

**DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS MACRÓFITAS (*Phragmites australis*
(Cav.) Trin. ex Steud y *Hedychium coronarium* D. Koenig), EN LA REMOCIÓN
DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA
TRUCHIFACTORÍA EL DIVISO, POPAYÁN - CAUCA**

HUGO NELSON ARCILA ARIAS

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INSTITUTO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS CONTINENTALES
POPAYÁN
2010**

**DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS MACRÓFITAS (*Phragmites australis*
(Cav.) Trin. ex Steud y *Hedychium coronarium* D. Koenig), EN LA REMOCIÓN
DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA
TRUCHIFACTORÍA EL DIVISO, POPAYÁN - CAUCA**

HUGO NELSON ARCILA ARIAS

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
MAGÍSTER EN RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS CONTINENTALES

Director: Magíster LEONIDAS ZAMBRANO POLANCO

Asesores
Magíster JAVIER FERNÁNDEZ
Magíster GERARDO I. NAUNDORF

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INSTITUTO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS CONTINENTALES
POPAYÁN**

2010

Nota de aceptación

Mg. Leonidas Zambrano Polanco
Director Trabajo de Grado

Mg. Sandra Morales
Jurado

Mg. Sandra Rivas
Jurado

Popayán, junio 10 de 2010.

AGRADECIMIENTOS

Mg. Leonidas Zambrano Polanco, Mg. Javier Fernández Mera y Mg. Gerardo Naundorf por compartir todos sus conocimientos.

Ing. Andrés Salazar, Ing. Carlos de la Cruz, y Qca. Nury Pinto, por su colaboración.

Esp. Jairo Rengifo, Mg. Silvio Carvajal y Dr. Miguel Peña, por su asesoría y colaboración en la interpretación de los datos.

Mg. Sandra Morales y Mg. Sandra Rivas, por su aporte en la corrección del trabajo.

A mis profesores y compañeros de la Maestría en Recursos Hidrobiológicos Continentales de la Universidad del Cauca, por su apoyo y los buenos momentos.

A mi esposa y mi hija por su amor y respaldo.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional.

Mg. Clara Nidya Ruiz y Mg. Aldemar Holguín por su apoyo y colaboración.

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, por su apoyo en la financiación del proyecto “Desarrollo y Adaptación de Tecnología para el Tratamiento de Efluentes Piscícolas”.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	22
1.1 GENERAL	22
1.2 ESPECÍFICOS	22
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
3. JUSTIFICACIÓN	25
4. MARCO TEÓRICO	29
4.1 EL AGUA	29
4.1.1 Propiedades del agua	30
4.1.2 Ciclo hidrobiológico	33
4.1.3 Clases de aguas	34
4.1.4 Balance del agua en la naturaleza	36
4.1.5 Contaminación del agua	37
4.2 HUMEDALES	41
4.2.1 Tipos de humedales artificiales	42
4.2.2 Componentes del humedal	45
4.2.3 Tipos de macrófitas utilizadas en los humedales	49
4.2.4 Principios generales para crear humedales	54
4.3 CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD PÚBLICA	55

	Pág.
4.3.1 Consideraciones en cuanto a salud	55
4.3.2 Microorganismos acuáticos que provocan enfermedades	57
4.3.3 Mecanismos depurativos típicos en tratamientos de fitodepuración	60
5. ANTECEDENTES	64
5.1 HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN	64
5.2 EXPERIENCIA PREVIA	67
5.3 CONTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	69
6. MATERIALES Y MÉTODOS	71
6.1 ÁREA DE ESTUDIO	71
6.2 RECOLECCIÓN Y DESINFECCIÓN DE SEMILLAS	73
6.3 ESQUEMA DEL MONTAJE PARA EL EXPERIMENTO PILOTO	74
6.3.1 Sedimentador	74
6.3.2 Lecho de secado de lodos	76
6.3.3 Humedales artificiales	76
6.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	77
6.5 TÉCNICAS PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO HÍDRICO	79
6.5.1 Fase de campo	79
6.5.2 Fase de laboratorio	80
6.6 TÉCNICAS PARA ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	82
6.6.1 Fase de laboratorio	82
6.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	83

	Pág.
6.7.1 Análisis estadístico fisicoquímico hídrico	83
6.7.2 Análisis estadístico microbiológico	85
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
7.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA HÍDRICA	86
7.1.1 Medidas (Estadísticos descriptivos)	86
7.1.2 Hipótesis de normalidad	106
7.1.3 ANOVA (Análisis de Varianza) de un factor para variables que se ajustan a la distribución normal	106
7.1.4 Prueba de homogeneidad de varianzas	113
7.1.5 Prueba de comparaciones múltiples para variables que se ajustan a la distribución normal y sus medias muestran diferencia significativa en los puntos de muestreo de los tres tratamientos	115
7.1.6 Análisis no paramétrico de un factor para variables que no se ajustan a la distribución normal.	119
7.1.7 Contraste no paramétrico de Kruskal-Wallis para las variables que no se ajustan a la normalidad	120
7.1.8 Análisis de correlación de variables	123
7.2 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA	131
7.2.1 Análisis para coliformes totales	133
7.2.2 Análisis para coliformes fecales	139
7.3 BIOMASA Y ANÁLISIS PRÓXIMAL EN LA VEGETACIÓN	144
7.3.1 Análisis de biomasa en la vegetación	144
7.3.2 Análisis proximal en la vegetación	146
8. CONCLUSIONES	149

	Pág.
9. RECOMENDACIONES	152
BIBLIOGRAFIA	153
ANEXOS	162

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Características de las especies macrófitas usadas en los humedales.	50
Cuadro 2. Bacterias que se pueden encontrar en aguas superficiales, y las enfermedades que causan.	58
Cuadro 3. Protozoos que se pueden encontrar en aguas superficiales y las enfermedades que pueden causar.	59
Cuadro 4. Resumen estadísticos descriptivos para Temperatura hídrica	86
Cuadro 5. Resumen estadísticos descriptivos para pH	88
Cuadro 6. Resumen estadísticos descriptivos para sólidos disueltos totales	89
Cuadro 7. Resumen estadísticos descriptivos para conductividad eléctrica	90
Cuadro 8. Resumen estadísticos descriptivos para sólidos suspendidos totales.	92
Cuadro 9. Resumen estadísticos descriptivos para concentración de oxígeno.	94
Cuadro 10. Resumen estadísticos descriptivos para porcentaje de saturación de oxígeno.	95
Cuadro 11. Resumen estadísticos descriptivos para demanda química de oxígeno	97
Cuadro 12. Resumen estadísticos descriptivos para demanda biológica de oxígeno	99
Cuadro 13. Resumen estadísticos descriptivos para nitrógeno total	101
Cuadro 14. Resumen estadísticos descriptivos para nitrógeno amoniacal.	102

Cuadro 15. Resumen estadísticos descriptivos para fosfatos.	Pág. 104
Cuadro 16. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable Temperatura hídrica vs. FACTOR	106
Cuadro 17. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable pH vs. FACTOR	107
Cuadro 18. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable sólidos disueltos totales vs. FACTOR	108
Cuadro 19. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable conductividad eléctrica vs. FACTOR	108
Cuadro 20. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la concentración de oxígeno vs. FACTOR	109
Cuadro 21. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable % de saturación de oxígeno vs. FACTOR	109
Cuadro 22. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable demanda biológica de oxígeno vs. FACTOR	110
Cuadro 23. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable nitrógeno total vs. FACTOR	111
Cuadro 24. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable nitrógeno amoniacal vs. FACTOR	111
Cuadro 25. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable fosfatos vs. FACTOR	112
Cuadro 26. Resumen de comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: pH	115
Cuadro 27. Resumen de comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: Fosfatos	117
Cuadro 28. Resumen del procedimiento Kruskal-Wallis para la variable sólidos suspendidos totales vs. FACTOR	120

Cuadro 29. Resumen del procedimiento Kruskal-Wallis para la variable demanda química de oxígeno vs. FACTOR	Pág. 122
Cuadro 30. Resumen correlación de las variables concentración de oxígeno y temperatura hídrica	124
Cuadro 31. Resumen correlación de las variables nitrógeno total y nitrógeno amoniacal	125
Cuadro 32. Resumen correlación de las variables demanda biológica de oxígeno y nitrógeno total.	128
Cuadro 33. Resumen correlación de las variables demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno.	130
Cuadro 34. Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x 10 ³ /100ml).	132
Cuadro 35. Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales.	133
Cuadro 36. Biomasa generada en el humedal con <i>Phragmites australis</i> .	145
Cuadro 37. Biomasa generada en el humedal con <i>Hedychium coronarium</i> .	145
Cuadro 38. Análisis proximal - <i>Phragmites australis</i> .	146
Cuadro 39. Análisis proximal- <i>Hedychium coronarium</i> . Primera poda	147

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Molécula de agua.	29
Figura 2. Ciclo del agua	35
Figura 3. Distribución global del agua	38
Figura 4. Consumo de agua por continentes y sectores	39
Figura 5. Humedal natural (Popayán, Cauca)	42
Figura 6. Tipos de humedales artificiales	43
Figura 7. Humedal artificial de flujo libre. Ginebra (Valle del Cauca).	44
Figura 8. Humedal artificial de flujo subsuperficial. Truchifactoría El Diviso	44
Figura 9. <i>Hedychium coronarium</i> K. D. Koenig (Zingiberaceae). Río Blanco, Popayán.	50
Figura 10. Flor <i>Hedychium coronarium</i>	52
Figura 11. <i>Phragmites australis</i> . Truchifactoría El Diviso (Cauca)	53
Figura 12. Humedal artificial de flujo subsuperficial, sede Las Guacas, UNICAUCA. Popayán (Cauca).	68
Figura 13. Truchifactoría, El Diviso	72
Figura 14. Humedales artificiales, Truchifactoría El Diviso, (Cauca)	72
Figura 15. Recolección y desinfección de semilla	73
Figura 16. Planta piloto Truchifactoría El Diviso	74
Figura 17. Vista general del Sedimentador	75
Figura 18. Vista general del lecho de secado de lodos	76
Figura 19. Vista general de los humedales artificiales	77

Figura 20. Gráfica de cajas para temperatura hídrica.	Pág. 87
Figura 21. Cajas para pH	88
Figura 22. Cajas para sólidos disueltos totales	90
Figura 23. Gráfica de cajas para conductividad eléctrica.	91
Figura 24. Cajas para sólidos suspendidos totales.	93
Figura 25. Cajas para concentración de oxígeno.	94
Figura 26. Cajas para porcentaje de saturación de oxígeno.	96
Figura 27. Cajas para demanda química de oxígeno.	98
Figura 28. Cajas para demanda biológica de oxígeno.	99
Figura 29. Cajas para nitrógeno total.	102
Figura 30. Cajas para nitrógeno amoniacal.	103
Figura 31. Cajas para fosfatos.	105
Figura 32. Prueba de homogeneidad de varianzas mediante el estadístico Levene para la variable pH.	113
Figura 33. Prueba de homogeneidad de varianzas mediante el estadístico Levene para la variable fosfatos.	114
Figura 34. Comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: pH	117
Figura 35. Comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: fosfatos	119
Figura 36. Valores individuales para la variable Sólidos suspendidos totales.	121
Figura 37. Valores individuales para la variable demanda química de oxígeno	122
Figura 38. Correlación de las variables concentración de oxígeno y temperatura hídrica	123

Figura 39. Correlación de las variables nitrógeno total y nitrógeno amoniacal	Pág. 125
Figura 40. Correlación de las variables demanda biológica de oxígeno y nitrógeno total	128
Figura 41. Correlación de las variables demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno	129
Figura 42. Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución.	135
Figura 43. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1.	139
Figura 44. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2.	137
Figura 45. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3.	138
Figura 46. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1.	141
Figura 47. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2.	141
Figura 48. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3.	142

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Tabla de datos de parámetros fisicoquímicos hídricos.	162
Anexo 2. Microbiológicos. Muestreo 29/04/2008	166
Anexo 3. Microbiológicos. Muestreo 09/05/2008	167
Anexo 4. Microbiológicos. Muestreo 13/05/2008	167
Anexo 5. Microbiológicos. Muestreo 16/05/2008	168
Anexo 6. Microbiológicos. Muestreo 20/05/2008	168
Anexo 7. Microbiológicos. Muestreo 06/06/2008	169
Anexo 8. Microbiológicos. Muestreo 10/06/2008	169
Anexo 9. Microbiológicos. Muestreo 17/06/2008	170
Anexo 10. Microbiológicos. Muestreo 24/06/2008	170
Anexo 11. Microbiológicos. Muestreo 04/07/2008	171
Anexo 12. Microbiológicos. Muestreo 08/07/2008	171
Anexo 13. Microbiológicos. Muestreo 11/07/2008	172
Anexo 14. Microbiológicos. Muestreo 15/07/2008	173
Anexo 15. Microbiológicos. Muestreo 18/07/2008	173
Anexo 16. Microbiológicos. Muestreo 22/07/2008	174
Anexo 17. Microbiológicos. Muestreo 26/07/2008	174
Anexo 18. Microbiológicos. Muestreo 29/07/2008	175
Anexo 19. Microbiológicos. Muestreo 01/08/2008	175
Anexo 20. Microbiológicos. Muestreo 05/08/2008	176

Anexo 21. Microbiológicos. Muestreo 12/08/2008	Pág. 176
Anexo 22. Microbiológicos. Muestreo 15/08/2008	177
Anexo 23. Microbiológicos. Muestreo 22/08/2008	177
Anexo 24. Microbiológicos. Muestreo 26/08/2008	178
Anexo 25. Microbiológicos. Muestreo 29/08/2008	178
Anexo 26. Microbiológicos. Muestreo 02/09/2008	179
Anexo 27. Microbiológicos. Muestreo 05/09/2008	179

RESUMEN

Para la actividad piscícola en Colombia, la demanda de agua en miles de m³ por año es de 509.336 m³, lo que corresponde al 8,8% de la demanda nacional; 5.785.765 miles de m³ por año (Fernández, 2006). Por tales razones, éste trabajo se realizó con el objetivo de determinar la eficacia de humedales artificiales de flujo subsuperficial con dos macrófitas (*Phragmites australis* y *Hedychium coronarium*), en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la truchifactoría El Diviso, departamento del Cauca, zona de vida bosque húmedo montano bajo (bh-MB). Se trabajó con una población de 52 plantas por humedal. Durante cinco meses se permitió el libre desarrollo de las macrófitas y de la biopelícula, controlando únicamente el tiempo de retención aplicado en los humedales. Simultáneamente se evaluó la capacidad de depuración del sistema, analizando las variables fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual por medio de indicadores de materia orgánica. Adicionalmente, se determinó la biomasa y se realizó un análisis proximal de las macrófitas.

Las variables analizadas mediante prueba de normalidad, ANOVA y análisis de correlación indicaron que el sistema completo es significativamente eficiente en la remoción de materia orgánica teniendo en cuenta las variaciones dadas para SST, DQO, DBO₅, NH₃, N_T. Por otra parte, no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos: humedal con *Phragmites*, humedal con *Hedychium* y el humedal control (sin macrófitas). Después de los tres tratamientos la relación DQO/DBO demostró que el agua contiene materia moderadamente degradable y poco degradable. Cabe destacar que la remoción de materia orgánica depende la cantidad de oxígeno disponible y de la acción de los microorganismos presentes en las biopelículas formadas en las raíces. En este sentido, el sistema de fitorremediación puede lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Palabras claves: Humedales artificiales, macrófitas, flujo subsuperficial, agua residual, fitorremediación.

INTRODUCCIÓN

La vida surgió en el agua y ella es esencial para el mantenimiento de todo tipo de vida en nuestro planeta, ningún proceso metabólico ocurre sin su acción directa o indirecta, además de que la interacción entre el agua y la atmósfera constituye el principal factor determinante del clima. Es preocupante que la mayoría de los ríos más intensamente utilizados, sean al mismo tiempo aquellos sobre los cuales se vierte todo tipo de contaminación industrial y doméstica haciendo que el tratamiento de aguas residuales sea cada vez más difícil y costoso¹.

Colombia posee uno de los mayores potenciales hídricos en el mundo; 33.630 m³ al año por persona, casi cinco veces mayor que la disponibilidad promedio del mundo que apenas alcanza los 7.700m³ ², el cual se ha ido deteriorando con el uso indiscriminado del recurso. En este sentido, el aporte de carga orgánica es de aproximadamente de 8500 ton DBO/día, además de un total de sólidos suspendidos de 353.7 ton/día³, debido al mal manejo y a la inexistencia de una planificación coherente a la necesidad de conservar este potencial hídrico⁴.

Una de las diversas actividades económicas que no cuentan con las necesidades anteriormente mencionadas es la piscícola, la cual tienen una alta presencia en nuestro país, gracias a la abundancia de recursos hídricos, terrenos y climas

¹ ROLDÁN, G. Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia, 1992.

² COLOMBIA. IDEAM. El medio ambiente en Colombia. 2 ed. Bogotá: IDEAM, 2001.

³ COLOMBIA. Consejo Nacional de Política Económica y Social. CONPES. Documento 3177. Bogotá, 2002.

⁴ FERNÁNDEZ, J.E. Una producción piscícola ambientalmente sostenible (Documento borrador). Propuesta doctoral en Ingeniería con énfasis en Ambiental y Sanitaria. Cali: Universidad del Valle, 2006.

apropiados para esta actividad⁵. En términos de producción, esta actividad reportó para el año 2003 un total de 28.530 toneladas de pescado y para el año 2004 se proyectó por encima de 30.000 toneladas⁶. La demanda de agua en miles de m³ por año para la actividad pecuaria es de 509.336 m³, lo que corresponde al 8,8% de la demanda nacional; 5.785.765 miles de m³ por año⁷⁻⁸.

Durante el proceso de producción piscícola, se considera inevitable la acumulación de residuos orgánicos y metabólicos en los estanques y criaderos de peces. El volumen de excreta producido por los peces es la mayor fuente de residuos orgánicos. Según Kubitz⁹, la digestibilidad del material seco, usado como alimento, es del orden del 70 al 75%, lo cual significa que entre el 25 y el 30 % se convierte en residuo fecal. Este material orgánico, no solo genera contaminación de tipo microbiológico, también consume el oxígeno disuelto del agua, que compite con el oxígeno requerido por los peces. De otra parte, el drenaje de los estanques durante el proceso de cosecha, o en la operación de limpieza, genera concentraciones de materia orgánica que alcanza los 28.9 mg/L de DBO y 2.34 mg/L como amonio total¹⁰. Datos más recientes tomados en el Departamento del Cauca en DQO y DBO₅ durante el proceso de lavado de estanques productores de trucha alcanzan valores de 180 y 130 mg/L respectivamente¹¹ lo cual indica una alta contaminación puntual¹². De otra parte la cantidad de sólidos producidos que se reincorporan en la época de cosecha a los cuerpos de agua por resuspensión de los lodos no ha sido bien identificada.

⁵ COLOMBIA. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. La cadena de la piscicultura en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica. Bogotá: Minagricultura, 1991 – 2005.

⁶ Ibid.

⁷ OJEDA, A., PACHECO, M. ORTIZ, D. Identificación y conteo de huevos de helmintos y coliformes en lodos crudos y tratados anaeróbicamente. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [en línea]. URL disponible en [mail.femisca.org/publicaciones/Xcongreso/XCNIS046.pdf](mailto:femisca.org/publicaciones/Xcongreso/XCNIS046.pdf)

⁸ FERNÁNDEZ, Op. cit.

⁹ KUBITZA. Qualidade da agua na producto de peixes. 3 ed. Jundiai-SP. Divisao de Biblioteca e documentacao – Campus “Luiz de Queiroz”/usp. Brasil, 1999.

¹⁰ BOYD, C. E. Effluents from catfish ponds during fish harvest. J. Environ. Qual.; 7. 1978. p.59 – 62

¹¹ YASNO, J. J., GARCIA, C. Selección y diseño de alternativa para el tratamiento de afluente y efluente del proceso de producción piscícola, caso específico trucha. Trabajo de grado, en borrador. 2006

¹² FERNÁNDEZ, Op.cit. p.

En los efluentes de estanques de producción de trucha *Oncorhynchus mykiss* se reportan, en piscícolas españolas, valores promedio de 22 mg/L de sólidos suspendidos totales y turbiedad de 16 UNT¹³. Yasno y García¹⁴, reportan, durante el proceso de limpieza y cosecha, valores del orden de 400 mg/L de sólidos suspendidos totales y turbiedad de 175 UNT, medidos en un criadero ubicado en el municipio de Silvia, Departamento del Cauca. Se estima que en el caso de la cosecha de la Tilapia *Oreochromis sp.*, estos valores de turbiedad y sólidos se incrementan a niveles que pueden sobre pasar el doble de las concentraciones reportadas por Díaz (2003) y Fernández (2006).

“La convención de Ramsar ha definido a los humedales como las extensiones de marisma, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanente o temporal, estancado o corriente, dulce, salado o salobre, incluidas las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” Ramsar, (1971).

Según Lara¹⁵, los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos, lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento. Este tema ha sido estudiado principalmente en países de Europa y Norteamérica; por lo cual, es necesario realizar este trabajo de investigación adecuando los modelos de diseño a las condiciones locales. Por tales razones,

¹³ DÍAZ, D. C. Sistema de recirculación de agua para cría de Alevín de Trucha Arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) y carpa común (*Cyprinus carpio*); en: Agua Potable para Comunidades Rurales: Reuso y Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Domesticas. [en línea] disponible en : <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo07.html>. [2009].

¹⁴ YASNO, J. J., GARCIA, C. Op.cit.

¹⁵ LARA, J. A. Depuración de Aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.

éste trabajo pretendió determinar la eficacia de humedales artificiales de flujo subsuperficial con dos macrófitas, en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales en la truchifactoría El Diviso, en el Departamento del Cauca en una zona de vida definida como bosque húmedo montano bajo (bh –MB) de acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida según Holdridge (1978).

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Determinar la eficacia de humedales artificiales de flujo subsuperficial con dos macrófitas, en la remoción de materia orgánica de una estación piscícola en el Departamento del Cauca, bajo las condiciones de bosque húmedo montano bajo (bh-MB).

1.2 ESPECÍFICOS

- Determinar la eficacia de humedales artificiales de flujo subsuperficial con *Hedychium coronarium* y con *Phragmites australis*, en la remoción de materia orgánica de una truchifactoría.
- Comparar los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua en el efluente del humedal con *Hedychium coronarium*, con los del efluente del humedal con *Phragmites australis*.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia posee uno de los mayores potenciales hídricos en el mundo; 33.630 m³ al año por persona, casi cinco veces mayor la disponibilidad promedio del mundo que apenas alcanza los 7.700 m³ ¹ el cual se ha ido deteriorando con el uso indiscriminado del recurso. En este sentido, el aporte de carga orgánica es de aproximadamente de 8500 ton DBO/día, además de un total de sólidos suspendidos de 353.7 ton/día², debido al mal manejo y a la inexistencia de una planificación coherente a la necesidad de conservar este potencial hídrico³.

Una de las diversas actividades económicas que no cuentan con las necesidades anteriormente mencionadas es la piscícola, la cual tienen una alta presencia en nuestro país, gracias a la abundancia de recursos hídricos, terrenos y climas apropiados para esta actividad⁴. En términos de producción, esta actividad reportó para el año 2003 un total de 28.530 toneladas de pescado y para el año 2004 se proyectó por encima de 30.000⁵. La demanda de agua en miles de m³ por año para la actividad pecuaria es de 509.336 m³, lo que corresponde al 8,8% de la demanda nacional; 5.785.765 miles de m³ por año⁶⁻⁷.

En el Departamento del Cauca la actividad piscícola se ha incrementado, pasando de ser una actividad, que en principio consideraba solo la seguridad alimentaría,

¹ COLOMBIA. IDEAM. Op.cit. p.

² COLOMBIA. CONPES. Op.cit. p.

³ FERNÁNDEZ, Op.cit. p.

⁴ COLOMBIA. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. p.

⁵ Ibid. p.

⁶ OJEDA, et.al. Op.cit. p.

⁷ FERNÁNDEZ, Op.cit. p.

particularmente de las comunidades indígenas del Macizo Colombiano, a una actividad que pasó de producir 1`328.637 Kg. en el año 2000 a 2`953.449 Kg. en el 2004, siendo la trucha la de mayor producción con 78.5%⁸. Las piscícolas captan el agua de vertientes superficiales, (usualmente de páramo) con muy baja contaminación, para posteriormente ser utilizada en el proceso de producción. Los efluentes son vertidos sin un tratamiento adecuado a la fuente superficial nuevamente, limitando su uso para otras actividades, especialmente para el consumo humano. Este aspecto, aunque no ha sido estudiado detalladamente, se considera importante ya que el Macizo Colombiano, representa el suministro de agua para buena parte del país, especialmente de grandes ciudades como Cali, que dependen de fuentes superficiales que están siendo contaminadas, desde su cuenca alta por esta actividad⁹.

Tratar los efluentes generados en la producción piscícola no solamente es un problema técnico, también es un problema de manejo. Existen muchas tecnologías para procesar y hasta reciclar los desechos de las granjas piscícolas con el fin de alcanzar las metas de estándares de efluentes, pero los costos son un factor limitante¹⁰. El grado de contaminación que presentan estos efluentes puede considerarse como diluido, sin embargo, si bien estos efluentes no causan un impacto como lo generan las aguas residuales domésticas y las industriales, si limita el uso de las fuentes superficiales donde son vertidas sin tratamiento¹¹⁻¹².

⁸ CHACÓN, C.H. Caracterización de la seguridad alimentaria en el Departamento del Cauca para el período 2000 a 2004. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Minero del Departamento del Cauca, Universidad del Cauca. 2006.

⁹ FERNÁNDEZ, Op.cit. p.

¹⁰ GIANLUIGI, N. Optimización de manejo y tecnologías sostenibles para tratamiento y eliminación de afluentes de granjas piscícolas con énfasis en pantanos construidos. World Aquaculture. Septiembre 2000, Vol. 31, N° 3.

¹¹ HELLAWEL, J. Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier Applied Science. 1 ed. EEUU. 1989.

