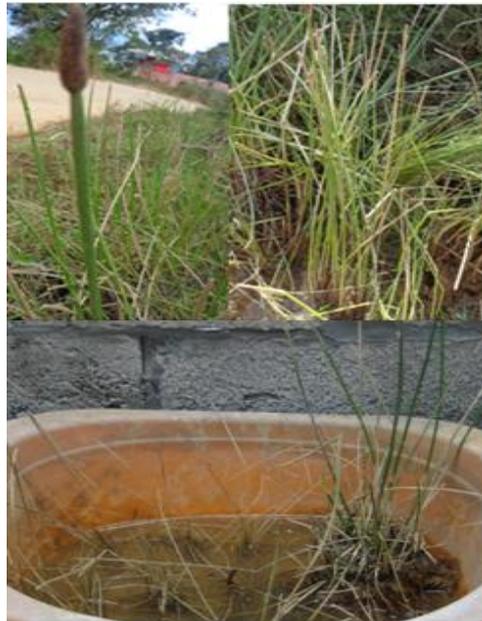
**Figura 3.3.** *Phragmites australis*

**Fuente:** Los autores

### **Totora (*Typha Angustifolia*)**

Los ejemplares de *Typha Angustifolia* fueron recolectados en un pantano de la ciudad de Zaruma. Se procedió a

lavarlas y colocarlas en tinas con agua y una capa de material granular como medio de soporte. Posteriormente fueron trasladadas a la ciudad de Guayaquil para su adaptación, pero luego de unos días se marchitaron.



**Figura 3.4.** Typha Angustifolia.

**Fuente:** Los autores

### **Bambú de la suerte (Dracaena Sanderiana)**

Las Dracaenas fueron adquiridas en un invernadero de la ciudad. Se les retiró la tierra de sembrado en las que estaban colocadas, se las lavó y se las colocó en pequeños recipientes con agua y una capa de material granular.



**Figura 3.5.** Dracaena Sanderiana.

**Fuente:** Los autores

Todas las especies vegetales, exceptuando la Dracaena Sanderiana que fue colocada en un lugar a media luz, fueron expuestas al sol en un promedio de 8 horas diarias. De igual forma se les agregó una pequeña cantidad de nutriente en el agua. Durante el tiempo que se tuvo las especies vegetales acuáticas en adaptación, la Lemna Minor fue la única que consiguió reproducirse.

El período de adaptación en Guayaquil fue de tres semanas, las especies que presentaron un mejor comportamiento fueron Eichhornia Crassipes, Lemna Minor y Dracaena Sanderiana.

Finalmente las especies vegetales acuáticas fueron dispuestas en los humedales artificiales FS de la siguiente manera:

Reactor #1: Lenteja de agua (*Lemna Minor*)

Reactor #2: Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*)

Reactor #3: Bambú de la suerte (*Dracaena Sanderiana*).



**Figura 3.6.** Vista superior de los tres reactores.

**Fuente:** Los autores

### **3.1.3. Material granular empleado para los humedales artificiales de flujo superficial**

Como se indicó en la sección anterior, en el reactor #3 se empleó la especie *Dracaena Sanderiana*, las mismas que tenían alturas que oscilaban entre los 40 y 80 cm de altura.

Obviamente las *Dracaenas* necesitan un material como medio de soporte, en este caso se utilizó material granular de cuarzo ya que no aporta ninguna propiedad al agua, el tamaño de partícula oscila entre 5 y 7 mm de diámetro.

### **3.1.4. Construcción de la unidad de laboratorio**

Para la construcción de los humedales artificiales a escala de laboratorio se adquirió diferentes materiales e instrumentos.

#### **Materiales**

Los materiales se enlistan a continuación.

- Estanques de vidrio

- PL Neplo Flex ½”
- PL Tee Flex ½”
- Manguera plástica transparente ½”
- Válvula de bola ½”
- Manguera transparente 6 mm
- Bidones de agua, capacidad 20 litros

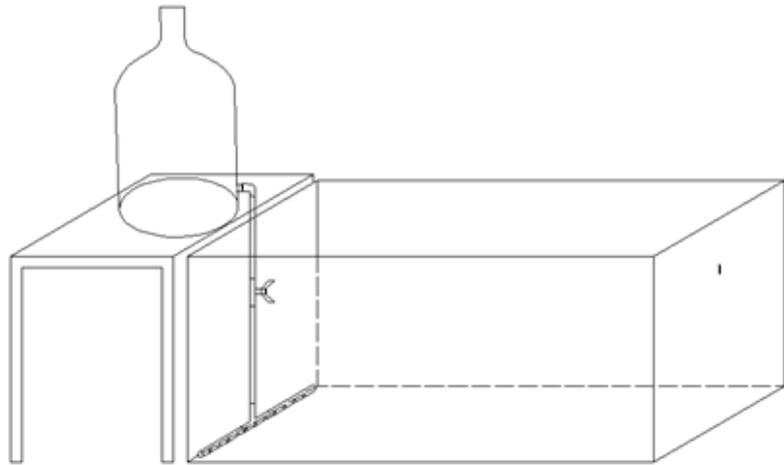
### **Instrumentación empleada.**

Los instrumentos empleados para las mediciones necesarias fueron:

- Pipeta de vidrio, 5 mL
- Termómetro
- Medidor de pH
- Vaso graduado
- Cronómetro

### **Esquema de los humedales artificiales a construir.**

Previamente se realizó un esquema de lo que se iba a construir, el mismo que se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7.** Esquema del humedal artificial FS.

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Los tres humedales artificiales tuvieron la misma configuración presentada en el esquema.

### **Proceso constructivo**

Se indica a continuación el procedimiento seguido para la construcción de los humedales artificiales FS a escala de laboratorio.

- Para la construcción de los humedales artificiales se utilizó 3 reactores de vidrio de 6 mm de espesor, con dimensiones: 40 cm de alto, 30 cm de ancho y 90 cm

de largo, con un orificio de 6 mm de diámetro en una de las paredes laterales, a 30 cm desde el fondo del mismo. A este orificio se le colocó una manguera transparente de 6 mm de diámetro que sirvió para la salida del efluente.



**Figura 3.8.** Reactores de vidrio para los humedales artificiales, presentaron un orificio de 8 mm en una de sus paredes laterales angostas.

**Fuente:** Los autores

- Como tanques sedimentadores primarios se emplearon bidones de 20 litros de capacidad, en los que se realizó una perforación a 10 cm desde su base,

incorporándoles una conexión para alimentar continuamente a los humedales artificiales FS con agua previamente sedimentada.



**Figura 3.9.** Perforaciones hechas en los bidones con la ayuda de un cautil. Esa perforación sirvió para colocar las conexiones.

**Fuente:** Los autores

- En cada conexión se colocó un codo de 1/2" con un neplo flex de 1/2" en cada extremo, uno de ellos se conectó al orificio del bidón y en el otro se conectó la manguera que a su vez se encontraba unida a la válvula de bola de 1/2". Al extremo final de la conexión se colocó una tee flex de 1/2" en cuyos extremos se colocó manguera con pequeñas perforaciones uniformemente distribuidas en su

longitud. Esto se realizó para que el agua que iba a ingresar al tratamiento continuamente, sea distribuida de manera uniforme sobre la superficie del reactor. El caudal que debía ingresar a cada reactor fue regulado con la válvula de bola y a su vez el caudal se comprobó con un vaso graduado y cronómetro.

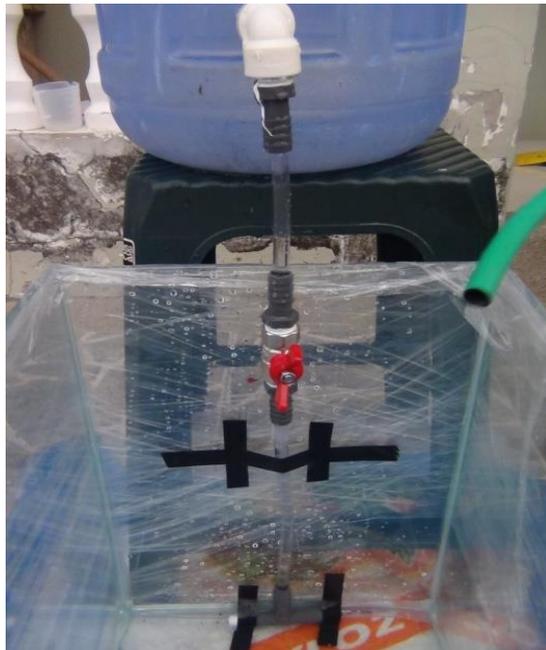


**Figura 3.10.** Regulación y control de caudal.

**Fuente:** Los autores

- Para el ingreso del agua a tratar a cada humedal artificial, se colocó sobre un banco plástico el tanque sedimentador con la conexión indicada en el numeral 3, a una altura de 49 cm desde la base. Los reactores se soportaron sobre una plancha de plywood de 30 cm

de ancho por 90 cm de largo y una base de plumafón, con altura de 4 cm en conjunto.



**Figura 3.11.** Tanque sedimentador.

**Fuente:** Los autores

- En el reactor #3 donde se colocó la *Dracaena Sanderiana*, se colocó un sustrato como soporte que consistía en una capa de 8 cm de arena de cuarzo, una vez hecho esto se colocaron las *Dracaenas* en un total de 12 dispuestas en 2 hileras.



**Figura 3.12.** Colocación de *Dracaena Sanderiana* en el medio de soporte.

**Fuente:** Los autores

- Antes de abrir las válvulas se midió el pH, y se obtuvo un valor de 9.4 por lo que se agregó a los tanques 11.5 ml de ácido acético por cada 5 litros de agua, con lo que se logró reducir el pH a valores de 7.5 7.8 y 8.0 en los reactores #1, #2 y #3 respectivamente. Obtenido el valor de pH adecuado para las especies vegetales acuáticas se dio paso al agua.



**Figura 3.13.** Reducción del pH del agua.

**Fuente:** Los autores

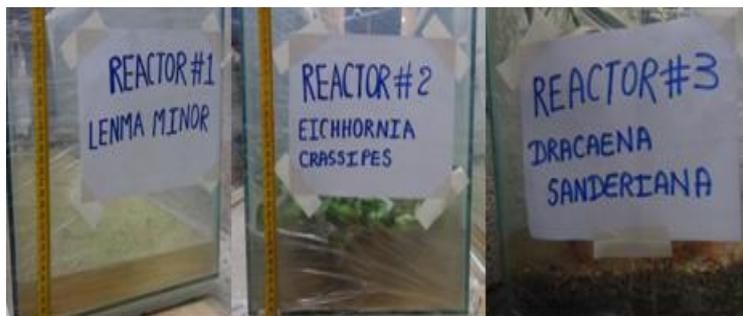
- En los reactores #1 y #2 se colocó la Lenteja de agua y Jacinto de agua respectivamente, una vez que había suficiente agua dentro del reactor. En el reactor #1 se colocaron 15 Jacintos de agua, que corresponde a un 80% del área superficial del reactor. En el reactor #2 se colocó una cantidad de Lentejas de agua, que corresponde a un 90% del área superficial del reactor.



**Figura 3.14.** Limpieza y colocación de *Eichhornia Crassipes* y *Lemna Minor*.

**Fuente:** Los autores

- Se colocó una cinta métrica en la pared lateral de cada reactor y una etiqueta con el nombre de la especie vegetal acuática utilizada en el respectivo reactor.



**Figura 3.15.** Etiquetado de los reactores.

**Fuente:** Los autores

### 3.2. Muestreo y monitoreo de efluentes.

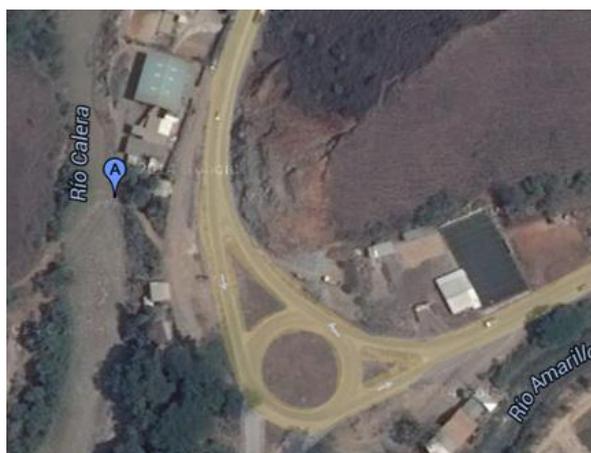
Una vez construidos los humedales artificiales a escala de laboratorio, comenzó el tratamiento, el monitoreo realizado al proceso fue diario.

#### 3.2.1. Ubicación del sitio de muestreo

El muestreo se realizó en un punto de descarga de efluentes mineros hacia el Río Calera. Las coordenadas del lugar de muestro se detallan a continuación:

Coordenadas UTM 17 M

Coordenada X	651584
Coordenada Y	9587994



**Figura 3.16.** Punto de muestreo (A), descarga de efluente hacia el Río Calera.

**Fuente:** Tomada de Google Maps (18-01-2015).



**Figura 3.17.** Punto de muestreo, descarga de efluente hacia el Río Calera, se observa en la ribera del río los linderos de una planta de procesamiento.

**Fuente:** Los autores

El punto de muestreo está ubicado en una zona que fue escogida de acuerdo a lo que se expuso en el Capítulo I, que durante muchos años ha existido un vertido de efluentes industriales provenientes de actividades mineras propias del sector, en la que se ubican más de 100 plantas de procesamiento de material extraído de las minas. Se puede apreciar las características del lugar en las fotografías que se presentan a continuación con la Figura 3.18.



**Figura 3.18.** Zona circundante al punto de muestreo en la descarga de efluente hacia el Río Calera.

**Fuente:** Los autores

### 3.2.2. Tipo de muestreo

El muestreo para los diferentes análisis, tanto para la caracterización como para determinar la concentración inicial de contaminantes del agua a tratar fue puntual y de tipo superficial. La extracción de las muestras fue de manera directa para evitar traspasos y no demorar su transporte, fue necesario construir un muestreador para la inserción de las botellas y evitar la exposición a la contaminación existente en el sitio.



**Figura 3.19.** Inserción del muestreador para la recolección de la muestra.

**Fuente:** Los autores

Una vez extraídas las muestras se taparon herméticamente las botellas cuidando de no contener aire en su interior. Luego las muestras se etiquetaron y se guardaron en una hielera, puesto que para ser transportadas hasta la ciudad de Guayaquil se requería mantener las muestras a una temperatura inferior a la del sitio donde fueron recolectadas. El muestreo se realizó a las 21h00 y al día siguiente se entregaron las muestras en laboratorio a las 09h00.

### 3.2.3. Caracterización del agua tomada del efluente industrial minero hacia el Río Calera

En el mes de noviembre se tomó una muestra para caracterizar el agua que se iba a tratar, la muestra obtenida fue llevada hasta la ciudad de Guayaquil para ser evaluada. Este ensayo y los posteriores se realizaron en Grupo Químico Marcos, laboratorio de análisis de aguas que cuenta con la acreditación ISO 17025. La muestra tomada para ser caracterizada presentaba color café debido a la presencia de sólidos, un olor fuerte y en el sitio se registró pH igual a 9.



**Figura 3.20.** Se aprecia la tonalidad color café.

**Fuente:** Los autores

En el laboratorio se ensayaron los siguientes parámetros: Nitrógeno Total, Fósforo Total, Cianuro Total, Mercurio,

Plomo, Hierro, Cadmio, Manganeso, Arsénico y pH. Los resultados obtenidos se muestran en el Capítulo 4. Las copias de los resultados del laboratorio se encuentran en la sección Anexos.

#### **3.2.4. Recolección del agua a tratar y determinación de la concentración inicial.**

El agua para ser tratada en el experimento se recolectó directamente sumergiendo tanques pequeños de 35 litros de forma superficial y luego fue almacenada en tanques de 60 litros para su posterior traslado.

Junto con el agua para tratar, se trasladó una muestra para determinar la concentración inicial de cada contaminante que se va a remover. Se tomó la muestra el día jueves 4 de diciembre a las 21h00 y se llevó hasta la ciudad de Guayaquil bajo condiciones controladas para determinar cuál sería la concentración antes del tratamiento, de cianuro, mercurio, cadmio y arsénico.



**Figura 3.21.** Recolección de agua para tratamiento.

**Fuente:** Los autores

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a esta muestra, que se indican en la Tabla IV del Capítulo 4, fueron las concentraciones iniciales para los tres reactores construidos, ya que fue la misma agua tratada por diferentes especies vegetales acuáticas.

### **3.2.5. Monitoreo de efluentes**

El monitoreo realizado durante el tiempo de experimentación fue cada 72 horas, tomando una muestra de 1 litro de cada reactor una vez completado el tiempo de tratamiento

respectivo. Las muestras fueron debidamente etiquetadas con información correspondiente al número del reactor, y el número de muestra correspondiente, de inmediato se las puso en la hielera y fueron transportadas hasta el laboratorio.



**Figura 3.22.** Muestras recolectadas durante el tratamiento.

**Fuente:** Los autores

En total se tomaron 15 muestras entre los 3 reactores durante los 15 días de ensayo. Las muestras tomadas en los días 3, 6, 9, 12 y 15 tendrán como resultado a las concentraciones de cada contaminante a lo largo del proceso, lo que va a permitir determinar el orden de la reacción y con ello usar la ecuación correspondiente para obtener la constante de remoción de cada contaminante. Los

resultados obtenidos del día 15 corresponden a la concentración final en cada reactor para cada uno de los contaminantes. Con estas concentraciones y con el dato de concentración inicial se determinará el porcentaje de remoción para cianuro, arsénico, cadmio y mercurio en cada uno de los reactores.

Es importante también mencionar que se realizó un constante monitoreo del proceso, para registrar los valores de pH y temperatura, así como de los cambios que pudieran surgir en las especies vegetales acuáticas o cualquier eventualidad que se presentare durante el proceso. Las mediciones de pH y temperatura se realizaron cada 12 horas, a las 10h00 y a las 22h00. Los registros de pH y temperatura se encuentran en el Anexo A.

# **CAPÍTULO 4**

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

### **4.1. Caracterización.**

A fin de determinar qué contaminantes se encontraban presentes en la zona de descarga de efluente minero hacia el Río Calera se realizaron varios ensayos. La muestra fue tomada el 16 de octubre del 2014 y posteriormente fue analizada en el laboratorio del Grupo Químico Marcos. Se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación en la Tabla V.

**TABLA V**  
**Valores de la caracterización.**

Contaminante	Unidad	Valor
Arsénico	mg/L	1.18
Cadmio	mg/L	0.011
Mercurio	mg/L	0.00119
Cianuro	mg/L	13.3
Hierro	mg/L	0.6636
Plomo	mg/L	0.0025
Nitrógeno Total	mg/L	8.49
Fósforo Total	mg/L	2.41
pH		10.07

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Las concentraciones indican cuantos miligramos de contaminante se encuentran por cada litro de agua analizada. Los resultados son 1.18 miligramos de arsénico por litro de agua, 0.011 miligramos de cadmio por litro de agua, 0.00119 miligramos de mercurio por litro de agua. En el caso de cianuro se encuentra una elevada concentración de 13.3 miligramos por litro. Para el estudio que se realizó debido al costo que representaba realizar los ensayos de laboratorio, al evaluar la eficiencia de remoción de los humedales artificiales a escala de laboratorio, no se monitoreó todos los parámetros ensayados en esta caracterización, sino se escogieron cadmio y arsénico debido a que presentaron una elevada concentración. El mercurio también fue analizado ya que debido a su peligrosidad resulta importante analizar qué sucede con este

contaminante. Además de estos tres metales pesados se realizaron ensayos para poder determinar la eficiencia de remoción de cianuro que como muestra el resultado se encuentra en una elevada concentración.

El valor de pH igual a 10.07 indica que se trata de agua alcalina, por lo que se neutralizó el pH antes de iniciar el tratamiento, a fin de ofrecer las características en el agua que las especies vegetales requieren para su normal desenvolvimiento. De acuerdo a la literatura revisada en la sección 2.6.3., las condiciones óptimas para las especies vegetales acuáticas utilizadas en los humedales artificiales, están en un rango de pH entre 7 y 8.

Nitrógeno Total y Fósforo Total se ensayaron para determinar si las concentraciones de estos elementos en el agua serían suficientes para satisfacer los requerimientos nutricionales de las especies vegetales acuáticas a utilizar. Las concentraciones obtenidas fueron 8.49 miligramos por litro y 2.41 miligramos por litro para nitrógeno y fósforo respectivamente. De acuerdo con los valores requeridos que se muestran en la sección 2.6.3. se puede decir que el agua presta las condiciones adecuadas para la *Lemna Minor*, *Eichhornia Crassipes* y *Dracaena Sanderiana*.

#### 4.2. Concentración inicial.

Una vez definido qué contaminantes se iban a ensayar, se obtuvo una muestra para determinar cuáles serían las concentraciones iniciales. La muestra se recolectó el día jueves 4 de diciembre del 2014 y fue analizada por Grupo Químico Marcos. Los resultados se muestran en la Tabla VI.

**TABLA VI**  
**Valores de la concentración inicial.**

Contaminante	Unidad	Valor
Arsénico	mg/L	0.41900
Cadmio	mg/L	0.01670
Mercurio	mg/L	0.00142
Cianuro	mg/L	9.30000

**Fuente:** Elaborado por los autores.

En este caso se obtuvo una concentración de 0.419 miligramos de arsénico por litro de agua, 0.0167 miligramos de cadmio por litro de agua, para el mercurio 0.00142 miligramos por litro. En el caso del cianuro, al igual que en la caracterización, el valor obtenido fue alto, con una concentración de 9.3 miligramos de cianuro por litro de muestra ensayada. Estos valores son el dato de la concentración inicial para todos los reactores.

### 4.3. Efluentes

Con el propósito de determinar la constante K, que indica la velocidad con que se produce la reacción en los humedales artificiales FS, se obtuvieron las concentraciones de los contaminantes a lo largo del tratamiento. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Reactor #1: Lemna Minor.

La Tabla VII contiene los resultados de los ensayos realizados a las 5 muestras tomadas durante el tratamiento en el reactor #1, que contuvo la Lemna Minor.

**TABLA VII**  
**Efluentes del reactor #1, concentración en mg/L**

REACTOR #1	Arsénico	Cadmio	Mercurio	Cianuro
Muestra #1	0.52400	0.01470	0.00099	0.16200
Muestra #2	0.44680	0.00520	0.00023	0.19900
Muestra #3	0.45590	0.00160	0.03256	0.19100
Muestra #4	0.46000	0.00260	0.00645	0.07000
Muestra #5	0.38990	0.00230	0.00052	0.00400

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Los valores de la muestra #1 corresponden al tercer día de tratamiento, y los posteriores corresponden al sexto, noveno, décimo segundo y décimo quinto día de tratamiento respectivamente. Los valores de la muestra #5 corresponden a la concentración final de cada contaminante, una vez completado el tiempo de retención hidráulico. Los resultados indican 0.3899 miligramos de arsénico por litro de agua, 0.0023 miligramos de cadmio por litro de agua, 0.00052 miligramos de mercurio por litro de agua y 0.004 miligramos de cianuro por litro de agua.

Reactor #2: Eichhornia Crassipes.

La Tabla VIII muestra los resultados para los ensayos que se realizaron a las 5 muestras obtenidas a lo largo del tratamiento para el reactor #2.