¹² FERNÁNDEZ, Op.cit. p.

3. JUSTIFICACIÓN

En la naturaleza, los desechos producidos por plantas y animales son descompuestos por los microorganismos, mineralizados y utilizados de nuevo por las plantas para construir nueva materia viva. El hombre primitivo produjo, y aún hoy las pequeñas comunidades rurales, una cantidad de desechos orgánicos tan pequeña, que la naturaleza es capaz de mineralizarla sin que ello signifique una sobre carga para el sistema. Con el desarrollo desmesurado de los centros urbanos y de la industria, los ríos y corrientes perdieron su capacidad de autopurificación. El problema de la contaminación de los ecosistemas acuáticos ha obligado al hombre a desarrollar sistemas de tratamiento de sus aguas industriales y domésticas, con el fin de recuperar la vida en dichos ecosistemas¹³.

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos, lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento. Este tema ha sido estudiado principalmente en países con estaciones, por lo cual es necesario realizar este trabajo de investigación tendiente a adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales con el fin de determinar la eficacia de los humedales¹⁴⁻¹⁵.

¹³ ROLDAN, Op.cit. p.

¹⁴ LARA, Op.cit. p.

¹⁵ FERNÁNDEZ, Op.cit. p.

El crecimiento explosivo de las ciudades ha generado una acelerada pérdida de áreas de cultivo lo que ha obligado a dar prioridad al uso del agua superficial para la bebida y la industria, esto ha incurrido en la industria en consecuencia que la actividad agrícola, la cual se encuentra en las afueras de las ciudades, tengan que aprovechar el agua residual como única alternativa de uso. Esto vislumbra la existencia de mas de 500.000 hectáreas agrícolas irrigadas con agua residual sin ningún tratamiento adecuado previo, según¹⁶ Bartone, (1990) citado por Moscoso, (2004).

En general ya son muchos los países en donde se practican diferentes tipos de reuso. Según Moeller¹⁷, existen muchos estudios que justifican y apoyan esta practica entre otros están España, Japón con los sistemas descentralizados, Israel y Australia

Las aguas residuales de un proyecto piscícola pueden tener diferentes impactos ambientales desde el momento de su generación hasta su disposición final. Cuando las aguas residuales tanto domesticas como industriales son llevadas a una planta para su tratamiento conjunto, se presenta un impacto ambiental positivo ya que se remueven diferentes sustancias contaminantes antes del vertimiento final; también pueden generar algunos impactos negativos asociados con aspectos paisajísticos, proliferación de plagas y generación de olores entre otros. Adicionalmente, cuando las aguas residuales son descargadas sin tratamiento, en los cuerpos hídricos se puede afectar el equilibrio biológico tanto en las aguas como en el lodo del fondo, especialmente si se tienen descargas con

¹⁶ BARTONE, 1990. Citado por MOSCOSO, J., EGOICHEAGA, L. Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS/OPS). 2004.

¹⁷ MOELLER, G., RIVAS, A. et.al. Tecnología de punta para el reuso de aguas residuales en México. México: 1997.

altas temperaturas, detergentes, altas cargas orgánicas o con sustancias tóxicas cancerígenas y/o mutagénicas (sustancias de interés sanitario)¹⁸.

El decreto 1220 de 2005 “por el cual se reglamenta el título VIII de la ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.” Establece en el artículo 2º la competencia de las autoridades ambientales para otorgar o negar licencia ambiental, con forme a la ley y al presente decreto, siendo autoridades competentes las siguientes:

- El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Las Corporaciones Autónomas Regionales y las de Desarrollo Sostenible.
- Los municipios, distritos y áreas metropolitanas cuya población urbana sea superior a un millón de habitantes dentro de su perímetro urbano.
- Las autoridades ambientales creadas mediante la ley 768 de 2002, y
- Las entidades territoriales delegatarias de las Corporaciones Autónomas Regionales, salvo cuando se trate de la realización de proyectos, obras o actividades ejecutadas por la misma entidad territorial. Para efectos de la delegación, las Corporaciones Autónomas Regionales tendrán en cuenta especialmente, la capacidad técnica, económica, administrativa y operativa de las entidades territoriales para ejercer las funciones delegadas.

También establece en el artículo 3º que la licencia ambiental, es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir

¹⁸CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. Plan de manejo ambiental del sector piscícola. Subdirección de gestión ambiental. Popayán: C.R.C, 2004.

deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual sujeta al beneficiario de esta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra, o actividad autorizada.

La licencia ambiental llevará implícitos todos los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, que sean necesarios para el desarrollo y operación del proyecto, obra o actividad. La licencia ambiental deberá obtenerse previamente a la iniciación del proyecto, obra o actividad. Ningún proyecto, obra o actividad requerirá más de una licencia ambiental.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 EL AGUA

La vida surgió en el agua y ella es esencial para el mantenimiento de todo tipo de vida en nuestro planeta. Ningún proceso metabólico ocurre sin su acción directa o indirecta¹. El agua es una molécula formada por 2 átomos de Hidrógeno (H) y uno de Oxígeno, por lo que su fórmula química es H₂O. Al unirse estos 3 átomos se forma una nueva nube de electrones alrededor de los 3 núcleos, con un ángulo de separación entre los enlaces O-H de aproximadamente 105°. De esta forma se obtiene una molécula bipolar; es decir, tiene dos polos: Negativo en el lado del oxígeno y positivo en el lado de los átomos de hidrógeno.

Figura 1. Molécula de agua.



Fuente: Kalipedia. Santillana.

¹ ROLDÁN, G. Op.cit. p.

El agua es el principal e imprescindible componente del cuerpo humano. El ser humano no puede estar sin beberla más de cinco o seis días sin poner en peligro su vida. El cuerpo humano tiene un 75 % de agua al nacer y cerca del 60 % en la edad adulta. Aproximadamente el 60 % de este agua se encuentra en el interior de las células (agua intracelular). El resto (agua extracelular) es la que circula en la sangre y baña los tejidos.

4.1.1 Propiedades del agua. Los antiguos filósofos consideraban el agua como un elemento básico que representaba a todas las sustancias líquidas. Los científicos no descartaron esta idea hasta la última mitad del siglo XVIII. En 1781 el químico británico Henry Cavendish sintetizó agua detonando una mezcla de hidrógeno y aire. Sin embargo, los resultados de este experimento no fueron interpretados claramente hasta dos años más tarde, cuando el químico francés Antoine Laurent Lavoisier propuso que el agua no era un elemento sino un compuesto de oxígeno e hidrógeno. En un documento científico presentado en 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac y el naturalista alemán Alexander von Humboldt demostraron conjuntamente que el agua consistía en dos volúmenes de hidrógeno y uno de oxígeno, tal como se expresa en la fórmula actual H_2O .

Propiedades Físicas del Agua

- Estado físico: sólida, líquida y gaseosa
- Color: incolora
- Sabor: insípida
- Olor: inodoro
- Densidad: 1,0 g./c.c. a 4°C
- Punto de congelación: 0°C
- Punto de ebullición: 100°C
- Presión crítica: 217,5 atm.

- Temperatura crítica: 374°C

Propiedades Químicas del Agua:

- Reacciona con los óxidos ácidos.
- Reacciona con los óxidos básicos.
- Reacciona con los metales.
- Reacciona con los no metales.
- Se une en las sales formando hidratos.
- Los anhídridos u óxidos ácidos reaccionan con el agua y forman ácidos oxácidos.
- Los óxidos de los metales u óxidos básicos reaccionan con el agua para formar hidróxidos.
- Algunos metales descomponen el agua en frío y otros lo hacían a temperatura elevada.
- El agua reacciona con los no metales, sobre todo con los halógenos, por ej: Haciendo pasar carbón al rojo sobre el agua se descompone y se forma una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno (gas de agua).
- El agua forma combinaciones complejas con algunas sales, denominándose hidratos.

Propiedades bioquímicas: los seres vivos se han adaptado para utilizar químicamente el agua en dos tipos de reacciones:

En la fotosíntesis, en la que las enzimas utilizan el agua como fuente de átomos de hidrógeno. En las reacciones de hidrólisis, en que las enzimas hidrolíticas han explotado la capacidad del agua para romper determinados enlaces hasta degradar los compuestos orgánicos en otros más simples, durante los procesos digestivos.

Propiedades físico-químicas:

- Acción disolvente: el agua es el líquido que más sustancias disuelve (disolvente universal), esta propiedad se debe a su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias, ya que estas se disuelven cuando interaccionan con las moléculas polares del agua. La capacidad disolvente es la responsable de dos funciones importantes para los seres vivos: es el medio en que transcurren las mayorías de las reacciones del metabolismo, y el aporte de nutrientes y la eliminación de desechos se realizan a través de sistemas de transporte acuosos.
- Fuerza de cohesión entre sus moléculas: los puentes de hidrógeno mantienen a las moléculas fuertemente unidas, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible.
- Gran calor específico: el agua absorbe grandes cantidades de calor que utiliza para romper los puentes de hidrógeno. Su temperatura desciende más

lentamente que la de otros líquidos a medida que va liberando energía al enfriarse

- Elevado calor de vaporización: a 20° C se precisan 540 calorías para evaporar un gramo de agua, lo que da idea de la energía necesaria para romper los puentes de hidrógeno establecidos entre las moléculas del agua líquida y, posteriormente, para cargar las moléculas energía cinética suficiente para cambiar de estado líquido a estado gaseoso.
- Elevada constante dieléctrica: por tener moléculas bipolares, el agua es un gran medio disolvente de compuestos iónicos, como las sales minerales y de compuestos covalentes polares como los glúcidos. Las moléculas de agua, al ser polares, se disponen alrededor de los grupos polares del soluto, llegando a desdoblarse los compuestos iónicos en aniones y cationes, que quedan así rodeados por moléculas de agua.
- Bajo grado de ionización: de cada 10⁷ moléculas de agua, sólo una se encuentra ionizada. Esto explica que la concentración de iones hidronio (H₃O⁺) y de los iones hidroxilo (OH⁻) sea muy baja. Dado los bajos niveles de H₃O⁺ y de OH⁻, si al agua se le añade ácido o base, aunque sea en poca cantidad, estos niveles varían bruscamente.

4.1.2 Ciclo hidrológico. El sol, calienta el agua de los océanos, la cual se evapora hacia el aire como vapor de agua. Corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde la menor temperatura causa que el vapor de agua se condense y forme las nubes. Las corrientes de aire

enfrian las nubes y se precipitan, parte de esta precipitación cae en forma de nieve, y se acumula en capas de hielo y en los glaciares. En los climas más cálidos, la nieve acumulada se funde y derrite cuando llega la primavera. La mayor parte de la precipitación cae en los océanos o sobre la tierra, donde, debido a la gravedad, corre sobre la superficie como escorrentía superficial. Una parte de esta escorrentía alcanza los ríos en las depresiones del terreno; en la corriente de los ríos el agua se transporta de vuelta a los océanos. El agua de escorrentía y el agua subterránea que brota hacia la superficie, se acumula y almacena en los lagos de agua dulce. No toda el agua de lluvia fluye hacia los ríos, una gran parte es absorbida por el suelo como infiltración. Parte de esta agua permanece en las capas superiores del suelo, y vuelve a los cuerpos de agua y a los océanos como descarga de agua subterránea. Otra parte del agua subterránea encuentra aperturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales de agua dulce. El agua subterránea que se encuentra a poca profundidad, es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas, regresando a la atmósfera. Otra parte del agua infiltrada alcanza las capas más profundas de suelo y recarga los acuíferos (roca subsuperficial saturada), los cuales almacenan grandes cantidades de agua dulce por largos períodos de tiempo. A lo largo del tiempo, esta agua continua moviéndose, parte de ella retornará a los océanos, donde el ciclo del agua comienza nuevamente. (Figura 2.)

4.1.3 Clases de aguas

- Aguas naturales: son las que permanecen en la superficie de la tierra o también dentro de ella, arrastrando diversas sustancias en su recorrido; por lo tanto nunca son puras y contienen sales minerales como cloruro, nitratos, sales cálcicas, CO₂ y sustancias orgánicas. Las aguas lluvias son menos impuras que las anteriores y se denominan también aguas meteóricas.

Figura 2. Ciclo del agua.



Fuente: John M. Evans USGS, Colorado District (2009).

- Aguas potables: se denominan potables porque son aptas para beber y contienen elementos necesarios para el organismo como CO_2 , aire y sales de Na, K, Ca y Mg en proporciones óptimas para el metabolismo.
- Aguas duras o crudas: son las aguas que contiene exceso de sales de Ca y Mg; estas sales con el palmitato de sodio, que es la parte esencial del jabón, forman palmitatos de Ca y Mg que son insolubles, por este motivo no disuelven el jabón ni dan espuma, tampoco cosen bien legumbres.

- Aguas blandas: son aguas duras tratadas: Es decir, se han sometido a ciertos procesos químicos o físicos, con el fin de remover las sustancias en exceso como los bicarbonatos, cloruros, sulfatos, etc. Este proceso se conoce como ablandamiento de aguas.
- Aguas minerales: son las aguas que contienen disueltos algunos compuestos, en proporciones relativamente altas. Las que contienen H₂S se llaman sulfhídricas o sulfurosas; si contienen CO₂ se denominan acídulas o carbónicas (tienen sabor picante); con sodio, son sodadas, con cloro, cloradas; selenitosas, con sulfato de cobre; etc. También existen las aguas cuya temperatura pasa de los 200° C y se conocen como aguas termales.
- Agua pesada: es la que presenta en su estructura en vez de los átomos de H¹ y O¹⁶ que forman el agua normal, los isótopos de estos elementos, presentando la fórmula D₂O. De acuerdo con el isótopo presente habrá diferentes clases de agua pesada; La más común es la D₂O¹⁶; también la D₂O¹⁸ en la cual no solo esta presente el deuterio sino también el isótopo de hidrógeno, ya se tienen aguas extrapesadas, es muy poco abundante y puede obtenerse por medio de la reacción electrolítica para sintetizar H₂ aprovechando los residuos de la reacción².

4.1.4 Balance del agua en la naturaleza. El mantenimiento de los ecosistemas acuáticos depende de un adecuado balance entre el agua que entra a través de la precipitación, la escorrentía, los nacimientos subterráneos, los afloramientos superficiales, las infiltraciones en el terreno y los procesos de evaporación. Cada uno de estos procesos de ganancia y pérdida del agua varían geográfica y

²CHEMICAL BOND APPROACH PROJECT. Sistemas químicos. España: Reverté. 1978.

estacionalmente y dependen del clima de la región³. Adicionalmente es importante tener en cuenta la distribución y el consumo de agua en nuestro planeta.

Distribución del agua en nuestro planeta: el agua cubre 3/4 partes (71%) de la superficie de la Tierra, pese al área por la cual se extiende, la hidrosfera terrestre es comparativamente bastante escasa. A pesar de que es una sustancia tan abundante, sólo supone el 0,022% de la masa de la Tierra. Se puede encontrar esta sustancia en prácticamente cualquier lugar de la biosfera y en los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso. (Figura 3.)

4.1.5 Contaminación del agua. De manera simple, la contaminación del agua se puede definir como la adición de sustancias extrañas que deterioran su calidad. La calidad del agua se refiere a su aptitud para los usos beneficiosos a que se ha venido dedicando en el pasado, esto es, para la bebida del hombre y de los animales, para el soporte de una vida sana, para el riego de cultivos y para la recreación. Un contaminante puede ser de origen “inerte” como plomo, mercurio, detergentes; o de origen “vivo”, como el ocasionado por microorganismos provenientes de desechos domésticos (aguas negras principalmente)⁴.

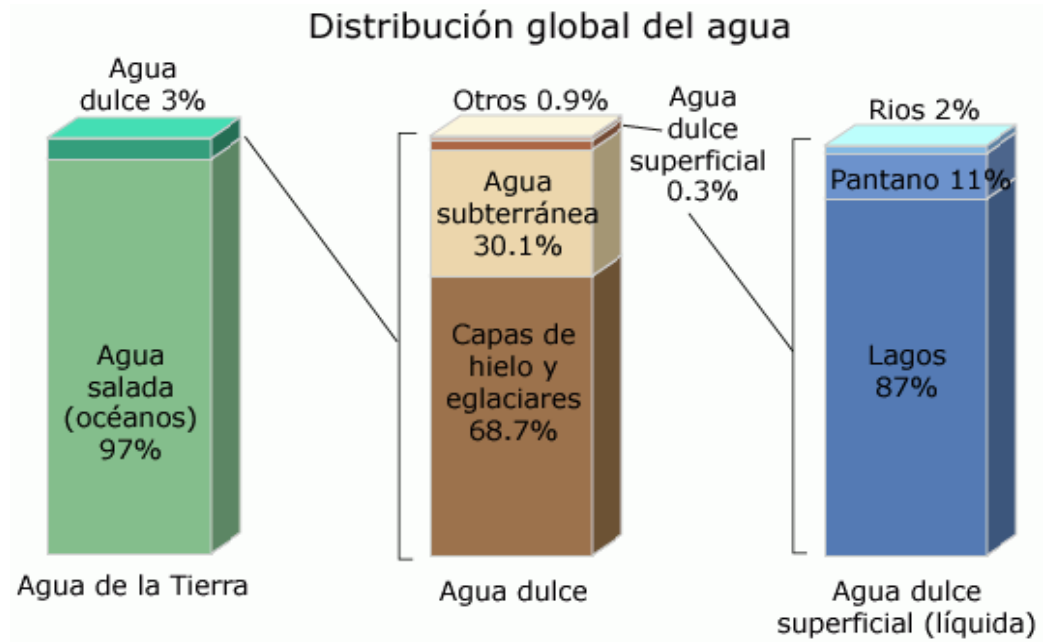
El 97% es agua salada, la cual se encuentra principalmente en los océanos y mares; sólo el 3,0% de su volumen es dulce. De esta última, un 1,0 % está en estado líquido, componiendo los ríos y lagos. El 2,0% restante se encuentra en estado sólido en capas, campos y plataformas de hielo o banquisas en las latitudes próximas a los polos. Fuera de las regiones polares el agua dulce se encuentra principalmente en humedales y, subterráneamente, en acuíferos. Hacia

³ ROLDÁN, G. Op.cit.

⁴ ROLDÁN, Op.cit. p.

1970 se consideraba ya que la mitad del agua dulce del planeta Tierra estaba contaminada.

Figura 3. Distribución global del agua.

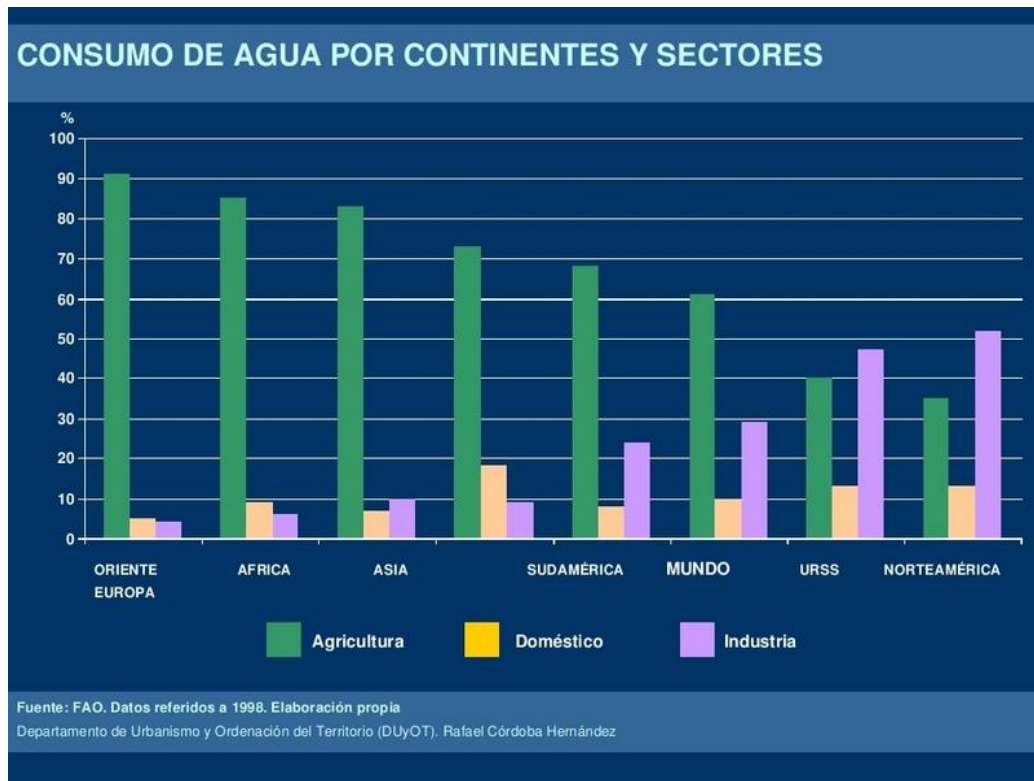


Fuente: ga.water.usgs.gov (2009).

La escasez de agua dulce es uno de los principales problemas ambientales ante los que nos encontramos. De forma sencilla se puede decir que estamos alcanzando el límite de extraer agua dulce de la superficie terrestre, pero el consumo no deja de aumentar. Sin embargo, una gran amenaza la constituye el efecto que el cambio climático tendrá sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua dulce. Para asegurar nuestras necesidades básicas necesitamos de 20 a 50 litros de agua potable, libre de contaminantes, por día. Un recién nacido en un

país desarrollado consume una cantidad de agua 30 a 50 veces mayor que la de un recién nacido en un país en desarrollo.

Figura 4. Consumo de agua por continentes y sectores.



Fuente: FAO. Datos referidos a 1998.

Desde el punto de vista ecológico, la calidad del agua tiene una connotación un poco diferente a la requerida para usos domésticos, agrícolas industriales. La calidad del agua de un ecosistema acuático natural puede ser muy diversa; ciertos ecosistemas, a pesar de tener concentraciones elevadas de sales, durezas y alcalinidades y valores de pH muy ácidos o muy básicos, pueden tener comunidades estables y adaptadas a vivir en dichos medios. En estos casos, la

calidad del agua depende fundamentalmente de los aportes naturales dados por las lluvias y por la naturaleza geoquímica del terreno⁵.

¿Qué contamina el agua?

- Agentes patógenos: bacterias, virus, protozoarios, parásitos que entran al agua provenientes de desechos orgánicos.

- Desechos que requieren oxígeno: los desechos orgánicos pueden ser descompuestos por bacterias que usan oxígeno para biodegradarlos. Si hay poblaciones grandes de estas bacterias, pueden agotar el oxígeno del agua, matando así las formas de vida acuáticas.

- Sustancias químicas inorgánicas: ácidos, compuestos de metales tóxicos (Mercurio, Plomo).

- Nutrientes vegetales: pueden ocasionar el crecimiento excesivo de plantas acuáticas que después mueren y se descomponen, agotando el oxígeno del agua.

- Sustancias químicas orgánicas: petróleo, plásticos, plaguicidas, detergentes.

- Sedimentos o materia suspendida: partículas insolubles de suelo que enturbian el agua.

- Sustancias radiactivas: pueden causar defectos congénitos y cáncer.

- Calor: ingresos de agua caliente que disminuyen el contenido de oxígeno.

⁵ ROLDÁN, Op.cit. p.

Fuentes puntuales y no puntuales:

- Las fuentes puntuales: descargan contaminantes en localizaciones específicas a través de tuberías y alcantarillas; por ejemplo: fábricas, plantas de tratamiento de aguas negras, minas, pozos petroleros, etc.

- Las fuentes no puntuales: son grandes áreas de terreno que descargan contaminantes al agua sobre una región extensa; por ejemplo: vertimiento de sustancias químicas, tierras de cultivo, lotes para pastar ganado, construcciones, tanques sépticos.

4.2 HUMEDALES

La convención de Ramsar, los ha definido: como las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, saladas o salobres, incluidas las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Figura 5.)

Figura 5. Humedal río Blanco (Popayán, Cauca)

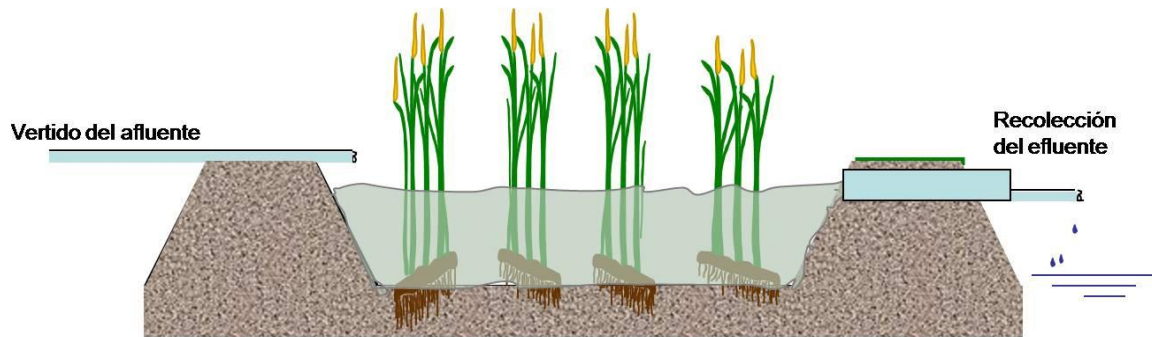


Fuente: Hugo Arcila, 2009

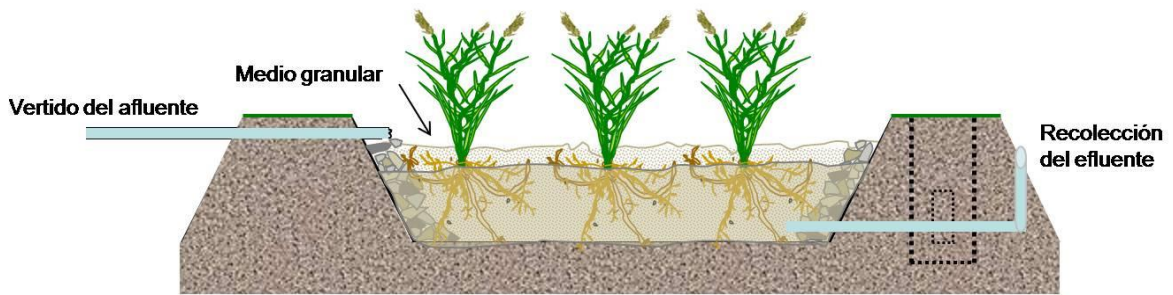
4.2.1 Tipos de humedales artificiales. Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual: Sistemas a Flujo Libre y Sistemas de Flujo Subsuperficial. Los sistemas de flujo libre suelen consistir en canales con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelos relativamente impermeables, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos de 0.1m. a 0.6 m. Los sistemas de flujo subsuperficial consisten en canales excavados o construidos, rellenos de material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava. Las mismas especies vegetales se usan en los dos tipos de humedales artificiales⁶.

⁶ LARA, J.A. Op.cit. p.

Figura 6. Tipos de humedales artificiales.



A.



B.

A: Humedal de flujo libre.

B: Humedal de flujo subsuperficial.

Fuente: García Serrano y Corzo Hernández (2009).

Figura 7. Humedal artificial de flujo libre. Ginebra (Valle del Cauca).



Fuente: Hugo Arcila 2008.

Figura 8. Humedal artificial de flujo subsuperficial. Truchifactoría El Diviso (Cauca)



Fuente: Hugo Arcila 2008.

Los humedales artificiales han sido usados para una variedad de industrias, escorrentía de aguas agrícolas y de lluvias, lixiviados de vertederos, rebose de alcantarillados, drenaje de minas y aguas residuales domésticas en pequeños humedales tras tanques sépticos convencionales”⁷.

Lo anterior ha estimulado la realización de investigaciones a partir de procesos realizados por la naturaleza, que permitan diseñar proyectos de bajos costos para el tratamiento de aguas residuales⁸.

La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo”⁹⁻¹⁰.

4.2.2 Componentes del humedal . Según Lara¹¹, los componentes del humedal son el agua, sustrato y vegetación. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microorganismos y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente.

⁷ LARA, J. Op.cit. p.

⁸ ÑIQUE, A, Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, 2000. [en línea] http://www.Geocities.com/sociedadpga/publicaciones/anolno1/humedales_tratamiento_aguas.htm. [fecha de acceso]

⁹ LARA, J. Op.cit.

¹⁰ BEASCOECHEA, E. CURT, M.D. FERNÁNDEZ, J. MUÑOZ, J. Manual de fitodepuración. Universidad Politécnica de Madrid. España: Edita. 2000. p. 91 - 105.

¹¹ LARA, J. Op.cit.

El agua: la hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en el éxito o fracaso del humedal. Mientras la hidrología de un humedal artificial no es muy diferente que la de otras aguas superficiales y cercanas a superficie, difiere en aspectos importantes:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración.
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta de manera importante su hidrología, ya que, obstruye caminos de flujo, siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas, además de bloquear la exposición al viento y al sol.

Sustratos, sedimentos y restos de vegetación: los sustratos en los humedales artificiales incluyen suelo, arena, grava, roca, y materiales orgánicos como el compost. El sustrato, sedimentos, y los restos de vegetación son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.

- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal”.

Vegetación: las principales funciones de las plantas dentro de un humedal artificial son: Servir como soporte para la fijación de microorganismos, transportar oxígeno hacia la columna de agua, facilitando las reacciones de los mismos, tomar carbono, nutrientes, minerales e incorporarlos a sus tejidos¹²⁻¹³.

Las plantas disminuyen la velocidad de circulación del agua, haciendo que los sólidos suspendidos se sedimenten; estabilizan los sustratos y, al morir, se descomponen dando lugar a restos de vegetación que constituyen una fuente de carbono necesaria para la mayoría de las reacciones químicas y biológicas llevadas a cabo en un humedal¹⁴. Las plantas incrementan el volumen de porosidad de los humedales, aumentando la capacidad de filtro¹⁵.

¹² NIQUE, Op.cit.

¹³ LARA, Op. cit.

¹⁴ SHANNON, R., FLITE, O., MICHAEL and HUNTER, S. Subsurface flow constructed wetlands performance at a Pennsylvania campground and conference center. 2000. 29: 2029-2036.

¹⁵ COLEMAN, J, HENCH, K, GARBUTT, K, SEXSTONE, A, BISSONNETTE, G and SKOUSEN, J. 2000. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetland. Department of Biology, West Virginia University, Morgantown. 2000. 128: 283-295

Ramírez y Añazco¹⁶, indican que estas especies de plantas presentan una marcada estacionalidad en su desarrollo. Esta propiedad les permite además, presentar una amplia distribución geográfica. Wang, Gorsuch y Hughes, establecen que estas macrófitas están influenciadas directa o indirectamente por la calidad del agua.

Microorganismos: la eficiencia de las transformaciones de la materia orgánica e inorgánica en sus diversas formas se debe a la actividad metabólica de los microorganismos, tales como las bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios, que consumen gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes¹⁷.

Por medio de la actividad microbiana se realizan transformaciones de un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas. Además, los microbios están involucrados en los ciclos de reciclaje de nutrientes¹⁸.

Algunas transformaciones microbianas son aeróbicas, mientras otras son anaeróbicas. Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales. La comunidad microbiana de un humedal artificial puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales¹⁹.

¹⁶ RAMÍREZ, C., AÑAZCO, N. Variaciones estacionales en el desarrollo de *Scirpus californicus*, *Typha latifolia* y *Phragmites communis* en pantanos valdivianos de Chile 1982. Agro Sur 10 (2): 11-123

¹⁷ LARA, Op. cit.

¹⁸ ÑIQUE, Op.cit.

¹⁹ LARA, Op.cit.

Animales: Los humedales construidos proveen un hábitat de invertebrados y vertebrados. Los animales invertebrados, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus consumiendo materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significantes de materia durante sus fases larvales. Las ninfas de las libélulas son rapaces importantes de larvas de mosquito. Los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, aves y mamíferos²⁰.

4.2.3 Tipos de macrófitas utilizadas en los humedales. Ñique comenta que las macrófitas de los géneros *Typha*, *Scirpus* y *Phragmites* son los más utilizados en estos sistemas por su alta capacidad de reproducirse en condiciones de baja concentración de oxígeno disuelto. Coleman et.al.²¹, estudiaron el efecto de estas tres especies en el tratamiento de aguas, indicando que todas mejoraron significativamente la calidad del efluente.

²⁰ LARA, Op.cit.

²¹ COLEMAN, J, HENCH, K, GARBUTT, K, SEXSTONE, A, BISSONNETTE, G and SKOUSEN, J. 2000. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetland. Department of Biology, West Virginia University, Morgantown. 2000. 128: 283-295

Cuadro 1. Características de las especies macrófitas usadas en los humedales.

Familia	Nombre Científico	Nombre Común	Temperaturas óptimas	Temperaturas germinación	Tolerancia Salinidad (ppm)	Rango Efectivo (pH)
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	-	14 a 32° C		20	5 a 7.5
	<i>Eleocharis</i>	-	18 a 27° C			4 a 9
	<i>Scirpus</i>	Junco				4 a 9
Gramíneas	<i>Glyceria</i>	Hierba	12 a 23° C	10 a 30° C	45	2 a 8
	<i>Phragmites</i>	Maná				
		Carrizo				
Iridáceas	<i>Iris</i>	Lirio Amarillo				
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Junco	16 a 26° C		20	5 a 7.5
Tifáceas	<i>Thypha sp.</i>	Espadaña	10 a 30° C	12 a 24°C	30	4 a 10

Fuente: Lara, (2000).

A continuación se describen las principales características de las plantas empleadas en nuestro estudio.

Figura 9. *Hedychium coronarium* K. D. Koenig (Zingiberaceae). Río Blanco, Popayán.



Hedychium coronarium, es una planta herbácea perenne, en forma de césped, mide de 1,0 a 3,0 m de longitud. La planta es ornamental, se le atribuyen propiedades medicinales, crece en bosques de encino y es una especie introducida originaria del norte de la India²².

Sus flores son de color blanco, terminales (en las puntas de las ramas) y muy conspicuas. Tiene un aroma muy fuerte y agradable y por eso se cultiva como ornamental. *Hedychium coronarium* es una planta herbácea con dos tipos de tallos. Unos son subterráneos rizomatosos gruesos. Saliendo de éstos, los otros son aéreos, finos, rectos, rígidos. Los tallos aéreos tienen hojas grandes, envainadoras, cuyos peciolo envuelven el tallo alternándose a cada lado. Sus hojas son simples, alternas, de forma lanceolada, de aproximadamente 41 cm de largo. Conocida comúnmente como Caña de indio, Heliotropo, Mariposa o Lirio blanco. Es la Flor Nacional de Cuba, es también conocida como "caña de ámbar" y su nombre científico es *Hedychium coronarium* Koenig, de la familia de las Zingiberáceas. Su nombre resulta del parecido al insecto lepidóptero. No es endémica de Cuba, sino de Asia, crece en las fértiles márgenes de ríos, así como en otros lugares húmedos²³.

²² GÓMEZ, L.D. Las plantas acuáticas y anfibias de Costa Rica y Centroamérica. Costa Rica: Universidad Estatal a distancia, 1984.

²³ Ibid.

Figura 10. Flor *Hedychium coronarium*.



Fuente: Hugo Arcila 2008.

Fue en 1936 que los botánicos del Jardín de la Paz en Argentina, pidieron a sus homólogos cubanos que determinaran cuál podría ser la flor nacional. El 13 de octubre de ese mismo año, fue elegida la mariposa, debido a que su blancura representa la pureza de los ideales independentistas²⁴.

²⁴ Ibid.

***Phragmites australis* (Cav.)Trin. ex Steud.**

Figura 11. *Phragmites australis*. Truchifactoría El Diviso (Cauca).



Fuente: Hugo Arcila 2008.

Phragmites australis es una planta acuática perteneciente a la familia de las gramíneas (*Poaceae*). Como las eneas, el carrizo crece en zonas inundadas con el sistema radicular arraigado en el lodo o fondo del humedal, y desarrolla una estructura vegetativa emergente por encima de la lámina de agua. Según algunos autores el carrizo es la especie vegetal de mayor distribución conocida a nivel mundial de entre todas las plantas superiores. En la parte subterránea de la planta se desarrollan rizomas leñosos, escamosos y nudosos. El tallo aéreo del carrizo es generalmente simple, y como en todas las gramíneas, está formado por una sucesión de nudos y entrenudos perfectamente diferenciados que conforman la “caña” de la planta²⁵.

²⁵ BEASCOECHEA *et al.*, Op.cit. 2000

Son anuales y altos con un rizoma perenne extenso. Logran un muy buen cubrimiento en un año con separación de 0.6 m. Se han usado carrizos en Europa y han sido la planta acuática emergente más extendida. Sistemas que utilizan carrizos pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente, y más profundamente que los de las espadañas pero menos que los juncos 0,4 m.²⁶

4.2.4 Principios generales para crear humedales. Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción de humedales son básicamente, la impermeabilización del terreno, selección y colocación del medio granular para el caso de los sistemas subsuperficial, el establecimiento de la vegetación, y por último las estructuras de entrada y salida²⁷.

Mitsch y Gosselink²⁸, recomiendan tener en cuenta las siguientes condiciones:

- Diseñar el sistema para mantenimiento mínimo.
- Diseñar sistemas que funcionen con energía natural.
- Diseñar sistemas acorde con las condiciones ecológicas, hidrológicas, topográficas y climáticas del sitio.
- Diseñar el sistema con el fin de cumplir objetivos múltiples.
- Diseñar el sistema como un ecotono.
- Tener en cuenta el tiempo de adaptación de los componentes para la optimización del sistema.
- El diseño dependerá de la función.
- No se debe saturar el sistema con obras de ingeniería.

Selección del sitio: Mitsch y Gosselink, 1999 indican:

²⁶ LARA, Op.cit. 1999.

²⁷ LARA, Op.cit. 1999.

²⁸ MITSCH, W. GOSSSELINK, J. Wetlands. 3 ed. USA. Ed. Wiley. 1998. p. 653 – 686.

- Tener en cuenta el uso del entorno y de los planes futuros para el aprovechamiento del mismo.
- Realizar un estudio hidrológico en el sitio para determinar la oferta de agua.
- Tener una oferta de agua de manera frecuente.
- Determinar la textura, permeabilidad y estratificación del sustrato.
- Asegurarse de tener el material necesario y adecuado para la construcción.

4.3 CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD PÚBLICA

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta son el medio ambiente y por consiguiente la salud de la población. Lara²⁹, comenta que la protección de la salud pública es el propósito fundamental del tratamiento de residuos y le sigue en importancia la protección del medio ambiente. Por tanto, es responsabilidad de los profesionales en el tema y funcionarios públicos involucrados, asegurar que los sistemas de tratamiento logren estos objetivos. Las consideraciones en cuanto a salud, se refieren principalmente a nitrógeno, fósforo, metales, patógenos o trazas orgánicas:

4.3.1 Consideraciones en cuanto a salud

- Nitrógeno: el nitrógeno está limitado en el agua para proteger la salud y puede limitarse en aguas superficiales para prevenir eutrofización. Puede eliminarse nitrógeno en estos sistemas mediante procesos de nitrificación/desnitrificación y posterior pérdida de gas a la atmósfera.

²⁹ LARA, Op.cit. 1999.

- Fósforo: la remoción de fósforo en humedales no es muy eficaz debido a las limitadas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno. Los mecanismos principales para la remoción de fósforo son la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno.
- Metales: los metales pesados son contaminantes medioambientales comunes que se producen como resultado de actividades industriales, comerciales y domésticas. El objetivo del tratamiento es quitar los metales del medio ambiente y de la cadena alimenticia en ríos y aguas marinas.
- Trazas orgánicas: entre estos están las alternativas biológicas, químicas, fotoquímicas, y los procesos fisicoquímicos como absorción, sedimentación, y evaporación. La degradación biológica de compuestos orgánicos fácilmente degradables se considera el más importante de éstos.
- Patógenos: en lo referente a las aguas superficiales que recibirán la descarga del efluente del humedal artificial, los patógenos de interés en los sistemas de tratamiento acuáticos son bacterias y virus. Estudios significativamente completos indican que los parásitos no aumentan en el ganado que ha estado en contacto con pastos regados por agua residual. La fauna puede verse afectada por los sistemas de humedales, ya que los lodos anaerobios pueden contener el organismo causante del botulismo (*Clostridium botulinum*). Las principales vías de transmisión de enfermedades a los seres humanos desde el agua residual son: el contacto directo con el agua residual, transporte de aerosoles, cadena alimenticia, e inadecuado trato del agua para bebida.

4.3.2 Microorganismos acuáticos que provocan enfermedades. A veces se pueden encontrar en el agua potable microorganismos causantes de enfermedades. Sin embargo, como hoy en día el agua potable es meticulosamente desinfectada, las enfermedades provocadas por microorganismos son raramente causadas por beber agua. Las personas que nadan en las piscinas encontrarán que el agua en el que nadan está desinfectada con cloro, ozono, UV o dióxido de cloro. Pero hay personas que nadan en el exterior en aguas superficiales todos los años. Estas son las personas más susceptibles de contraer infecciones bacterianas e infecciones causadas por otros microorganismos, porque los microorganismos a menudo acaban en las aguas superficiales a través de vertidos industriales y excrementos animales. Los nadadores de espacios exteriores deben ser cuidadosos y leer los carteles situados en las orillas, porque el agua en la que pretenden nadar puede estar infectada, por ejemplo con el botulismo. Hay varias bacterias y protozoos que pueden provocar enfermedades cuando están presentes en aguas superficiales³⁰.

Las bacterias no solo pueden provocar enfermedades cuando entran en el cuerpo humano a través de los alimentos, las aguas superficiales también pueden ser una fuente importante de infecciones bacterianas. En el siguiente Cuadro pueden observarse varias bacterias que se pueden encontrar en aguas superficiales, y las enfermedades que causan cuando son ingeridas en grandes cantidades, junto con los síntomas.

³⁰ MICROORGANISMOS ACUÁTICOS QUE PROVOCAN enfermedades. [en línea] disponible en: <http://www.lentech.es/faq-microbiologia-del-agua.htm> [2009]

Cuadro 2. Bacterias que se pueden encontrar en aguas superficiales, y las enfermedades que causan.

Bacteria	Enfermedad/Infección	Síntomas
<i>Aeromonas</i>	Enteritis	Diarrea muy líquida, con sangre y moco
<i>Campylobacter jejuni</i>	Campilobacteriosis	Gripe, diarreas, dolor de cabeza y estómago, fiebre, calambres y náuseas
<i>Escherichia coli</i>	Infecciones del tracto urinario, meningitis neonatal, enfermedades intestinales	Diarrea acuosa, dolores de cabeza, fiebre, uremia hemolítica, daños hepáticos
<i>Plesiomonas shigelloides</i>	Plesiomonas-infección	Náuseas, dolores de estómago y diarrea acuosa, a veces fiebre, dolores de cabeza y vómitos
<i>Salmonella typha</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre
<i>Salmonella sp.</i>	Salmonelosis	Mareos, calambres intestinales, vómitos, diarrea y a veces fiebre leve
<i>Streptococcus sp.</i>	Enfermedad (gastro) intestinal	Dolores de estómago, diarrea y fiebre, a veces vómitos
<i>Vibrio El Tor (agua dulce)</i>	Cólera (forma leve)	Fuerte diarrea

Fuente: FAQ de la purificación del agua (2009).

En el Cuadro 3 se pueden observar diferentes protozoos que se pueden encontrar en aguas superficiales y las enfermedades que pueden causar cuando son ingeridos en grandes cantidades, además de los síntomas.

Cuadro 3. Protozoos que se pueden encontrar en aguas superficiales y las enfermedades que pueden causar.

Microorganismo	Enfermedad	Síntomas
<i>Amoeba</i>	Disentería ameboidea	Diarrea, dolor de cabeza, dolor abdominal, escalofríos, fiebre; puede causar abscesos en el hígado, perforación intestinal y muerte
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Cryptosporidiosis	Sensación de mareo, diarrea, vómitos, falta de apetito
<i>Giardia</i>	Giardiasis	Diarrea, calambres abdominales, flatulencia, eructos, fatiga
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis	Gripe, inflamación de las glándulas linfáticas, aborto e infecciones cerebrales

Fuente: FAQ de la purificación del agua (2009).

4.3.3 Mecanismos depurativos típicos en tratamientos de fitodepuración.

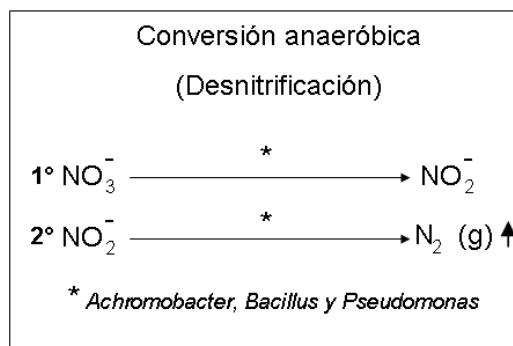
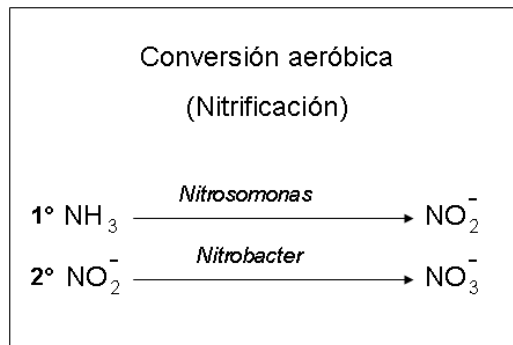
Los procesos químico-físicos y de tipo biológico deben ser agregados a los tratamientos de fitodepuración.

- Eliminación de sólidos en suspensión: los sólidos suspendidos son removidos básicamente por sedimentación o filtrado, por ejemplo a través de algún mecanismo de tipo mecánico. Los coloides son eliminados por adsorción por otros sólidos, o degradación biológica de tipo hidrolítica (provocando la ruptura enzimática de macromoléculas orgánicas en una etapa preliminar del metabolismo bacterial).

- Eliminación de materia orgánica: es realizada por los microorganismos que se asocian al sistema radicular de las plantas y que reciben oxígeno a través del sistema de aireación. También se elimina una parte de la materia orgánica por sedimentación.

- Eliminación de nitrógeno: se logra a través de la absorción directa por las plantas y, en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias. La eliminación de amonio y nitratos por esta vía es bastante compleja. Es un proceso de tratamiento del agua que necesita conversión tanto aeróbica como anaeróbica para eliminar los contaminantes. En la fase de conversión aeróbica hay dos especies bacterianas implicadas. Primero, las bacterias Nitrosomonas convierten el amoniaco en nitrito. Segundo, las bacterias Nitrobacter convierten los nitritos en nitratos. Estos dos procesos juntos son comúnmente conocidos como el proceso de nitrificación.

Después de eso, las bacterias anaeróbicas entran a actuar. Estas bacterias convierten los nitratos en nitrógeno gaseoso atmosférico. Este proceso se llama desnitrificación. La desnitrificación es realizada por con muchas bacterias anaeróbicas, tales como *Achromobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas*. La primera fase de la desnitrificación es el proceso inverso a la nitrificación, vuelve a transformar el nitrato en nitrito. La segunda fase de la desnitrificación transforma el nitrito en nitrógeno gaseoso, el cual puede ser liberado a la atmósfera sin causar daños ambientales. A continuación se resumen el proceso de nitrificación y desnitrificación, de la siguiente manera:



- Eliminación de fosfatos: se logra por absorción de las plantas y precipitación de fosfatos insolubles. La remoción de fósforo en la mayoría de los humedales artificiales no es muy eficaz, debido a las pocas oportunidades de contacto

entre el agua residual y el terreno. Algunos sistemas usan arena en lugar de grava para aumentar la capacidad de retención de fósforo, pero este medio requiere instalaciones muy grandes debido a la reducida conductividad hidráulica de la arena.

- DBO y DQO: los sistemas de tratamiento para “humedales” contribuyen significativamente a la reducción de los niveles de DBO, a través de la sedimentación física de sólidos en los canales del sistema de los humedales y vía filtrado directo de sólidos (a través de plantas o procesos biológicos con microorganismos en la rizósfera).

Las sustancias orgánicas que entran en un sistema de fitodepuración pueden ser en forma de sólidos sedimentales o sustancias disueltas. La fracción suspendida es removida por sedimentación o filtrado, mientras que los microorganismos adjuntos y suspendidos son responsables por la degradación de la fracción disuelta.

La degradación biológica de sustancias orgánicas por microorganismos puede tomar lugar en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Cuando el oxígeno está presente, bacterias heterotróficas oxidan moléculas orgánicas, alcanzando la energía necesaria para sus funciones vitales. Hay degradación aeróbica en la porción oxigenada de la columna de agua y la rizósfera, y degradación anóxica cerca de las áreas oxigenadas donde la ausencia de oxígeno molecular está asociada con una fuente de oxígeno combinado (mayormente nitratos y sulfatos). Finalmente también hay degradación anaeróbica en las áreas sin oxígeno, ya sea libre o combinado, pero especialmente en los sedimentos. La

expansión del área aeróbica depende de hecho, de la difusión del sistema de raíces de estas plantas.

El conjunto de procesos abióticos (físicos/químicos) o bióticos (microbianos/fitológicos) que tienen lugar en un humedal construido permiten reducir el número de microorganismos patógenos. Los diferentes procesos metabólicos microbianos juegan un papel fundamental en la eliminación de compuestos orgánicos en los ambientes aeróbicos/anaeróbicos de los humedales. Igualmente, las plantas son las responsables, entre otros procesos, de la absorción directa de los contaminantes que son necesarios como nutrientes, o mediante la rizodegradación, que facilita la degradación microbiana³¹.

- Metales: los metales pesados son contaminantes medioambientales comunes que se producen como resultado de actividades industriales, comerciales y domésticas. El objetivo del tratamiento es quitar los metales del medio ambiente y de la cadena alimenticia en ríos y aguas marinas³².
- Trazas orgánicas: entre estos están las alternativas biológicas, químicas, fotoquímicas, y los procesos fisicoquímicos como absorción, sedimentación, y evaporación. La degradación biológica de compuestos orgánicos fácilmente degradables se considera el más importante de éstos³³.

³¹ GARCÍA, J.; MORATO, J. y BAYONA, J M. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos; una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. Barcelona (Esp.) : Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

³² LARA, Op.cit. 1999

³³ LARA, Op.cit. 1999

5. ANTECEDENTES

5.1 HISTORIA DE LA CONTAMINACIÓN

Desde la antigüedad, el interés por el suministro de agua potable y recolección de aguas negras alcanzó niveles muy avanzados en los imperios mesopotámicos de Asia y Babilonia. En minas descubiertas cerca de Bagdad se han encontrado evidencias de letrinas y alcantarillas que datan desde 2500 años antes de Cristo. Situaciones similares se han descubierto en la India en la misma época¹.

La civilización prehelénica en la isla de Creta (300 a 1000 años antes de Cristo) transportaba agua bajo presión y recolectaba sus desechos mediante sistemas de alcantarillas. Partes de estos sistemas aún operan en el lugar. Las llamadas cloacas romanas fueron diseñadas principalmente para canalizar agua superficial y subterránea. En Londres (1815), Boston (1833) y Paris (1880) se dictaron leyes respecto a la disposición de aguas negras. A pesar de estos intentos por sanear las aguas, el acelerado desarrollo industrial y agrícola a fines de siglo pasado y principios y mediados del presente y la explosión demográfica de las últimas décadas, agravó de tal manera el problema, que los países más industrializados han comenzado a desarrollar soluciones prácticas para el control de la contaminación. Ríos como el Sena en Francia y el Támesis en Inglaterra, son un ejemplo de como un ecosistema puede ser recuperado ecológicamente².