**TABLA VIII**  
**Efluentes del reactor #2, concentración en mg/L**

REACTOR #2	Arsénico	Cadmio	Mercurio	Cianuro
Muestra #1	0.48560	0.01380	0.00117	0.15200
Muestra #2	0.39220	0.00560	0.00027	<0.00300
Muestra #3	0.38870	0.00280	0.00045	0.00300
Muestra #4	0.39970	0.00560	<0.00002	0.00400
Muestra #5	0.38910	0.00260	0.00082	<0.00300

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Los valores de la muestra #1 corresponden al tercer día de tratamiento, y los posteriores corresponden al sexto, noveno, décimo segundo y décimo quinto día de tratamiento respectivamente. Las concentraciones que se indican a continuación 0.3891 miligramos de arsénico por litro de agua, 0.0026 miligramos de cadmio por litro de agua, 0.00082 miligramos de mercurio por litro de agua corresponden a las concentraciones finales una vez que se ha completado el tratamiento. En el caso del cianuro se indica para la muestra #5 un valor menor a 0.003 miligramos de cianuro por litro de agua, pero con el fin de aplicar la Ec. 9, el valor para la concentración final de cianuro se toma como 0.003 miligramos de este contaminante por litro de agua ensayada.

Reactor #3: *Dracaena Sanderiana*.

A continuación, la Tabla IX, muestra los resultados para los ensayos que se realizaron a las 5 muestras obtenidas a lo largo del tratamiento. Estos resultados corresponden al reactor #3.

**TABLA IX**  
**Efluentes del reactor #3, concentración en mg/L**

REACTOR #3	Arsénico	Cadmio	Mercurio	Cianuro
Muestra #1	0.10740	0.00330	0.00186	1.9600
Muestra #2	0.06450	0.00090	<0.00002	0.18900
Muestra #3	0.12790	<0.00040	0.00093	0.11500
Muestra #4	0.15330	0.00190	<0.00002	0.00600
Muestra #5	0.14450	0.00080	0.00086	0.00500

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Los resultados que se indican para la muestra #1 corresponden al tercer día de tratamiento, y los posteriores corresponden al sexto, noveno, décimo segundo y décimo quinto día de tratamiento respectivamente. Los valores para la muestra #5 que representan las concentraciones finales una vez culminado el tratamiento son los siguientes: 0.1445 miligramos de arsénico por litro de agua, 0.008 miligramos de cadmio por litro de agua, 0.00086 miligramos de mercurio por litro de agua y 0.005 miligramos de cianuro por litro de agua.

Una vez descrito lo que se obtuvo en cada reactor, se puede observar que en los tres reactores, en lo que concierne a la concentración de arsénico y mercurio, se detecta que los valores no tienden siempre a disminuir, es más en el reactor #1 se presenta un valor elevado en la muestra #3 igual a 0.03256 miligramos de

mercurio por litro de agua. Lo que se puede asumir, en base a la literatura revisada en el Capítulo 2, es que debido a las variaciones de pH que se presentaron y al ser estos metales pesados sensibles a las variaciones de pH influyó en los mecanismos químicos de remoción. Otro factor que se puede intuir como explicación a este comportamiento es que las especies vegetales acuáticas utilizadas, bajo las condiciones en los humedales artificiales que fueron construidos, no presentaron la mejor absorción a través de sus tallos o raíces para el arsénico y el mercurio. En cuanto al cadmio, este metal pesado si presentó una mayor tendencia a disminuir continuamente. En este caso se puede decir que las especies vegetales acuáticas empleadas proporcionan las condiciones adecuadas para que los mecanismos físicos, químicos y biológicos den lugar a la remoción de este metal pesado en los humedales artificiales construidos y que no es sensible en la misma magnitud que el arsénico y el mercurio a las variaciones de pH que pudieron presentarse.

**4.4. Comparación de las concentraciones finales obtenidas, con los límites máximos permisibles y criterios de calidad admisibles, establecidos en el Libro VI Anexo 1 del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente.**

En la Tabla I presentada en el Capítulo 2, se recopiló los límites máximos permisibles para descarga de efluentes para el arsénico, cadmio, mercurio y cianuro. También se encuentran los criterios de calidad admisibles de acuerdo a su uso. Se procede a comparar las concentraciones obtenidas en el efluente al finalizar el tratamiento con los humedales artificiales FS, con estos valores que se encuentran en la Tabla I, a fin de determinar si es o no factible que el agua luego del tratamiento sea descargada a un cuerpo receptor o que se le pueda dar un uso específico. Las concentraciones que se van a comparar son las correspondientes a la muestra #5.

A continuación se presenta la Tabla X, en que se verifican los límites máximos permisibles para descarga a un cuerpo de agua dulce.

**TABLA X**  
**Descarga a un cuerpo de agua dulce.**

REACTOR #1 CON LEMNA MINOR			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.1	0.38990	NO CUMPLE
Cadmio	0.02	0.00230	CUMPLE
Mercurio	0.005	0.00052	CUMPLE
Cianuro Total	0.1	0.00400	CUMPLE
REACTOR #2 CON EICHHORNIA CRASSIPES			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.1	0.3891	NO CUMPLE
Cadmio	0.02	0.0026	CUMPLE
Mercurio	0.005	0.00082	CUMPLE
Cianuro Total	0.1	0.003	CUMPLE
REACTOR #3 CON DRACAENA SANDERIANA			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.1	0.1445	NO CUMPLE
Cadmio	0.02	0.0008	CUMPLE
Mercurio	0.005	0.00086	CUMPLE
Cianuro Total	0.1	0.005	CUMPLE

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Como se puede observar en la Tabla X, en lo que respecta a arsénico, en ninguno de los tres reactores se logró disminuir la concentración a un valor por debajo del límite máximo permisible. Para los tres reactores se tiene que en el caso de cadmio la eficiencia de remoción obtenida fue muy buena, se puede apreciar que la concentración final de este contaminante, si está por debajo del límite máximo permisible. De igual manera sucede con el mercurio, donde la concentración del efluente quedó por debajo del límite máximo permisible y en el caso del cianuro la eficiencia de

remoción fue notablemente buena, la concentración del efluente está muy por debajo del límite máximo permisible.

A continuación se presenta la Tabla XI, en la que se analiza la posibilidad de dar al agua tratada un uso para preservar la flora y la fauna en aguas dulces.

**TABLA XI**  
**Preservación de flora y fauna en aguas dulces**

REACTOR #1 CON LEMNA MINOR			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.05	0.38990	NO CUMPLE
Cadmio	0.001	0.00230	NO CUMPLE
Mercurio	0.0002	0.00052	NO CUMPLE
Cianuro Total	0.01	0.00400	CUMPLE
REACTOR #2 CON EICHHORNIA CRASSIPES			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.05	0.3891	NO CUMPLE
Cadmio	0.001	0.0026	NO CUMPLE
Mercurio	0.0002	0.00082	NO CUMPLE
Cianuro Total	0.01	0.003	CUMPLE
REACTOR #3 CON DRACAENA SANDERIANA			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.05	0.1445	NO CUMPLE
Cadmio	0.001	0.0008	CUMPLE
Mercurio	0.0002	0.00086	NO CUMPLE
Cianuro Total	0.01	0.005	CUMPLE

**Fuente:** Elaborado por los autores.

En la Tabla XI, se puede apreciar que en los tres reactores, los contaminantes arsénico y mercurio no cumplen con el límite máximo permisible. No siendo así para el cianuro, cuyas concentraciones

finales si cumplen con lo establecido en los criterios de calidad para preservar la flora y la fauna. En lo que respecta a cadmio, se logró cumplir con el límite máximo permisible sólo en el humedal con la *Dracaena Sanderiana*.

Seguidamente se presenta la Tabla XII, en la que se analiza la posibilidad de usar al agua tratada para fines agrícolas o riego.

**TABLA XII**  
**Para uso agrícola o riego**

REACTOR #1 CON LEMNA MINOR			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.1	0.38990	NO CUMPLE
Cadmio	0.01	0.00230	CUMPLE
Mercurio	0.001	0.00052	CUMPLE
Cianuro Total	0.2	0.00400	CUMPLE
REACTOR #2 CON EICHHORNIA CRASSIPES			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.1	0.3891	NO CUMPLE
Cadmio	0.01	0.0026	CUMPLE
Mercurio	0.001	0.00082	CUMPLE
Cianuro Total	0.2	0.003	CUMPLE
REACTOR #3 CON DRACAENA SANDERIANA			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.1	0.1445	NO CUMPLE
Cadmio	0.01	0.0008	CUMPLE
Mercurio	0.001	0.00086	CUMPLE
Cianuro Total	0.2	0.005	CUMPLE

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Al revisar la Tabla XII, se puede apreciar que en los tres reactores, el arsénico no cumple con el límite máximo permisible. En lo que

respecta a las concentraciones finales de cadmio, mercurio y cianuro, estas si han disminuido por debajo del valor que señala el criterio de calidad establecido para cada contaminante.

A continuación se presenta la Tabla XIII, en que se analiza si cada contaminante logró o no una concentración final que cumpla con los criterios de calidad establecidos para poder dar al agua uso pecuario.

**TABLA XIII**  
**Para uso pecuario**

REACTOR #1 CON LEMNA MINOR			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.2	0.38990	NO CUMPLE
Cadmio	0.05	0.00230	CUMPLE
Mercurio	0.01	0.00052	CUMPLE
Cianuro Total	0.2	0.00400	CUMPLE
REACTOR #2 CON EICHHORNIA CRASSIPES			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.2	0.3891	NO CUMPLE
Cadmio	0.05	0.0026	CUMPLE
Mercurio	0.01	0.00082	CUMPLE
Cianuro Total	0.2	0.003	CUMPLE
REACTOR #3 CON DRACAENA SANDERIANA			
CONTAMINANTE	LMP (mg/L)	Ce	CUMPLE/NO CUMPLE
Arsénico	0.2	0.1445	CUMPLE
Cadmio	0.05	0.0008	CUMPLE
Mercurio	0.01	0.00086	CUMPLE
Cianuro Total	0.2	0.005	CUMPLE

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Al observar los valores de la Tabla XIII, se puede apreciar que en el humedal con Lemna Minor, el arsénico no cumple con el límite establecido, pero para cadmio, mercurio y cianuro se obtuvieron concentraciones por debajo de los límites establecidos. En el humedal con Eichhornia Crassipes se presenta el mismo resultado que en el humedal anterior. Finalmente en el tercer humedal con Dracaena Sanderiana, todos los contaminantes fueron disminuidos por debajo de los límites máximos permisibles.

#### 4.5. Eficiencia de remoción.

En esta sección se va a presentar los porcentajes alcanzados para la eficiencia de remoción en arsénico, cadmio, mercurio y cianuro. Los cálculos se han realizado haciendo uso de la Ec. 9 que se presentó en el Capítulo 2. Las tablas se sitúan a continuación, para los reactores #1, #2 y #3 respectivamente.

**TABLA XIV**  
**Eficiencia de remoción (%) del reactor #1**

REACTOR #1	Arsénico	Cadmio	Mercurio	Cianuro
Co	0.419	0.0167	0.00142	9.3
Ce	0.38990	0.00230	0.00052	0.00400
Eficiencia de remoción(%)	6.95	86.23	63.38	99.96

**Fuente:** Elaborado por los autores.

En el reactor #1 que contenía la Lemna Minor, se obtuvieron las eficiencias de remoción que se encuentran en la Tabla XIV, el porcentaje de eficiencia de remoción obtenido para el arsénico fue 6.95% lo que no es mayormente considerable. En el caso de mercurio la eficiencia de 63.38% lograda es aceptable, y en el caso de cadmio y cianuro las eficiencias de remoción fueron 86.23% y 99.96% que son valores de eficiencia altos.

**TABLA XV**  
**Eficiencia de remoción (%) del reactor #2**

REACTOR #2	Arsénico	Cadmio	Mercurio	Cianuro
Co	0.419	0.0167	0.00142	9.3
Ce	0.3891	0.0026	0.00082	<0.003
Eficiencia de remoción (%)	7.14	84.43	42.25	99.97

**Fuente:** Elaborado por los autores.

De igual manera en la Tabla XV se presenta la eficiencia obtenida en el reactor #2 en el que se empleó la Eichhornia Crassipes, al igual que en el reactor #1 la eficiencia alcanzada en la remoción de arsénico es baja con un valor de 7.14 %. En el caso del mercurio la eficiencia de remoción obtenida fue del 42.25%. En este reactor también se logró un elevado valor en la remoción de cadmio y cianuro, 84.43 % y 99.97 % respectivamente, siendo los valores muy cercanos a los obtenidos en el reactor #1.

**TABLA XVI**  
**Eficiencia de remoción (%) del reactor #3**

REACTOR #3	Arsénico	Cadmio	Mercurio	Cianuro
Co	0.419	0.0167	0.00142	9.3
Ce	0.1445	0.0008	0.00086	0.005
Eficiencia de remoción (%)	65.51	95.21	39.44	99.95

**Fuente:** Elaborado por los autores.

En la Tabla XVI están dispuestos los valores para las concentraciones iniciales y finales de los contaminantes en el reactor #3 en el que se empleó *Dracaena Sanderiana*, a diferencia de los otros reactores en este si se alcanzó una eficiencia considerable en cuanto a remoción de arsénico, con un valor de 65.51 %. Los posibles mecanismos que se desarrollaron para marcar esta diferencia en cuanto a los reactores #1 y #2 pueden deberse a la presencia de sustrato o a microorganismos específicos que se desarrollaron en y alrededor de la *Dracena Sanderiana*. En este reactor la eficiencia en cuanto a la remoción de mercurio disminuyó aún más en comparación con los otros reactores, el valor de 39.44% no es tan considerable. En lo que refiere a remoción de cadmio, en este reactor se logró una eficiencia del 95.21% lo cual es un incremento satisfactorio en comparación a lo logrado en los reactores #1 y #2. Para el caso del cianuro, una vez más se obtuvo una alta eficiencia de remoción con un valor de 99.95%.

Una vez analizado lo que ha sucedido en cada reactor, es importante establecer un análisis global para comparar lo sucedido en los 3 reactores, en la Tabla XVII se encuentran las máximas eficiencias de remoción obtenidas para cada contaminante.

**TABLA XVII**  
**Resumen de eficiencias obtenidas.**

<b>Contaminante</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>	<b>Humedal artificial</b>
Arsénico	65.51	Reactor #3 con Dracaena Sanderiana
Cadmio	95.21	Reactor #3 con Dracaena Sanderiana
Mercurio	63.38	Reactor #1 con Lemna Minor
Cianuro	99.97	Reactor #2 con Eichhornia Crassipes

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Como se puede constatar en la Tabla XVII, el arsénico alcanzó el mayor porcentaje de remoción en el reactor #3, donde se encontraban las Dracaenas Sanderianas. Debido a los bajos porcentajes obtenidos en los reactores #1 y #2 se intuye que la Lemna Minor y la Eichhornia Crassipes no dieron lugar a las condiciones necesarias para la remoción de arsénico. En el caso del cadmio la eficiencia de 95.21% se obtuvo en el reactor #3 con la Dracaena Sanderiana. Entre los tres reactores fue el #1 con la Lemna Minor en el que se logró la mayor eficiencia de remoción de mercurio alcanzando un 63.38% y para el cianuro aunque los valores obtenidos fueron muy cercanos para los 3 reactores, en el

reactor #2 con la Eichhornia Crassipes se obtuvo el 99.97% de eficiencia en la remoción de contaminante. Es importante mencionar que el porcentaje de remoción obtenido, no puede ser atribuido completamente a las especies vegetales acuáticas, debido a la presencia de otros mecanismos como la volatilización, que se produce de forma natural, que contribuyen también a la remoción de los contaminantes. En todo caso, la eficiencia de remoción del humedal artificial FS como una modelación de los mecanismos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la naturaleza es notablemente alta.

#### **4.6. Manejo estadístico de datos para la determinación de la constante K.**

Como se había mencionado, los muestreos que se realizaron a medida que avanzaba el tratamiento, a los días tercero, sexto, noveno, décimo segundo y décimo quinto proporcionarían datos que serían útiles para obtener la constante K, para la remoción de cada contaminante.

Los datos fueron analizados estadísticamente mediante regresión lineal simple con el programa Minitab 15, con lo que se obtuvo las

gráficas mencionadas y la correspondiente ecuación para la regresión lineal. La ecuación de regresión lineal que se obtiene obedece a la forma:  $y = b \pm mx$ , donde “y” será el valor de las concentraciones de cada contaminante en un determinado tiempo, el mismo que será representado con la variable “x” y finalmente “m” corresponde al valor de la constante K, es decir la constante que se busca es igual al valor de la pendiente de la gráfica obtenida. Cabe aclarar que “y” y “x” se relacionaran como C vs. t, ln C vs. t y 1/C vs. t, en correspondencia con las ecuaciones 4, 5 y 6 que se revisaron en el Capítulo 2.

Además se determinó el coeficiente de correlación, r. Una vez obtenido todo esto, se determina el orden de reacción de acuerdo a aquella gráfica que presente el mayor valor para la correlación lineal, ya que este indica el grado de relación lineal que existe entre las variables que están siendo objeto de estudio. Mientras el valor del coeficiente de correlación se aproxime más a 1 o a -1, se dice que existe mayor relación lineal positiva o negativa entre las variables. Según Pita y Pértega (2001), coeficientes de correlación lineal entre 0.5 y 0.7 tienden a ser significativos en muestras pequeñas. Por lo tanto los valores correspondientes a coeficientes

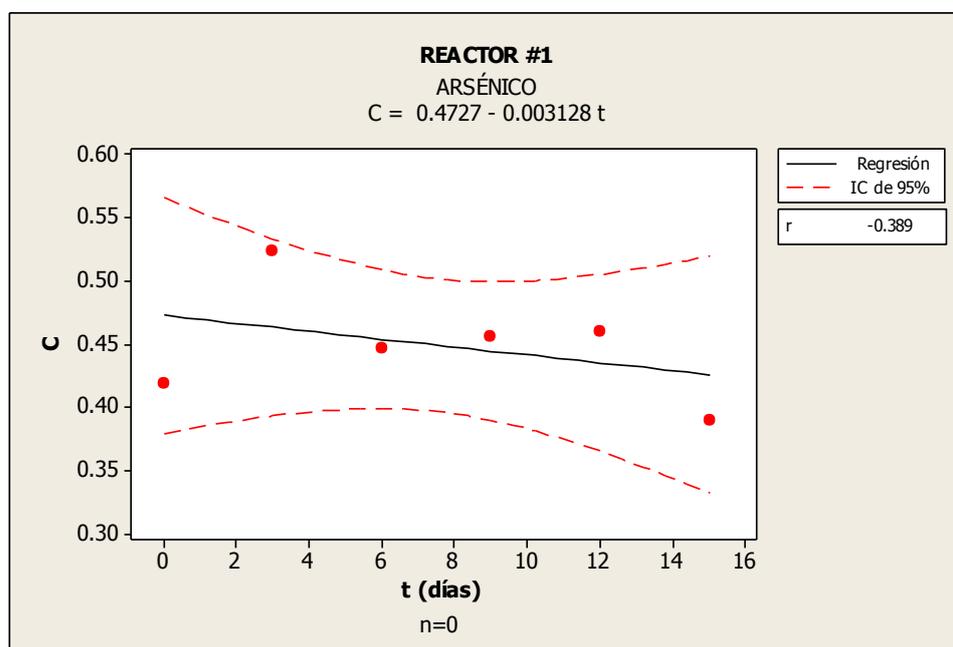
de correlación lineal menores a 0.5 serán rechazados, y se establecerá que dichas variables no presentan relación lineal.

Cuando un dato no parece corresponderse con el resto de datos, es considerado como un dato aberrante (Lau y Murphy, 2008). Debido a que estos datos aberrantes no permitirán obtener la mejor aproximación a la tendencia real de la relación entre las concentraciones y el tiempo, que son las variables que se analizan en este estudio, se procede a extraer este valor y obtener una nueva ecuación para la regresión lineal.

Los datos aberrantes que se puedan encontrar, pueden deberse a diversas circunstancias durante el proceso del tratamiento. Como se mencionó anteriormente la variación de pH es un factor determinante en la remoción de metales pesados y cianuro. La dificultad para mantener con exactitud siempre el mismo pH, pudo originar variaciones que aunque pequeñas influyeron notablemente en los mecanismos químicos de remoción de contaminantes. Otro motivo pudo ser un error humano al momento de realizar el muestreo.

A continuación se presentan las gráficas realizadas con todos los datos obtenidos y aquellas en que se encontraron datos aberrantes, presentan una nueva gráfica sin ellos.

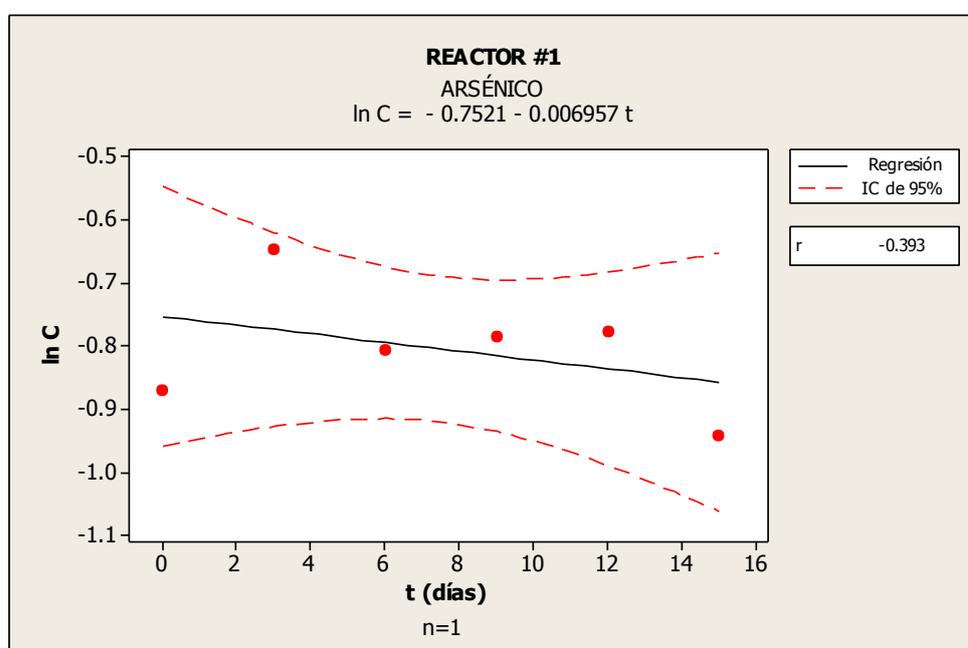
En la Gráfica 4.1. se puede apreciar los valores de las concentraciones de arsénico en el reactor #1 en el eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden al orden de reacción  $n=0$ . Con el análisis realizado en Minitab 15 se obtuvo un valor, para el coeficiente de correlación lineal, igual a -0.389.



**Gráfica 4.1.** C vs. t para el arsénico en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

En la Gráfica 4.2. están los valores correspondientes al logaritmo natural de las concentraciones de arsénico en el reactor #1 dispuestos en el eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica, así como la ecuación de regresión lineal, corresponden al orden de reacción  $n=1$ . Con el análisis realizado en Minitab 15 se obtuvo un valor, para el coeficiente de correlación lineal, igual a -0.393.