¹ ROLDÁN, Op.cit. 1992

² ROLDÁN, Op.cit. 1992

Arcos *et al.*³, indican que la primera preocupación real por la contaminación del agua se produjo a fines del siglo XIX, cuando la revolución industrial había estimulado el crecimiento de las ciudades además, de la costumbre de arrojar el agua residual a los ríos cercanos, convirtiéndolos en pozos negros y como la mayor parte del agua potable se tomaba de los mismos ríos, surgieron epidemias.

En los últimos 150 años el hombre ha utilizado sistemas convencionales de depuración de las aguas para aliviar este mal. Pero no fue hasta la década de los 50 que se inician las investigaciones con plantas como *Scirpus spp* o Jacinto de agua (*Eichornia spp*) como posibles absorbentes de cargas de las aguas residuales. A partir de 1970, el gobierno, fundaciones y empresas alemanas dieron apoyo financiero y científico a las investigaciones de los sistemas humedales artificiales en tres universidades alemanas, lo que llevo a que el sistema fuera reconocido e incorporado como propuesta técnica en algunos países. A nivel internacional, desde 1976 se reportan en Sudáfrica, Estados Unidos y Gran Bretaña experiencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales y a partir de 1986, se empiezan a introducir los sistemas de humedales artificiales. En la actualidad este tipo de sistemas se aplica en varios países de Europa, América, África y Australia, para tratar efluentes con muy distintas características⁴.

Hay evidencia de que las plantas acuáticas pueden absorber sustancias radiactivas, como es el caso de *Eleocharis dulcis*, que tuvo un buen crecimiento en humedales artificiales construidos para tratar efluentes de minas de uranio,

³ ARCOS RAMOS, R., CANTELLANO DE ROSA, E., ALEJO NABOR, M., GARCÍA MORALES R., SOLÍS CASAS, R. Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Sta. María Nativitas Texcoco Edo. de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM. México 1999.

⁴ Ibid.

encontrándose que la planta acumula grandes cantidades de uranio en sus raíces⁵.

En otra investigación, Otto *et al*⁶., encontraron que la vegetación tiene una fuerte influencia en la retención de N en wetlands, ya sea por absorción directa en los tejidos de las plantas o por desnitrificación provocada por microorganismos. Ellos trabajaron con las especies *Lythrum salicaria* L., *Phragmites australis* y *Typha angustifolia* L.

A lo anterior hay que agregar que la factibilidad de utilizar plantas acuáticas depende muchas veces de la temperatura ambiental, pues ellas presentan actividad estacional que puede afectar seriamente su rendimiento en sistemas de tratamiento de aguas industriales que deben operar todo el año⁷⁻⁸.

El uso de los filtros en grava se encuentra bien documentado y su aplicación en Colombia ha sido desarrollada como sistemas de pretratamiento para filtros lentos en arena, tecnología que es usada para la potabilización del agua (Fernández *et al.* 1998). Una experiencia con el uso de sedimentadores es reportada por Puentes (2005), en la piscifactoría El Diviso, localizada en el Departamento del Cauca en Colombia. Los sedimentadores operan con un tiempo de retención de 90 a 120 min. Aunque no se reportan los valores de eficiencia de remoción en sólidos y materia orgánica, el documento indica que su eficiencia es alta, pero que requiere de un seguimiento que permita definir su eficiencia real.

⁵ OVERALL, R. AND PARRY, D. The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland filter. *Environmental Pollution* 2004. 132: 307- 320.

⁶ OTTO, et.al. Op.cit.

⁷ SEN, N.S., KAPOOR, V.K. and GOPALKRISHNA, G. Seasonal growth of *Eichhornia crassipes* (Mart.) and its possible impact on the primary productivity and fishery structure in a tropical reservoir. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* 1990. 18 (3): 307-323.

⁸ FRITIOFF, A., KAUTSKY, L. and GREGER, M. Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants. *Environmental Pollution.* 2005. 133: 265-274.

En España, se han construido humedales artificiales en Cataluña⁹; Cantabria¹⁰; León¹¹; Andalucía (Junta de Andalucía, 1997); Almería¹²⁻¹³; Barcelona¹⁴.

5.2 EXPERIENCIA PREVIA

Actualmente la empresa Tratar, con sede en Popayán Colombia realizó los primeros trabajos con sistemas de humedales de flujo subsuperficial en Colombia, los cuales se hicieron en asocio con Tecnoskandia, empresa de origen sueco, radicada en Bogotá, la que aportó sus conocimientos y experiencias utilizando la planta *Phragmites comunis* o *Phragmites australis*, como principal elemento para acción filtrante.

Obras ejecutadas en Colombia por la empresa TRATAR:

- Planta piloto para 10 (P/E) (personas equivalentes). Colegio Encuentros.
- Planta para 300 estudiantes = 100 (P/E) (personas equivalentes).
- Varias Plantas de Tratamiento en Residencias Particulares en Cali.
- Varias Plantas de Tratamiento a Instituciones Públicas y Privadas.
- Planta de Tratamiento Universidad del Cauca Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Planta de Tratamiento matadero municipal Popayán, Cauca.
- Plantas de Tratamiento municipales en Ecuador.

⁹ ALARCÓN, A., KOLB, P., MARULL, J. Recuperación medioambiental del tramo final del río Besós. 1997.

¹⁰ CASTILLO, P. A., COLLARDO R. Eliminación de nitrógeno en sistemas naturales de depuración de aguas residuales: análisis comparativo. Retema, 52: 49-55. 1996.

¹¹ GARCÍA, M., BÉCARES, E., SOTO, F., LUIS, E. Macrófitos en la depuración de aguas residuales. Su función en la eliminación de bacterias. Tecnología del agua, 185: 64-67. 1999.

¹² LAHORA, A. Humedales controlados como tratamiento terciario de aguas residuales urbanas. Rivera. Conclusiones del Encuentro Medioambiental (Junta de Andalucía), Instituto de Estudios Almerienses (Diputación Provincial de Almería), Universidad de Almería, Grupo Ecologista Mediterráneo. Almería 1998.

¹³ LAHORA, A. Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo costo en la depuración de aguas residuales urbanas. Gestión de aguas del Levante Almeriense 2000.

¹⁴ PIGEM, J., MARZO, R., DE LA PEÑA, J. L., LLAGOSTERA, R. Infiltración/percolación y humedales como tratamientos blandos en la depuración de aguas residuales. Tecnología del Agua, 1999. 186: 48-53.

Figura 12. Humedal artificial de flujo subsuperficial, sede Las Guacas, UNICAUCA. Popayán (Cauca).



Fuente: Carlos Sarzosa (2008).

- Planta de Tratamiento - Casa Perafán Simonds, Pino Pardo.
- Planta de Tratamiento Parcelación La Cordillera.
- Planta de Tratamiento - Casa Castrillón, Luna Blanca.
- Planta de Tratamiento - Casa Sarzosa Varona.
- Planta de Tratamiento - Casa Duque Muñoz.
- Planta de Tratamiento - Estadero Caballo de Copas.
- Planta de Tratamiento - Granja María Auxiliadora.
- Planta de Tratamiento - Granja FEDAR.
- Planta de Tratamiento - Escuela San Felipe Neri Pasto (N).
- Planta de Tratamiento - El Crucero, municipio de Caldonó.
- Planta de Tratamiento - Nueva Esperanza, municipio de Piendamó.
- Planta de Tratamiento - Casa Rebolledo Manzano, Los Robles.
- Planta de Tratamiento - Casa Paredes Muñoz, La Variante.

5.3 CONTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Investigaciones en Santee, California, con sistemas de flujo Subsuperficial, han estudiado la contribución de la vegetación a la eliminación de bacterias de coliformes en humedales artificiales. El flujo del afluente era agua residual municipal primaria. La remoción de coliformes fue del 99%, debido a la sedimentación, filtración y absorción. La luz del sol ha demostrado tener un efecto letal en los coliformes¹⁵.

Midiendo la proporción de inactivación de bacterias de coliformes en bolsas selladas con incubación in situ debajo de la superficie de la arena gruesa de un humedal tipo subsuperficial. El resultado fue que la proporción de inactivación a través del sistema del humedal era dos veces que la de uno sin contacto con la vegetación. La diferencia indica que la mitad de la degradación se debe a la acción que la vegetación efectúa¹⁶.

Los virus en la mayoría de los sistemas del tratamiento son más resistentes a la inactivación que las bacterias. Se probó la eficacia de remoción de un sistema de flujo subsuperficial en Santee, California 98.3% en escala de demostración con un lecho de juncos. Esto involucró la plantación en el agua residual afluente de virus y el estudio de la eficacia de remoción subsecuente¹⁷.

¹⁵ LARA, Op.cit. 1999.

¹⁶ LARA, Op.cit. 1999.

¹⁷ LARA, Op.cit. 1999.

El humedal artificial del tipo subsuperficial en Santee, California recibió agua residual municipal que se cargó con cobre, zinc y cadmio. Las eficiencias de remoción fueron respectivamente 99, 97, y 99%. La remoción se atribuyó a los fenómenos de precipitación - adsorción. La precipitación química es reforzada por el metabolismo del humedal, sobre todo de las algas que reducen los niveles de CO₂ disuelto y aumentan el pH¹⁸⁻¹⁹.

¹⁸ LARA, Op.cit. 1999.

¹⁹BEASCOECHEA, E. CURT, M.D. FERNÁNDEZ, J. MUÑOZ, J. Manual de fitodepuración. Universidad Politécnica de Madrid. España: Edita. 2000. p. 91 - 105.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha establecido un estudio piloto para determinar la eficacia en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la Truchifactoría El Diviso mediante el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial: humedal con *H. coronarium*, humedal con *Phragmites australis*; adicionalmente, se construyó un humedal control el cual no tuvo ningún tipo de macrófita.

6.1 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en la truchifactoría El Diviso (Fig.13), localizada en el corregimiento de Quintana, región del río las Piedras, al oriente del municipio de Popayán y que incluye las veredas San Juan y San Ignacio, a 2167 m.s.n.m y con coordenadas geográficas N 02° 22' 59,8" y W 76° 29' 43,4", en una zona de vida definida como bosque húmedo montano bajo (bh –MB) y una temperatura media anual de 10°C.

En esta zona de vida y específicamente en el sector de la cuenca donde se instaló la planta, se destacan entre otras las siguientes especies: aliso (*Alnus acuminata* Kunth), cajeto o teterete (*Delostoma integrifolium* D. Don), cordoncillo (*Piper* sp), encenillo (*Weinmannia pubescens* Kunth), guarango (*Mimosa quitensis* Benth.), laurel de cera (*Morella pubescens* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Wilbur), lechero (*Euphorbia latazí* Kunth), mayo (*Meriania speciosa* Naudin), niguito o huesito (*Miconia versicolor* Naudin), roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.) y el uvo (*Clusia* sp). En el mismo predio, en los humedales cercanos sobresalen las macrófitas:

barbasco (*Polygonum punctatum* Elliott), junco (*Juncus* sp), y el lirio blanco (*Hedychium coronarium* D. Koenig).

Bordeando el río se encuentran áreas de potrero destinadas a la ganadería donde abundan las especies de: kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov.) y grama nativa (*Paspalum notatum* Flügge).

Figura 13. Truchifactoría, El Diviso



Fuente: Google earth.



Fuente: Hugo Arcila 2008.

Figura 14. Humedales artificiales, truchifactoría El Diviso, (Cauca).



Fuente: Hugo Arcila 2008.

6.2 RECOLECCIÓN Y DESINFECCIÓN DE SEMILLA

Los rizomas de *Hedychium coronarium* y de *Phragmites australis* para el experimento se obtuvieron del medio natural el 13 de marzo del 2008 en zonas aledañas a río Blanco y en Unicauca, sede Las Guacas respectivamente, los rizomas colectados se transportaron en bolsas plásticas humedecidas. En el laboratorio se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 2,0% Vol. (inmersión 60") y se lavaron 2 veces con agua de la llave y 2 veces con agua destilada. Los rizomas fueron humedecidos con cristales de sábila por un tiempo de 12 horas con el fin de cicatrizar posibles lesiones y de actuar como enraizador natural.

Figura 15. Recolección y desinfección de semilla.



Fuente: Hugo Arcila 2008.

Los humedales a construir constituyen tratamientos de tipo secundario, es decir que el agua a tratar ya ha pasado por un tratamiento previo, que incluye un sedimentador.

Las macrófitas se transportaron en cajas plásticas y se sembraron el 14 de marzo del 2008 a las 8:30 am. en estado de rizomas: *Hedychium* con hijuelos de 5 cm. de longitud. *Phragmites*, rizomas de 30-40 cm. de longitud y 1,5 cm. de diámetro con hijuelos de 5 cm. de longitud. La siembra se hace en los dos surcos centrales, los dos restantes, cada uno en un costado sirve como borde libre. Se deja un espacio de 50 cm. entre planta y planta.

6.3 ESQUEMA DEL MONTAJE PARA EL EXPERIMENTO PILOTO

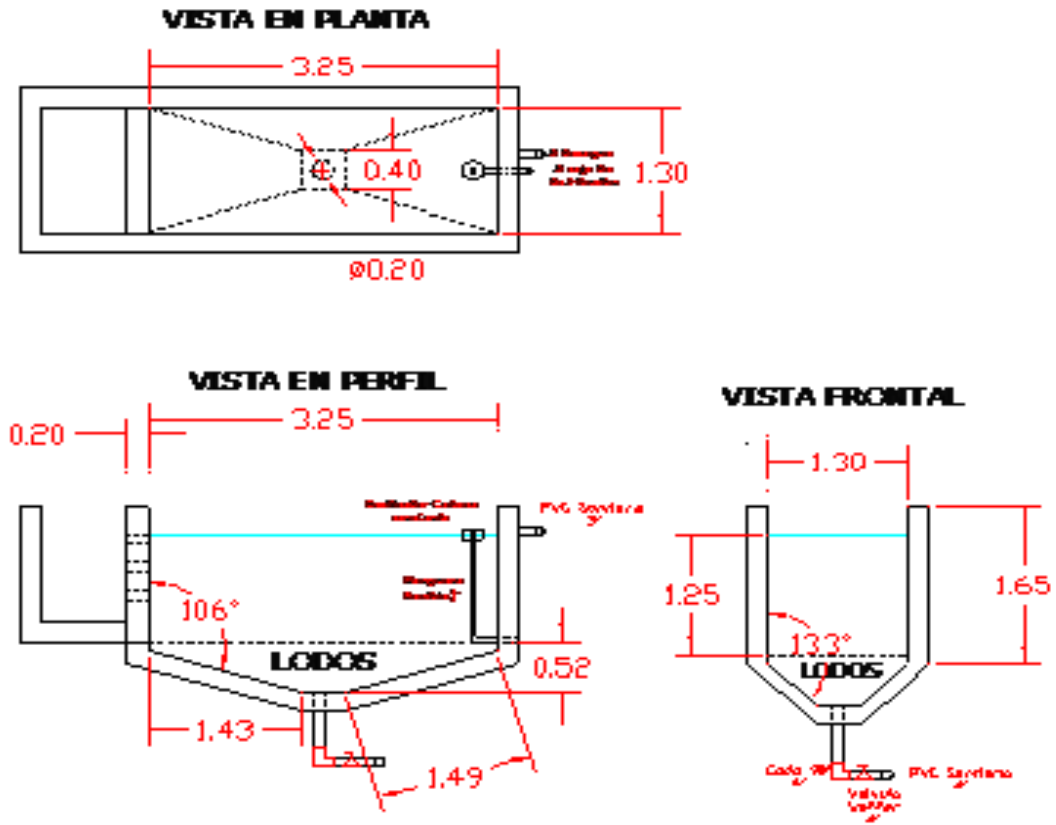
Figura 16. Planta piloto truchifactoría El Diviso



Fuente: Hugo Arcila 2008

6.3.1 Sedimentador. Dimensiones: 3.25m de largo x 1.30m de ancho x 1.65m de profundidad. El sistema recibe el agua directamente de la piscícola y posee dos salidas, una para lodos y otra que va directamente a la caja de distribución.

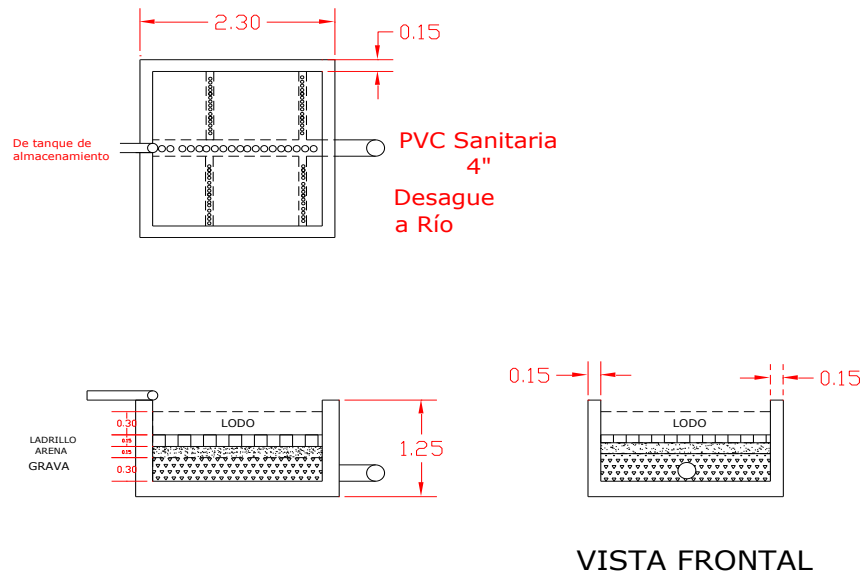
Figura 17. Vista general del Sedimentador.



Fuente: Proyecto Efluentes Piscícolas Minagricultura.

6.3.2 Lecho de secado de lodos.

Figura 18. Vista general del lecho de secado de lodos.

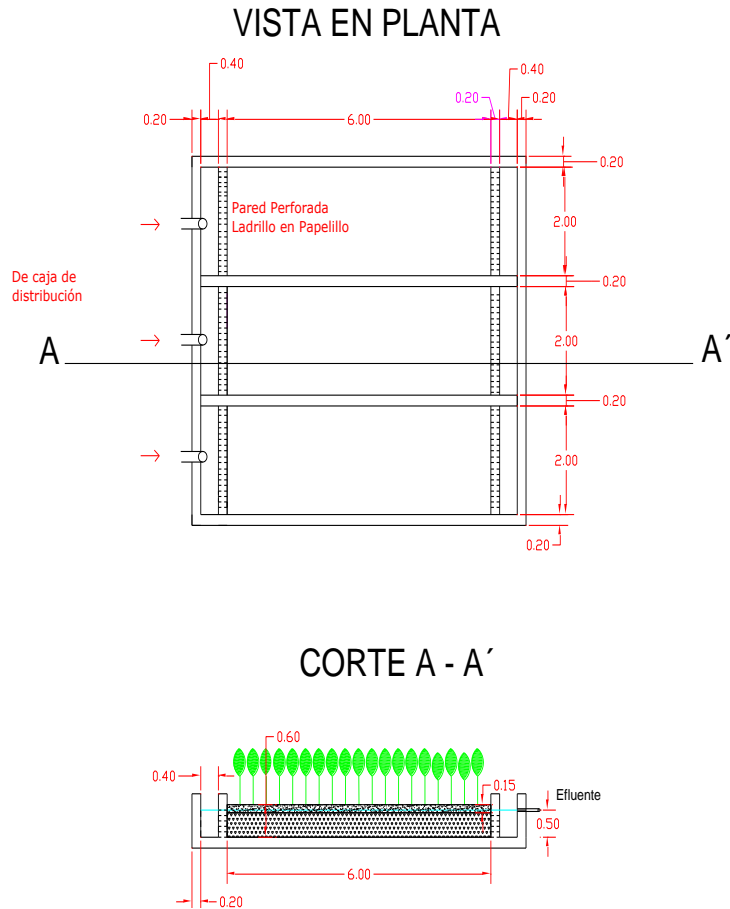


Fuente: Proyecto Efluentes Piscícolas Minagricultura.

6.3.3 Humedales artificiales. Se ha establecido trabajar con una población de 52 plantas por humedal, para lo cual los humedales cuentan con las siguientes características:

- Dimensiones del humedal: 6,0 m. de largo x 2,0 m. de ancho x 0,6 m. de profundidad.
- Sustrato de fijación: grava de diferente calibre.
- Surcos: 4 surcos con capacidad para 13 plantas cada uno.

Figura 19. Vista general de los humedales artificiales.



Fuente: Proyecto Efluentes Piscícolas Minagricultura.

6.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En el humedal se asumen condiciones de flujo laminar y de pistón, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. También asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos en el flujo que pueden llegar a

presentarse por una desigual porosidad (Lara, 1999). Levenspiel (1999) establece que el flujo a través del medio poroso genera turbulencias localizadas por los cambios de dirección que experimenta el fluido al rodear las partículas del medio aún a velocidades muy bajas. Esto genera perturbaciones que distorsionan el patrón de mezcla y alteran los mecanismos de transporte de sustrato hacia y desde las células que conforman la biomasa activa del sistema. Este hecho tiene implicaciones directas en la eficiencia de los procesos de degradación/transformación de los contaminantes^{20,21}.

El tiempo de retención hidráulica dentro de los humedales fue de 4 días y el caudal de 0.5 L/min, posteriormente, el agua es conducida hacia el exterior por canales de PVC, lista para el reuso.

Lara²² recomienda tener en cuenta los factores más importantes, que aseguran el rendimiento del sistema:

- Proporcionar el contacto del agua con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación y con el sedimento.
- Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Mantener un ambiente saludable para los microbios.
- Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación.

Hidrología: Mantener el flujo subsuperficial del agua en los humedales.

²⁰ BRIX, H. "Use of subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment – an overview". Natural and constructed wetlands for wastewater treatment and reuse – experience, goals and limits. Ramadori, R. *et al.* Editors. Rome, Italy. 1995.

²¹ ASCUNTAR RIOS, D., TORO VÉLEZ, A., PEÑA VARÓN, M., MADERA, C. A. Influencia del Crecimiento Biológico en la Hidrodinámica y en la Remoción de Materia Orgánica en un Humedal de Flujo Sub-Superficial sin Vegetación (HFSSV), para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Regiones Tropicales. En: Conferencia Latinoamericana de Saneamiento, 2007.

²² LARA, Op.cit. 1999.

Vegetación: Debe tenerse cuidado de no exceder los límites de tolerancia de las especies usadas durante periodos largos de tiempo. La vegetación debe ser inspeccionada regularmente y deben quitarse las especies invasoras. Además, no exceder la densidad de siembra, ya que esto podría generar flujos superficiales del agua.

Control: La supervisión será una herramienta operacional importante que:

- Proporciona datos para mejorar el rendimiento del tratamiento.
- Identifica problemas.
- Determina el cumplimiento de los requisitos reguladores.

6.5 TÉCNICAS PARA ANÁLISIS FISCOQUÍMICO HÍDRICO

Para establecer la eficacia de los humedales se analizaron los siguientes parámetros físicos, químicos y microbiológicos hídricos tanto en el afluente como en el efluente de cada humedal. Es importante tener en cuenta que los puntos de muestreo de los tres tratamientos se denominaron así: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*).

6.5.1 Fase de campo. En campo los parámetros medidos fueron: Temperatura hídrica, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, concentración de oxígeno y porcentaje de saturación de oxígeno, para lo cual se empleó sonda multiparamétrica marca Hach.

6.5.2 Fase de laboratorio. Los siguiente parámetros fueron determinados en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de Unicauca, para lo cual se tomó un litro de agua *in situ* y se transportaron en viales de plásticos debidamente congeladas y etiquetadas con el fin de detener los procesos de degradación que alteren los resultados: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total, Nitrógeno amoniacal, Fósforo Total y Sólidos Suspendidos Totales. Los métodos de laboratorio utilizados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos hídricos se hicieron siguiendo las guías del Standard Methods for Examination of Water and Waster Water 20 ed.

Demanda biológica de oxígeno DBO₅. (Método modificación de azida):

Equipos y Materiales:

- Incubadora a 20°C
- Agitador electromagnético
- Bureta
- Erlenmeyer
- Botellas Winkler
- Pipetas graduadas

Demanda química de oxígeno DQO (método espectrofotométrico manual Hach)

Equipos y Materiales:

- Reactor COD. Modelo 45600
- Espectrofotómetro HACH DR/2010
Precisión: Desv. de + 1.3 mg/L (rango 0-45 mg/ L COD)
Desv. de + 2.7 mg/L (rango 0-150 mg/ L COD)
Desv. de + 18 mg/L (rango 0-1500 mg/ L COD)
- Celdas para DQO (HACH)

Sólidos suspendidos totales SST (método gravimétrico).

Equipos y Materiales:

- Equipo de filtración al vacío
- Horno de 0°C - 150°C
- Balanza analítica
- Papel filtro
- Desecador
- Probeta de 100 ml
- Frasco lavador

Determinación nitrógeno total y amoniacal (método macro kjeldahl)

Equipos y Materiales:

- Digestor para nitrógeno kjeldahl marca Buchi
- Tubos para digestión marca Buchi
- Destilador marca Buchi

Determinación de fósforo total (método de cloruro estañoso)

Equipos y Materiales:

- Espectrofotómetro: a una longitud de onda de 690 nm provisto de celdas de 10 cm de paso de luz
- Balanza analítica
- Centrífuga
- Estufa de seis puestos
- Balones aforados de 100 ml
- Pipetas graduales y volumétricas

6.6 TÉCNICAS PARA ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

6.6.1 Fase de laboratorio. En el laboratorio del grupo de Recursos Hidrobiológicos de Unicauca, se analizaron los parámetros microbiológicos: Coliformes fecales y totales, para lo cual se tomaron 250 ml de agua *in situ* y se transportaron en frascos de vidrio esterilizados, debidamente congeladas y etiquetadas con el fin de conservar las muestras.

Las técnicas empleadas para la determinación del número de bacterias fueron:

- Detección y cuantificación de coliformes fecales: técnica filtración por membrana, de acuerdo con el método estándar No. 9222 B. Métodos para la determinación de aguas y aguas residuales²³.
- Detección y cuantificación de coliformes totales: técnica filtración por membrana, de acuerdo con el método estándar No. 9222 D. Métodos para la determinación de aguas y aguas residuales²⁴.

Adicionalmente para determinar la biomasa generada en cada tratamiento y hacer un análisis proximal de la vegetación, se cosechó en cada humedal la biomasa aérea (vástago y hojas) generada durante el tiempo de muestreo, con una poda de rebaje sobre todas las plantas a 10 cm de altura. Para calcular la biomasa las muestras seleccionadas aleatoriamente se pesaron (peso fresco), correspondientes a 3 muestras de cada fila (tres filas por humedal), luego se secaron en horno a 75°C por 72 horas, obteniendo la materia seca generada.

²³ APHA-AWWA-WEF. "Standard methods for the determination of water and wastewater". 1998. 20st Edition. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Enviroment Federation. USA. 1998.

²⁴ Ibid.

En cuanto al análisis proximal, las muestras seleccionadas aleatoriamente se analizaron en el Laboratorio de análisis industriales del Departamento de Química de UNIVALLE. Este análisis se hizo con el objetivo de conocer el contenido nutricional de cada especie, y no con el fin de comparar las dos especies utilizadas en la investigación.

6.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

6.7.1 Análisis estadístico fisicoquímico hídrico. Para la descripción de las variables en cada uno de los puntos de muestreo en el capítulo de resultados se calcularon los **estadísticos descriptivos**: Media aritmética, desviación estándar, mínimo, máximo y rango.

En el capítulo de análisis de resultados se empleó el test de Kolgomorov-Smirnov para comprobar el ajuste a una distribución normal de cada variable.

Para las variables que se ajustaron a la normalidad se ha aplicado un modelo de análisis de varianza (ANOVA) de un factor para valorar si difieren los distintos niveles o puntos de muestreo: 1 (sedimentador), 2 (afluente), 3 (efluente humedal con *Phragmites*), 4 (efluente humedal control), 5 (efluente humedal con *Hedychium*).

De este procedimiento, si el valor de significancia observado (P), es *menor* que 0,05, puedo rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que éstas no son iguales en los distintos puntos de muestreo.

Se analiza el estadístico de Levene, el cual permite contrastar la hipótesis de que las varianzas de los puntos de muestreo son iguales. Si el nivel crítico es *menor* que 0,05, debo rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas y concluir, que en los puntos de muestreo definidos, las varianzas de las variables no son iguales.

En este modelo se utilizó la opción comparaciones múltiples, utilizando la prueba de Tukey asumiendo varianzas homogéneas.

Se realizó análisis no paramétrico de un factor, por el método de Kruskal-Wallis para las variables que no se ajustaron a la normalidad, usando la mediana de cada uno de los puntos de muestreo para realizar las diferentes comparaciones.

De este procedimiento, si el valor de significancia observado (p), es *menor* que 0,05, puedo rechazar la hipótesis de igualdad de medianas y concluir que éstas no son iguales en los distintos puntos de muestreo.

Por último, se utiliza la correlación de variables por el método de Pearson para determinar qué tan intensa es la relación entre dos variables. El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde menos uno hasta uno, indicando que mientras más cercano sea el valor a uno o a menos uno, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables. Es importante tener en cuenta que el valor P , es la significancia estadística del coeficiente de correlación.

Para llevar a cabo los cálculos estadísticos se utilizaron los paquetes estadísticos MINITAB versión 15.1 y SPSS versión 15.

6.7.2 Análisis estadístico microbiológico. Igualmente, se pretendió establecer estadísticamente, cuál fue el humedal que presentó la mayor remoción de bacterias coliformes. Para tales efectos, se realizaron pruebas de normalidad, análisis de varianza y pruebas no paramétricas de Kruskal- Wallis y Spearman.

Para llevar a cabo los cálculos estadísticos se utilizó el paquete estadístico versión SPSS versión 11.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA HÍDRICA

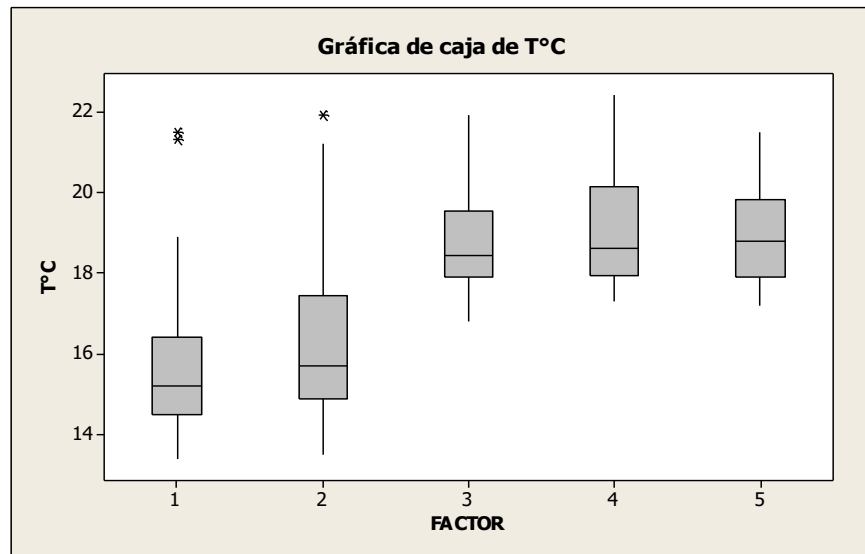
7.1.1 Medidas (Estadísticos descriptivos)

Cuadro 4. Resumen estadísticos descriptivos para Temperatura hídrica

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
T°C	1	15,810	2,056	13,01	13,400	21,500
	2	16,403	2,117	12,90	13,500	21,900
	3	18,790	1,266	6,74	16,800	21,900
	4	18,940	1,290	6,81	17,300	22,400
	5	18,890	1,148	6,07	17,200	21,500

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 20. Cajas para temperatura hídrica.



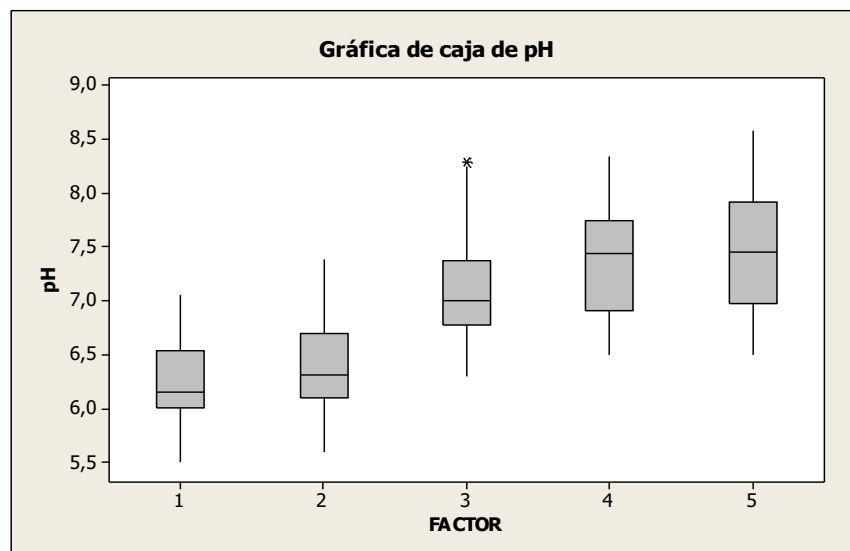
La Figura 20 indica que la temperatura media del agua al ingresar al sedimentador es de 15,81 °C, la cual se incrementa en aproximadamente 3 °C en cada uno de los humedales debido al tiempo de retención hidráulica aplicado durante los tratamientos. Dichos valores alcanzados (18,9 °C) siguen siendo apropiados para el normal desarrollo de la biota acuática. La temperatura en un ecosistema acuático incide en la densidad del agua, solubilidad de gases, reacciones químicas y en procesos biológicos como es el caso de la degradación de materia orgánica.

Cuadro 5. Resumen estadísticos descriptivos para pH

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
pH	1	6,2797	0,3858	6,14	5,5000	7,0600
	2	6,4000	0,4272	6,68	5,6000	7,3900
	3	7,1033	0,5286	7,44	6,3000	8,2900
	4	7,3693	0,5180	7,03	6,5000	8,3400
	5	7,480	0,616	8,23	6,500	8,590

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 21. Cajas para pH



La Figura 21 muestra que los valores de pH determinados en el efluente de cada humedal varían entre 7,1 y 7,5, lo cual indica que hay un funcionamiento del sistema “buffer” (HCO_3^-), siendo éste fisiológicamente óptimo para cultivo y levante de ictiofauna. Los valores de pH en las aguas naturales, varían en función del estado trófico del sistema, concentración de CO_2 , presencia de iones que determinan la alcalinidad (HCO_3^- ; SO_4^{2-} ; PO_4^{3-} , etc.), acidez mineral, factores edáficos, presencia de ácidos orgánicos (ácidos húmicos), en la columna de agua¹.

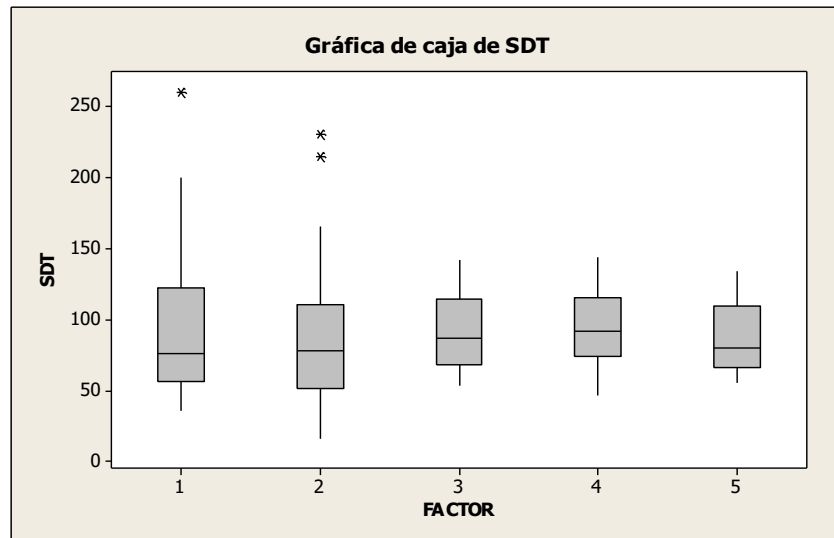
Cuadro 6. Resumen estadísticos descriptivos para sólidos disueltos totales

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
SDT	1	96,71	52,61	54,40	35,60	260,00
	2	89,59	51,33	57,30	15,50	230,00
	3	91,54	26,22	28,64	53,10	142,00
	4	91,92	24,91	27,10	46,00	144,00
	5	88,50	25,89	29,26	55,50	134,00

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

¹VÁSQUEZ, G. Evaluación de la calidad de las aguas naturales. Significado y alcances en la determinación y análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos fundamentales. Grupo de Recursos Hidrobiológicos Continentales. UNICAUCA. 2001.

Figura 22. Cajas para sólidos disueltos totales

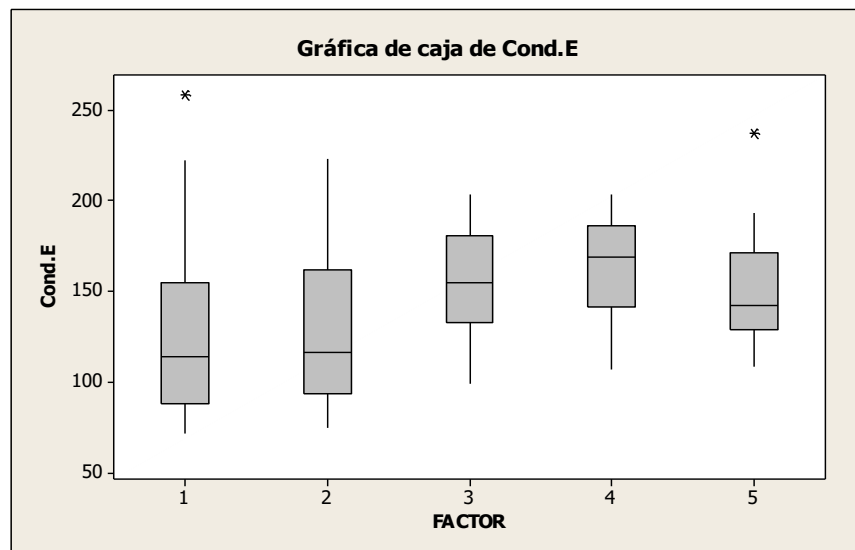


Cuadro 7. Resumen estadísticos descriptivos para conductividad eléctrica.

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
Cond.E	1	128,08	49,05	38,29	71,10	258,00
	2	128,65	43,10	33,50	74,60	223,00
	3	154,52	27,91	18,06	99,00	203,00
	4	162,99	27,84	17,08	106,50	203,00
	5	150,73	30,28	20,09	108,40	237,00

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 23. Cajas para conductividad eléctrica.



La conductividad eléctrica en aguas naturales mide la cantidad de iones y por lo tanto se relaciona con los sólidos disueltos. Mediante la conductividad se puede tener una idea aproximada acerca de la actividad iónica, diversidad biótica, descomposición de materia orgánica y origen de un proceso de contaminación.

La Figura 22 muestra que el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de Sólidos disueltos totales de 96,71 mg/L. en afluente o entrada al sedimentador, 91,54 mg/L en el efluente del humedal con *Phragmites*; 91,92 mg/L en el efluente del humedal control y 88,5 mg/L en el humedal con

Hedychium. Por lo tanto, se puede inferir que la remoción en este parámetro fue mínima, probablemente debido a que la grava sufrió procesos de disolución y liberación de sales por fricción con el agua a medida que esta fluía por el sistema. Lo anterior indica que son aguas de naturaleza mesotrófica, ya que los valores varían entre 88,5 mg/L y 96,71 mg/L.²

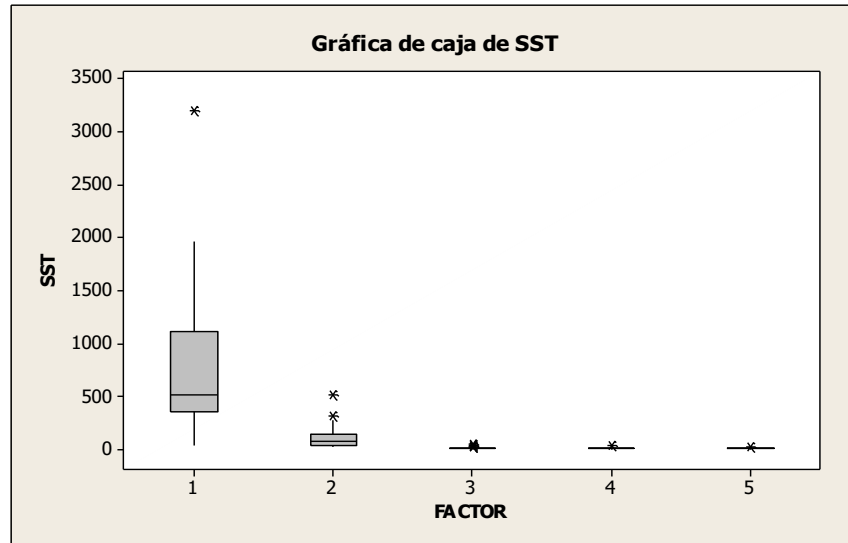
Cuadro 8. Resumen estadísticos descriptivos para sólidos suspendidos totales.

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
SST	1	741	685	92,42	36	3195
	2	111,8	112,9	100,94	16,0	514,0
	3	8,03	10,55	131,31	1,00	51,00
	4	9,60	8,96	93,31	1,00	38,00
	5	9,73	6,58	67,61	1,00	26,00

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

² Ibid..

Figura 24. Cajas para sólidos suspendidos totales.



La Figura 24 muestra que el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de sólidos suspendidos totales de 741 mg/L., obteniéndose un porcentaje de remoción de 84,91% en el sedimentador. Los porcentajes de remoción de los tres tratamientos fueron de: 92,82% en el humedal con *Phragmites*; 91,41% en el humedal control y 91,3% en el humedal con *Hedychium*. Los datos indican que la remoción de SST es buena ya que la remoción esperada varía entre 70% y 80% para este parámetro³ principalmente, por fenómenos de sedimentación, floculación y adsorción, a través del conjunto que forman el sustrato y las raíces.

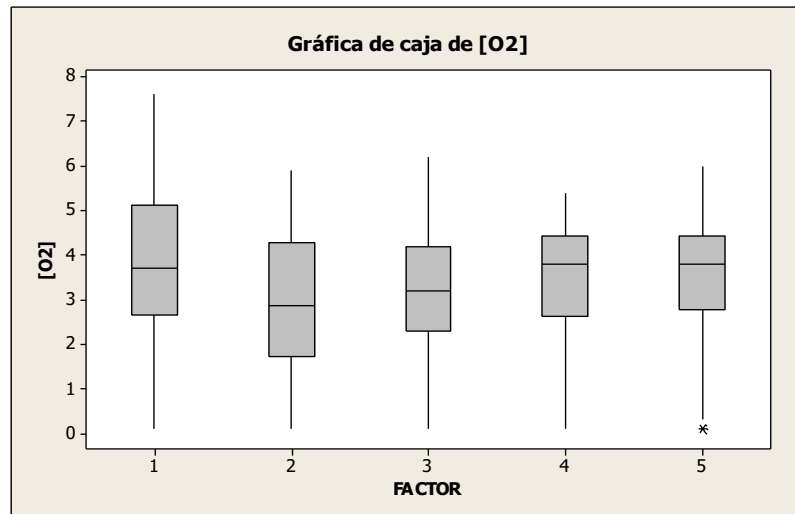
³ RIVAS, H. A. Lechos de plantas acuáticas (LPA) para el tratamiento de aguas residuales. Ingeniería Hidráulica en México. 1997.

Cuadro 9. Resumen estadísticos descriptivos para concentración de oxígeno.

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
[O ₂]	1	3,760	2,036	54,15	0,100	7,600
	2	2,977	1,675	56,27	0,100	5,900
	3	3,220	1,475	45,81	0,100	6,200
	4	3,440	1,354	39,35	0,100	5,400
	5	3,493	1,383	39,59	0,100	6,000

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 25. Cajas para concentración de oxígeno.

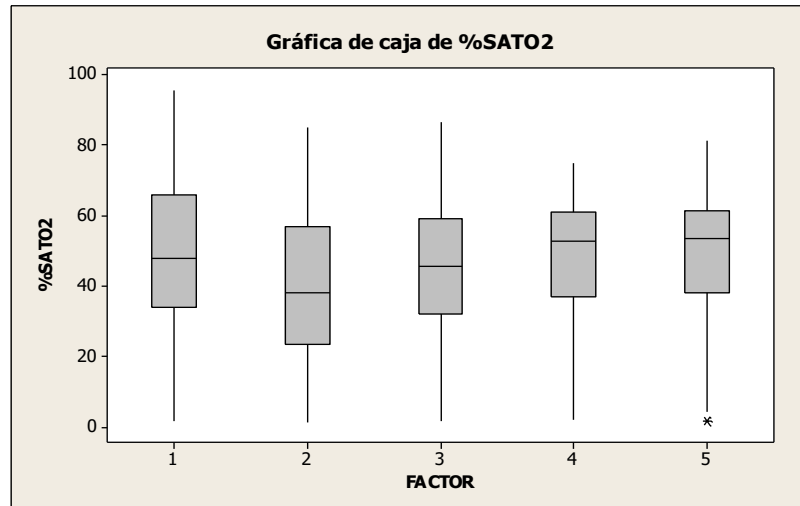


Cuadro 10. Resumen estadísticos descriptivos para porcentaje de saturación de oxígeno.

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
%SATO ₂	1	48,86	26,02	53,26	1,70	95,50
	2	39,57	22,19	56,08	1,30	84,90
	3	45,12	20,63	45,72	1,80	86,60
	4	48,64	18,89	38,83	2,00	74,70
	5	48,94	19,05	38,93	1,60	81,30

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 26. Cajas para porcentaje de saturación de oxígeno.



En la Figura 26 se observa que el porcentaje de saturación de oxígeno en la entrada al sedimentador es de 48,86%, debido a que en el afluente hay materia degradable (nutrientes) presentes, por lo cual se reduce debido a los procesos bioquímicos que ocurren por la acción de microorganismos aeróbicos presentes en el sistema. Los valores bajos en el porcentaje de saturación de oxígeno, en los humedales: 45,12% en efluente de humedal con *Phragmites a.*, 48,64% en efluente de humedal control y 48,94% en efluente de humedal con *Hedychium c.*, se pudo deber al mayor consumo de este por parte de microorganismos aerobios que requieren oxígeno para desarrollarse y a la poca transferencia de este por parte de las plantas, ya que no se observó diferencia entre los tres tratamientos. El porcentaje de saturación de oxígeno 45,12% en efluente del humedal con *Phragmites a.* es menor que en los otros tratamientos debido a problemas en el flujo del caudal por taponamiento en el sistema de conducción del agua del afluente de dicho humedal, lo cual también se ve reflejado en la relación que

existe entre el consumo de oxígeno, la producción de gas carbónico y el pH. Las principales funciones de las plantas dentro de un humedal artificial son: servir como soporte para la fijación de microorganismos, transportar oxígeno hacia la columna de agua, facilitando las reacciones de los mismos, tomar carbono, nutrientes, minerales e incorporarlos a sus tejidos⁴⁻⁵. No obstante, es necesario indicar que los porcentajes de saturación de oxígeno se encuentran por debajo del 80%, el cual se considera como el mínimo óptimo y sobre esta base, se pueden hacer los respectivos ajustes, con el fin de mantener condiciones aeróbicas adecuadas para cualquier tipo de propósito en el manejo de las aguas naturales⁶.

Cuadro 11. Resumen estadísticos descriptivos para demanda química de oxígeno

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
DQO	1	1174	991	84,40	35	4424
	2	169,4	166,7	98,37	12,0	873,0
	3	30,99	48,64	156,96	3,00	276,00
	4	22,78	13,18	57,84	5,00	66,00
	5	19,67	13,26	67,42	3,00	51,00

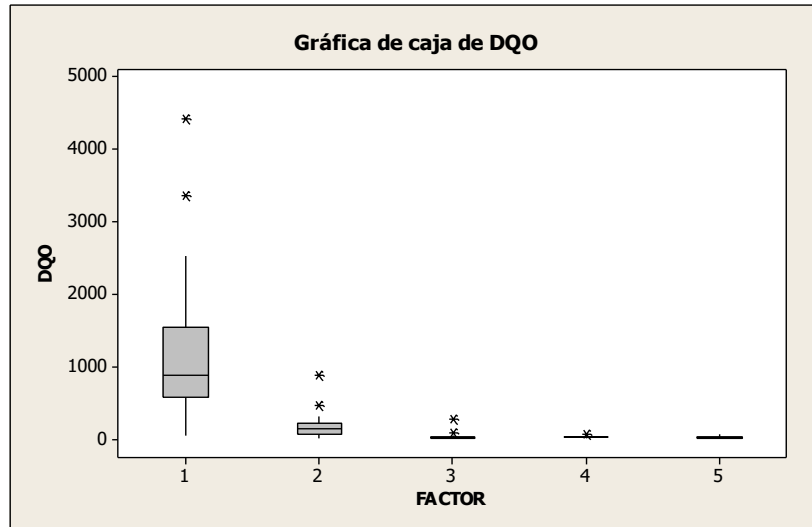
Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

⁴ ÑIQUE, Op.cit. 2000.

⁵ LARA, Op.cit. 1999

⁶ VÁSQUEZ, Op.cit.

Figura 27. Cajas para demanda química de oxígeno.



En la Figura 27 se puede observar que el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de DQO de 1174 mg/L, lo cual indica que hay una gran cantidad de sólidos suspendidos presentes, los cuales requieren de una gran cantidad de oxígeno para su degradación en compuestos más simples. Los porcentajes de remoción fueron de: 85,57% en el sedimentador; 81,71% en el efluente del humedal con *Phragmites*; 86,55% en el efluente del humedal control y 88,39% en el humedal con *Hedychium*. La eficiencia de remoción de DQO esperada varía entre 70 y 80%⁷; la obtenida varió entre 81 y 88%. En la zona aerobia se produce la mayor parte de remoción de la DQO, debido a que en esta zona el O₂ es aprovechado por los microorganismos para producir CO₂ y agua durante la degradación de la materia orgánica.

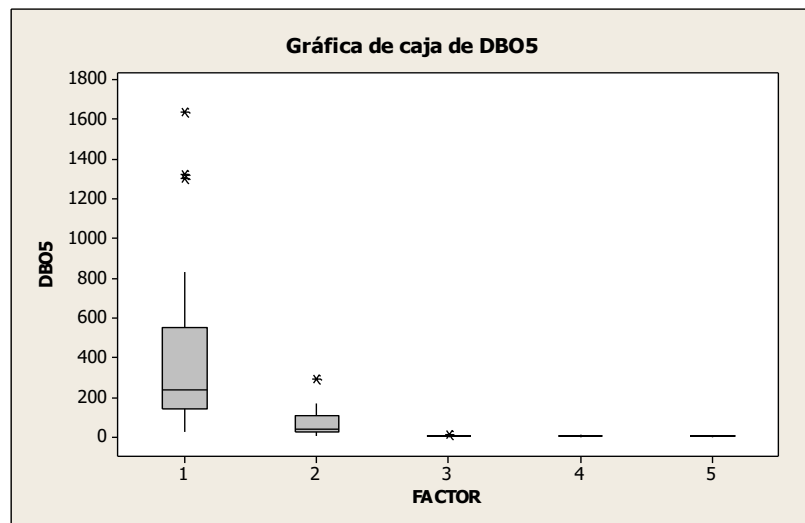
⁷ RIVAS, Op.cit

Cuadro 12. Resumen estadísticos descriptivos para demanda biológica de oxígeno

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
DBO ₅	1	396,8	407,6	102,73	28,5	1633,7
	2	67,2	63,9	95,21	5,7	294,7
	3	4,544	2,435	53,58	1,188	12,317
	4	4,051	2,259	55,77	0,802	9,178
	5	3,918	1,592	40,62	1,248	7,188

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 28. Cajas para demanda biológica de oxígeno.