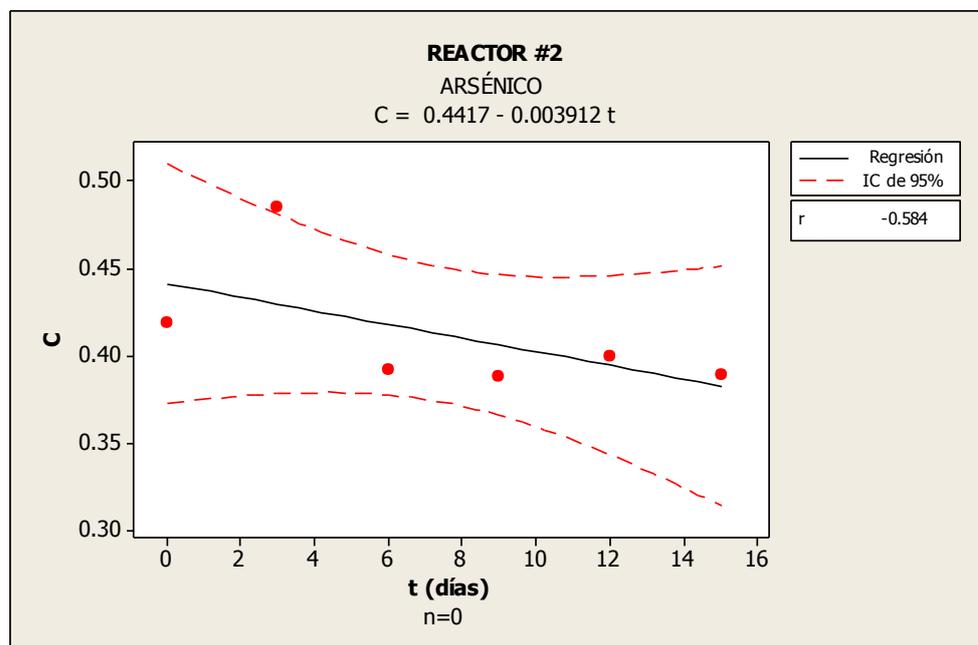
**Gráfica 4.2.** In C vs. t para el arsénico en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al comparar los coeficientes de correlación lineal de las Gráficas 4.1. y 4.2, se observa que el mayor corresponde al orden de reacción  $n=1$ , lo que indica que la remoción de arsénico en el reactor #1 podría modelarse de manera más precisa con la forma

de la Ec. 5 del Capítulo 2. Sin embargo, aunque este coeficiente, igual a  $-0.393$ , es mayor al obtenido con  $n=0$ , su proximidad a  $0$ , señala que existe una débil relación lineal entre concentración y tiempo, por lo que, no se considera significativa la constante de remoción  $K$  que se pudiera obtener.

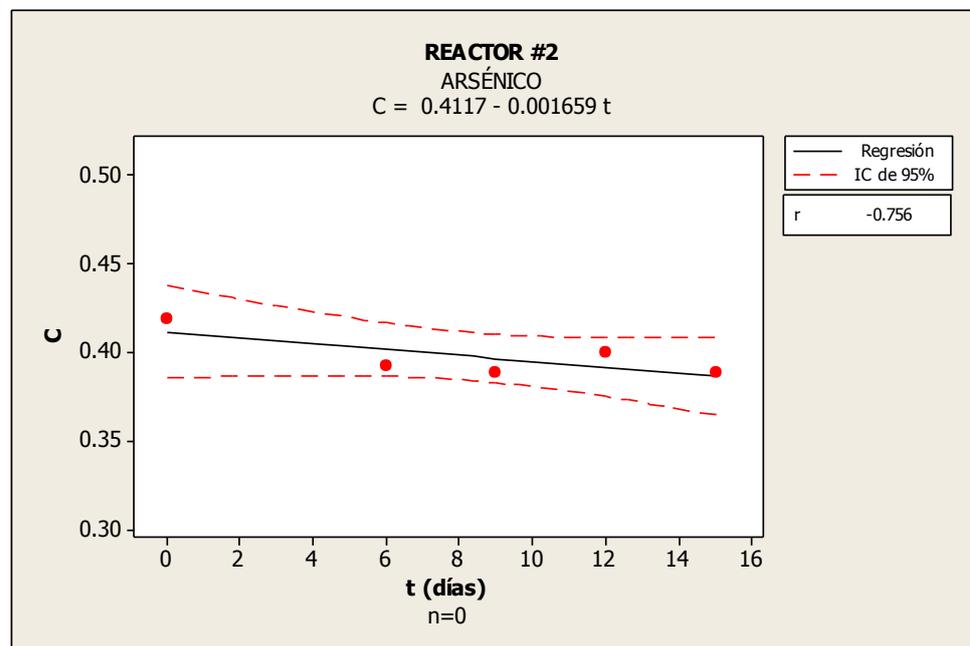
En la Gráfica 4.3. están los valores de las concentraciones de arsénico en el reactor #2 en el eje "y", y el tiempo en el eje "x". La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden al orden de reacción  $n=0$ . El coeficiente de correlación lineal, fue igual a  $-0.584$ .



**Gráfica 4.3.** C vs. t para el arsénico en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

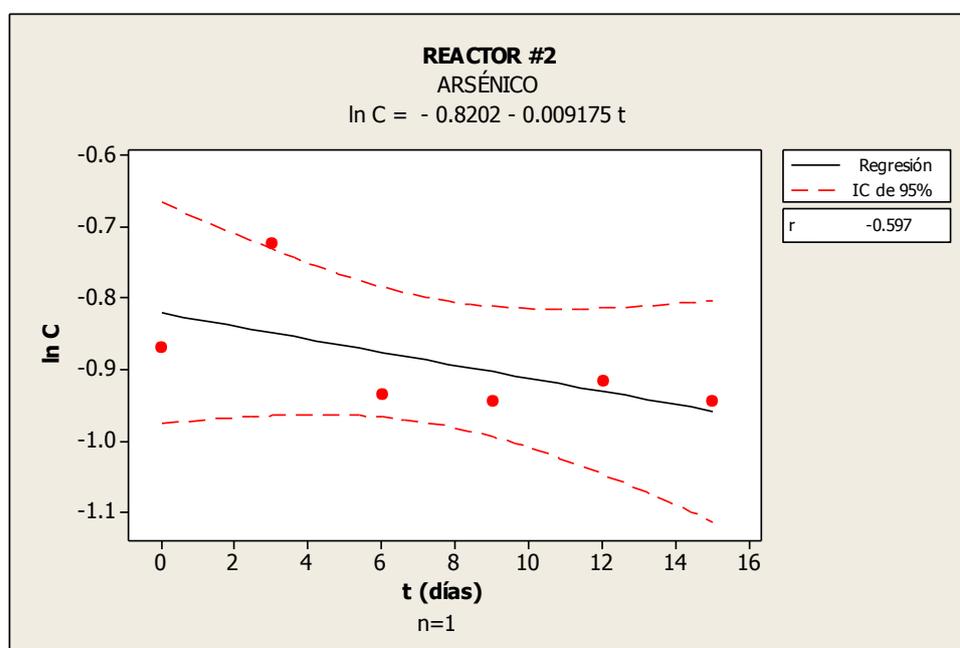
Si se observa la gráfica anterior, se detecta la presencia de un dato estadísticamente considerado aberrante, que corresponde a la concentración de arsénico en el día 3. Por ello, se presenta la Gráfica 4.4. con los valores correspondientes a las concentraciones de arsénico en el reactor #2 dispuestos en el eje “y”, así como el tiempo en el eje “x”, sin tomar en cuenta el dato del día 3. La gráfica obtenida al igual que la ecuación de regresión lineal, corresponden al orden de reacción  $n=0$ . Con el análisis realizado en Minitab 15 se obtuvo un valor, para el coeficiente de correlación lineal, igual a -0.756.



**Gráfica 4.4.** C vs. t para el arsénico en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

En la Gráfica 4.5. constan los valores correspondientes al logaritmo natural de las concentraciones de arsénico en el reactor #2 dispuestos en el eje “y”, mientras que en el eje “x” se tiene la variable tiempo. La gráfica obtenida, así como la ecuación de regresión lineal, corresponden al orden de reacción  $n=1$ . Al usar Minitab 15 se obtuvo un valor, para el coeficiente de correlación lineal, igual a -0.597.

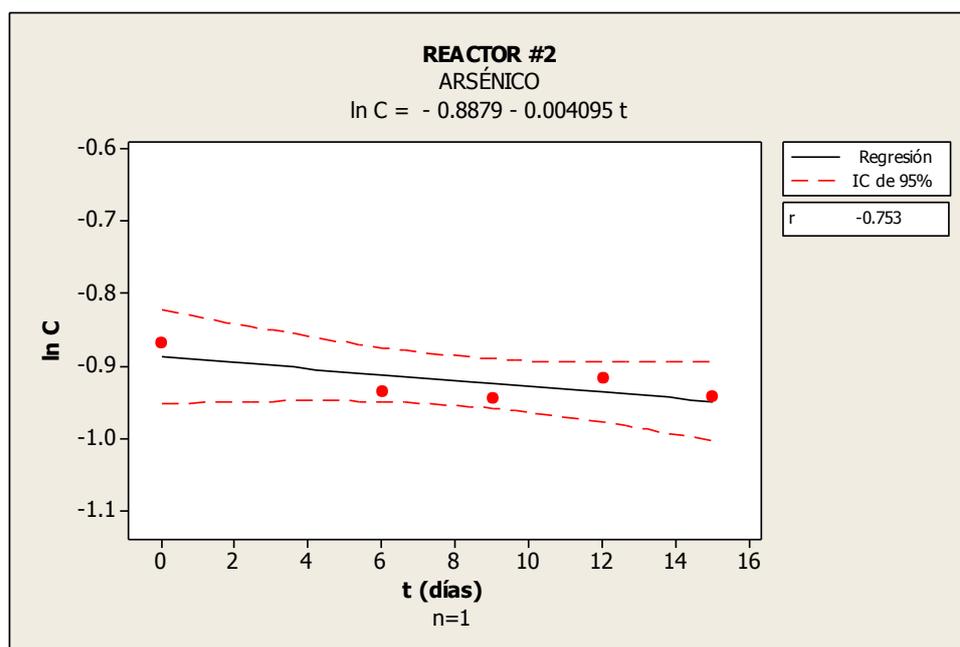


**Gráfica 4.5.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el arsénico en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al observar la Gráfica 4.5. es notoria la presencia de un dato aberrante, correspondiente al tercer día de tratamiento. Una vez extraído este dato se obtiene la Gráfica 4.6., que se presenta a

continuación, donde se relaciona también el logaritmo natural de las concentraciones de contaminante con el tiempo, pero ahora el valor del coeficiente de correlación obtenido con el software Minitab 15 es igual a -0.753.



**Gráfica 4.6.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el arsénico en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Una vez que se ha determinado el coeficiente de correlación con la respectiva extracción de datos aberrantes, se puede observar que el coeficiente de correlación mayor corresponde a la Gráfica 4.4. El coeficiente de correlación tiene un valor de -0.756. Este valor es cercano a -1, por lo que se puede decir que existe una buena

relación lineal entre las variables analizadas y por tanto la remoción de arsénico en el reactor #2 se establece con orden de reacción  $n=0$ .

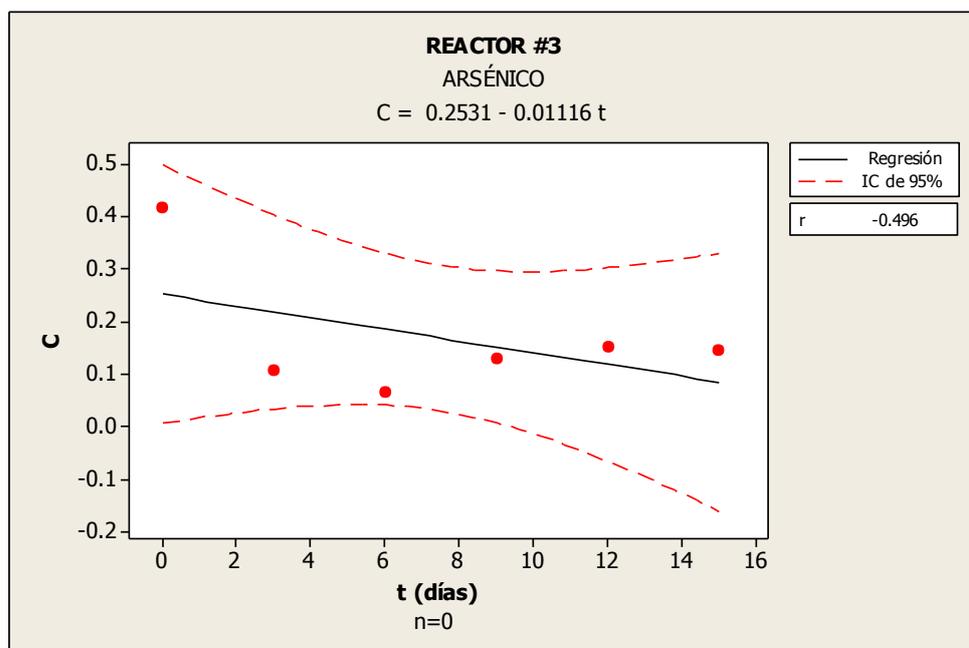
Ahora que ya se ha determinado el orden de reacción, se va a analizar la ecuación de regresión lineal obtenida, para determinar el valor de la constante K. El software Minitab 15 da como resultado la siguiente ecuación:

$$C = 0.4117 - 0.001659t.$$

Si se compara esta ecuación con la forma  $y = b \pm mx$ , se tiene que  $m$  es igual a  $-0.001659$  mg/L/día. Este valor corresponde a la constante K que determina la velocidad con que se produjo la reacción en el reactor #2 para la remoción de arsénico.

El mismo análisis se realiza con los datos obtenidos para el contaminante arsénico en el reactor #3. A continuación, en la Gráfica 4.7. constan los valores de las concentraciones de arsénico en el reactor #3 en el eje "y", contra el tiempo en el eje "x". La gráfica y ecuación de regresión lineal que fueron dadas por el software, corresponden al orden de reacción  $n=0$ . Del análisis

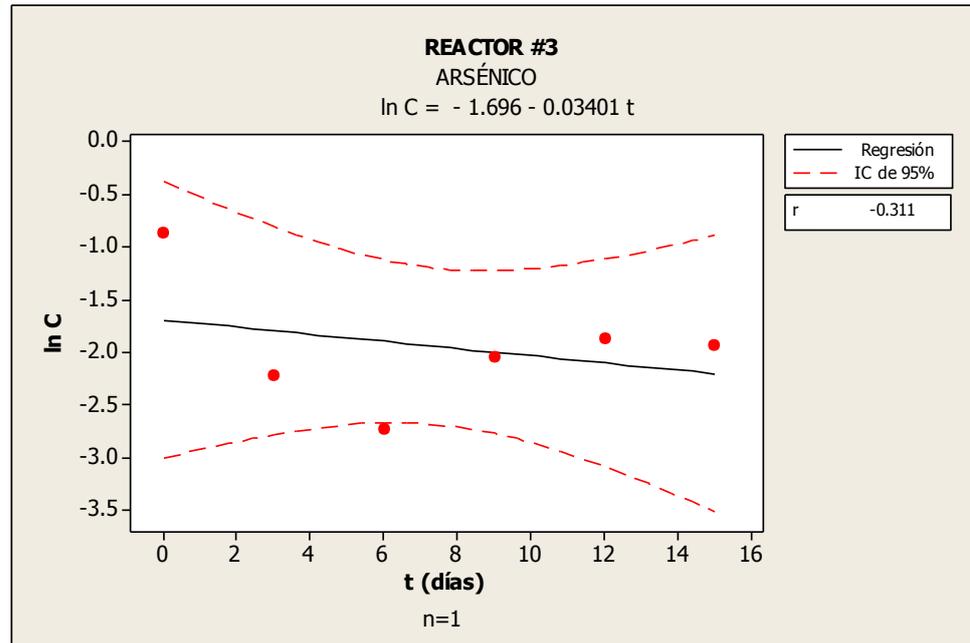
realizado en Minitab 15 se obtuvo el coeficiente de correlación lineal, igual a -0.496.



**Gráfica 4.7.** C vs. t para el arsénico en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

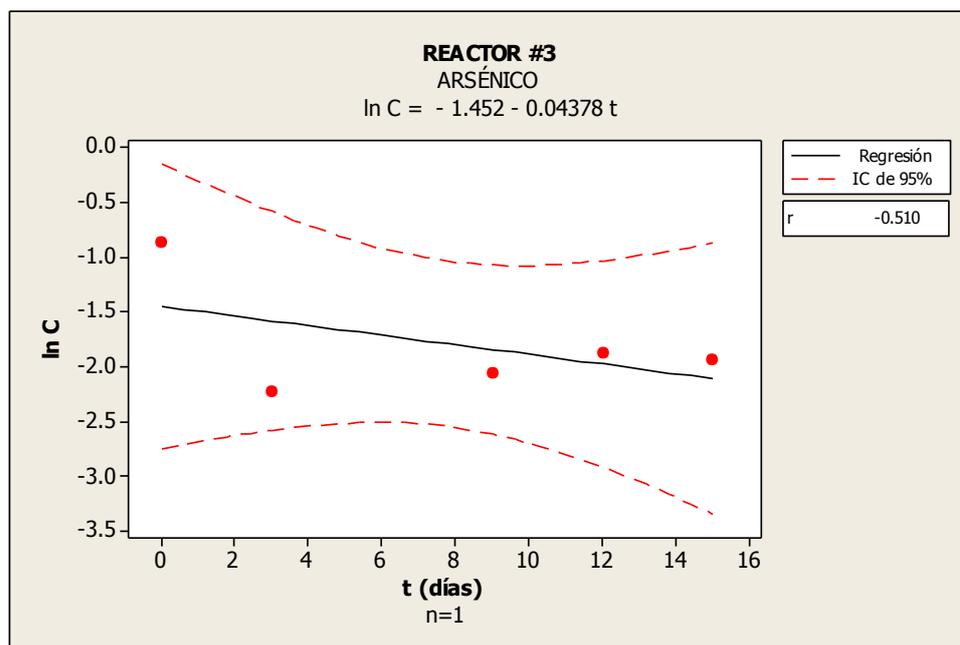
A continuación en la Gráfica 4.8. se muestran los valores correspondientes al logaritmo natural de las concentraciones de arsénico en el reactor #3 en el eje “y” contra la variable tiempo en el eje “x”. La gráfica obtenida, así como la ecuación de regresión lineal, corresponden al orden de reacción  $n=1$ . El valor para el coeficiente de correlación lineal obtenido es igual a -0.311.



**Gráfica 4.8.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el arsénico en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al observar la gráfica de la Gráfica 4.8. se percibe la existencia de un dato aberrante, correspondiente al sexto día de funcionamiento del humedal artificial. Una vez extraído este dato se obtiene la Gráfica 4.9., donde se relaciona también el logaritmo natural de las concentraciones de contaminante con el tiempo. El nuevo valor obtenido para el coeficiente de correlación es igual a -0.510.



**Gráfica 4.9.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el arsénico en el Reactor #3, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Una vez que se ha determinado el coeficiente de correlación con la respectiva extracción de datos aberrantes, se puede observar que el coeficiente de correlación mayor corresponde a la Gráfica 4.9. El coeficiente de correlación tiene un valor de -0.510. Este valor es medianamente cercano a -1, por lo que se puede decir que existe cierta relación lineal entre las variables analizadas y por tanto la remoción de arsénico en el reactor #3 se establece con orden de reacción  $n=1$ .

Como ya se ha determinado el orden de reacción, se procede a analizar la ecuación de regresión lineal obtenida, para con ello determinar el valor de la constante K. Minitab 15 da como resultado la siguiente ecuación:

$$\ln C = -1.452 - 0.04378t.$$

Si se compara esta ecuación con la forma  $y = b \pm mx$ , se tiene que m es igual a  $-0.04378 \text{ día}^{-1}$ . Este valor corresponde a la constante K que determina la velocidad con que se produjo la reacción en el reactor #3 para la remoción de arsénico.

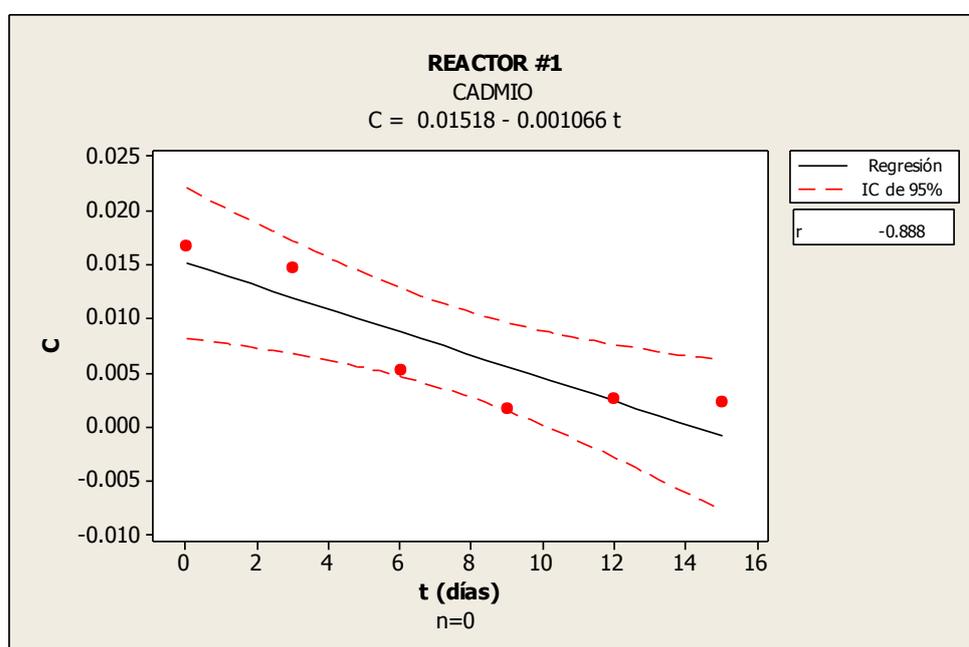
A continuación se presenta la Tabla XVIII, donde se resume el orden de reacción y el valor de la constante K para el contaminante arsénico en cada uno de los reactores.

**TABLA XVIII**  
**Constante K para arsénico**

ARSÉNICO	ORDEN	CONSTANTE K	UNIDAD
Reactor #1	n=1	No se determinó	...
Reactor #2	n=0	-0.001659	(mg/L)/día
Reactor #3	n=1	-0.04378	día <sup>-1</sup>

**Fuente:** Elaborado por los autores.

En la Gráfica 4.10 se muestran las concentraciones de cadmio contra el tiempo de toma de cada muestra realizada en el reactor #1. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=0$ . Mediante el análisis estadístico realizado en Minitab 15, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de -0.888.

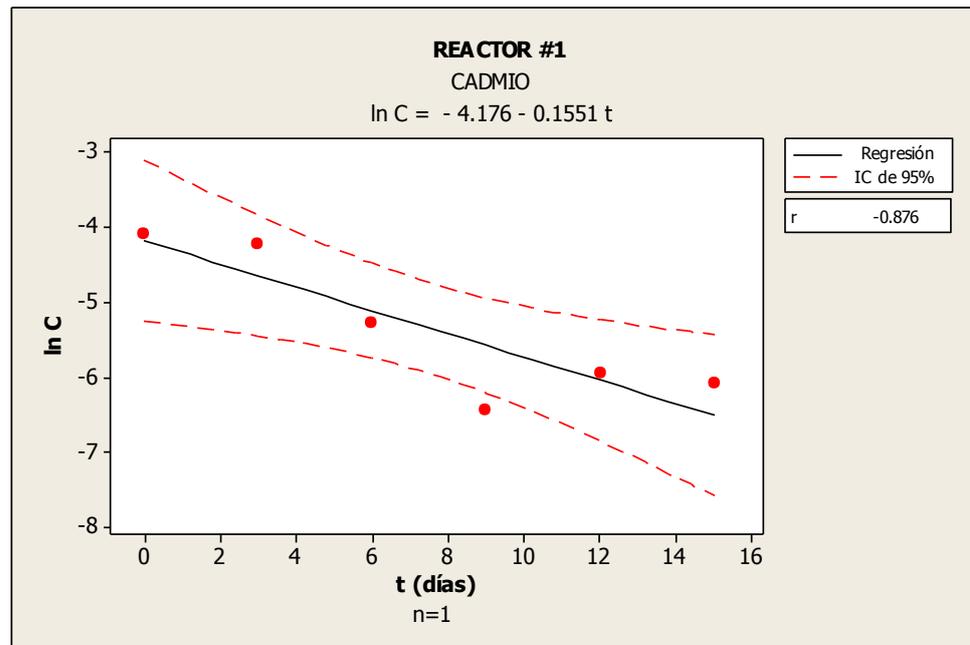


**Gráfica 4.10.** C vs. t para el cadmio en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

A continuación en la Gráfica 4.11., correspondiente al reactor #1, se presentan los valores del logaritmo natural de las concentraciones de cadmio colocados en el eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. Tanto la gráfica como la ecuación de regresión lineal, corresponden a una

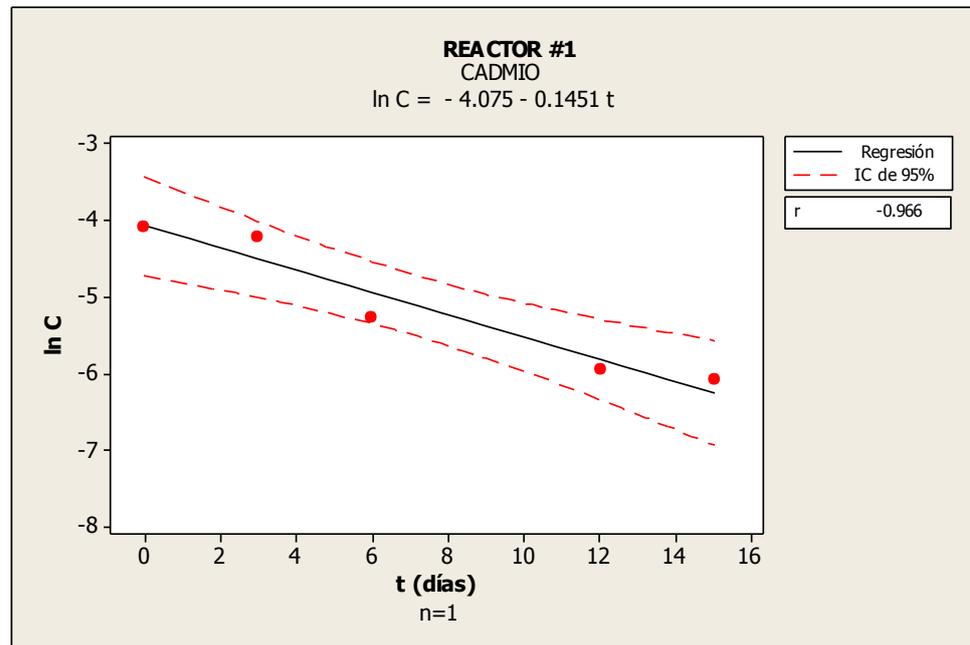
reacción de orden  $n=1$ . El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis con Minitab es igual a  $-0.876$ .



**Gráfica 4.11.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cadmio en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Se aprecia en la Gráfica 4.11. un valor aberrante en el noveno día de tratamiento. Al extraer el dato aberrante del análisis, se obtiene la Gráfica 4.12., donde mediante análisis estadístico se obtiene un coeficiente de correlación lineal igual a  $-0.966$ , para las variables logaritmo natural de concentración y tiempo.



**Gráfica 4.12.** In C vs. t para el cadmio en el Reactor #1, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

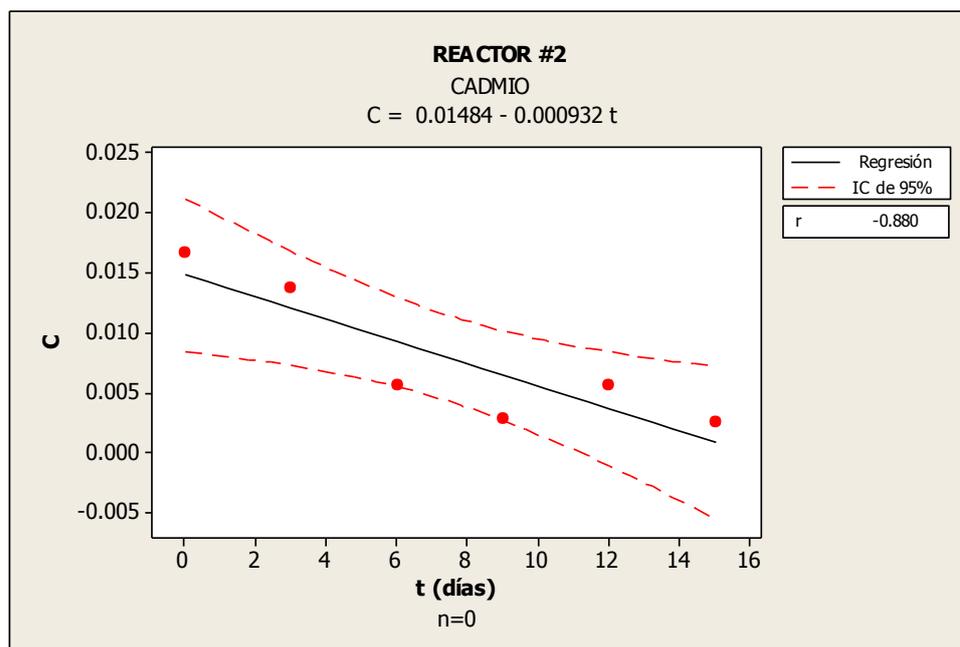
Con el coeficiente de correlación lineal obtenido de la nueva gráfica sin el dato aberrante, se puede indicar que el mayor coeficiente de correlación lineal se presenta en la Gráfica 4.12. El valor de coeficiente de correlación lineal es igual a -0.966. Siendo este valor muy cercano a -1, por lo que se tiene una correlación lineal fuerte e inversa entre las variables analizadas, entonces se determina que la remoción de cadmio en el reactor #1 presenta una reacción de orden  $n=1$ .

Ya que se ha determinado el orden que define la reacción, se analiza la ecuación de regresión lineal dada por Minitab 15, para con ello encontrar el valor de la constante K, que será la pendiente de la ecuación de regresión lineal. La ecuación de la remoción del cadmio en el reactor #1 es:

$$\ln C = -4.075 - 0.1451t$$

Si se compara con la forma  $y = b \pm mx$ , se dice que el valor de m es igual a  $-0.1451 \text{ día}^{-1}$ , que corresponde al valor de la constante K.

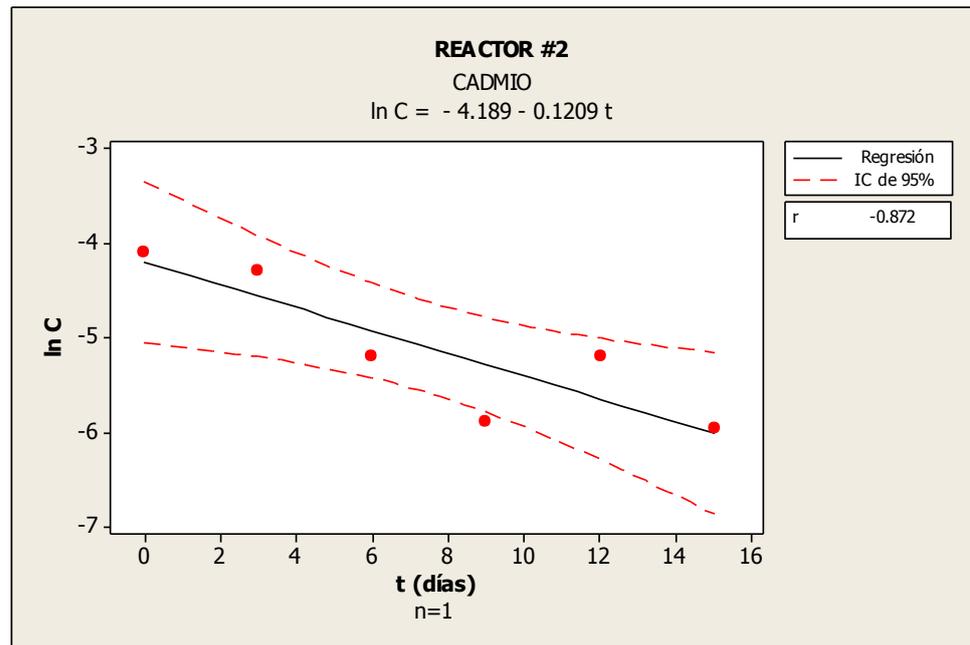
Seguidamente, en la Gráfica 4.13 se muestra para el reactor #2, las concentraciones de cadmio colocadas en el eje "y" contra el tiempo de toma de cada muestra en el eje "x". La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=0$ . Mediante el análisis estadístico realizado en Minitab 15, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal igual a  $-0.880$ .



**Gráfica 4.13.** C vs. t para el cadmio en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

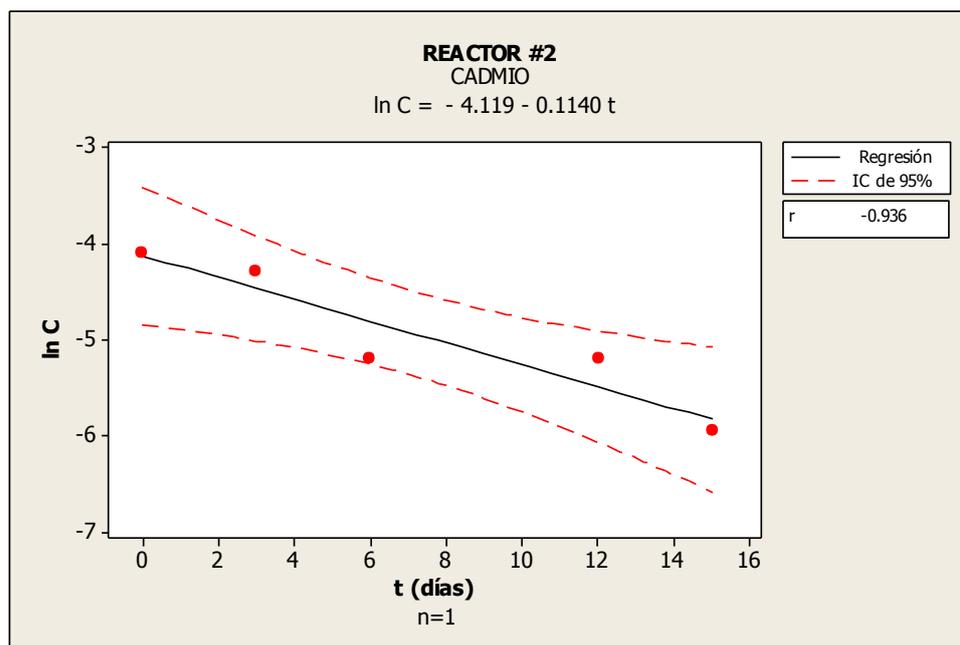
Posteriormente, se encuentra la Gráfica 4.14., correspondiente al reactor #2, con los valores del logaritmo natural de las concentraciones de cadmio colocados en el eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. Tanto la gráfica como la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=1$ . El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis estadístico es igual a -0.872.



**Gráfica 4.14.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cadmio en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

En la Gráfica 4.14. se descubre la presencia de un dato aberrante, correspondiente al noveno día de tratamiento. Se procede a extraer este valor y obtener la Gráfica 4.15., que se presenta a continuación, la misma que posee un coeficiente de correlación igual a -0.936.



**Gráfica 4.15.** In C vs. t para el cadmio en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

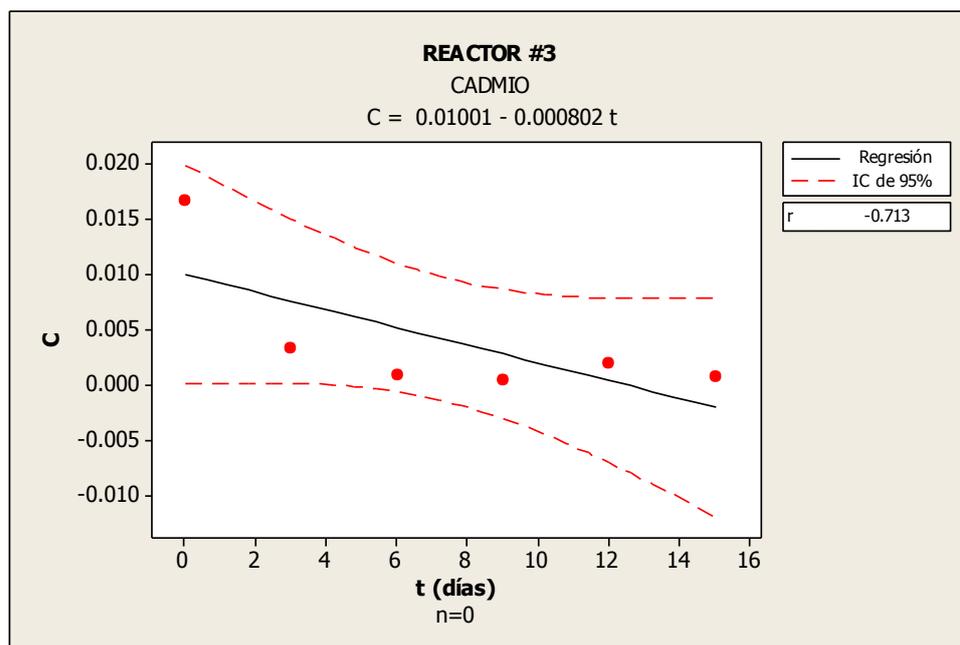
Con el coeficiente de correlación lineal obtenido de la nueva gráfica, en la que se retiró el dato aberrante, se puede indicar que el mayor coeficiente de correlación lineal corresponde a esta última, es decir la Gráfica 4.15. El valor de coeficiente de correlación lineal es igual a -0.936. Siendo este valor muy cercano a -1, por lo que se tiene una correlación lineal fuerte e inversa entre las variables concentración y tiempo que han sido analizadas, entonces se determina que la remoción de cadmio en el reactor #2 presenta una reacción de orden  $n=1$ .

Ahora que ya se ha determinado el orden que define la reacción, se analiza la ecuación de regresión lineal dada por Minitab 15, para así poder encontrar el valor de la constante K, que será la pendiente de la ecuación de regresión lineal. La ecuación de la remoción del cadmio en el reactor #2 es:

$$\ln C = -4.119 - 0.1140t$$

Si se compara con la forma  $y = b \pm mx$ , se dice que el valor de m es igual a  $-0.1140 \text{ día}^{-1}$ , que corresponde al valor de la constante K.

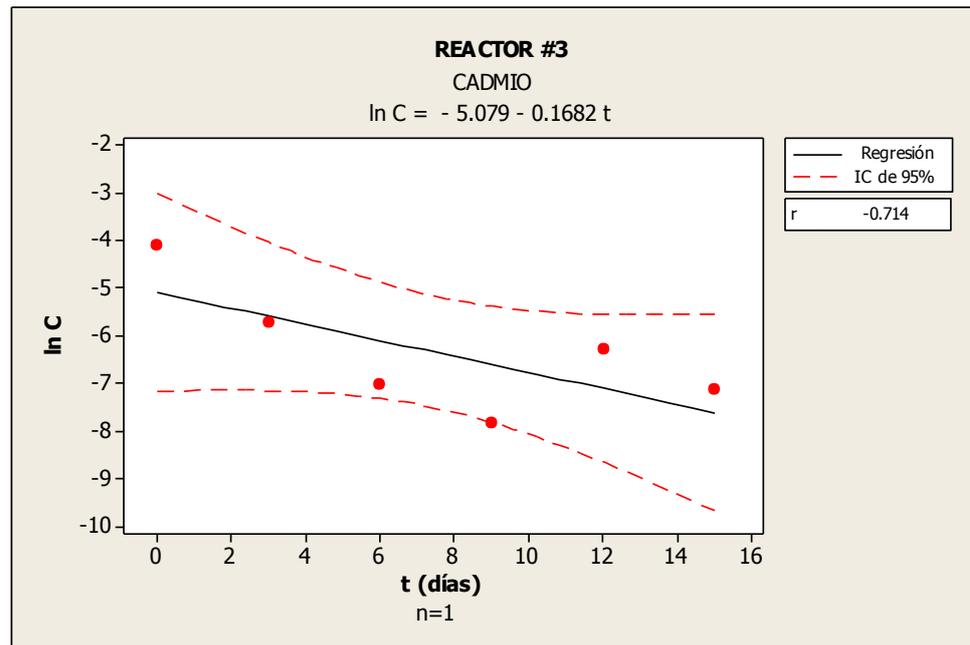
Se presenta a continuación la Gráfica 4.16. para el reactor #3, se encuentran en esta las concentraciones de cadmio colocadas en el eje "y" contra el tiempo en que se tomó cada muestra en el eje "x". La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=0$ . Con el análisis estadístico realizado, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal igual a  $-0.713$ .



**Gráfica 4.16.** C vs. t para el cadmio en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

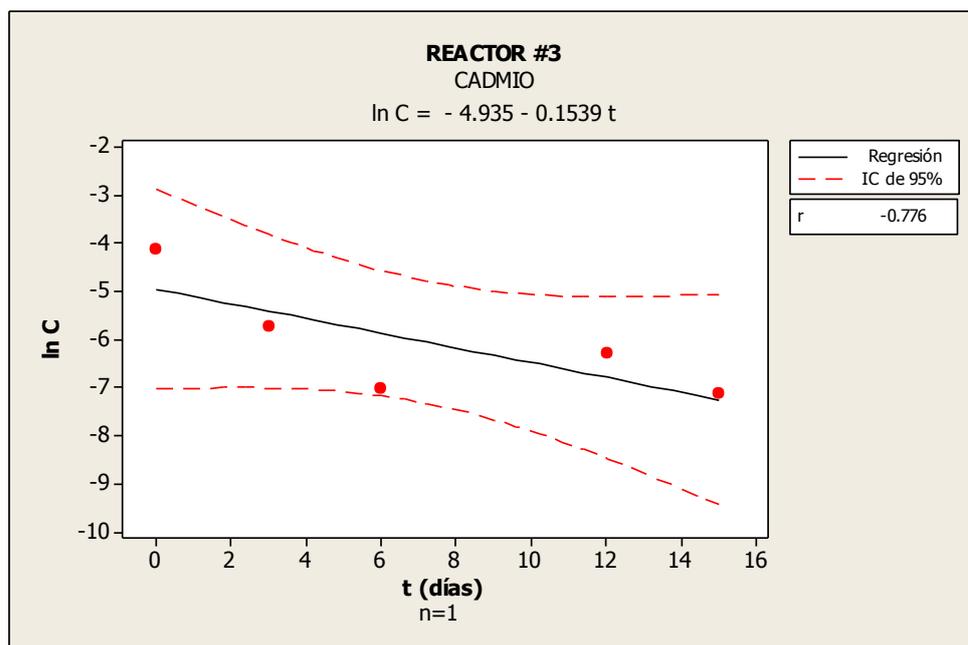
Seguido se encuentra la Gráfica 4.17., que corresponde al reactor #3, cuenta con los valores del logaritmo natural de las concentraciones de cadmio colocados en el eje “y”, y el tiempo de toma de cada muestra en el eje “x”. Tanto la gráfica como la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=1$ . El valor del coeficiente de correlación lineal obtenido del análisis estadístico es igual a -0.714.



**Gráfica 4.17.** In C vs. t para el cadmio en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

En la Gráfica 4.17. se nota la presencia de un dato aberrante, correspondiente al noveno día de tratamiento. Se procede a extraer este valor y obtener la gráfica que se muestra en la Gráfica 4.18., la misma que posee un coeficiente de correlación igual a -0.776.



**Gráfica 4.18.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cadmio en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al comparar los coeficientes de correlación lineal de las gráficas obtenidas, se dice que el valor de coeficiente de correlación lineal igual a  $-0.776$ , es el mayor entre todos. Siendo este valor cercano a  $-1$ , se tiene una correlación lineal inversa considerable entre las variables concentración del contaminante y tiempo que han sido analizadas, entonces se determina que la remoción de cadmio en el reactor #3, presenta una reacción de orden  $n=1$ .

Una vez determinado el orden de reacción, se revisa la ecuación de regresión lineal obtenida con Minitab 15, para así poder encontrar el

valor de la constante K. La ecuación de la remoción del cadmio en el reactor #3 es:

$$\ln C = -4.935 - 0.1539t$$

Si se compara con la forma  $y = b \pm mx$ , se dice que el valor de m es igual a  $-0.1539 \text{ día}^{-1}$ , que corresponde al valor de la constante K.

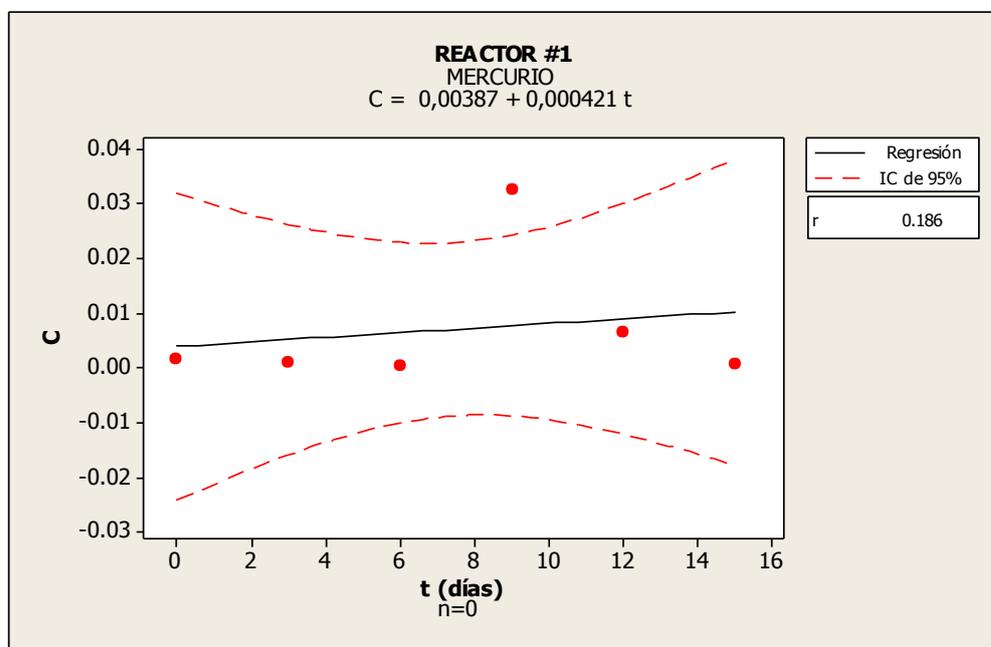
A continuación se presenta la Tabla XIX, donde se resume el orden de reacción y el valor de la constante K para el contaminante cadmio en cada uno de los reactores. En este caso todas las constantes se determinaron a partir de un orden de reacción con  $n=1$ .

**TABLA XIX**  
**Constante K para cadmio**

CADMIO	ORDEN	CONSTANTE K	UNIDAD
Reactor #1	n=1	-0.1451	día <sup>-1</sup>
Reactor #2	n=1	-0.1140	día <sup>-1</sup>
Reactor #3	n=1	-0.1539	día <sup>-1</sup>

**Fuente:** Elaborado por los autores.

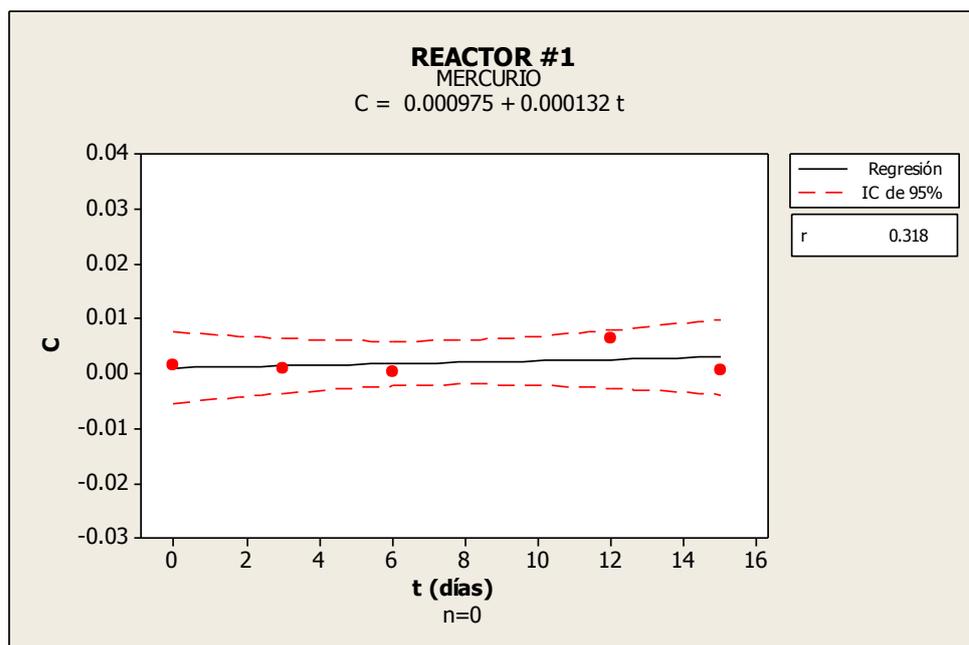
En la Gráfica 4.19., correspondiente al reactor #1, se cuenta con los valores del logaritmo natural de las concentraciones de mercurio a lo largo del eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=0$ . El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis estadístico es igual a 0.186.