La Figura 28 muestra que el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de DBO de 396,8 mg/L, obteniéndose un porcentaje de remoción de: 83% en el sedimentador. Los porcentajes de remoción de los tres tratamientos fueron de: 93,23% en el humedal con *Phragmites*; 93,97% en el humedal control y 94,17% en el humedal con *Hedychium*. La mayor eliminación de materia orgánica se realizó por filtración del medio y por digestión de la fracción carbonada en forma anaerobia⁸. Se espera que la variación en la DBO por acción biológica debe mejorar con el transcurso del tiempo, cuando se alcance una cobertura vegetal total en el humedal; y por lo tanto, una densidad de raíces mucha más amplia para favorecer el crecimiento de microorganismos que degraden la materia orgánica y favorezcan su mineralización ofreciendo estos minerales para el consumo de las plantas.

Relación DQO / DBO

DQO/DBO	1,5	Materia muy degradable
DQO/DBO	2,0	Materia moderadamente degradable
DQO/DBO	10	Materia poco degradable

La relación DQO/DBO se establece con el fin de determinar la degradabilidad de la materia contaminante, con lo cual podemos inferir que: en el sedimentador $1174/396,8 = 2,96$. La DQO obtenida es casi tres veces mayor en el sedimentador que el de la DBO, lo que indica que el total de agua residual tiene un componente bastante grande de materia moderadamente degradable, provenientes de la

⁸ DAVILA, D. Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales. 2003.

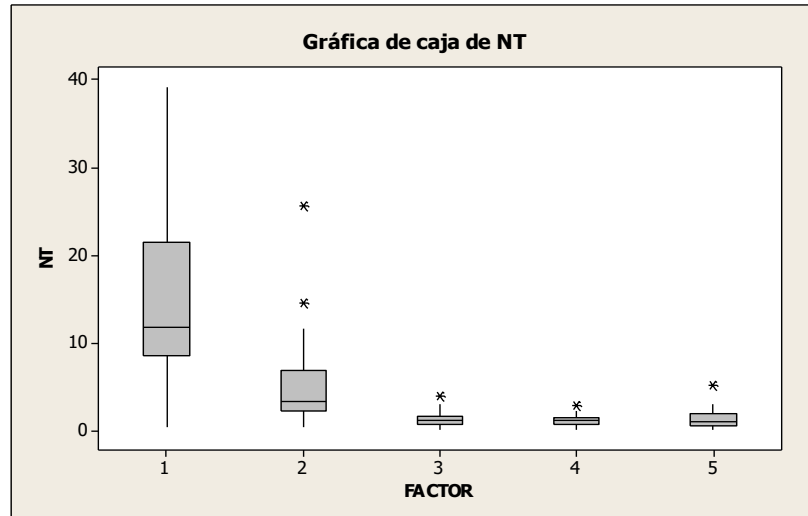
piscícola. Afluente de los humedales $169,4/67,2 = 2,52$ materia moderadamente degradable. Efluente del humedal con *Phragmites* $30,99/4,544 = 6,8$ materia moderadamente degradable y poco degradable. Efluente humedal control $22,78/4,051 = 5,6$ materia moderadamente degradable y poco degradable. Efluente humedal con *Hedychium* $19,67/3,918 = 5,02$ materia moderadamente degradable y poco degradable.

Cuadro 13. Resumen estadísticos descriptivos para nitrógeno total

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
NT	1	14,29	8,99	62,91	0,37	39,09
	2	5,086	5,166	101,57	0,372	25,620
	3	1,309	0,807	61,70	0,168	3,924
	4	1,190	0,629	52,84	0,168	2,933
	5	1,405	1,099	78,23	0,168	5,152

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 29. Cajas para nitrógeno total.

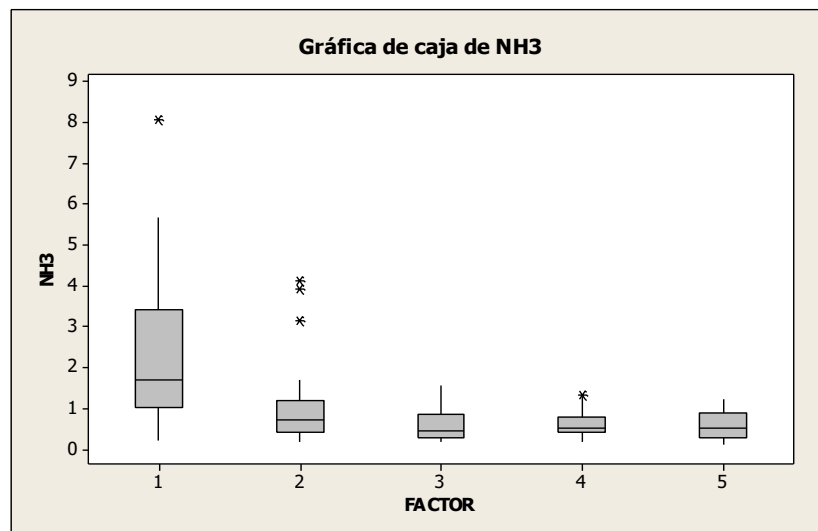


Cuadro 14. Resumen estadísticos descriptivos para nitrógeno amoniacal.

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
NH ₃	1	2,227	1,838	82,53	0,204	8,064
	2	1,051	1,000	95,18	0,163	4,130
	3	0,5975	0,4087	68,40	0,1596	1,5523
	4	0,6161	0,3363	54,59	0,1596	1,3367
	5	0,5908	0,3414	57,78	0,1120	1,2074

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

Figura 30. Cajas para nitrógeno amoniacal.



La Figura 30 indica que el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de nitrógeno total de 14,290 mg/L., obteniéndose un porcentaje de remoción de 64,4% en el sedimentador. Los porcentajes de remoción de los tres tratamientos fueron de: 74,26% en el humedal con *Phragmites*; 76,6% en el humedal control y 72,37% en el humedal con *Hedychium*. La eliminación de nitrógeno no fue mayor, debido a que ésta se logra a través de la absorción directa por las plantas y, en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias. Los niveles de amonio obtenidos fueron superiores a 0,5 mg/L, los cuales se consideran limitantes para el normal

desarrollo y distribución de macroinvertebrados acuáticos y de la fauna íctica; y a la vez, indicadores de alteraciones drásticas en la calidad del agua por alta degradación de residuos orgánicos⁹.

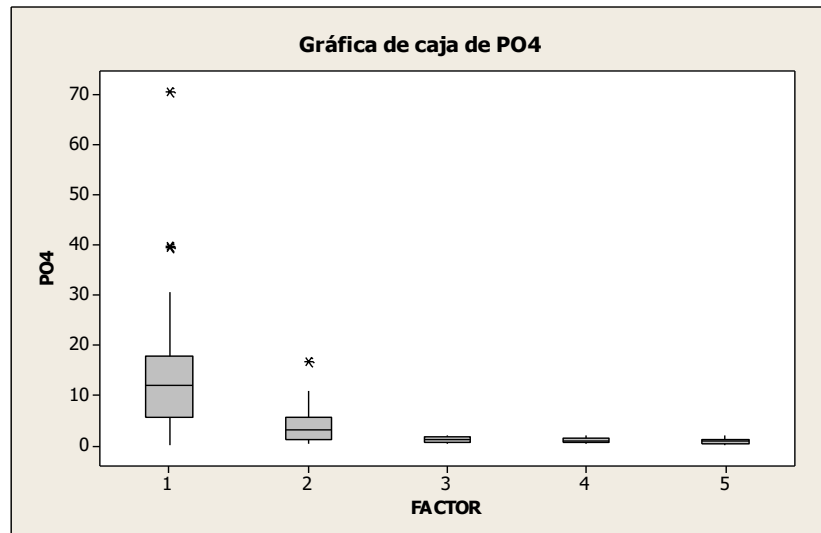
Cuadro 15. Resumen estadísticos descriptivos para fosfatos.

Variable	FACTOR	Media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Máximo
PO ₄	1	15,33	14,28	93,19	0,12	70,34
	2	4,230	3,875	91,62	0,367	16,680
	3	1,2287	0,5180	42,16	0,2306	2,0207
	4	0,9788	0,4852	49,57	0,2120	1,8706
	5	0,8335	0,4102	49,21	0,1561	1,9056

Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

⁹ VÁSQUEZ, Op.cit.

Figura 31. Cajas para fosfatos.



La Figura 31 muestra que el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de fosfatos de 15,33 mg/L., obteniéndose un porcentaje de remoción de 72,4% en el sedimentador. Los porcentajes de remoción de los tres tratamientos fueron de: 70,95% en el humedal con *Phragmites*; 76,86% en el humedal control y 80,3% en el humedal con *Hedychium*. Datos que están dentro del valor esperado (60 a 80%), por lo cual la eficiencia obtenida se encuentra dentro del rango teórico. Se considera que existe una alta capacidad de inmovilización en el sustrato/sedimento del fósforo. Esta disminución se produce también por fenómenos de absorción por parte de las plantas, adsorción y precipitación de fosfatos insolubles, además de la acción bacteriana al transformar formas insolubles de fósforo a formas solubles fácilmente asimilables por las plantas (biomasa). Por otra parte, Wetzel (1983) establece que la remoción de fósforo en la mayoría de los humedales artificiales no es muy eficaz, debido a las pocas oportunidades de contacto entre el agua residual y el sustrato. Wetzel

(1983) indica que la liberación del fósforo ocurre por la mineralización y descomposición de la materia orgánica y de los sedimentos del sustrato, o sea que esta fracción integrada a los detritus se deposita en los fondos, donde es liberado lentamente, en función de la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y del pH¹⁰.

7.1.2 Hipótesis de normalidad. Mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, se acepta la hipótesis de normalidad de las variables: *T°C, pH, SDT, Con.E, [O₂], % SAT O₂, DBO₅, NT, NH₃, PO₄*. Mediante la misma prueba se rechaza la hipótesis de normalidad de las variables: *SST, DQO*.

7.1.3 ANOVA (Análisis de varianza) de un factor para variables que se ajustan a la distribución normal.

Cuadro 16. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable Temperatura hídrica vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	0,35	0,18	0,11	0,892
Error	87	132,89	1,53		
Total	89	133,24			

¹⁰ VÁSQUEZ, Op.cit

Puesto que el nivel de significancia observado $P= 0,892$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que la temperatura hídrica de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es la misma.

Cuadro 17. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable pH vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	2,246	1,123	3,63	0,030
Error	87	26,876	0,309		
Total	89	29,121			

Puesto que el nivel de significancia observado $P= 0,030$ es menor que $0,05$ se decide rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que el pH de los distintos puntos de muestreo 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) no es el mismo; debido a problemas en el flujo del caudal por taponamiento en el sistema de conducción del agua del afluente del humedal con *Phragmites a.*, lo cual se ve reflejado en la relación que existe entre el consumo de oxígeno, la producción de gas carbónico y el pH.

Cuadro 18. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable sólidos disueltos totales vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	211	105	0,16	0,853
Error	87	57372	659		
Total	89	57583			

Puesto que el nivel de significancia observado $P = 0,853$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que los sólidos disueltos totales de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es la misma.

Cuadro 19. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable conductividad eléctrica vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	2363	1181	1,43	0,244
Error	87	71669	824		
Total	89	74031			

Puesto que el nivel de significancia observado $P = 0,244$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que la conductividad eléctrica de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal

con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es la misma.

Cuadro 20. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la concentración de oxígeno vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	1,26	0,63	0,32	0,728
Error	87	171,68	1,97		
Total	89	172,94			

Puesto que el nivel de significancia observado $P = 0,728$ es mayor que 0,05 se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que la concentración de oxígeno de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es la misma.

Cuadro 21. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable % de saturación de oxígeno vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	270	135	0,35	0,703
Error	87	33211	382		
Total	89	33481			

Puesto que el nivel de significancia observado $P= 0,703$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que el porcentaje de saturación de oxígeno de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es el mismo.

Cuadro 22. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable demanda biológica de oxígeno vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	6,53	3,26	0,72	0,489
Error	87	393,39	4,52		
Total	89	399,91			

Puesto que el nivel de significancia observado $P= 0,489$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que la demanda biológica de oxígeno_ de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es la misma.

Cuadro 23. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable nitrógeno total vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	0,697	0,348	0,46	0,631
Error	87	65,432	0,752		
Total	89	66,129			

Puesto que el nivel de significancia observado $P = 0,631$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que el nitrógeno total de los distintos puntos de muestreo 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es el mismo.

Cuadro 24. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable nitrógeno amoniacal vs. FACTOR

Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	0,010	0,005	0,04	0,962
Error	87	11,504	0,132		
Total	89	11,514			

Puesto que el nivel de significancia observado $P = 0,962$ es mayor que $0,05$ se decide no rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que el nitrógeno amoniacal de los distintos puntos de muestreo 3 (Efluente humedal con

Phragmites a.); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) es el mismo.

Cuadro 25. Resumen del procedimiento ANOVA unidireccional para la variable fosfatos vs. FACTOR

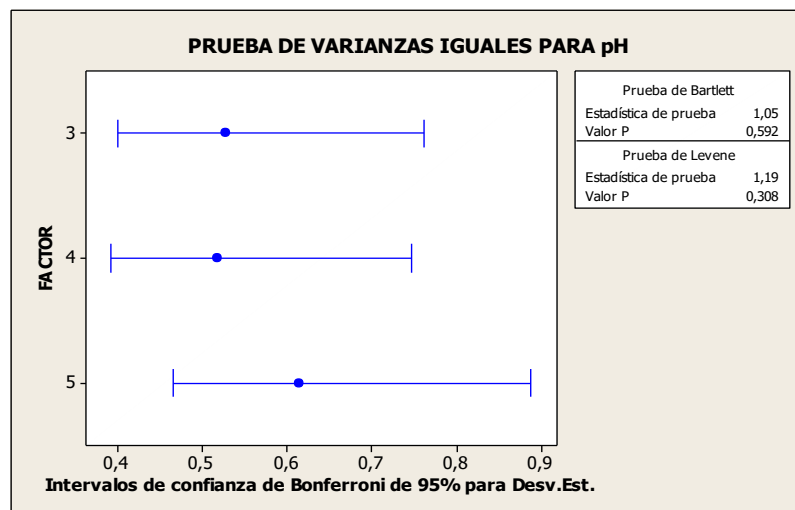
Fuente	GL	SC	MC	F	P
FACTOR	2	2,397	1,199	5,35	0,006
Error	87	19,490	0,224		
Total	89	21,887			

Puesto que el nivel de significancia observado $P = 0,006$ es menor que $0,05$ se decide rechazar la hipótesis de igualdad de medias y se concluye que los fosfatos de los distintos puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) no es el mismo; debido a problemas en el flujo del caudal por taponamiento en el sistema de conducción del agua del afluente del humedal con *Phragmites a.*, lo cual se ve reflejado en la relación que existe entre el consumo de oxígeno, la producción de gas carbónico y el pH, además de la posible presencia de algas (agua verdosa) en dicho humedal. Wetzel (1983) indica que la liberación del fósforo ocurre por la mineralización y descomposición de la materia orgánica y de los sedimentos del sustrato, o sea que esta fracción integrada a los detritus se deposita en los fondos, donde es liberado lentamente, en función de la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y del pH¹¹.

¹¹ VÁSQUEZ, Op.cit

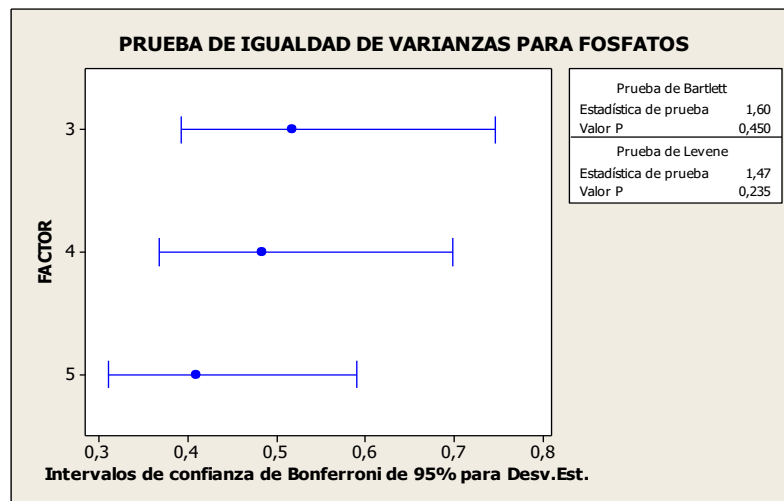
7.1.4 Prueba de homogeneidad de varianzas. Mediante el estadístico Levene para variables que se ajustan a la distribución normal y que presentan diferencia significativa. Dicha prueba se realiza con el fin de contrastar diferencia de varianzas y aplicar Tukey para aquellas variables que presentan varianzas homogéneas o Dunnet para aquellas variables que presentan varianzas no homogéneas.

Figura 32. Prueba de homogeneidad de varianzas mediante el estadístico Levene para la variable pH.



El gráfico 32 contiene el estadístico de Levene, el cual permite contrastar la hipótesis de que las varianzas de los puntos de muestreo son iguales. Puesto que el nivel crítico $P = 0,308$ es mayor que $0,05$ y por lo tanto no debo rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas y concluir que, en los puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) las varianzas de la variable pH son iguales.

Figura 33. Prueba de homogeneidad de varianzas mediante el estadístico Levene para la variable fosfatos.



El gráfico 33 contiene el estadístico de Levene, el cual permite contrastar la hipótesis de que las varianzas de los puntos de muestreo son iguales. Puesto que el nivel crítico $P = 0,235$ es mayor que $0,05$ y por lo tanto no debo rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas y concluir que, en los puntos de muestreo 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*) las varianzas de la variable fosfatos son iguales.

7.1.5 Prueba de comparaciones múltiples para variables que se ajustan a la distribución normal y sus medias muestran diferencia significativa en los puntos de muestreo de los tres tratamientos. 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*). Prueba de tukey para las variables que presentan varianzas homogéneas. El ANOVA se empleó para determinar si existe o no una diferencia estadística significativa entre los diferentes puntos de muestreo. La prueba de Tukey se aplicó para realizar comparaciones múltiples de las medias de puntos de muestreo y determinar cuáles difieren estadísticamente entre sí; en este caso, se eligió, ya que es el mejor procedimiento de comparaciones múltiples para diseños ANOVA que presentan varianzas homogéneas.

Pruebas post hoc

Cuadro 26. Resumen de comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: pH

HSD de Tukey

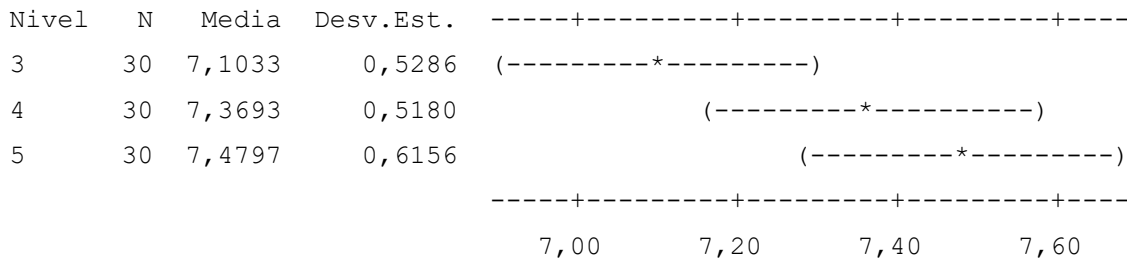
(I) NIVEL	(J) NIVEL	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite superior	Límite inferior
3,00	4,00	-,26600	,14351	0,159	-,6082	,0762
	5,00	-,37633(*)	,14351	0,028	-,7185	-,0341
4,00	3,00	,26600	,14351	0,159	-,0762	,6082
	5,00	-,11033	,14351	0,723	-,4525	,2319
5,00	3,00	,37633(*)	,14351	0,028	,0341	,7185
	4,00	,11033	,14351	0,723	-,2319	,4525

* La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

Niveles o puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*).

Al observar en el cuadro 26 los valores de significancia de medias mayores que 0,05 se puede concluir que existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos: 3 (humedal con *Phragmites a.*) y 5 (humedal con *Hedychium c.*) para la variable pH.

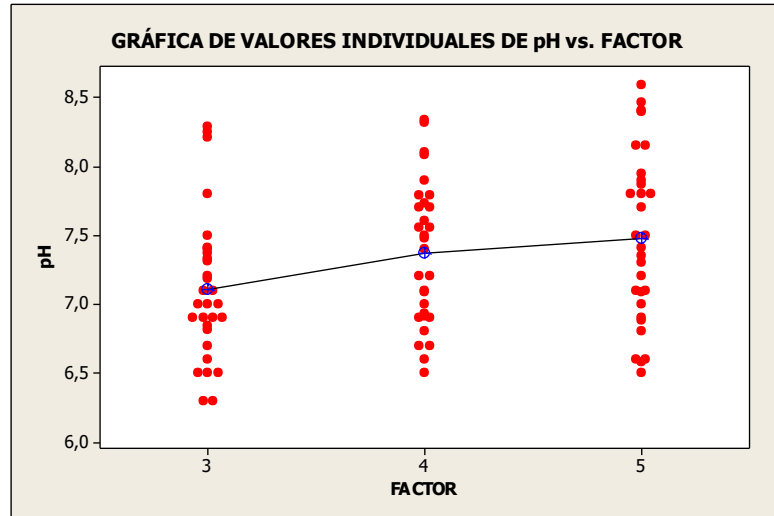
ICs de 95% individuales para la media
basados en Desv.Est. agrupada



Desv.Est. agrupada = 0,5558

El diagrama anterior muestra las comparaciones múltiples para la variable pH.

Figura 34. Comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: pH



Pruebas post hoc

Cuadro 27. Resumen de comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: Fosfatos

HSD de Tukey

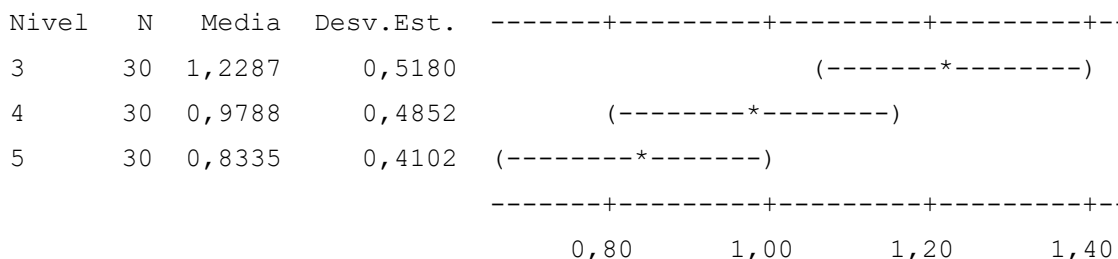
(I) NIVEL	(J) NIVEL	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite superior	Límite inferior
3,00	4,00	,25067	,12220	0,106	-,0407	,5420
	5,00	,39567(*)	,12220	0,005	,1043	,6870
4,00	3,00	-,25067	,12220	0,106	-,5420	,0407
	5,00	,14500	,12220	0,464	-,1464	,4364
5,00	3,00	-,39567(*)	,12220	0,005	-,6870	-,1043
	4,00	-,14500	,12220	0,464	-,4364	,1464

* La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

Niveles o puntos de muestreo: 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*).

Al observar en el cuadro 27 los valores de significancia de medias mayores que 0,05 para fosfatos, se puede concluir que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos: 3 (humedal con *Phragmites a.*) con 4 (humedal control, sin macrófitas); y 4 (humedal control, sin macrófitas) con 5 (humedal con *Hedychium c.*) para la variable fosfatos. Mientras que si existe diferencia significativa de 0,005 entre los tratamientos 3 (humedal con *Phragmites a.*) con 5 (humedal con *Hedychium c.*), debido a problemas en el flujo del caudal por taponamiento en el sistema de conducción del agua del afluente del humedal con *Phragmites a.* Wetzel (1983) indica que la liberación del fósforo ocurre por la mineralización y descomposición de la materia orgánica y de los sedimentos del sustrato, o sea que esta fracción integrada a los detritus se deposita en los fondos, donde es liberado lentamente, en función de la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y del pH¹².

ICs de 95% individuales para la media
basados en Desv.Est. agrupada

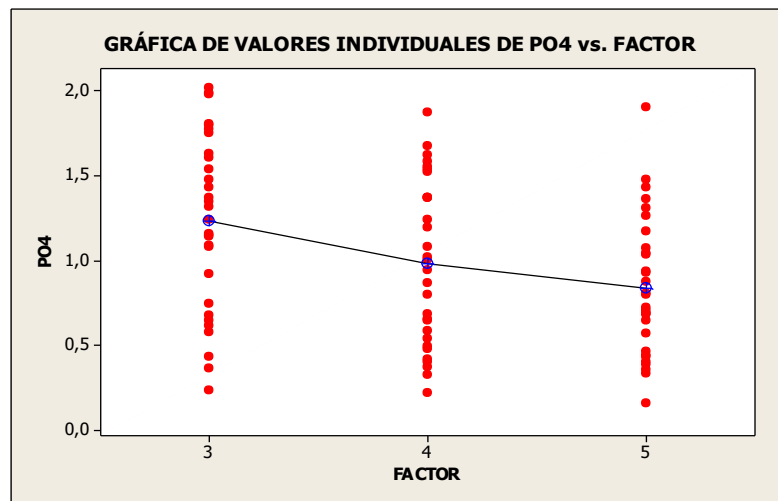


Desv.Est. agrupada = 0,4733

¹² VÁSQUEZ, Op.cit

El diagrama anterior muestra las comparaciones múltiples para la variable fosfatos.