**Gráfica 4.19.** C vs. t para el mercurio en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

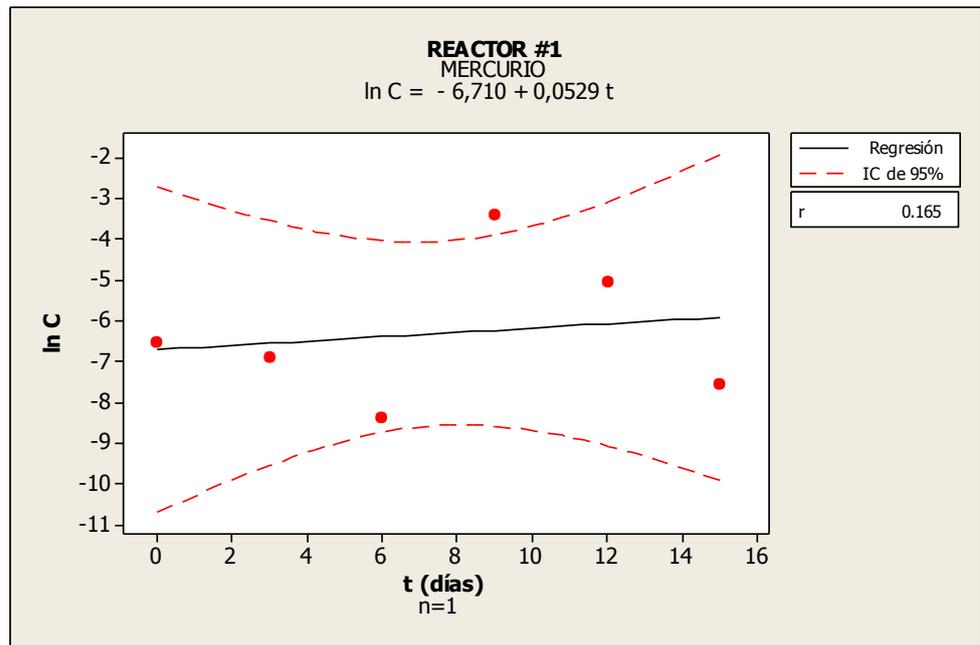
En la Gráfica 4.19. se tiene la presencia de un dato aberrante, correspondiente al noveno día de tratamiento. Se procede a extraer este valor y obtener a continuación la Gráfica 4.20., la cual tiene un coeficiente de correlación igual a 0.318.



**Gráfica 4.20.** C vs. t para el mercurio en el Reactor #1, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

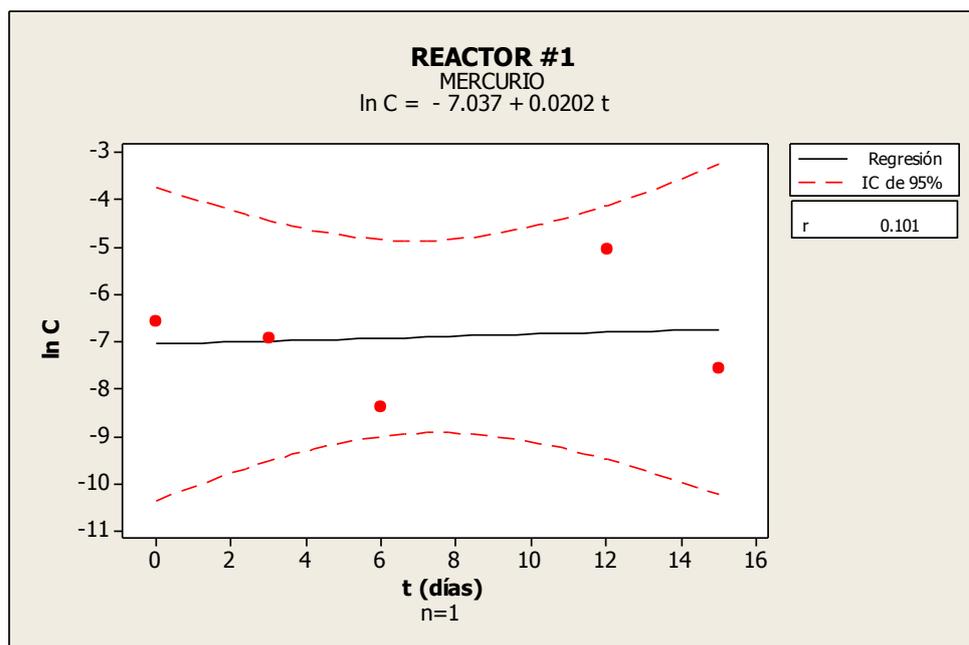
En lo posterior, se encuentra la Gráfica 4.21., la cual corresponde al reactor #1, que cuenta con los valores del logaritmo natural de las concentraciones de mercurio colocados en el eje “y”, y el tiempo de toma de cada muestra en el eje “x”. Tanto la gráfica como la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=1$ . El valor del coeficiente de correlación lineal obtenido del análisis estadístico es igual a 0.165.



**Gráfica 4.21.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el mercurio en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al analizar la Gráfica 4.21., se puede notar que existe un dato aberrante, el mismo que corresponde al noveno día en el proceso de tratamiento. Se extrae este valor y se procede a graficar nuevamente para obtener una mejor aproximación, esto se muestra seguidamente en la Gráfica 4.22., la misma que presenta un coeficiente de correlación igual a 0.101.



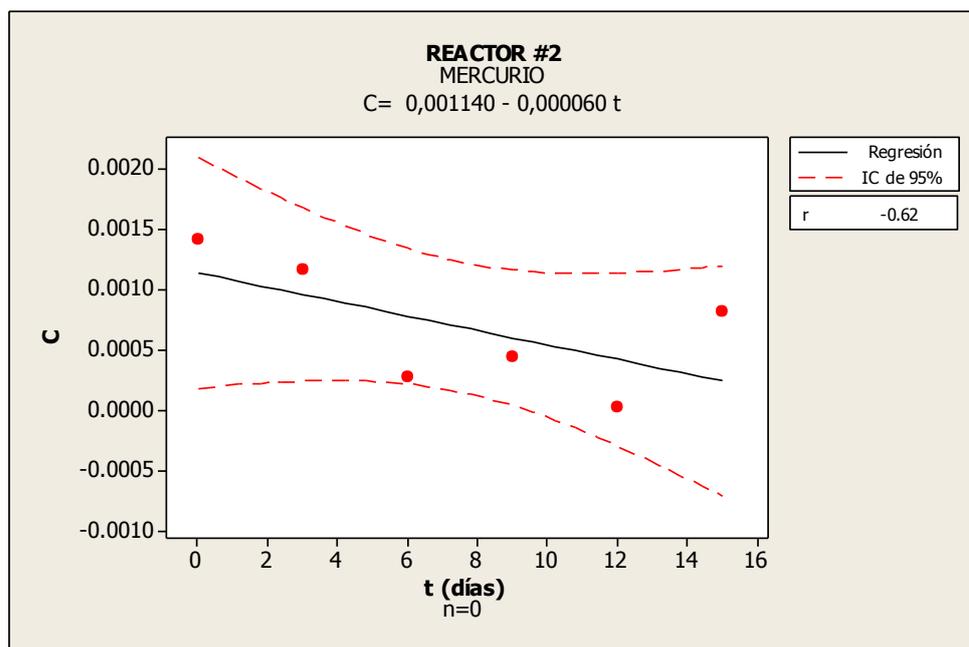
**Gráfica 4.22.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el mercurio en el Reactor #1, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al comparar las diferentes gráficas que se han obtenido para analizar la remoción de mercurio en el reactor #1, se puede notar que todas ellas presentan un valor para el coeficiente de correlación, muy bajo. Por lo tanto se dice que para este caso, la relación lineal es muy débil entre las variables concentración de mercurio y tiempo, lo cual conlleva a no considerar la constante  $K$  que se pudiera obtener, por no ser lo suficientemente significativa.

A continuación se presenta la Gráfica 4.23. que corresponde al reactor #2, con las concentraciones de mercurio a lo largo del eje

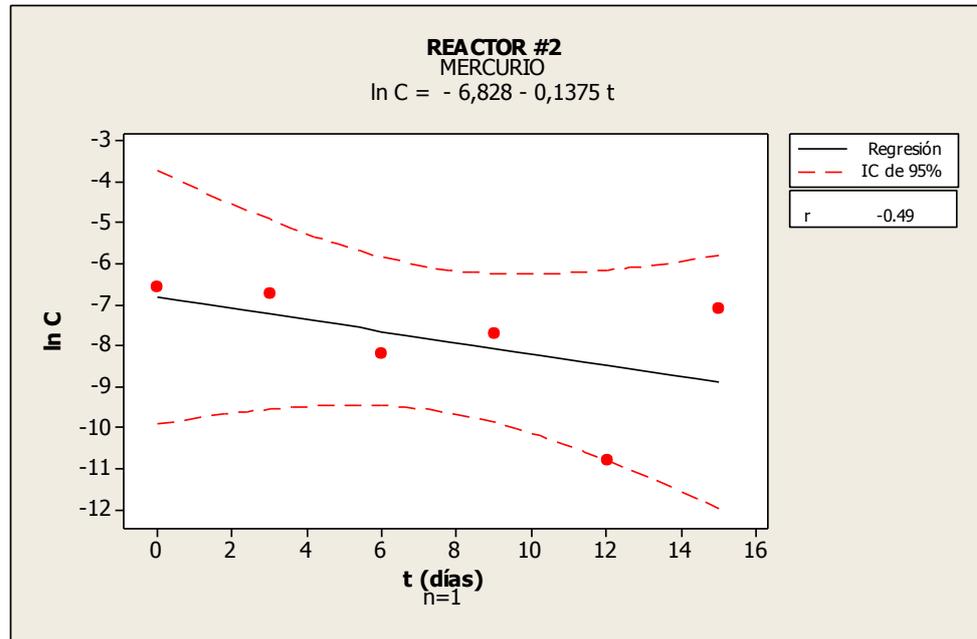
“y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=0$ . El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis estadístico es igual a -0.62.



**Gráfica 4.23.** C vs. t para el mercurio en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Después se presenta la Gráfica 4.24., correspondiente al reactor #2, con los valores del logaritmo natural de las concentraciones de mercurio a lo largo del eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=1$ . El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis estadístico es igual a -0.49.



**Gráfica 4.24.** ln C vs. t para el mercurio en el Reactor #2

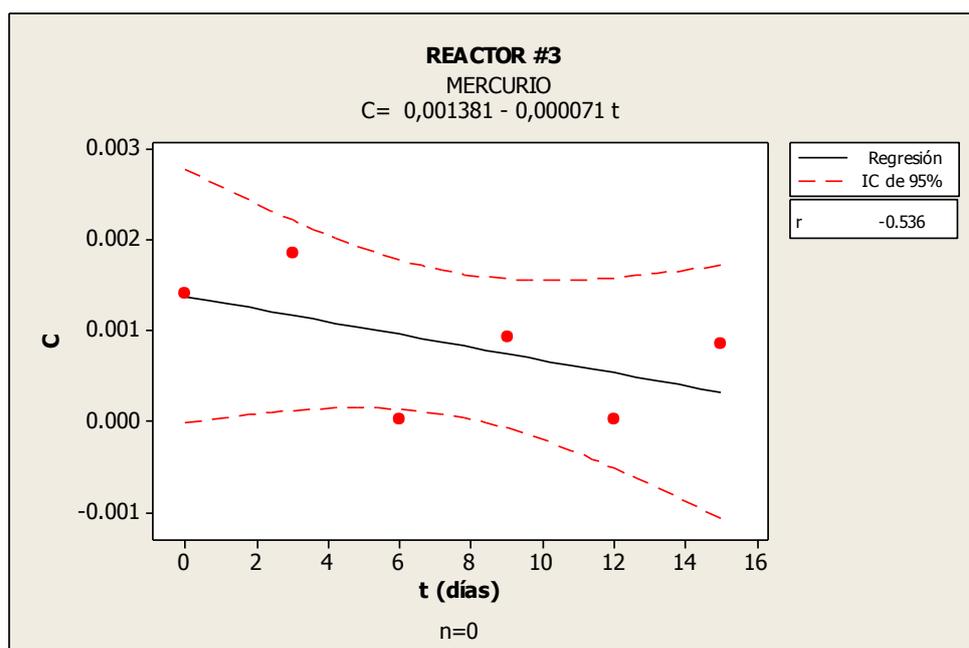
**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al revisar las gráficas obtenidas para analizar la remoción de mercurio en el reactor #2, se puede notar que el valor para el coeficiente de correlación para la gráfica con n=0 es mayor que la obtenida para n=1. El valor mencionado es igual a -0.62. Por lo tanto se dice que para este caso, la relación lineal es considerable entre las variables concentración de mercurio y tiempo, siendo esta inversa. La ecuación para la regresión lineal obtenida para n=0 es:

$$C = 0.001140 - 0.00006t$$

Si se compara con la forma  $y = b \pm mx$ , se encuentra que la constante K es igual a - 0.00006 mg/L/día.

La Gráfica 4.25., correspondiente al reactor #3, contiene las concentraciones de mercurio a lo largo del eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden n=0. El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis estadístico es igual a -0.536.

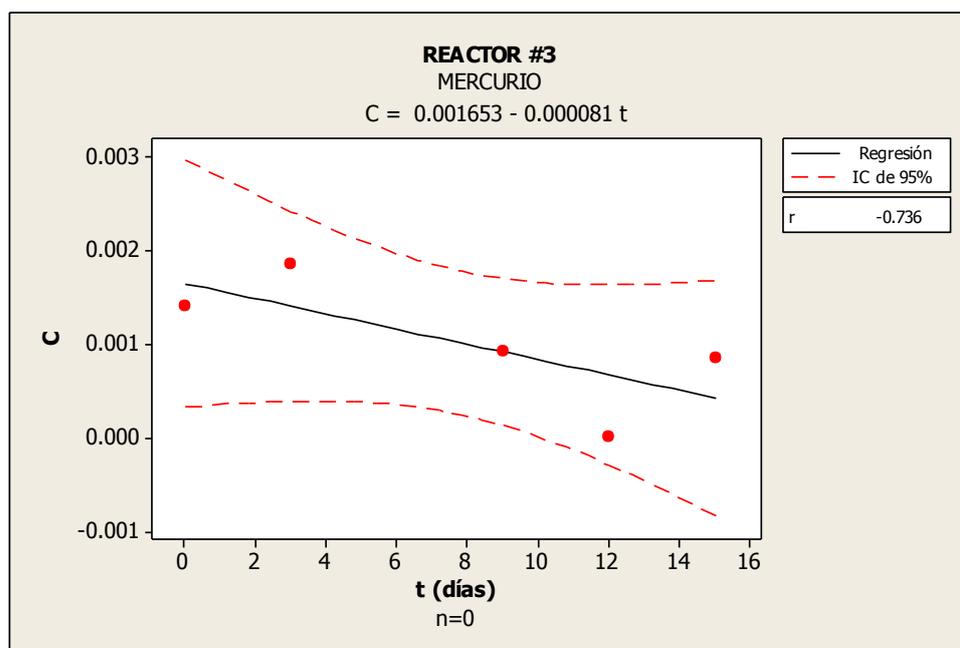


**Gráfica 4.25.** C vs. t para el mercurio en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

En la Gráfica 4.25 se detecta un dato aberrante, que corresponde al sexto día de tratamiento. Se extrae este valor y se procede a

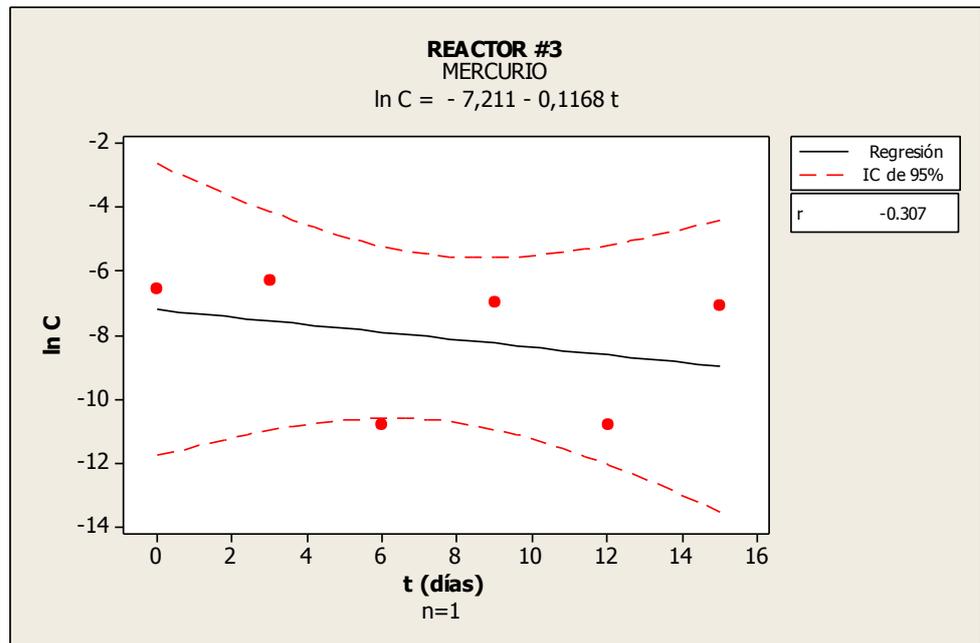
obtener la Gráfica 4.26., la misma que presenta un coeficiente de correlación igual a -0.736.



**Gráfica 4.26.** C vs. t para el mercurio en el Reactor #3, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

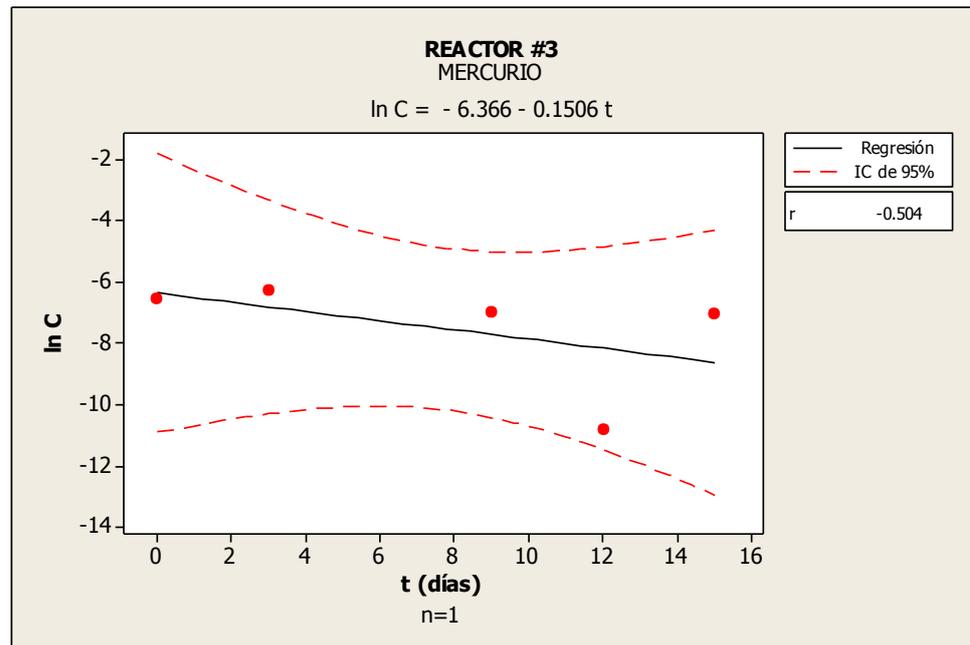
A continuación se encuentra la Gráfica 4.27., correspondiente al reactor #3, con los valores del logaritmo natural de las concentraciones de mercurio a lo largo del eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal, corresponden a una reacción de orden  $n=1$ . El valor del coeficiente de correlación lineal, obtenido del análisis estadístico es igual a -0.307.



**Gráfica 4.27.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el mercurio en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al igual que en la gráfica obtenida para  $n=0$ , en la Gráfica 4.27. se detecta un dato aberrante, que corresponde al sexto día de tratamiento. En esta gráfica también se extrae este valor y se procede a obtener la Gráfica 4.28., la cual presenta un coeficiente de correlación igual a -0.504.



**Gráfica 4.28.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el mercurio en el Reactor #3, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al revisar las gráficas obtenidas para analizar la remoción de mercurio en el reactor #3, se puede notar que el valor para el coeficiente de correlación para la gráfica con  $n=0$  en la cual se quitó un dato aberrante, es mayor que la obtenida para  $n=1$ . El valor mencionado es igual a  $-0.736$ . Por lo tanto se dice que para este caso, la relación lineal es considerable entre las variables concentración de mercurio y tiempo, siendo la relación inversa.

La ecuación de regresión lineal obtenida para  $n=0$  es:

$$C=0.001653-0.000081t$$

Si se la compara con la forma  $y = b \pm mx$ , se encuentra que la constante K es igual a - 0.000081 mg/L/día.

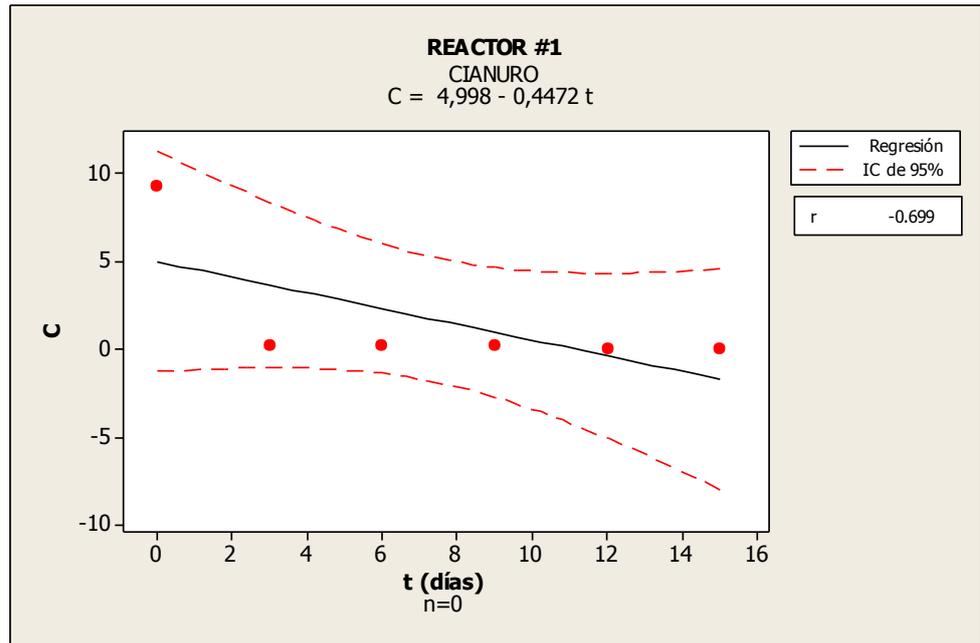
A continuación se presenta la Tabla XX, donde se resume el orden de reacción y el valor de la constante K para el contaminante mercurio en cada uno de los reactores.

**TABLA XX**  
**Constante K para mercurio**

MERCURIO	ORDEN	CONSTANTE K	UNIDAD
Reactor #1	...	No se determinó	...
Reactor #2	n=0	-0.00006	(mg/L)/día
Reactor #3	n=0	-0.000081	(mg/L)/día

**Fuente:** Elaborado por los autores.

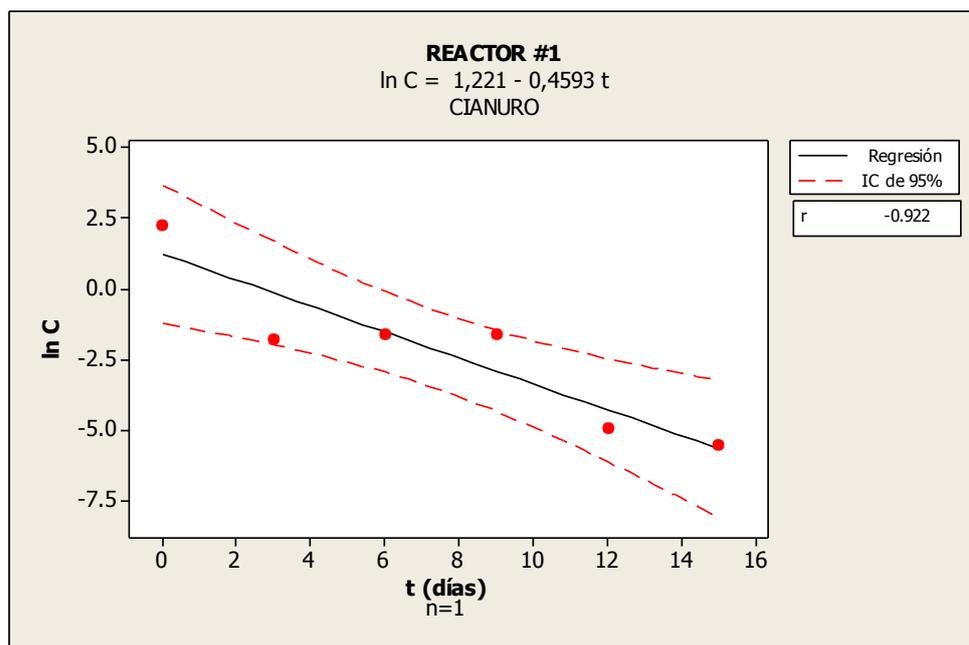
Posteriormente, se encuentra la Gráfica 4.29. que presenta las concentraciones cianuro en el reactor #1 situadas en el eje “y” contra el tiempo en el eje “x”. La gráfica aquí mostrada corresponde a una reacción de orden n=0, al igual que la ecuación de regresión lineal. Mediante el análisis realizado en Minitab 15 se obtuvo el valor del coeficiente de correlación lineal, igual a -0.699.



**Gráfica 4.29.** C vs. t para el cianuro en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Seguido, se presenta la Gráfica 4.30., donde se muestran los valores del logaritmo natural de las concentraciones de cianuro en el reactor #1 colocadas en el eje “y”, así como el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal corresponden al orden de reacción  $n=1$ . Con el análisis realizado en Minitab 15 se obtuvo el valor del coeficiente de correlación lineal, igual a -0.922.



**Gráfica 4.30.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cianuro en el Reactor #1.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Comparando los coeficientes de correlación lineal obtenidos en las Gráficas 4.29. y 4.30, que corresponden a  $C$  vs.  $t$  y  $\ln C$  vs.  $t$  respectivamente, se observa que el mayor valor corresponde al orden de reacción  $n=1$ , lo que indica que la remoción de cianuro en el reactor #1 se puede modelar de manera más precisa con la forma de la Ec. 5 del Capítulo 2.

El mayor de los dos coeficientes de correlación lineal es igual a -0.922, lo que indica una correlación fuerte e inversa entre las variables estudiadas. Con el orden de reacción definido para la remoción de cianuro en el reactor #1, se realiza el análisis de

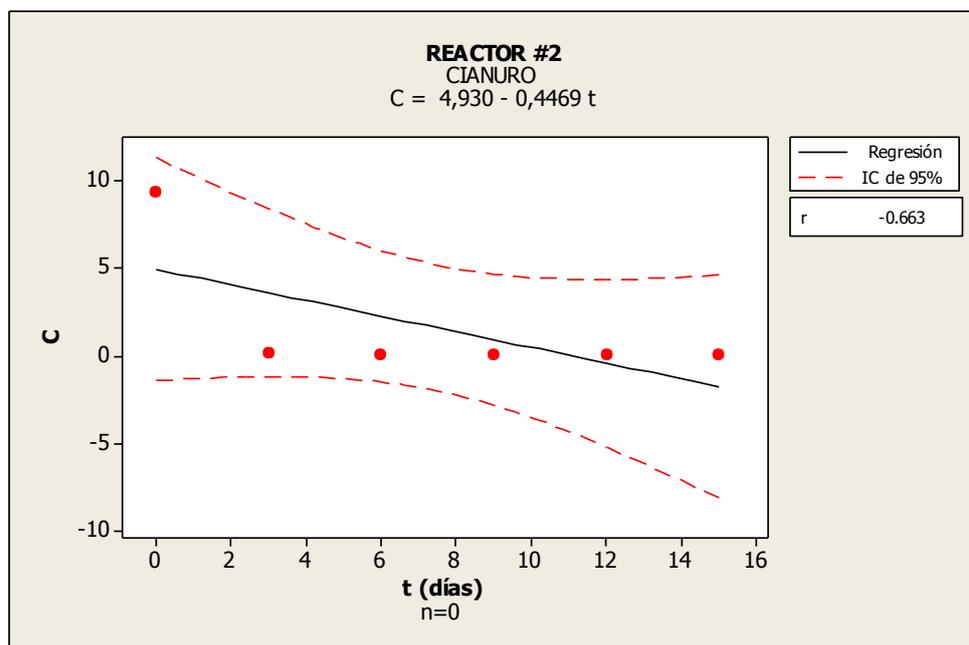
regresión lineal con Minitab 15 para encontrar el valor de la constante de remoción K.

La ecuación que determina la reacción en este reactor es:

$$\ln C = 1.221 - 0.4593t$$

La pendiente de la recta de regresión lineal, que corresponde al valor de la constante de remoción K es igual a  $-0.4593 \text{ día}^{-1}$ .

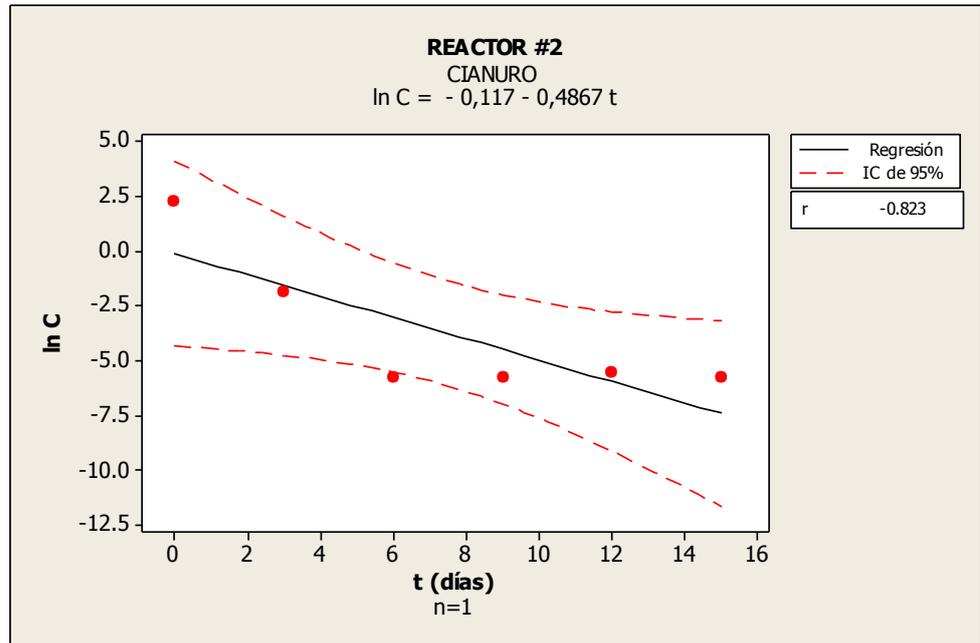
A continuación se encuentra la Gráfica 4.31., donde se aprecian los valores de las concentraciones de cianuro en el reactor #2, colocadas en el eje "y", así como el tiempo en el eje "x". La gráfica, así como la ecuación de regresión lineal que han sido obtenidas, corresponden al orden de reacción  $n=0$ . Por medio del análisis realizado en Minitab 15 se obtiene un valor para el coeficiente de correlación lineal, igual a  $-0.663$ .



**Gráfica 4.31.** C vs. t para el cianuro en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

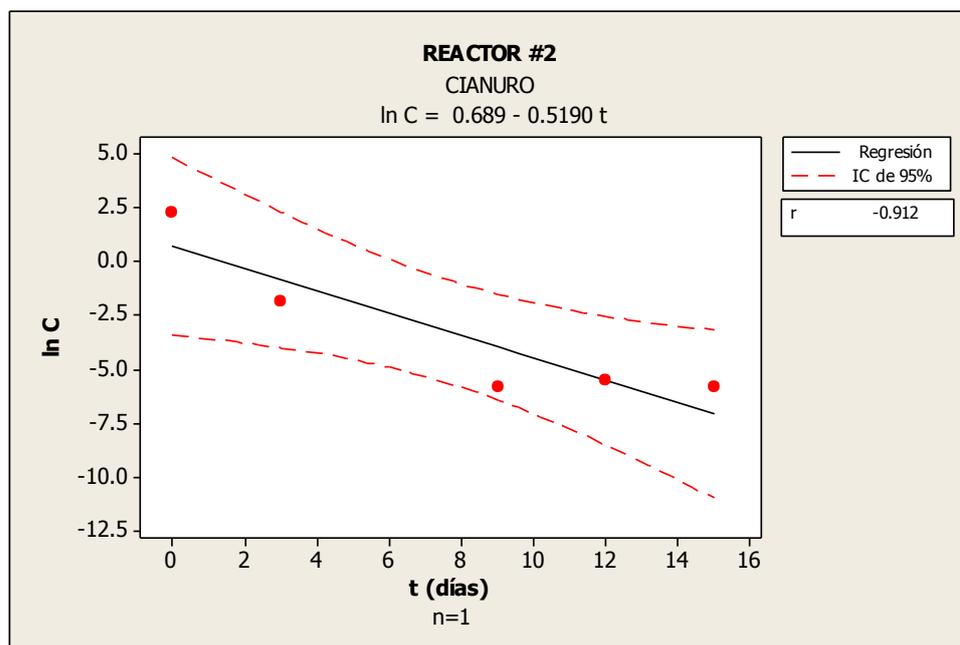
En la Gráfica 4.32., mostrada posteriormente, que corresponde al reactor #2, se muestran los valores del logaritmo natural de las concentraciones de cianuro en el eje “y”, y el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal corresponden al orden de reacción  $n=0$ . Con Minitab se obtiene el valor del coeficiente de correlación lineal igual a -0.823.



**Gráfica 4.32.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cianuro en el Reactor #2.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

En la Gráfica 4.32. se observa un valor aberrante en el sexto día de tratamiento. Al quitar este dato aberrante del análisis, se obtiene la Gráfica 4.33, que se presenta a continuación. Al realizar un nuevo análisis estadístico con Minitab15, se obtiene un coeficiente de correlación lineal igual a -0.912 para las variables logaritmo natural de concentración y tiempo.



**Gráfica 4.33.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cianuro en el Reactor #2, con extracción de dato aberrante.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

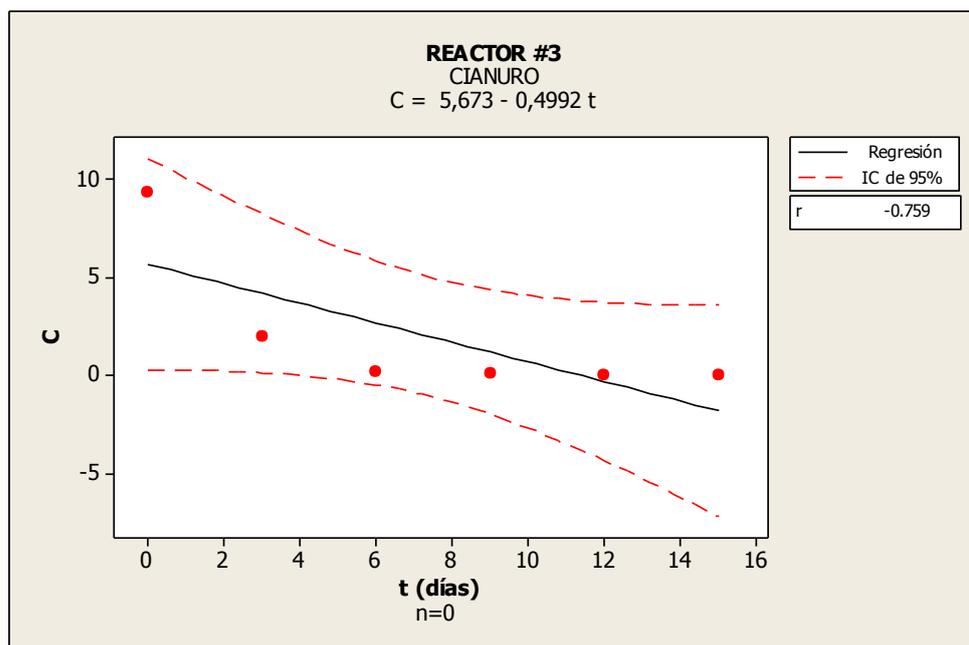
Ya con el nuevo valor de correlación lineal encontrado con el análisis estadístico sin el dato aberrante, se puede indicar que el mayor coeficiente de correlación lineal se presenta en la Gráfica 4.33. El mayor valor de coeficiente de correlación lineal es igual a -0.912, lo cual demuestra una correlación lineal fuerte e inversa entre las variables logaritmo natural de las concentraciones de cianuro y el tiempo. Por lo tanto la remoción de cianuro en el reactor #2 se modela como una reacción de orden  $n=1$ .

Con el orden de reacción determinado, se realiza el análisis de regresión lineal con Minitab 15, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\ln C = 0.689 - 0.5190t$$

Al comparar la ecuación obtenida con la forma  $y = b \pm mx$  se puede obtener el valor de la constante K que será la pendiente de la ecuación. El valor de la constante K para la remoción de cianuro en el reactor #2 es igual a  $-0.5190 \text{ día}^{-1}$ .

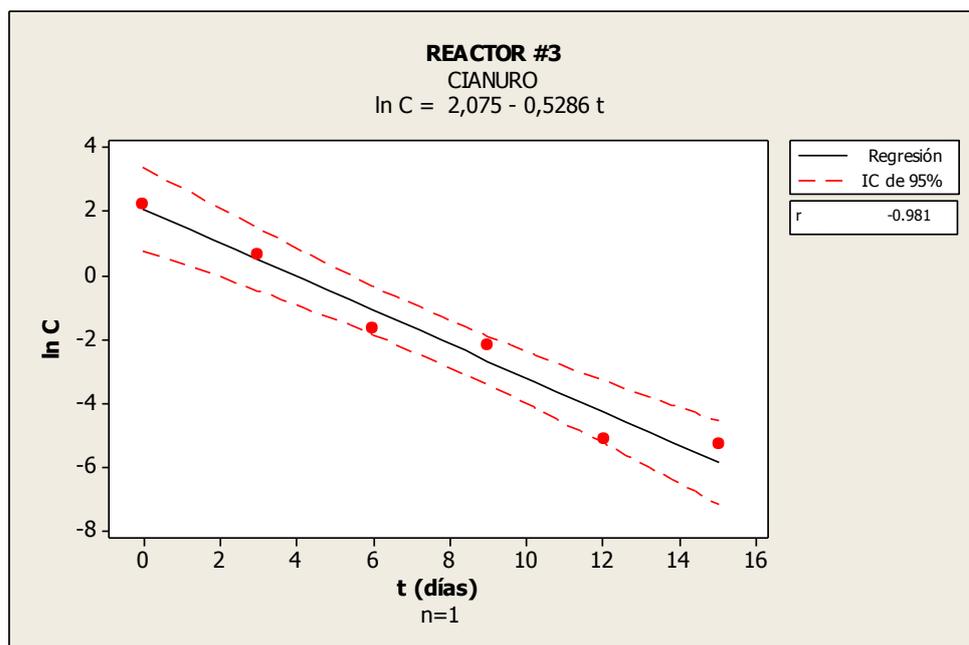
Se procede a presentar la Gráfica 4.34., que muestra las concentraciones de cianuro en el eje "y" para el reactor #3, contra el tiempo en el eje "x". Tanto la gráfica como la ecuación de regresión lineal corresponden a una reacción de orden  $n=0$ . Los datos son analizados con Minitab 15, obteniendo el valor del coeficiente de correlación lineal, igual a  $-0.759$ .



**Gráfica 4.34.** C vs. t para el cianuro en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

A continuación se encuentra la Gráfica 4.35., donde se encuentran los valores del logaritmo natural de la concentración de cianuro en el reactor #3 colocados en el eje “y” contra el tiempo en el eje “x”. La gráfica y la ecuación de regresión lineal corresponden al orden de reacción  $n=1$ . Con el análisis realizado en Minitab 15 se obtuvo el valor del coeficiente de correlación lineal, igual a -0.981.



**Gráfica 4.35.**  $\ln C$  vs.  $t$  para el cianuro en el Reactor #3.

**Fuente:** Elaborado por los autores en Minitab 15.

Al comparar los valores de los coeficientes de correlación lineal de las variables  $C$  vs.  $t$  y  $\ln C$  vs.  $t$ , se determina que el mayor coeficiente de correlación lineal es  $-0.981$ , que corresponde a la gráfica con orden de reacción  $n=1$ , con esto se demuestra que la remoción de cianuro en el reactor #3 se puede modelar con la forma de la Ec. 5 del Capítulo 2.

Con el orden de reacción ya encontrado se obtiene la ecuación de regresión lineal mediante el análisis con Minitab 15. La ecuación obtenida para la gráfica de orden  $n=1$  es:

$$\ln C = 2.075 - 0.5286t$$

La pendiente de esta recta es el valor de la constante de velocidad de reacción K, entonces para la remoción de cianuro en el reactor #3, se tiene una constante K igual a  $-0.5286 \text{ día}^{-1}$ .

A continuación se presenta la Tabla XXI, donde se resume el orden de reacción y el valor de la constante K para el contaminante cianuro en cada uno de los reactores.

**TABLA XXI**  
**Constante K para cianuro**

<b>CIANURO</b>	<b>ORDEN</b>	<b>CONSTANTE K</b>	<b>UNIDAD</b>
Reactor #1	n=1	-0.4593	día <sup>-1</sup>
Reactor #2	n=1	-0.5190	día <sup>-1</sup>
Reactor #3	n=1	-0.5286	día <sup>-1</sup>

**Fuente:** Elaborado por los autores.

Siendo la temperatura un factor importante en el funcionamiento de los humedales artificiales FS, es necesario indicar que las constantes que aquí se obtuvieron determinan la velocidad de reacción a una temperatura de 27 ° C.

#### 4.7. Especies Vegetales Acuáticas

A continuación se va a revisar algunos cambios que presentaron las especies vegetales acuáticas empleadas en el tratamiento.

Reactor #1: Lemna Minor



**Figura 4.1.** Lemna Minor después del tratamiento.

**Fuente:** Los autores.

A lo largo del tratamiento se pudo observar como algunas lentejas de agua cambiaban su tonalidad, al terminar el tratamiento la especie fue extraída del humedal artificial y se pudo constatar que ya muy pocas especies presentaban un color verde intenso. La gran mayoría estaba de color café o algo transparente.



**Figura 4.2.** Raíces de Lemna Minor después del tratamiento.

**Fuente:** Los autores.

En la Figura 4.2. se puede observar el color de la raíz de la Lemna Minor, sigue totalmente blanca como al inicio del tratamiento, en todos los especímenes retirados se observó las raíces de ese color. A fin de que los cambios mencionados sean notorios, se incluye a continuación la Figura 4.3. con el antes y después del tratamiento, para la Lemna Minor.



**Figura 4.3.** Lemna Minor antes y después del tratamiento.

**Fuente:** Los autores.

## Reactor #2: Eichhornia Crassipes



**Figura 4.4.** Manchas negras en Eichhornia Crassipes

**Fuente:** Los autores.

En la figura 4.4. se puede apreciar que en el peciolo de Eichhornia Crassipes aún inflado existen manchas, esto puede ser a causa de la absorción y acumulación de contaminantes en sus tejidos. Las manchas observadas fueron de color gris oscuro y negro.



**Figura 4.5.** Manchas blancas en Eichhornia Crassipes

**Fuente:** Los autores.

En figura 4.5., mostrada anteriormente, se evidencia la aparición de manchas de color blanco en las hojas y peciolo de la *Eichhornia Crassipes*, a diferencia de las manchas negras que se notaban dentro del tejido de la especie, esta mancha se veía como sobrepuesta al tejido.



**Figura 4.6.** Hojas y peciolo de *Eichhornia Crassipes* necróticos.

**Fuente:** Los autores.

En el día #12 del tratamiento se notó la presencia de partes necróticas en ciertos Jacintos, se encontraron tanto en hojas como en los peciolo. Se cree que esto se debe a los efectos de la toxicidad a la que se expone la especie cuando está absorbiendo y acumulando en sus tejidos los contaminantes.



**Figura 4.7.** Cosecha de *Eichhornia Crassipes* necróticos.

**Fuente:** Los autores.

En la Figura 4.7. se muestran los Jacintos que fueron retirados del reactor ya que comenzaron a presentar partes necróticas, al encontrarse estos en proceso de descomposición, lo recomendable era retirarlos del humedal artificial, puesto que al ser materia orgánica va consumir el oxígeno disuelto presente en el agua, el mismo que es necesario para el normal desarrollo de las demás especies y los microorganismos que permanecieron en el reactor.



**Figura 4.8.** Raíces de Eichhornia Crassipes.

**Fuente:** Los autores.

En la literatura revisada en el Capítulo II, se había dicho que el sistema de raíces de esta especie actuaría como un filtro, y efectivamente se pudo apreciar cierta acumulación de material retenido entre las espesas raíces de los Jacintos.

Para evidenciar el estado físico de Eichhornia Crassipes antes y después del tratamiento, se presenta la Figura 4.9.



**Figura 4.9.** Eichhornia Crassipes antes y después del tratamiento.

**Fuente:** Los autores.

### Reactor #3: Dracaena Sanderiana



**Figura 4.10.** Raíces de Dracaena Sanderiana.

**Fuente:** Los autores.

La Figura 4.10. muestra el oscurecimiento de la parte del tallo cercana a la zona de raíces, si se considera que los tallos tenían longitudes de hasta 80 cm, la parte que presentó una afectación fue aproximadamente un 5%, las raíces que al inicio del tratamiento estuvieron de color naranja, en la mayoría de las Dracaenas Sanderianas permanecieron igual a excepción de unas pocas que se tornaron grisáceas. Como se aprecia también en la imagen las hojas permanecieron intactas, entre las tres especies vegetales empleadas, fue la Dracaena Sanderiana la que permaneció en mejor estado manteniendo su lozanía todo el tiempo.

Para constatar cómo se encontraban las Dracaenas Sanderianas antes y después de ser empleadas para el tratamiento, se presenta la Figura 4.11.



**Figura 4.11.** Dracaena Sanderiana antes y después del tratamiento.

**Fuente:** Los autores

# **CAPÍTULO 5**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Como finalización de este estudio, se presentan las siguientes conclusiones, las mismas se exponen en respuesta a los objetivos que se plantearon inicialmente. En base a las observaciones y situaciones que se presentaron durante el desarrollo de la experimentación, también se adjuntan algunas recomendaciones para futuras investigaciones en este prometedor campo de los humedales artificiales.