Figura 35. Comparaciones múltiples por método de Tukey. Variable dependiente: fosfatos



7. 1. 6 Análisis no paramétrico de un factor para variables que no se ajustan a la distribución normal. El contraste de **Kruskal-Wallis** es la alternativa no paramétrica del método ANOVA, es decir, sirve para contrastar la hipótesis de que k muestras cuantitativas han sido obtenidas de la misma población. La única exigencia versa sobre la aleatoriedad en la extracción de las muestras, no haciendo referencia a ninguna de las otras condiciones adicionales de homocedasticidad y normalidad necesarias para la aplicación del test paramétrico ANOVA. De este modo, este contraste es el que debo aplicar necesariamente cuando no se cumple algunas de las condiciones que se necesitan para aplicar

dicho método. Al igual que las demás técnicas no paramétricas, ésta se apoya en el uso de los rangos asignados a las observaciones.

7.1.7 Contraste no paramétrico de Kruskal-Wallis para las variables que no se ajustan a la normalidad. El contraste Kruskal-Wallis no contrasta que las medias sean iguales, sino simplemente si los valores obtenidos en los diferentes grupos son similares. Esto lo realiza de un modo sorprendentemente simple. Se ordenan todas las observaciones, de menor a mayor de todos los grupos. Si al ordenarse de esta manera se da la circunstancia de que muchas de las observaciones más pequeñas (o más grandes) pertenecen a un grupo sería una indicación de que los grupos no presentan valores similares. Es decir, si al ordenar las observaciones de menor a mayor, aparecen muy poco “mezcladas”, se rechaza la hipótesis nula.

Cuadro 28. Resumen del procedimiento Kruskal-Wallis para la variable sólidos suspendidos totales vs. FACTOR

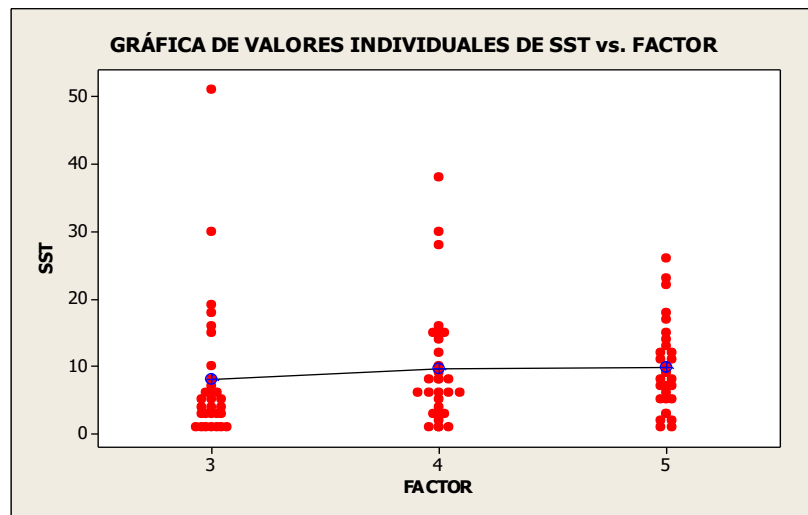
FACTOR	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
3	30	4,500	37,5	-2,05
4	30	7,000	47,2	0,44
5	30	8,500	51,8	1,60
General	90		45,5	

H = 4,64 GL = 2 **P = 0,098**

H = 4,67 GL = 2 P = 0,097 (ajustados para los vínculos)

Como el “p-value” es 0,098 mayor que 0,05 no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los tratamientos: 3 (humedal con *Phragmites a.*); 4 (humedal control, sin macrófitas); 5 (humedal con *Hedychium c.*) para la variable sólidos suspendidos totales son iguales.

Figura 36. Valores individuales para la variable Sólidos suspendidos totales.

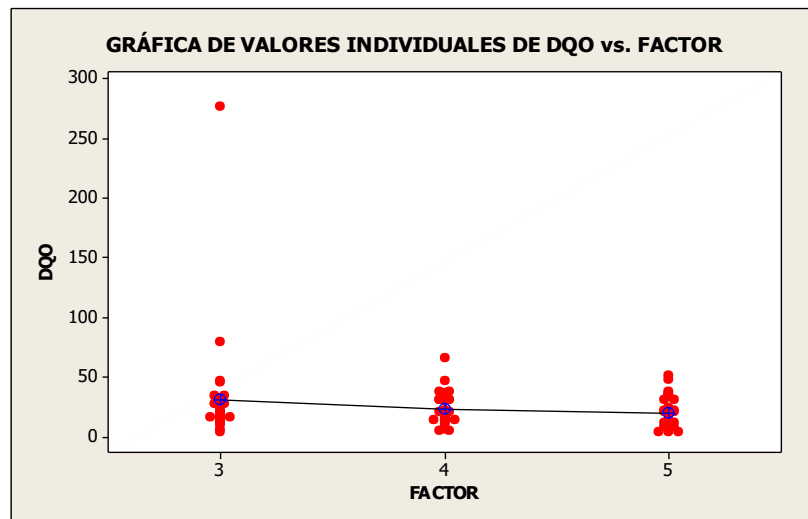


Cuadro 29. Resumen del procedimiento Kruskal-Wallis para la variable demanda química de oxígeno vs. FACTOR

FACTOR	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
3	30	19,05	47,5	0,51
4	30	19,65	48,3	0,73
5	30	16,50	40,7	-1,24
General	90		45,5	
H = 1,56 GL = 2 P = 0,459				
H = 1,56 GL = 2 P = 0,459 (ajustados para los vínculos)				

Como el “p-value” es 0,459 mayor que 0,05 no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los tratamientos: 3 (humedal con *Phragmites a.*); 4 (humedal control, sin macrófitas); 5 (humedal con *Hedychium c.*) para la variable demanda química de oxígeno son iguales.

Figura 37. Valores individuales para la variable demanda química de oxígeno

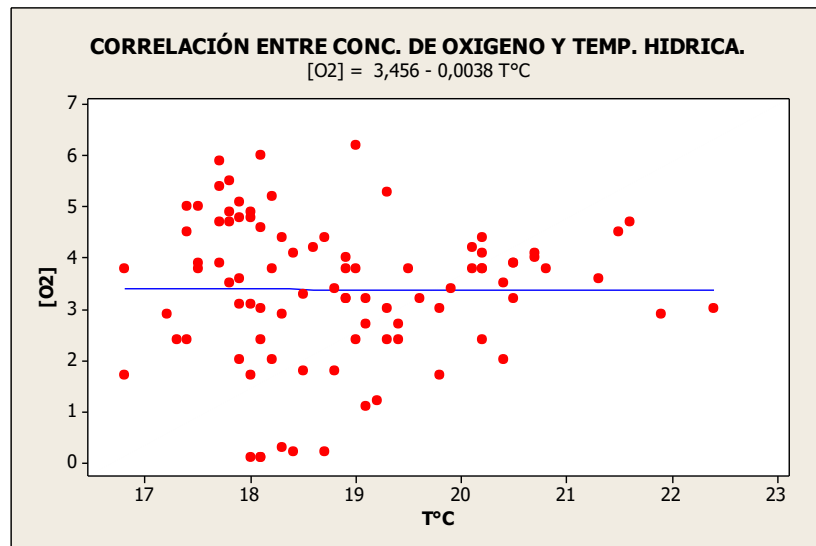


7.1.8 Análisis de correlación de variables. Es el conjunto de técnicas estadísticas empleado para medir la intensidad de la asociación entre dos variables.

El principal objetivo del análisis de correlación consiste en determinar que tan intensa es la relación entre dos variables. Normalmente, el primer paso es mostrar los datos en un diagrama de dispersión.

El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde menos uno hasta uno, indicando que mientras más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables. Mientras más cercano a cero sea el coeficiente de correlación indicará que más débil es la asociación entre ambas variables. Si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal alguna entre ambas variables.

Figura 38. Correlación de las variables concentración de oxígeno y temperatura hídrica



Cuadro 30. Resumen correlación de las variables concentración de oxígeno y temperatura hídrica

S = 1,40185 R-cuad. = 0,0% R-cuad.(ajustado) = 0,0%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	0,002	0,00193	0,00	0,975
Error	88	172,936	1,96519		
Total	89	172,938			

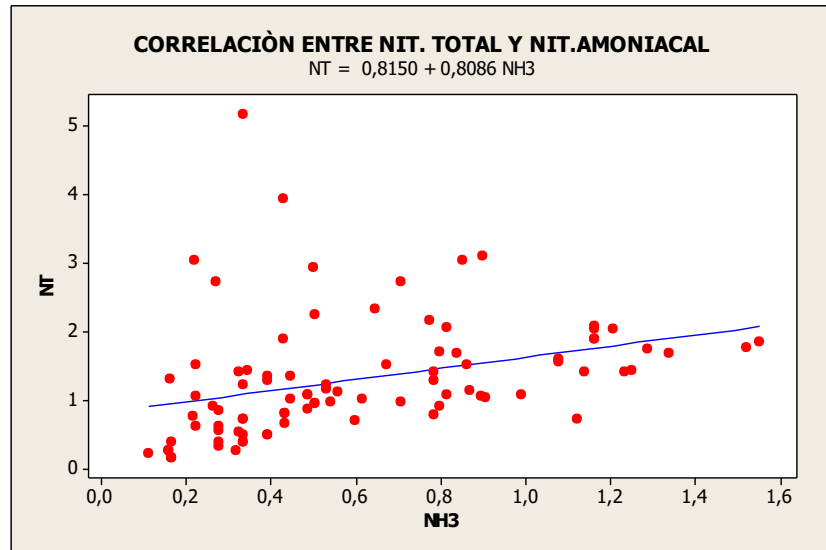
Correlación de Pearson de T°C y [O₂] = -0,003

Valor **P = 0,975**

Dado el valor de P = 0,975 no hay correlación lineal entre concentración de oxígeno y temperatura, además es no significativa; por lo tanto, se puede concluir que a medida que la temperatura se incrementa de 17 °C a 22 °C, la concentración de oxígeno permaneció constante. Según Vásquez¹³ la temperatura incide en: la densidad del agua (lo que puede causar estratificaciones y patrones de circulación entre las diferentes capas de la columna), solubilidad de los gases (relación inversa), reacciones químicas tanto en la columna de agua como en el sustrato y en procesos biológicos tales como niveles trofodinámicos de la biota acuática, tasa metabólicas, conversiones alimenticias procesos de degradación de materia orgánica, etc. Las concentraciones de oxígeno pueden variar debido a los procesos físicos, químicos y biológicos. El suministro de oxígeno por procesos fotosintéticos en el ecosistema acuático, dependerá de: la turbiedad, concentración de sólidos en suspensión, la intensidad y penetración lumínica, hora día, el brillo solar, la temperatura y distribución de macrófitas.

¹³ VÁSQUEZ, Op.cit.

Figura 39. Correlación de las variables nitrógeno total y nitrógeno amoniacal



Cuadro 31. Resumen correlación de las variables nitrógeno total y nitrógeno amoniacal

$S = 0,816031$ R-cuad. = 11,4% R-cuad.(ajustado) = 10,4%

Análisis de varianza

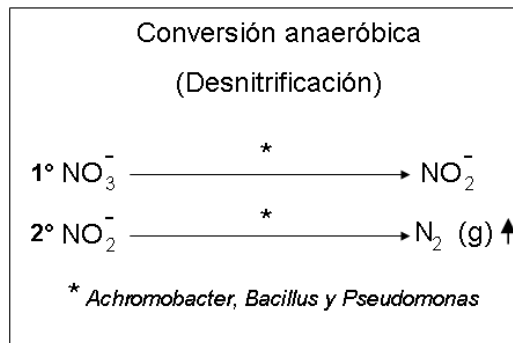
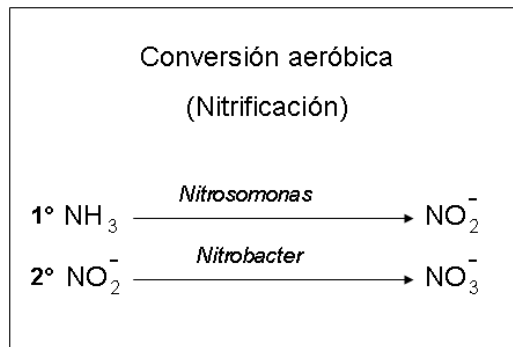
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	7,5293	7,52930	11,31	0,001
Error	88	58,5998	0,66591		
Total	89	66,1291			

Correlación de Pearson de NT y $NH_3 = 0,337$

Valor **P = 0,001**

La correlación entre nitrógeno amoniacal y nitrógeno total es baja, positiva y dado el valor $P = 0,001$ muy significativa. Por lo tanto, se puede concluir que a medida que la concentración de nitrógeno amoniacal aumenta, la concentración de nitrógeno total aumenta en poca proporción. La eliminación de nitrógeno se logra a través de la absorción directa por las plantas y, en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación, realizados por bacterias. La eliminación de amonio y nitratos por esta vía es bastante compleja. Es un proceso de tratamiento del agua que necesita conversión tanto aeróbica como anaeróbica para eliminar los contaminantes. En la fase de conversión aeróbica hay dos especies bacterianas implicadas. Primero, las bacterias *Nitrosomonas* convierten el amoniaco en nitrito. Segundo, las bacterias *Nitrobacter* convierten los nitritos en nitratos. Estos dos procesos juntos son comúnmente conocidos como el proceso de nitrificación.

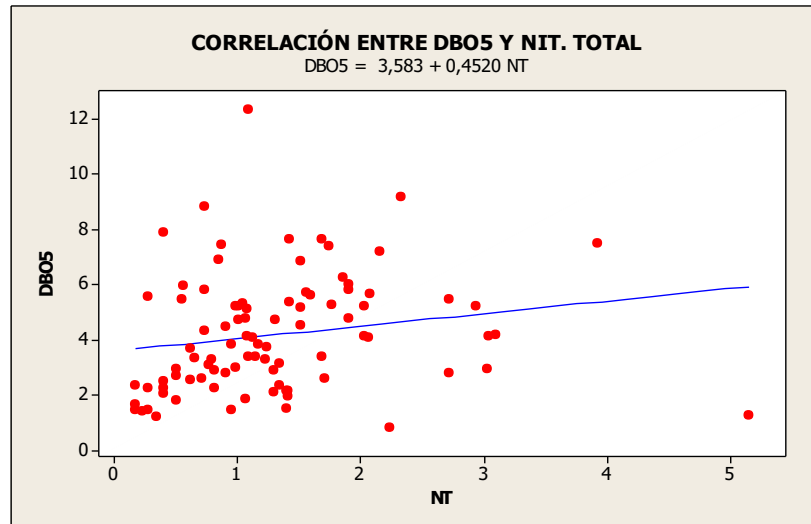
Después de eso, las bacterias anaeróbicas entran a actuar. Estas bacterias convierten los nitratos en nitrógeno gaseoso atmosférico. Este proceso se llama desnitrificación. La desnitrificación es realizada por muchas bacterias anaeróbicas, tales como *Achromobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas*. La primera fase de la desnitrificación es el proceso inverso a la nitrificación, vuelve a transformar el nitrato en nitrito. La segunda fase de la desnitrificación transforma el nitrito en nitrógeno gaseoso, el cual puede ser liberado a la atmósfera sin causar daños ambientales. A continuación se resumen el proceso de nitrificación y desnitrificación, de la siguiente manera:



Shannon *et al.*¹⁴, afirman que la remoción de nitrógeno total aumenta en el tiempo a medida que se va generando una mayor densidad de plantas en el humedal. Además, sugieren que hay una mayor remoción en los meses de verano cuando las plantas están en pleno crecimiento. Ñique afirma que la remoción de nitrógeno por parte de las plantas puede llegar a alcanzar valores de hasta un 80%, cuando las plantas se han desarrollado completamente. Shannon *et al.*, señalan que el rol primario de las plantas es respaldar los procesos de nitrificación y desnitrificación.

¹⁴ SHANNON, et.al. Op.cit.

Figura 40. Correlación de las variables demanda biológica de oxígeno y nitrógeno total



Cuadro 32. Resumen correlación de las variables demanda biológica de oxígeno y nitrógeno total.

$S = 2,09546$ R-cuad. = 3,4% R-cuad.(ajustado) = 2,3%

Análisis de varianza

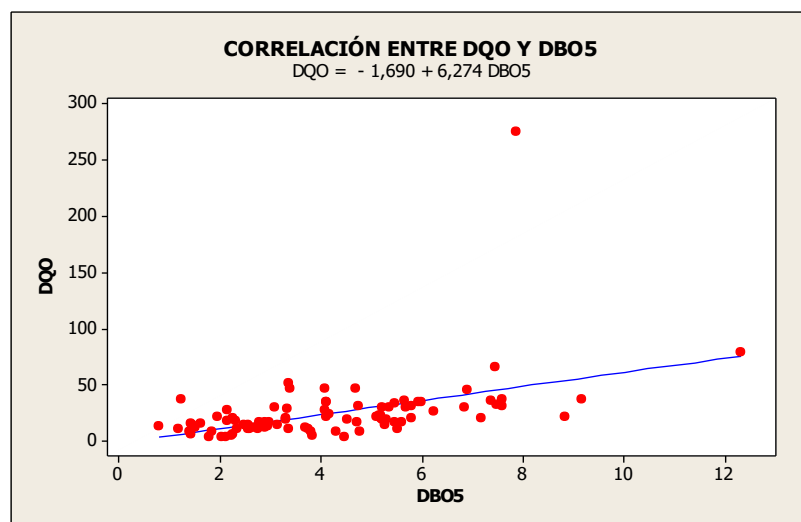
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	13,509	13,5091	3,08	0,083
Error	88	386,404	4,3910		
Total	89	399,913			

Correlación de Pearson de DBO_5 y NT = 0,184

Valor **P = 0,083**

La correlación entre nitrógeno total y DBO₅ es baja, positiva y dado el valor P = 0,083 no significativa. Por lo tanto, se puede concluir que a medida que la concentración de nitrógeno total aumenta, la demanda biológica de oxígeno aumenta en poca proporción, con lo cual se puede inferir acerca de la cantidad de materia orgánica presente y los niveles de degradación en el sistema, en función de las concentraciones de oxígeno. Con base en el ciclo del nitrógeno, son de gran importancia para el análisis de aguas el amonio, nitritos y nitratos, pues los dos primeros son también considerados como indicadores químicos de procesos de degradación de materia orgánica¹⁵. Correlación de las variables demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno:

Figura 41. Correlación de las variables demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno



¹⁵ VÁSQUEZ, Op.cit.

Cuadro 33. Resumen correlación de las variables demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno.

S = 27,1875 R-cuad. = 19,5% R-cuad.(ajustado) = 18,6%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	1	15739,3	15739,3	21,29	0,000
Error	88	65046,2	739,2		
Total	89	80785,5			

Correlación de Pearson de DQO y DBO₅ = 0,441

Valor **P = 0,000**

La correlación entre DBO y DQO es baja, positiva y dado el valor de P= 0,000 muy significativa, Por lo tanto, se puede concluir que a medida que la demanda biológica de oxígeno aumenta, la demanda química de oxígeno aumenta en poca proporción, ya que la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), están relacionadas con la remoción de la materia orgánica, que se realiza tanto por su deposición y fijación en el substrato, como por procesos anaerobios y aerobios; cabe destacar que estos últimos dependen del oxígeno disponible y la acción de los microorganismos presentes en las biopelículas formadas en las raíces¹⁶. Al establecer la relación DQO/DBO con el fin de determinar la degradabilidad de la materia contaminante, podemos inferir que el agua residual tiene un componente bastante grande de materia moderadamente y poco degradable, provenientes de la piscícola. Vásquez comenta que la DBO₅ siempre estará incluida en la DQO, situación que se ha comprobado por experiencias propias en los sistemas hídricos del alto Cauca, en

¹⁶ ÑIQUE, Op.cit.

el embalse La Salvajina y en baterías para estanques para desarrollo acuícola en la meseta de Popayán, en los departamentos del Cauca y Valle del Cauca.

7.2 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

Los datos de detección y cuantificación de Coliformes totales y fecales fueron analizados por las estudiantes Sandra Barco y Diana Mora del Programa de Biología de la Universidad del Cauca, Grupo de Recursos Hidrobiológicos Continentales, en el trabajo de grado titulado: “Evaluación de la Eficiencia de Remoción de Bacterias Coliformes de un Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de Aguas Residuales de una Truchifactoría¹⁷”. Dicho trabajo corresponde a uno de los aspectos evaluados en el proyecto: “Desarrollo y Adaptación de Tecnología para el Tratamiento de Efluentes Piscícolas”, apoyado en la financiación por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

El Cuadro 34 muestra los promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales, expresadas como UFC x 10³/100ml, en los cuales se tuvo en cuenta los valores mínimos y máximos de los diferentes sitios en el tiempo de duración del muestreo, teniéndose para Coliformes Totales en H1 una variación entre 4.5 y 515 con un promedio de 168.68 UFC x 10³/100ml, para H2 entre 7.5 y 397 con un promedio de 131.58 UFC x 10³/100ml, para H3 entre 8 y 564.5 con un promedio de 121.27 UFC x 10³/100ml, para Sedimentador entre 302500 y 85050000 con un promedio de 16252000 UFC x 10³/100ml y para Caja de distribución entre 167000 y 101150000 con un promedio de 17652307.69 UFC x 10³/100ml.

¹⁷ BARCO, Sandra, MORA, Diana. Evaluación de la Eficiencia de Remoción de Bacterias Coliformes de un Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de Aguas Residuales de una Truchifactoría. Popayán, 2008. Trabajo de grado (Bióloga). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación.

Para Coliformes Fecales en H1 una variación entre ± 6.5 con un promedio de 2.66 UFC x $10^3/100\text{ml}$, para H2 entre 0 y 21.5 con un promedio de 4.83 UFC x $10^3/100\text{ml}$, para H3 entre 0 y 49 con un promedio de 7.36 UFC x $10^3/100\text{ml}$, para Sedimentador entre 0 y 2450000 con un promedio de 625027.78 UFC x $10^3/100\text{ml}$ y para Caja de distribución entre 0 y 2950000 con un promedio de 642472.22 UFC x $10^3/100\text{ml}$.

Los valores relativamente altos en el sedimentador se debieron principalmente a que existió cierta acumulación de sólidos sedimentables que no se removieron totalmente, pues con este tipo de sistemas se busca solo la remoción de sólidos, sin buscar remoción de materia orgánica disuelta. El resultado de este proceso contribuye a que con una mayor circulación de agua en la caja de distribución se presenten altos registros de UFC x $10^3/100\text{ml}$ por el contenido de carga orgánica.

Cuadro 34. Promedios de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales (UFC x $10^3/100\text{ml}$).

Parámetro	Sedimentador	Caja dist	Eflu H1	Eflu H2	Eflu H3
Coliformes Totales.	16252000	17652307,69	168,68	131,58	121,27
Coliformes Fecales.	625027,78	642472,22	2,66	4,83	7,36

El Cuadro 35, muestra los valores mínimos y máximos del porcentaje de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales para lo cual se tuvo en cuenta el

promedio de los datos originales, teniéndose para coliformes totales en H1 una variación entre 99.96% y 100%, H2 entre 99.88% y 100%, H3 entre 99.89% y 100%. La remoción global, estimada sobre los valores de todos los humedales, fue del 100%.

El porcentaje de remoción de bacterias Coliformes Fecales en H1, H2 y H3 no presento cambio, por lo tanto se considera que hubo un 100% de efectividad en este proceso. Según Lara¹⁸, estudios realizados en Canadá removieron coliformes fecales en aproximadamente un 90% cuando se opero con un tiempo de retención hidráulica de 6 a 7 días.

Cuadro 35. Porcentajes de remoción de bacterias Coliformes Totales y Fecales.

Parámetro		Efluente H1	Efluente H2	Efluente H3
Coliformes Totales	Remoción (%)	100	100	100
	Desviación (%)	99.96-100	99.88-100	99.89 -100
Coliformes Fecales	Remoción (%)	100	100	100
	Desviación (%)	100 - 100	99.99 -100	99.98 -100

7.2.1 Análisis para coliformes totales. Para el tratamiento estadístico de los datos, se utilizó el paquete estadístico SPSS, versión académica 11.0

¹⁸ LARA, Op.cit.

Dado que los datos no cumplieron con las pruebas de normalidad, pero si con homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar la eficiencia de los humedales, en cuanto a la remoción de bacterias coliformes en el sistema propuesto de humedales artificiales, para los cinco sitios de muestreo.

Con esta prueba se reportó que no existe diferencia significativa ($p=0.052$) entre los humedales y por lo tanto la remoción fue prácticamente igual independientemente de la planta utilizada como complemento del sistema de tratamiento. Según García¹⁹, los humedales artificiales remueven entre 25 y 40% más de materia orgánica, sólidos suspendidos y coliformes totales que las lagunas de estabilización. Además, los humedales construidos disminuyen los requerimientos de calidad del afluente y permiten tener un mayor control sobre el régimen hidráulico en el sistema, en comparación con los humedales naturales.

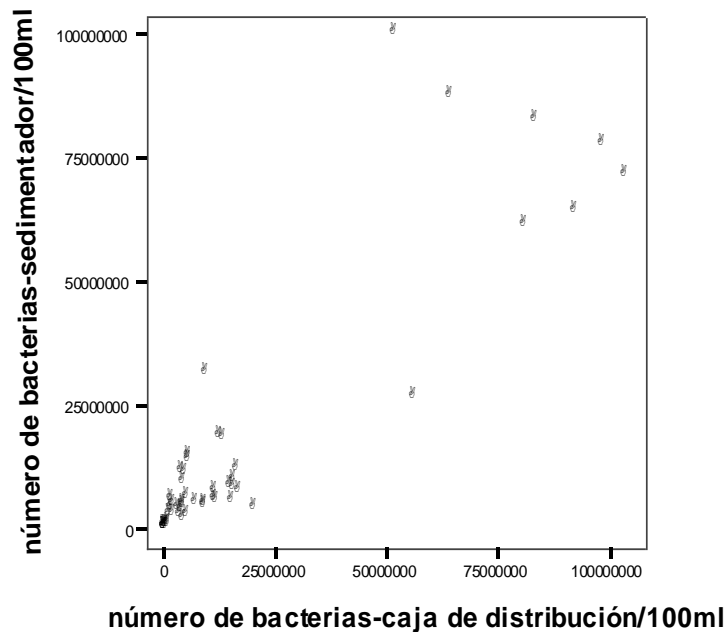
Durante el tiempo de muestreo se presentaron diversas situaciones en cuanto al desarrollo de las plantas, debido a que no habían alcanzado una adecuada maduración ni un buen desarrollo de rizomas, lo cual podría haber afectado la operación de los humedales. Además al haber poco contacto del agua residual con las raíces no se logra el contacto suficiente con los microorganismos y por lo tanto el proceso de descontaminación no se reportó como significativo.