### **5.1. Conclusiones.**

1. De acuerdo a los resultados analizados en el Capítulo 4, se puede concluir que el agua tomada en el sitio de descarga de efluente minero hacia el Río Calera presenta contaminación por metales pesados y cianuro; ya que las concentraciones que se determinaron superan los límites máximos permisibles

establecidos en la normativa. Esta conclusión se hace con la respectiva aclaración que fue un muestreo puntual el que se realizó para determinar la concentración inicial de los contaminantes. De acuerdo a la literatura revisada, los metales pesados que se han encontrado así como el cianuro tienen efectos muy dañinos y algunos irreversibles o que pueden ocasionar la muerte. También se encontró que el tratamiento de los efluentes mineros por medio de humedales artificiales es una opción muy prometedora en cuanto a la remoción de estos elementos contaminantes.

2. Luego del proceso de adaptación se seleccionaron las especies Lemna Minor, Eichhornia Crassipes y Dracaena Sanderiana, para ser implantadas en los humedales artificiales de flujo superficial, ya que debido a las características propias de cada especie presentaron un mejor comportamiento y adaptabilidad. Con estas especies seleccionadas se logró construir tres humedales artificiales de flujo superficial a escala de laboratorio, según el esquema y las dimensiones que se habían determinado.
3. Al tratar el agua tomada del sitio de descarga de efluente minero hacia el Río Calera con los humedales artificiales de flujo

superficial, se puede concluir en base al análisis de resultados que la eficiencia de remoción obtenida, fue notablemente alta, sobre todo para el cianuro se logró una eficiencia muy cercana al 100% en los tres humedales construidos.

4. Debido a que la eficiencia de remoción en los tres humedales fue bastante diferente, para el caso de arsénico y mercurio, resulta conveniente indicar en qué humedal se logró el mayor porcentaje de remoción, concluyendo que el humedal artificial de flujo superficial más efectivo para la remoción de arsénico fue el reactor #3 con la *Dracaena Sanderiana*, donde se logró una eficiencia de remoción del 65.51% y en lo que a mercurio respecta, el reactor #1 con la *Lemna Minor* fue el sistema más eficiente con una remoción del 63.38%. Aunque para el cadmio y cianuro las eficiencias de remoción obtenidas fueron cercanas en los tres humedales construidos, se concluye que el reactor #3 con la *Dracaena Sanderiana* logró la mayor eficiencia de remoción de cadmio con un 95.21 % y el reactor #2 con *Eichhornia Crassipes* fue el más eficiente para el cianuro, logrando una eficiencia de remoción de 99.97%.
5. Se concluye que por medio de un manejo estadístico de los datos obtenidos, para cada reactor a lo largo del tratamiento, fue

posible determinar el valor de la constante K para cada contaminante. Siendo las constantes de mayor valor para cada contaminante, las que se indican a continuación. El arsénico, obtuvo una constante de remoción igual a  $-0.04378 \text{ día}^{-1}$ , obtenida en el reactor # 3 con *Dracaena Sanderiana*. Para el caso del cadmio, el valor de la constante K fue igual a  $-0.1539 \text{ día}^{-1}$ , lograda también en el reactor #3. En lo que a mercurio respecta, la mayor constante de remoción que se obtuvo, fue  $-0.000081 \text{ (mg/L)/día}$  en el reactor # 3 con *Dracaena Sanderiana* y para el cianuro la constante K tuvo un valor de  $-0.5286 \text{ día}^{-1}$  en el reactor #3 con *Dracaena Sanderiana*. Se puede concluir al comparar las constantes de remoción que aquellas que se determinaron a partir de un orden de reacción con  $n=1$  son mucho mayores a la de orden  $n=0$ . Esto se debe a que un orden  $n=1$  indica un comportamiento exponencial. Así también se concluye que la velocidad de reacción, determinada por la constante K, fue mayor para el cianuro que para los demás contaminantes.

6. Al revisar las conclusiones anteriores es evidente que la *Dracaena Sanderiana* es una especie vegetal acuática recomendable, ya que no sólo propició condiciones adecuadas para lograrse la mayor remoción de dos de los contaminantes

monitoreados, sino que las mayores velocidades de reacción tuvieron lugar en el reactor #3 que contuvo esta especie.

7. La eficiencia de los humedales artificiales de flujo superficial, para remoción de contaminantes industriales está asociada a la especie vegetal acuática que ha sido implantada. Las especies Lemna Minor, Eichhornia Crassipes y Dracaena Sanderiana demostraron ser de gran capacidad para remoción de metales pesados, presentando diferencias significativas dependiendo cada metal, pero especialmente cadmio y el compuesto cianuro fueron removidos eficientemente en los 3 reactores que contuvieron las mencionadas especies.
8. El reactor que contuvo la especie vegetal Dracaena Sanderiana fue en el que todos los contaminantes monitoreados tuvieron la mayor velocidad de reacción, por lo que se puede concluir que la Dracaena Sanderiana es una especie que debe ser considerada para usarse en un humedal artificial, sus características así como sus bajos requerimientos nutricionales y de cuidado, hacen de la Dracaena Sanderiana una candidata ideal para este tipo de tratamiento. A esto se añade el valor ornamental con el que cuenta esta especie, lo que haría de un humedal artificial

que la utilice, no sólo un sistema de tratamiento sino un espacio que aporte belleza natural al entorno.

9. Si bien en esta investigación para unos pocos casos no se logró reducir la concentración de contaminante por debajo de los límites permisibles, si se logró una buena eficiencia de remoción; lo que da un indicio que si se mejora la eficiencia de remoción en los casos necesarios, se tendría un tratamiento económico que va a ayudar a remediar y mitigar los daños provocados por esta contaminación del agua con contaminantes industriales. Si el tratamiento de estas aguas provenientes de la actividad minera se realiza antes de que el efluente sea descargado al río, se estaría colaborando con un desarrollo industrial minero sustentable, ya que al evitar la contaminación del agua natural se brinda a los moradores, no sólo de la zona del Distrito minero Portovelo-Zaruma, sino de aquellos que se sirven de este río aguas abajo, la oportunidad o más bien su justo derecho de disponer de un agua libre de contaminantes peligrosos y poder ser así usada para diferentes fines como recreativo, para riego, pecuario, etc.
10. Para finalizar se concluye que los humedales artificiales son una excelente opción para remover metales pesados y cianuro. Los

mecanismos físicos, químicos y biológicos dan lugar a la remoción de los contaminantes, con procesos que ocurren de forma natural por la interacción de especies vegetales acuáticas, microorganismos y el entorno, sin requerir para su funcionamiento de energía eléctrica. Adicional cabe recalcar que se usará un recurso disponible que no ha sido utilizado para fines de tratamiento como son las especies vegetales acuáticas, por lo que si se cuenta con terreno disponible para la implementación de humedales no habrá mayor costo de inversión en el tratamiento.

11. Se logró cumplir con los objetivos planteados al inicio de esta investigación.
12. Finalmente se concluye que la hipótesis propuesta en el Capítulo I, de que los humedales artificiales de flujo superficial son útiles para la remoción de los contaminantes industriales, como metales pesados y cianuro, fue comprobada.

## 5.2. Recomendaciones.

1. Estudiar especies vegetales acuáticas propias de la zona de estudio, realizando cultivos para determinar, cuáles cumplen con las características requeridas para ser parte de un humedal artificial.
2. Emplear para los humedales artificiales especies vegetales acuáticas endógenas previamente estudiadas, a fin de sortear los efectos negativos que los factores climáticos pudieran originar en caso de usar especies vegetales exógenas.
3. No utilizar especies vegetales que proporcionen frutos. Esto podría ser un potencial peligro para las personas que pudieran cultivarlos, ya que al igual que los contaminantes se acumulan en los tejidos de raíces y tallos, también lo harán en la carne de los frutos.
4. Una vez terminado el tratamiento, analizar las especies vegetales acuáticas para determinar qué porcentaje de contaminante fue absorbido por las raíces y qué porcentaje por la parte aérea. Con ello se podrá determinar si se trata o no de una especie vegetal acuática hiperacumuladora.

5. Una vez que se han cosechado las especies vegetales acuáticas, se recomienda emplear este recurso. Las especies vegetales pueden ser incineradas y entrar a un proceso de recuperación de metales a partir de esas cenizas.
6. A fin de evaluar la eficiencia de los humedales artificiales FS en la zona de estudio, se recomienda instalar un humedal artificial FS a escala piloto, para con ello evaluar cómo las condiciones del sitio inciden en el normal desarrollo de los diferentes mecanismos físicos, químicos y biológicos que intervienen. En caso de resultar satisfactorio y conveniente se puede emplear los humedales artificiales FS a escala real para tratar el agua a ser descargada hacia el Río Calera.
7. Realizar ensayos con hierro y plomo, que si bien en la caracterización se determinó que presentan concentraciones elevadas, debido al costo de los ensayos no se monitoreó el proceso de remoción de estos contaminantes. Se recomienda, además de realizar ensayos con metales pesados y cianuro, monitorear parámetros como Nitrógeno Total, Fósforo Total, Oxígeno Disuelto, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales y pH con el fin de estudiar con mayor detalle las bondades que podría ofrecer un humedal artificial FS y si el

agua que se va a tratar ofrece condiciones adecuadas para las especies vegetales propias de la zona.

8. Realizar un número mayor de ensayos para cada contaminante que se vaya a remover, con el propósito de tener resultados más representativos al trabajar con un valor promedio.
9. Para el caso de arsénico y mercurio, realizar nuevas investigaciones con las mismas especies vegetales acuáticas empleadas en este estudio, en las que se evalúe la influencia de diferentes valores de pH en los mecanismos químicos que intervienen para la remoción de estos metales pesados. El ir evaluando como influye el pH permitirá determinar en qué punto se logra una mayor remoción de cada uno de estos metales, ya que existen antecedentes que indican que estas especies vegetales acuáticas si son acumuladoras de estos metales pesados.
10. Profundizar en la investigación de este tratamiento para aguas residuales o remediación de aguas contaminadas, con humedales artificiales FS, a fin de optimizar su funcionamiento para lograr mayores eficiencias y determinar cuáles son los parámetros más críticos que intervienen en el diseño.

11. Realizar posteriores investigaciones para experimentar con diferentes tiempos de retención hidráulico, así como variar la longitud de los reactores para acercarse más a las condiciones de un reactor de flujo a pistón.
  
12. Incentivar el uso de humedales artificiales para dar tratamiento a los efluentes industriales mineros antes de ser vertidos a las aguas del Río Calera, ya que a pesar de las prohibiciones, según los medios de comunicación y testimonios de moradores, aún se sigue descargando los efluentes directamente a las aguas del río por parte de algunas plantas de procesamiento del sector.

# **ANEXOS**

# **ANEXO A**

**REGISTRO DE pH y TEMPERATURA.**

		Día 1		Día 2		Día 3		Día 4		Día 5	
		pH	T(°C)								
Reactor #1	10:00	7.9	27	7.8	27	7.8	27.5	7.9	25	7.9	25
	22:00	7.7	28	7.7	26	7.7	26	7.9	26	7.8	26
Reactor #2	10:00	7.8	27	7.6	28	7.5	28	7.8	25	7.8	25
	22:00	7.6	28	7.5	26	7.5	26	7.6	26	7.7	26
Reactor #3	10:00	8.2	27	8	26.5	8.1	26.5	8.1	25	8.2	25
	22:00	8.1	28	8	26	8	26	8.2	26	8.1	26
		Día 6		Día 7		Día 8		Día 9		Día 10	
		pH	T(°C)								
Reactor #1	10:00	7.8	27	7.8	27	7.7	26.5	7.7	27	7.8	27
	22:00	7.7	27	7.8	26	7.7	27	7.7	26.5	7.9	25
Reactor #2	10:00	7.8	27	7.7	27	7.6	27	7.7	27	7.8	26.5
	22:00	7.6	27.5	7.7	28	7.9	29	7.8	26	7.6	27
Reactor #3	10:00	8.1	27	8.1	27	8.2	27.5	8.1	27	8	27
	22:00	8.1	28	8.2	28	8.2	28	8	26.5	8.2	25
		Día 11		Día 12		Día 13		Día 14		Día 15	
		pH	T(°C)								
Reactor #1	10:00	7.7	29	7.8	27	7.7	26.5	7.7	27	7.8	27
	22:00	7.8	27.5	7.7	26.5	7.9	27	7.6	26	7.7	27.5
Reactor #2	10:00	7.7	27	7.6	27	7.8	27.5	7.6	28	7.8	27
	22:00	7.6	28	7.8	26	7.7	27	7.6	26	7.6	27.5
Reactor #3	10:00	8.2	27	8.1	27	8.1	28	8	26.5	8.1	27
	22:00	8.1	27.5	8	26.5	8	27	8.1	26	8.2	28

# **ANEXO B**

**RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO**

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO

Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10

Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425

Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya

Tipo de Industria

Guayaquil, 28 DE OCTUBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 16/10/14 20:30 Provincia El Oro - Sector El Pache  
 Fecha y Hora de Recepción: 17/10/14 10:40  
 Punto e Identificación de la Muestra: Agua del Rio Calera.  
 Norma Técnica de muestreo: N/A  
 Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
 Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
 Muestreador: Cliente  
 Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUIMICO MARCOS, Cía. Ltda.

 LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
 ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

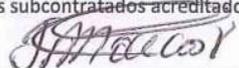
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	13,300	---	mg/l	4500-CN C	23/10/14 KV
Nitrogeno total (1)	8,49	---	mg/l	4500 N C	20/10/14 AM
Potencial de Hidrogeno (3)	10,07	0,08	-	PEE-GQM-FQ-01	17/10/14 AM
Fosforo Total (1)	2,41	---	mg/l	4500 P	17/10/14 AM

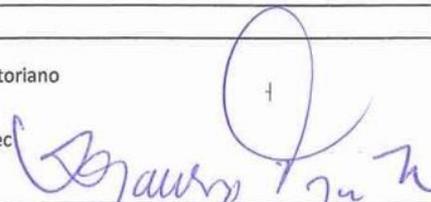
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	1,1880	0,1782	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	22/10/14 JV
Cadmio (3)	0,0110	0,0022	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	22/10/14 JV
Hierro	0,6636	0,1858	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	22/10/14 JV
Mercurio (1)	0,00119	0,0002 0	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	22/10/14 JV
Plomo (3)	0,0025	0,0005	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	22/10/14 JV

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)



Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico



Q. F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

**Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.**  
**Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.**  
**Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.**

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
 Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)

Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 16 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 04/12/14 20:00 Provincia de El Oro - Zaruma - Rio Calera  
Fecha y Hora de Recepción: 05/12/14 10:12  
Punto e Identificación de la Muestra: Agua del Rio Calera.  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUÍMICO MARCOS S.A. LTDA.

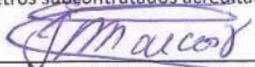
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

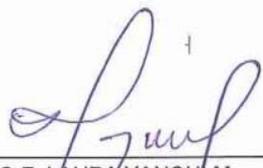
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	9,300	---	mg/l	4500-CN C	15/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,4190	0,0629	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	09/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0167	0,0033	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	09/12/14 AL
Mercurio (3)	< 0,00002	---	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	09/12/14 AL
Plomo (3)	0,0029	0,0006	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	09/12/14 AL

-----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

  
Q. F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 7 DE ENERO DEL 2015

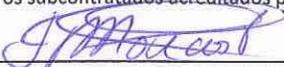
Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 21/12/14 21:00 Zaruma - El Oro  
Fecha y Hora de Recepción: 22/12/14 11:24  
Punto e Identificación de la Muestra: Muestra inicial  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

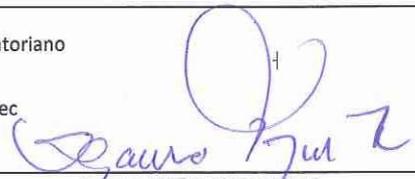
GRUPO QUIMICO MARCOS Cia. Ltda.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,2328	0,0349	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Mercurio (3)	0,00142	0,0002 4	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

  
Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 17 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 09/12/14 11:30 Rio Calera - Provincia del Oro  
Fecha y Hora de Recepción: 09/12/14 12:40  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 1  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUAS NATURALES  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

GRUPO QUIMICO MARCOS Cía. Ltda.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,162	---	mg/l	4500-CN C	15/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,5240	0,0786	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
Cadmio (3)	0,0147	0,0029	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
Mercurio (3)	0,00099	0,0001	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
		7			

-----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

  
Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO

Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10

Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425

Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya

Tipo de Industria

Guayaquil, 17 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 09/12/14 11:30 Rio Calera - Provincia del Oro

Fecha y Hora de Recepción: 09/12/14 12:44

Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 2

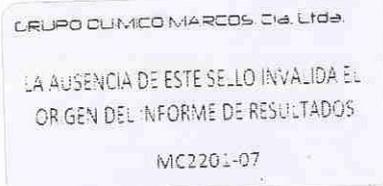
Norma Técnica de muestreo: N/A

Matriz de la muestra: AGUAS NATURALES

Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO

Muestreador: Cliente

Tipo de Muestreo: No Aplica



Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,152	---	mg/l	4500-CN C	15/12/14 JV
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,4856	0,0728	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
Cadmio (3)	0,0138	0,0028	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
Mercurio (3)	0,00117	0,0002 0	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano

2: Parámetros subcontratados no acreditados

3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación

 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)


 Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
 Director Técnico



 Q. F. LAURA YANQUI M.  
 Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
 Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
 Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule

Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)

Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 17 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 09/12/14 11:30 Rio Calera - Provincia del Oro  
Fecha y Hora de Recepción: 09/12/14 12:40  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 3  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUAS NATURALES  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

GRUPO QUÍMICO MARCOS, C.A. LDA.

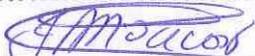
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	1,960	---	mg/l	4500-CN C	15/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,1074	0,0161	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
Cadmio (3)	0,0033	0,0007	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER
Mercurio (3)	0,00186	0,0003 2	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	15/12/14 ER

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)



Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico



Q. F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 24 DE DICIEMBRE DEL 2014

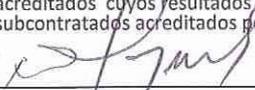
Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 12/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 12/12/14 12:34  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 1  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUAS NATURALES  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

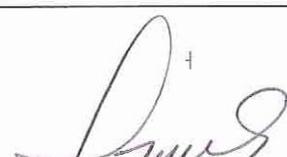
GRUPO QUIMICO MARCOS Cía. Ltda.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,199	---	mg/l	4500-CN C	16/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,4468	0,0670	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0052	0,0010	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio (3)	0,00023	0,0000 4	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano  
2: Parámetros subcontratados no acreditados  
3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación  
4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director/Tecnico

  
Q. F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO

Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10

Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425

Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya

Tipo de Industria

Guayaquil, 24 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 12/12/14 11:30 Guayaquil  
 Fecha y Hora de Recepción: 12/12/14 12:34  
 Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 2  
 Norma Técnica de muestreo: N/A  
 Matriz de la muestra: AGUAS NATURALES  
 Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
 Muestreador: Cliente  
 Tipo de Muestreo: No Aplica

GRUPO QUIMICO MARCOS, Cía. Ltda.

LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	< 0.003	---	mg/l	4500-CN C	16/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,3923	0,0588	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0056	0,0011	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio (3)	0,00027	0,0000 5	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
 Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
 Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 24 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 12/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 12/12/14 12:34  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 3  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUAS NATURALES  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

GRUPO QUÍMICO MARCOS Cía. Ltda.

LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS.

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,189	---	mg/l	4500-CN C	16/12/14 JV
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,0645	0,0097	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0009	0,0002	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio (3)	< 0,00002	---	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano  
2: Parámetros subcontratados no acreditados  
3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación  
4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 24 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 15/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 15/12/14 12:32  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 1  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUÍMICO MARCOS Cía. Ltda.

LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,191	---	mg/l	4500-CN C	16/12/14 JV
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,4559	0,0684	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0016	0,0003	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio	0,03256	0,0055 4	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

-----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros subcontratados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 24 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 15/12/14 11:35 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 15/12/14 12:34  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 2  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUIMICO MARCOS CIA. LTDA.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,003	---	mg/l	4500-CN C	16/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,3887	0,0583	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0028	0,0006	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio (3)	0,00045	0,00008	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO

Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10

Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425

Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya

Tipo de Industria

Guayaquil, 24 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 15/12/14 11:40 Guayaquil  
 Fecha y Hora de Recepción: 15/12/14 12:34  
 Punto e Identificación de la Muestra: Reactor # 3  
 Norma Técnica de muestreo: N/A  
 Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
 Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
 Muestreador: cliente  
 Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUIMICO MARCOS Cía. Ltda.

LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,115	---	mg/l	4500-CN C	16/12/14 JV
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,1279	0,0192	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	< 0,0004	---	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio (3)	0,00093	0,0001 6	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule

Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)

Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 30 DE DICIEMBRE DEL 2014

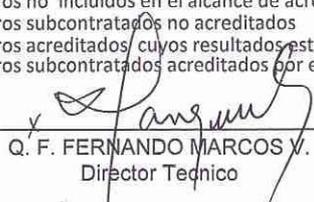
Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 18/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 18/12/14 12:35  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor #1  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

GRUPO QUIMICO MARCOS, C.A. Ltda.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,007	---	mg/l	4500-CN C	20/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,4600	0,0690	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0026	0,0005	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL
Mercurio	0,00645	0,0011 0	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	23/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados, cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
 Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
 Director Técnico

  
 Q.F. LAURA YANQUI M.  
 Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 30 DE DICIEMBRE DEL 2014

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 18/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 18/12/14 12:35  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor #2  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

GRUPO QUÍMICO MARCOS S.A. Ltda.

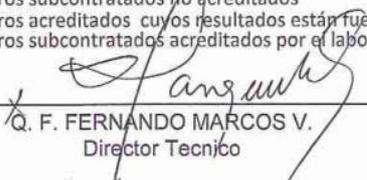
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

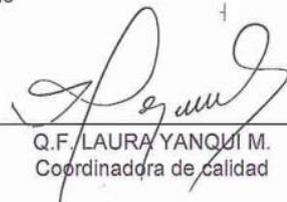
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,004	---	mg/l	4500-CN C	20/12/14 JV
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,3997	0,0600	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	24/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0056	0,0011	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	24/12/14 AL
Mercurio (3)	< 0,00002	---	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	24/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

  
Q. F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de Calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 30 DE DICIEMBRE DEL 2014

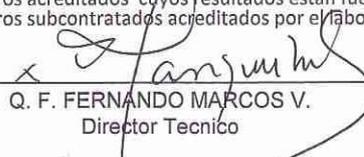
Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 18/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 18/12/14 12:35  
Punto e Identificación de la Muestra: Reactor #3  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: Cliente  
Tipo de Muestreo: No Aplica

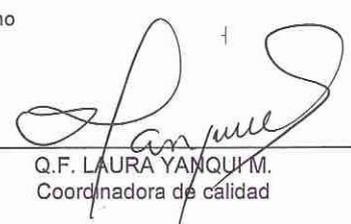
GRUPO QUIMICO MARCOS, Cia. Ltda.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,006	---	mg/l	4500-CN C	20/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,1533	0,0230	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	24/12/14 AL
Cadmio (3)	0,0019	0,0004	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	24/12/14 AL
Mercurio (3)	< 0,00002	---	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	24/12/14 AL

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
 Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
 Director Técnico

  
 Q. F. LAURA YANQUI M.  
 Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 6 DE ENERO DEL 2015

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 21/12/14 11:30 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 22/12/14 11:24  
Punto e Identificación de la Muestra: M 5 - Reactor # 1  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUIMICO MARCOS Cia. Ltda.

LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,004	---	mg/l	4500-CN C	30/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,3899	0,0585	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Cadmio (3)	0,0023	0,0005	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Mercurio (3)	0,00052	0,0000 9	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/09999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 6 DE ENERO DEL 2015

Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 21/12/14 11:35 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 22/12/14 11:24  
Punto e Identificación de la Muestra: M 5 - Reactor # 2  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

GRUPO QUIMICO MARCOS Cía. Ltda.

LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS

MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	< 0,003	---	mg/l	4500-CN C	30/12/14 JV
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,3891	0,0584	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Cadmio (3)	0,0026	0,0005	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Mercurio (3)	0,00082	0,0001 4	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permisible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

**COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO**

Representante Legal: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Urbanización Villa España, Ciudadela Valencia Mz 2228 V10  
Guayaquil, Tel. 0981836527/0999178425  
Atención: Sr. Ramiro Coello Montoya  
Tipo de Industria

Guayaquil, 6 DE ENERO DEL 2015

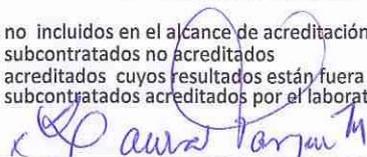
Fecha, Hora y lugar de Muestreo: 21/12/14 11:40 Guayaquil  
Fecha y Hora de Recepción: 22/12/14 11:24  
Punto e Identificación de la Muestra: M 5 - Reactor # 3  
Norma Técnica de muestreo: N/A  
Matriz de la muestra: AGUA NATURAL RIO  
Muestreado por: COELLO MONTOYA RAMIRO ALBERTO  
Muestreador: cliente  
Tipo de Muestreo: Simple

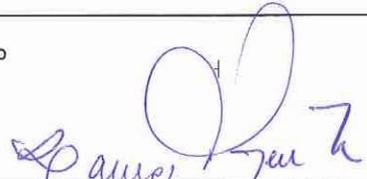
GRUPO QUIMICO MARCOS CIA. LDA.  
LA AUSENCIA DE ESTE SELLO INVALIDA EL  
ORIGEN DEL INFORME DE RESULTADOS  
MC2201-07

Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>INORGANICOS NO METALES:</b>					
Cianuro Total (1)	0,005	---	mg/l	4500-CN C	30/12/14 JV
Parámetro	Resultado	U K=2	Unidades	Método Analítico	Analizado
<b>METALES:</b>					
Arsenico	0,1445	0,0217	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Cadmio (3)	0,0008	0,0002	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER
Mercurio (3)	0,00086	0,0001 5	mg/l	PEE-GQM-FQ-33	05/01/15 ER

----	No. Aplica	N.E.	No Efectuado	Método Analítico: Standard Methods 2012, 22 th edition
< LD	Menor al Límite Detectable	L.M.P.	Límite Máximo Permissible	
U	Incertidumbre	P.E.E.	Procedimiento específico de ensayo de GQM	

- 1: Parámetros no incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano
- 2: Parámetros subcontratados no acreditados
- 3: Parámetros acreditados cuyos resultados están fuera del alcance de acreditación
- 4: Parámetros subcontratados acreditados por el laboratorio subcontratista; ver alcance en [www.oae.gob.ec](http://www.oae.gob.ec)

  
Q. F. FERNANDO MARCOS V.  
Director Técnico

  
Q.F. LAURA YANQUI M.  
Coordinadora de calidad

Los resultados de este informe de ensayo solo son aplicables a las muestras analizadas.  
Este informe de ensayo no deberá reproducirse más que en su totalidad, con autorización escrita de G.Q.M.  
Las muestras serán retenidas por 7 días a partir de la fecha de entrega de resultados.

Parque Industrial California 2 Bloque D-41 Km. 11 1/2 vía a Daule  
Teléfonos 2-103390(2) / 2-103825(35) / 0998-286653

[www.grupoquimicomarcos.com](http://www.grupoquimicomarcos.com)  
Guayaquil - Ecuador

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aduvire, O., Baretino, D. y López Pamo, E. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113(1), p. 9. Recuperado el 30 de diciembre de 2014, de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/mina-pasivos.pdf>
- [2] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (2012, septiembre). *Cadmio* (p. 1). Recuperado el 8 de noviembre de 2014, de: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts5.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.pdf)
- [3] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (2007a, agosto). *Resumen de salud pública: Arsénico* (p. 1). Recuperado el 8 de noviembre de 2014, de: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs2.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.pdf)

- [4] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (2006a, febrero). *Evaluación de los cangrejos terrestres* (p. 12). Recuperado el 23 de noviembre de 2014, de: <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/pha/IsladeViequesBombingRange/ViequesLandCrabHealthConsultationUpdate-s.pdf>
- [5] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (1999, marzo). *Mercurio* (p. 1). Recuperado el 13 de noviembre de 2014, de [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs46.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs46.pdf)
- [6] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (2007b, agosto). *Resumen de salud pública: Plomo* (pp. 1-3). Recuperado el 8 de noviembre de 2014, de: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs13.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.pdf)
- [7] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (1997, septiembre). *Cianuro* (p. 1). Recuperado el 11 de noviembre de 2014, de: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts8.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts8.pdf)
- [8] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ATSDR. (2006b, julio). *Resumen de salud pública: Cianuro* (pp. 1 y 4).

Recuperado el 12 de noviembre de 2014, de:  
[http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs8.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs8.pdf)

[9] Aguado Alonso, J. (2013, mayo 16). Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales: Conceptos e historia. [web log]. Recuperado el 8 de octubre de 2014, de:  
<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891#comments>.

[10] Aguirre, F., Amaya, G., Marchevsky, N., Mas, M. y Torres, F. (s.f.). *Proceso de destrucción de complejos cianurados*. Recuperado el 27 de diciembre de 2014, de: <http://www.fcai.uncu.edu.ar/upload/14amtc-mas-unlp.pdf>

[11] Alvarado-De la Peña, A. I., Antuna, D. M., García-Vargas, A., Gonzalez-Valdez, L.S., Jaquez-Matas, V. S., Orona-Meza, F., Quintos-Escalante, M., Reyes-Navarrete, M. G. y Vásquez-Alarcón, E. C. (2012). *Efectos a la salud por la ingesta crónica de arsénico en agua* (p. 5). Recuperado el 2 de enero d 2014, de:  
<http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8170/LSGVarvidsupra2012.pdf?sequence=1>

- [12] Angarita Hernández, J. P. (2010, septiembre). *Estimación del balance hídrico anual, en el humedal artificial del Tancat de la Pipa, con apoyo de modelos matemáticos de calidad de aguas; para contaminantes conservativos*. Tesina de máster, Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. (pp. 23 y 29)
- [13] Aquabase.org (2002a). *Plante: Eichhornia Crassipes*. Recuperado el 22 de noviembre de 2014, de: <http://www.aquabase.org/plant/view.php3?id=136&desc=Eichhornia-Crassipes>.
- [14] Aquabase.org (2002b). *Plante: Dracaena Sanderiana*. Recuperado el 22 de noviembre de 2014, de: <http://www.aquabase.org/plant/view.php3?id=84&desc=Dracaena-Sanderiana>
- [15] Arroyave, M. P. (2004, febrero). La lenteja de agua (Lemna Minor L.): Una planta acuática promisorio. *Revista EIA: Escuela de Ingeniería de Antioquia (Medellín)*, (1), pp. 34 y 35. Recuperado el 20 de noviembre de 2014, de: <http://revista.eia.edu.co/articulos1/3.pdf>

- [16] Aslam, J., Mujib, A. y Prasad Sharma, M. (2013, enero). In vitro micropropagation of *Dracaena Sanderiana* Sander ex Mast: An important indoor ornamental plant. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1), p. 63. doi: 10.1016/j.sjbs.2012.11.005
- [17] Báez Ramírez, O. A., Gaytán Oyarzún, J. C., Prieto García, F., Scoot, W. y Zúñiga Estrada, A. (2006). Acumulación, toxicidad y teratogénesis provocada por presencia de arsénico en aguas en el pez cebra (*Danio rerio*). *Revista Aquatic*, (24), p. 73. Recuperado el 16 de noviembre de 2014, de: <http://www.revistaaquatic.com/aquatic/art.asp?t=p&c=197>
- [18] Barrera-Godínez, J. A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. C., González-Sandoval, M. R., Moeller-Chávez, G., Ramírez-Camperos, E. y Ruiz-López, V. (2010). Remoción de Cd y Zn de una corriente acuosa de una empresa minera usando humedales artificiales. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1), p. 32. Recuperado el 20 de noviembre de 2011, de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48215094004>
- [19] Beura, S., Jagadev, P. N. y Samal, P. (2007). Preliminary studies of in vitro cloning of *Dracaena* (*Dracaena Sanderiana*) [Abstract]. *Acta*

*Horticulturae*, 1(760). Recuperado el 21 de noviembre de 2014, de:  
[http://www.actahort.org/books/760/760\\_31.htm](http://www.actahort.org/books/760/760_31.htm)

[20] Bonilla Dominguez, F., Izurrieta Ruiz, E., Mendoza Gamez, G. y Paz Sánchez, A. (1979). Curso de tratamiento de aguas residuales (p. 14 )  
*VI Jornada de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México y Colegio de Ingenieros Civiles del Guayas, Guayaquil, Ecuador.*

[21] Bryan Arana, C.; Ramírez, O.; Ribera López, C.; Rodríguez, S. (1976).  
Conjunto tecnológico de prácticas para la producción de algunas  
Dracaenas. *Estación Experimental Agrícola*, (98), p. 10.

[22] Bulc, T. G., Vrhovšek, D. y Kukanja, V. (1996, abril). Constructed  
wetland (CW) for industrial waste water treatment. *Water Research*,  
30(10), pp. 2287-2292. doi: 10.1016/0043-1354(96)00114-5

[23] Calle J., Calle Arévalo L., Castillo Cevallos, X., Rodríguez Manchay L.  
y Sánchez A. (2014). *Estudio de Impacto Ambiental del mineraducto  
del Distrito minero Zaruma-Portovelo* (p. 61) Recuperado el 10 de  
enero de 2015, de:

<https://maecalidadambiental.files.wordpress.com/2014/09/eia-mineraducto.pdf>

- [24] Camacho, J. V., Martín, N. y Sanz, J. M. (s.f.) *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos* (pp. 3 y 4). 9º Congreso Nacional del Medio Ambiente. La Mancha, España.
- [25] Canal 21. (2011). *Contaminación de río Tumbes Canal 21 Tumbes*. [Archivo de video]. Recuperado el 18 de diciembre de 2014, de: <https://www.youtube.com/watch?v=wgVhzpJpHxs>
- [26] Castro de Esparza, M. L. (2006, junio). *Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública*. En Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Coord.), *International Congress: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. México.
- [27] Celis Hidalgo, J., Junod Montano, J. y Sandoval Estrada, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1), p. 18. Recuperado el 22 de noviembre de 2014, de: <http://www.ubiobio.cl/theoria/v/v14/a2.pdf>

- [28] Cristobal, M. y Lacuesta, C. (2013). *Eficiencia de tres Macrófitas en la remediación de las aguas del arroyo Miguelete* (p. 8). Feria Nacional de Clubes de Ciencia. Montevideo, Uruguay.
- [29] Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados* (Tomo 2, p. 588). Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill. ISBN: 958-4-0045-9
- [30] Cubillos, A. (s.f.). *Parámetros y características de las aguas residuales* (pp. 2-5). Recuperado el 7 de octubre de 2014, de: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan2/011643/011643-09.pdf>
- [31] Curt Fernández de la Mora, M. D. (2005). Macrófitas de interés en fitodepuración. En J. Fernández González (Coord.). *Manual de fitodepuración: Filtros de macrófitas en flotación* (pp. 102-104). Lorca, España: Ayuntamiento de Lorca.
- [32] Díaz Álvarez, J. (2013). *Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el Municipio de Marmato - Caldas*. Tesis de maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia. (p. 73)

- [33] Dorado Valiño, M., Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Sanz García, J. y Villar Fernández, S. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. *Madrid+d*, 2, pp. 10-12. Recuperado el 30 de enero de 2015, de: [http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2\\_tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)
- [34] Ecuavisa. (2013). *Contaminación de río Tumbes por Dante Danilo*. [Archivo de video]. Recuperado el 18 de diciembre de 2014, de: <https://www.youtube.com/watch?v=wgVhzpJpHxs>
- [35] Engler Heinrich, G. (2011). Bambú de la suerte. *En Enciclopedia Cubana en la Red*. Recuperado el 19 de noviembre de 2014, de: [http://www.ecured.cu/index.php/Bamb%C3%BA\\_de\\_la\\_suerte](http://www.ecured.cu/index.php/Bamb%C3%BA_de_la_suerte)
- [36] Environmental Protection Agency EPA. (2000, septiembre). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo superficial* (p. 1). Washington D. C., Estados Unidos.
- [37] Español Cano, S. (2001, septiembre). *Toxicología del mercurio. Actuaciones preventivas en sanidad laboral y ambiental* (pp. 3 y 5). Jornada Internacional sobre el Impacto Ambiental del Mercurio

Utilizado por la Minería Aurífera Artesanal en Iberoamérica. Lima, Perú.

- [38] Fernández Galán M. A., González Hurtado, J. A., López López, R. M. y Martín Núñez, G. (2001, julio). Anemia secundaria a intoxicación por plomo: Nuestra experiencia a propósito de 12 casos. *Revista Clínica Español*, 201(7). Recuperado el 30 de diciembre de 2014, de: <http://www.revclinesp.es/en/anemia-secundaria-intoxicacion-por-plomo-/articulo/13015708/>
- [39] Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26(1), pp. 150-151. doi: 10.4321/S1137-66272003000200008.
- [40] Flores Campoverde, E. D.; Jaramillo Jumbo M. C. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de especies vegetales Lemna Minor (Lenteja de agua), y Eichhornia Crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- [41] Frers, C. (2008). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental*, 11, pp. 303 y 305.

- [42] García González, F., García Martín, M. A. y Heras Ballesteros, M. C. (1995). Quelantes del hierro: Situación actual y perspectivas terapéuticas. *Sociedad Española de Farmacia Hospitalaria*, 19(1), p. 1. Recuperado el 23 de noviembre de 2014, de: [http://www.sefh.es/revistas/vol19/n6/323\\_329.PDF](http://www.sefh.es/revistas/vol19/n6/323_329.PDF)
- [43] García Trujillo, Z. M. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- [44] Gessner, T. P., Kadlec, R. H. y Reaves, R. P. (2005, noviembre). Wetland remediation of cyanide and hydrocarbons. *Ecological Engineering*, 25(4), pp. 458-459. doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.07.015
- [45] Guadalupe Gómez, E. y Llagas Chafloque, W. A. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica*, 9(17), pp. 87-90.

- [46] Guerrero, D. I. (2013). *Diagnóstico ambiental de las descargas mineras líquidas y sólidas, en los recursos hídricos superficiales y subterráneas del cantón Portovelo*. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. (pp. 23–31 y 41–50).
- [47] Hadad, H. R. y Maine, M. A. (2008). *Utilización de humedales construidos para el tratamiento de efluentes industriales*. Com. Muse. Prov. Cs. Nat. "Florentino Ameghino", 14, p. 11.
- [48] Hagelstein, K., Logsdon, M. y Mudder, T. (2001, abril). *El manejo de cianuro en la extracción de oro* (p. 27). Ontario, Canadá: Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente. ISBN: 1-895720-35-4
- [49] Hoffmann, H., Platzer, C., Von Muench, E. y Winker, M. (2011, febrero). *Revisión técnica de humedales artificiales de flujo Subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas* (p. 15 y 19). Eschborn, Alemania: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania.

- [50] Infoagro (s.f.) *El cultivo de la Dracaena*. Recuperado el 24 de noviembre de 2014, de: [http://www.infoagro.com/flores/plantas\\_ornamentales/dracena.htm](http://www.infoagro.com/flores/plantas_ornamentales/dracena.htm)
- [51] Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico - INIGEMM (2014). *Informe de rendición de cuentas 2013*. (p. 31)
- [52] Invasive Species Specialist Group (Comp.). (2006). *Eichhornia Crassipes (aquatic plant)*. Recuperado el 22 de noviembre de 2014, de: Global Invasive Species Database: <http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?si=70&fr=1&sts=sss&lang=EN>
- [53] Isch, E. (2011). Contaminación de las aguas y políticas para enfrentarla (pp. 7 y 10-28). Foro de los recursos hídricos coordinado por el consorcio CAMAREN. Quito, Ecuador.
- [54] Johnson Restrepo, B., Olivero Verbel, J. (2002). *El lado gris de la minería del oro: La contaminación con mercurio en el norte de Colombia* (p. 44). Cartagena, Colombia: Editorial Universitaria. ISBN: 958-33-3885-0

- [55] Lahora Cano, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La edar de los gallardos (Almería). En M. Paracuellos Rodríguez (Ed.) *Ecología, Manejo y Conservación de los Humedales* (p. 99). España. ISBN: 84-8108-276-7
- [56] Landeta, C. (2014). *Términos de referencia para la adquisición e instalación de los componentes para el proyecto de video vigilancia del distrito Zaruma - Portovelo conjuntamente con el ECU-911* (p. 2). Quito, Ecuador.
- [57] Lau, A. y Murphy T. (2008). Manejo de valores atípicos. *ASTM Standardization News*. Recuperado el 30 de enero de 2015, de: [http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND08/datapoints\\_spnd08.html](http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND08/datapoints_spnd08.html)
- [58] Marín Alvarado, S. A. (2011). *Aporte dinámico de cianuro, mercurio, plomo y arsénico en los cauces naturales de los ríos Calera y Amarillo en el distrito minero Portovelo – Zaruma*. Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. (pp. 23–31 y 41–50).
- [59] Márquez Reyes, J. M. (2013, noviembre). *Desarrollo, optimización e integración de tecnologías sustentables a base de un biorreactor*

*empacado de flujo ascendente y un humedal artificial de flujo horizontal Subsuperficial para el tratamiento de agua contaminada con cromo y plomo.* Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. (pp. 23-26).

[60] Márquez Romegialli, F. (s. f.). *Introducción a la Toxicología Ambiental* (pp. 95-96). Concepción, Chile.

[61] Mazza, G. (s. f.). *Dracaena Sanderiana*. Recuperado el 26 de noviembre de 2014, de: <http://www.photomazza.com/?Dracaena-Sanderiana&lang=es>

[62] Mendiola, J., Mínguez-Alarcón, L. y Torres-Cantero A. M. (2014). Calidad seminal y toxicidad de metales pesados y plaguicidas. *Salud Reproductiva Y Medio Ambiente*, 14(1), p. 29.

[63] Menéndez Valderrey, J. L. (2006, 9 septiembre). *Lemna Minor I*. *Asturnatura.com*, (91). Recuperado el 26 de noviembre de 2014, de: <http://www.asturnatura.com/especie/Lemna-Minor.html>

- [64] Metcalf y Eddy, Inc. (1995a). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (3ra Ed., Vol. 1, pp. 1, 63). Madrid, España: McGraw-Hill. ISBN: 84-481-1727-1
- [65] Metcalf y Eddy, Inc. (1995b). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (3ra Ed., Vol. 2, pp. 1056-1063, 1138-1141). Madrid, España: McGraw-Hill. ISBN: 84-481-1606-2
- [66] Meuleman, A. F. M. y Verhoeven, J. T. A. (1999, enero). Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering*, 12(1-2), p. 7. doi: 10.1016/S0925-8574(98)00050-0
- [67] Moran, R. (s.f.). El cianuro en la minería: Algunas observaciones sobre la química, toxicidad y análisis de las aguas asociadas con la minería. *Colección Científica-Técnica*, (pp. 3, 9 y 10).
- [68] Morató J., Pires Carneiro, A. y Subirana A. (s. f.). Crisis del agua. En J Morató. y G. Peñuela. (Eds.). *Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas* (pp. 15, 16, 18 y 19). ISBN: 978-958-44-5307-5
- [69] Muñoz, V. (2013, marzo 7). *Mecanismos de fitorremediación*. [web log]. Recuperado el 26 de diciembre de 2014, de:

<http://colaboraconambien.blogspot.com/2013/03/mecanismos-de-fitorremediacion.html?view=flipcard>

[70] Murillo Carrión, R. (2000). Zaruma, historia minera Identidad en Portovelo (Primera Ed., p. 13). Quito: Abya-Yala. ISBN: 9978-04-620-8

[71] Nizama Merino, D. A. (2014, junio 27). *Contaminación de Río Tumbes* (p. 4). Recuperado el 10 de octubre de 2014, de SCRIBD: <http://es.scribd.com/doc/231513861/Contaminacion-Del-Rio-Tumbes>

[72] Nordberg, G. (s.f.). Metales: Propiedades químicas y toxicidad. En *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo* (pp. 63.22 y 63.23).

[73] Pérez González, G. (2005, abril). *Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados: Aplicaciones y limitaciones de la fraccionación en la determinación de gradientes de polución*. Tesis doctoral, Departamento de Química, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España. (p. 25)

[74] Pita Fernández S. y Pértega Díaz, S. (2001). Relación entre las variables cuantitativas. *Cad Aten Primaria*, 4, p. 5. Recuperado el 29 de enero de 2015, de:

[http://www.fisterra.com/mbe/investiga/var\\_cuantitativas/var\\_cuantitativas2.pdf](http://www.fisterra.com/mbe/investiga/var_cuantitativas/var_cuantitativas2.pdf)

- [75] Qian, J.-H., Terry, N., Yu, M., Zayed, A. y Zhu, Y.-L. (1999). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: III. Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species. *Journal of Environmental Quality*, 28(5). doi: 10.2134/jeq1999.00472425002800050009x
- [76] Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de aguas residuales* (pp. 10, 24-25). España: Reverte S. A. ISBN: 84-291-7975-5
- [77] Ramírez, A. (2008). Intoxicación ocupacional por mercurio. *Anales de la Facultad de Medicina*, 69(1), pp. 47 y 49.
- [78] Ramos Olmos, R., Sepúlveda Marqués, R. y Villalobos Moreto, F. (2003). *El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis* (pp. 73 y 80). México: Plaza y Valdés. ISBN: 970-722-141-0
- [79] Rodríguez Celma, J. (2011). *Respuesta radicular a la deficiencia de Fe y la toxicidad por Cd*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad Zaragoza, Zaragoza, España. (p. 5)

- [80] Rodríguez García, I. (2003). *Constructed wetlands use for cyanide and metal removal from gold mill effluents*. Recuperado el 27 de diciembre de 2014, de: [http://www2.lwr.kth.se/Publikationer/PDF\\_Files/LWR\\_EX\\_03\\_2.PDF](http://www2.lwr.kth.se/Publikationer/PDF_Files/LWR_EX_03_2.PDF)
- [81] Romero, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño* (3ra Ed., pp. 18, 37, 68, 260, 267, 268, 896-898). Colombia: Nuevas Ediciones Ltda. ISBN: 958-8060-13-3
- [82] Ruiz, J. I. (s. f.). *Metales tóxicos pesados su efecto sobre la salud* (pp. 275, 279). Departamento de Química Inorgánica, Universidad del País Vasco, España.
- [83] Sheoran, A. S. y Sheoran, V. (2006, febrero). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*, 19(2), pp. 107-112. doi: 10.1016/j.mineng.2005.08.006
- [84] Tapia Amores, C. M. (2009). *Ensayos de descontaminación de aguas residuales, mediante la utilización de plantas acuática, en sistema de pantano*. Tesis de pregrado, Escuela de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

- [85] Tejeda González, J. C. (2010). *Diseño de un humedal para la remoción de Cd, As y Cr con planas de Typha Latifolia (Espadaña)*. Tesis de maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, San Luis de Potosí, México. (p. 5, 6 y 24)
- [86] UNESCO. (2009). Hecho 36: Aguas residuales industriales. *Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos*. Recuperado el 7 de octubre de 2014, de: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/#topPage>
- [87] Villarroel Ávalos, C. M. (2005, abril). *Tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales El Cortijo para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial* (pp. 28, 32-36). XXI Congreso Interamericano de Ingeniería Química. Lima, Perú.
- [88] Vymazal, J. (2007, julio). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1-3), p. 50. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.09.014

[89] Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), pp. 61-69. doi: 10.1021/es101403q