Se realizó el análisis para los sitios de muestreo del sedimentador y la caja de distribución para observar la remoción de bacterias del grupo coliformes al pasar el agua de un sitio a otro. Para la comparación entre los sitios sedimentador y la caja de distribución, a los datos se les realizó la prueba paramétrica de Mann-

¹⁹ GARCÍA, J; MORATO, J y BAYONA, J M. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos; Una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. España. 2004.

Whitney, obteniéndose un valor de prueba no significativa ($p=0.884$). Adicionalmente, se aplicó el análisis de correlación para variables bivariadas, para identificar asociación o dependencia entre los datos, encontrándose una correlación positiva entre el número de UFC/100ml del sedimentador y la caja de distribución (Figura 42). El resultado demuestra que ambos sitios son semejantes, en cuanto al comportamiento de remoción de contaminantes.

Figura 42. Correlación entre las concentraciones de coliformes totales en sedimentador y caja de distribución.



Para identificar la eficiencia de la remoción de bacterias coliformes en el sistema de tratamiento para aguas residuales, se realizó la comparación entre el humedal H1 y el sedimentador, se tomó el humedal H1 como referencia debido a que presentó una mayor variación en los resultados con referencia a los demás

humedales. Para tal análisis se aplicó la prueba T para una muestra y se concluyó que la diferencia es significativa estadísticamente ($p=0.000$), es decir que cuando se pasa del sedimentador al humedal H1 se encuentra una gran disminución en el número de coliformes totales, igualmente sucedió lo mismo para los humedales H2 y H3, mostrando que el sistema es eficiente en el tratamiento para mejorar la calidad del agua.

Otra variable importante que se tuvo en cuenta fue el tiempo de operación de los humedales cuya duración fue de 4,5 meses aproximadamente, con un periodo de retención hidráulica de 4 días, fijado con referencia a los cambios propuestos en el proyecto general teniendo en cuenta los diferentes tiempos de retención a evaluar.

Se comparó la remoción observada en los humedales con el tiempo transcurrido del muestreo. Para este efecto se aplicó un análisis de correlación no paramétrico de Spearman con un valor de significancia de 0.000, mostrando una correlación significativa. Se evidencia que el sistema, con el transcurrir del tiempo, muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias, es decir que se vuelve eficiente en la remoción de coliformes totales.

Eficiencia del humedal H1: se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman con una significancia: 0.000, el cual muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el transcurso del tiempo (Figura 43).

Eficiencia del humedal H2: se aplicó el análisis de correlaciones de Spearman con una significancia: 0.000, cuyo resultado muestra que el humedal H2 presenta una tendencia de disminución con el paso del tiempo en el número de bacterias (Figura 44).

Figura 43. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H1.

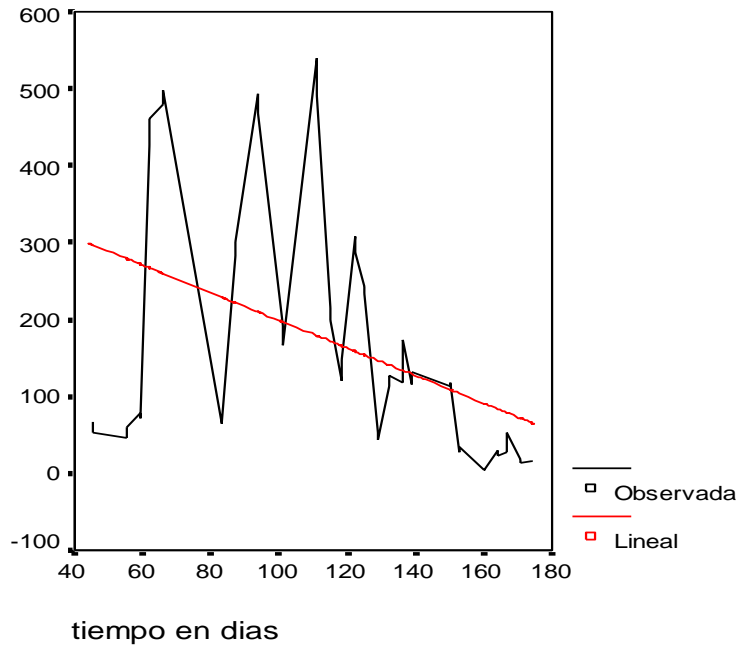
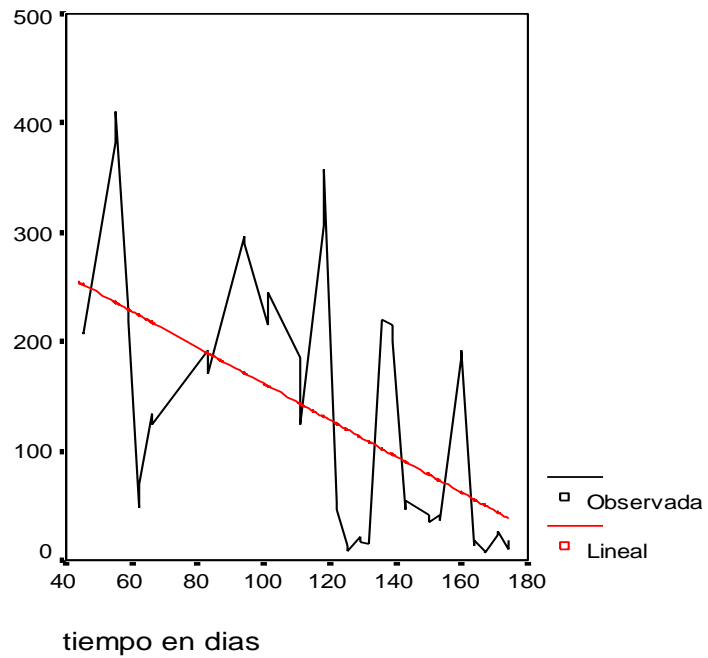


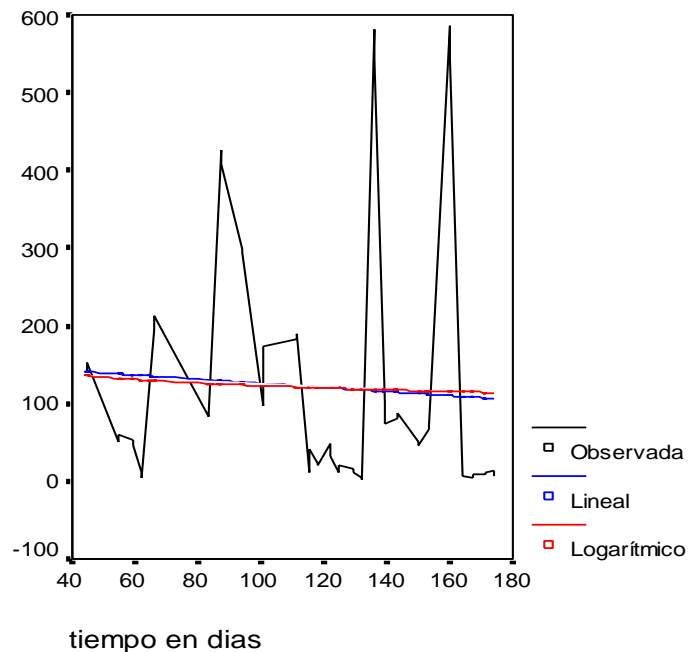
Figura 44. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H2.



Eficiencia del humedal H3: se aplicó el análisis de correlación no paramétrico de Spearman con una significancia: 0.015, el cual también muestra una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el paso del tiempo.

El humedal H3, obtuvo una diferencia significativa ($p=0.015$), es decir que hubo una eficiencia en la remoción para este sitio con el transcurrir del tiempo. Se observa un descenso notable entre los días 160 a 180 (Figura 45), debido a que el sistema radicular del *Hedychium* ofrece una mejor protección para las bacterias proporcionando un mayor número de nutrientes en comparación con el *Phragmites* el cual resultó desplazado por esta especie más competitiva y mejor adaptada a medios alterados.

Figura 45. Variación en la remoción de coliformes totales en el humedal H3.



7.2.2 Análisis para coliformes fecales. Para el análisis de los datos se realizó la comparación entre los humedales para determinar cual presentó mejor eficiencia en la remoción de coliformes fecales. Dado que los datos no cumplen con distribución normal (prueba de normalidad), pero si con homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal- Wallis. Los resultados reportan que la prueba es no significativa ($p=0.070$), con lo cual se concluye que no hay diferencia significativa estadísticamente entre los humedales, debido a que los tres humedales presentan un comportamiento casi similar en la remoción de coliformes fecales.

Se realizó la comparación en el número de UFC/100ml del sedimentador con la caja de distribución, aplicando la prueba no paramétrica de Mann-Whitney y un análisis de correlación, para identificar asociación o dependencia entre los datos. Se observó una correlación positiva entre el número de UFC/100ml del sedimentador y la caja de distribución. La prueba de Mann-Whitney reporta una significancia: 0.977, la cual muestra que la prueba es no significativa. Se concluye que no hay diferencia significativa entre el sedimentador y la caja de distribución, es decir que el número de bacterias se presentan de una forma similar en ambos sitios.

Para determinar la eficiencia en la remoción de coliformes fecales para el sistema de tratamiento, se realizó la comparación entre el humedal H1 y el sedimentador por medio del programa estadístico. Se aplicó la prueba T para una muestra dando como resultado que la diferencia es significativa estadísticamente, es decir que cuando se pasa del sedimentador al humedal H1 se encuentra una gran disminución en el número de coliformes fecales, con lo que se concluye que el sistema presenta eficiencia en la remoción de microorganismos. Se demostró en

un estudio realizado con cinco humedales a escala real²⁰ (Morató, 2004) que existe una menor inactivación de coliformes fecales en sistemas que operan con un menor tiempo de retención hidráulica. Además, se observó como la mayor eliminación de bacterias fecales se produjo en el humedal con material fino.

Se realizó también el análisis para observar la eficiencia de los humedales con el paso del tiempo, teniendo en cuenta la duración del muestreo de 172 días. Para esto se compararon los humedales H1, H2, H3 con el tiempo transcurrido del muestreo, aplicándose un análisis de correlación no paramétrico de Spearman con un valor de significancia: 0.600. Se concluye que el sistema con el transcurrir del tiempo no muestra cambio en la remoción de coliformes fecales, a diferencia de lo que se reportó en el análisis de coliformes totales.

Eficiencia del humedal H1: se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman con una significancia: 0.600, concluyendo que el resultado es estadísticamente no significativo lo cual muestra que los datos tienen una tendencia muy variable (Figura 46).

Eficiencia del humedal H2: se aplicó el análisis de correlaciones de Spearman con una significancia: 0.237, cuyo resultado muestra que el humedal H2 no presenta mucho cambio con el transcurso del tiempo por la gran variabilidad de los resultados (Figura 47).

²⁰ MORATÓ, J. Eliminación de microorganismos y dinámica del biofilm en humedales construidos de flujo subsuperficial. Barcelona (Esp.) : Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.

Figura 46. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H1.

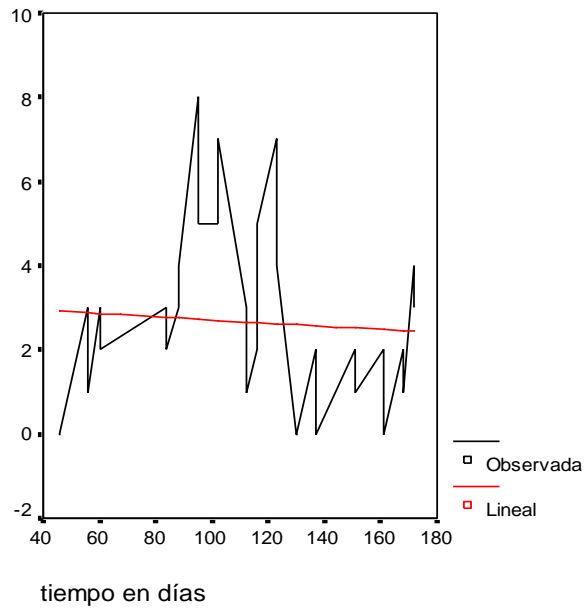
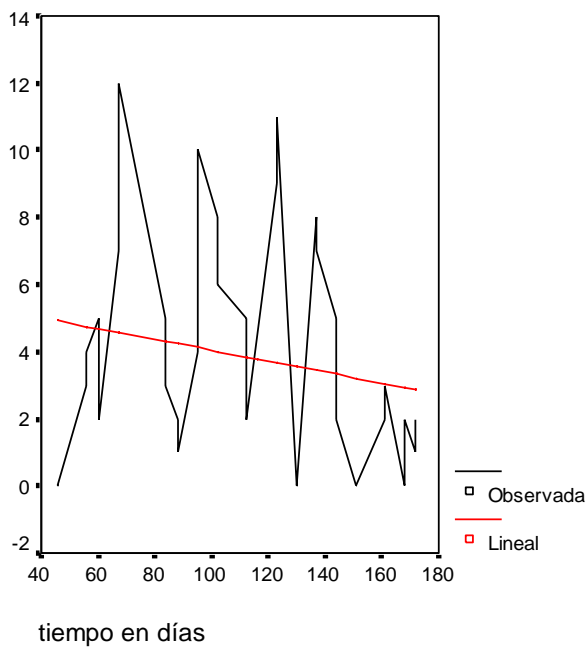
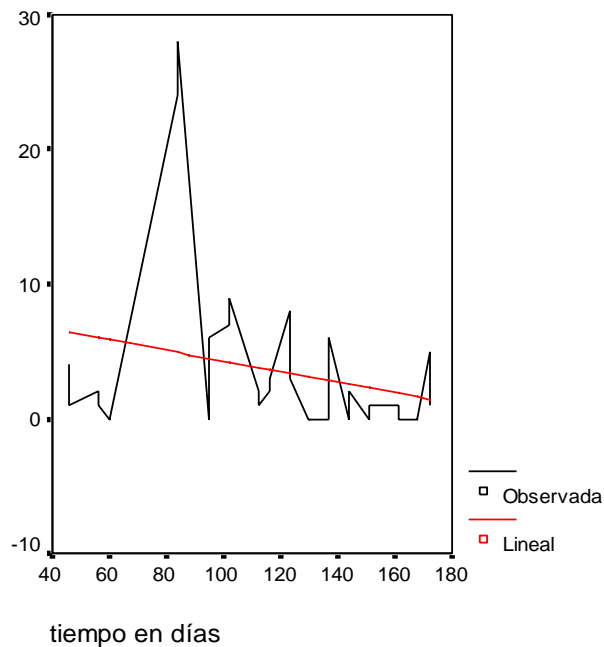


Figura 47. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H2.



Eficiencia del humedal H3: se aplicó el análisis de correlación no paramétrica de Spearman dando como resultado una significancia: 0.097, concluyéndose que no hay una tendencia a disminuir el número de bacterias coliformes con el paso del tiempo, debido a que el sistema de tratamiento aun se encuentra en condiciones de maduración (Figura 48).

Figura 48. Variación en la remoción de coliformes fecales en el humedal H3.



En general, se puede expresar que los humedales realizan una remoción importante de las bacterias coliformes, pero aún el rendimiento no es el adecuado, debido a que se presenta poca maduración del sistema reflejado en el bajo crecimiento de las macrófitas y de sus rizomas de corta profundidad. Debido a que es un sistema de reciente construcción, el sistema de humedales contribuyó a

mejorar la calidad del agua del efluente, aunque la remoción de las bacterias coliformes de los humedales, aún no es el deseable.

Es importante tener en cuenta que durante el tiempo de estudio, se presentaron diversos inconvenientes de operación y mantenimiento en los sistemas de alimentación y conducción del afluente al humedal, taponamiento del sedimentador con lodos, lo que producía por ende el cierre del caudal.

Aunque los análisis estadísticos indican similaridad en la operación, se observó en cuanto a eficiencia de las plantas utilizadas en el sistema de tratamiento que se presentó una mejor acción por parte del *Hedychium coronarium*. Para el tiempo de de retención hidráulico de 4 días, la remoción se atribuyó fundamentalmente a los fenómenos de precipitación - adsorción. La precipitación química se reforzó por el metabolismo del humedal, sobre todo de las algas que reducen los niveles de CO₂ disuelto y aumentan el pH²¹⁻²².

El proceso de eliminación de coliformes en humedales artificiales, se ha relacionado con factores ambientales como el tiempo de retención hidráulico, el tipo de medio granular y el tipo de vegetación utilizado. No obstante, diferentes investigadores muestran resultados contradictorios, hecho que se atribuye a la gran variabilidad en la concentración bacteriana, especialmente en los afluentes²³.

La remoción de materia orgánica y de las bacterias coliformes de los humedales, aún no es la deseable, debido a que por ser sistemas de reciente construcción,

²¹ LARA, Op.cit.

²² FERNÁNDEZ, Op.cit.

²³ MORATÓ, J. Op.cit.

aún les falta madurar. Rivera *et al.*²⁴, encontraron que en países como México, el tiempo mínimo para que el sistema de humedales se establezca es de un año, a diferencia de países como Alemania y el Reino Unido en los que el sistema se estabiliza en más tiempo debido a que la temperatura ambiental es menor²⁵.

7.3 BIOMASA Y ANÁLISIS PRÓXIMAL EN LA VEGETACIÓN

7.3.1 Análisis de biomasa en la vegetación. Para determinar la biomasa generada en cada tratamiento (H1 con *Phragmites australis* y H3 con *Hedychium coronarium*), se cosechó en cada humedal la biomasa aérea (vástago y hojas) generada durante el tiempo de muestreo. (Cuadros 36 y 37). Para interpretar los cuadros es importante tener en cuenta la siguiente simbología: F1: fila 1; F2: fila 2; F3: fila 3. M1, M2 y M3 (Muestra 1, 2 y 3) por cada humedal.

Debido a que son dos especies totalmente diferentes, no es posible hacer una comparación entre ellas desde el punto de vista estadístico; pero, si es posible establecer que *Phragmites australis* es la macrófita que mayor cantidad de biomasa construye, comparada con *Hedychium coronarium* y por lo tanto, sería importante a futuro hacer análisis profundos de sus tejidos con el fin de establecer su utilidad.

²⁴ RIVERA, F., WARREN, A., RAMÍREZ, E., DECAMP, O., BONILLA, P., GALLEGOS, E., CALDERÓN, A., SÁNCHEZ, J. T. Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). *Water Science and Technology*, 1995. 32: 211-218.

²⁵ FINDLATER, B.C., HOBSON, J. A. Y COOPER, P.F. Reed bed treatment systems: Performance evaluation. En: *Constructed Wetlands in water Pollution Control*. Cooper, P.F. y Findlater. Great Britain; B.C. Editors Pergamon Press, 1990.

Cuadro 36. Biomasa generada en el humedal con *Phragmites australis*.

		W bolsa (g.)	W bolsa + muestra (g.)	W fresco (g.)	W seco + bolsa (g.)	W seco (g.)	% H ₂ O	% Biomasa
F1	M1	11,0	172,4	161,4	36,0	25,0	84,51	15,49
	M2	11,1	174,5	163,4	43,5	32,4	80,17	19,83
	M3	11,1	140,1	129,0	36,5	25,4	80,31	19,69
F2	M1	11,1	129,3	118,2	37,1	26,0	78,01	21,99
	M2	11,1	166,9	155,8	45,5	34,4	77,92	22,08
	M3	11,1	171,3	160,2	34,9	23,8	85,14	14,86
F3	M1	11,1	143,1	132,0	29,5	18,4	86,06	13,94
	M2	11,0	130,4	119,4	32,0	21,0	82,41	17,59
	M3	11,1	152,9	141,8	34,5	23,4	83,50	16,50
Promedio						25,53	82,003	17,997

Cuadro 37. Biomasa generada en el humedal con *Hedychium coronarium*.

		W bolsa (g.)	W bolsa + muestra (g.)	W fresco (g.)	W seco + bolsa (g.)	W seco (g.)	% H ₂ O	% Biomasa
F1	M1	11,1	52,9	41,8	17,7	6,6	84,21	15,79
	M2	11,1	64,3	53,2	18,9	7,8	85,34	14,66
	M3	11,1	77,5	66,4	20,7	9,6	85,54	14,46
F2	M1	11,1	64,1	53,0	19,5	8,4	84,15	15,85
	M2	11,3	65,7	54,4	18,7	7,6	86,03	13,97
	M3	11,2	117,0	105,8	27,4	16,2	84,69	15,31
F3	M1	11,2	57,8	46,6	18,4	7,2	84,55	15,45
	M2	11,2	69,0	57,8	20,6	9,4	83,74	16,26
	M3	11,2	41,8	30,6	16,0	4,8	84,31	15,69
Promedio						8,62	84,73	15,27

La productividad del carrizo varía ampliamente entre los diferentes ecotipos; se indican cifras superiores a 50 ton de peso seco por ha y año, en donde aproximadamente el 44% corresponde a la biomasa aérea. *Phragmites* es una que produce mucha biomasa que es conveniente cosechar periódicamente y retirar del humedal para que no ocurra reciclado de nutrientes en el humedal ni incremento de materia orgánica en el sistema²⁶. Por otra parte, es importante anotar que según nativos de la zona, *Hedychium coronarium* es aprovechado en el tratamiento de hongos en la piel humana, específicamente en los pies.

7.3.2 Análisis proximal en la vegetación

Cuadro 38. Análisis proximal - *Phragmites australis*.

Determinación	Resultado	Método
Humedad % (m/m)	75,02	Gravimetría
	CV=0,09 n=2	
Fibra Cruda % (m/m)	1,01	NTC-668
	CV=1,98 n=2	
Cenizas % (m/m)	1,78	NTC-282
	CV=1,99 n=2	
Proteína % (m/m)	3,49	NTC-282
	CV=6,48 n=2	
Extracto Etéreo % (m/m)	4,43	NTC-668
	CV=3,19 n=2	
NTC: Norma Técnica Colombiana del ICONTEC. CV: Coeficiente de Variación. n = número de datos		

²⁶ BEASCOECHEA *et al.*, Op.cit.

Cuadro 39. Análisis proximal- *Hedychium coronarium*. Primera poda

Determinación	Resultado	Método
Humedad % (m/m)	84,04	Gravimetría
	CV=0,09 n=2	
Fibra Cruda % (m/m)	2,26	NTC-668
	CV=12,52 n=2	
Cenizas % (m/m)	1,67	NTC-282
	CV=1,69 n=2	
Proteína % (m/m)	2,48	NTC-282
	CV=3,99 n=2	
Extracto Etéreo % (m/m)	3,92	NTC-668
	CV=4,33 n=2	
<p>NTC: Norma Técnica Colombiana del ICONTEC. CV: Coeficiente de Variación. n = número de datos</p>		

Para determinar el análisis proximal en cada tratamiento (H1 con *Phragmites australis* y H3 con *Hedychium coronarium*), se cosechó en cada humedal la biomasa aérea (vástago y hojas) generada durante el tiempo de muestreo, con una poda de rebaje sobre todas las plantas a 10 cm de altura. Las muestras seleccionadas aleatoriamente se analizaron en el Laboratorio de análisis industriales del Departamento de Química de Univalle. Este análisis se hizo con el objetivo de conocer el contenido nutricional de cada especie, y no con el fin de comparar las dos especies utilizadas en la investigación (Cuadros 38 y 39). En este sentido, la fibra cruda indica el contenido de carbohidratos estructurados, ceniza indica el contenido de minerales, proteína indica el contenido de compuestos nitrogenados y extracto etéreo indica el contenido de grasas.

Del total del nitrógeno (proteína) absorbido del suelo por la planta, las proporciones que se asimilan en la raíz o en las hojas dependen tanto de factores externos como de factores intrínsecos de la propia planta. Así, si existe una baja concentración de nitrato en el suelo, una elevada proporción del total absorbido es reducida en la raíz, mientras que, si hay suficiente nitrato disponible, la mayor parte es transportada al vástago, en donde puede acumularse tanto en el tallo como en las hojas. Las vacuolas constituyen el principal sitio de almacenamiento de nitrato²⁷.

Otro factor que modifica la distribución interna de la asimilación del nitrato es la edad de la planta. En las primeras etapas de crecimiento la contribución de la raíz es significativa; sin embargo, a medida que la planta se desarrolla, la reducción de nitrato desciende en la raíz y aumenta en las hojas²⁸. Por lo anteriormente expuesto, es importante establecer en detalle los requerimientos nutricionales de las macrófitas utilizadas y la actividad fotosintética a través del tiempo.

²⁷ AZCÓN-BIETO, J., TALÓN, M. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Barcelona : McGraw Hill, 2000. p. 241-242.

²⁸ Ibid.

8. CONCLUSIONES

El porcentaje de remoción para SST en promedio fue de 91,8% y aunque se observó diferencia no significativa entre los tratamientos, los datos indican que la remoción es buena ya que la remoción esperada varía entre 70% y 80% para este parámetro principalmente, por fenómenos de sedimentación, floculación y adsorción, a través del conjunto que forman el sustrato y las raíces.

Los valores bajos en el porcentaje de saturación de oxígeno en los humedales, 47,56% en promedio, se pudo deber al mayor consumo de este por parte de microorganismos aerobios que requieren oxígeno para desarrollarse y a la poca transferencia de este por parte de las plantas, ya que no se observó diferencia significativa entre los tres tratamientos.

La eficiencia de remoción de DQO esperada varía entre 70 y 80%; la obtenida varió entre 81 y 88%, presentándose diferencia no significativa entre los tratamientos. En la zona aerobia se produce la mayor parte de remoción de la DQO, debido a que en esta zona el O_2 es aprovechado por los microorganismos para producir CO_2 y agua durante la degradación de la materia orgánica.

Para la DBO el porcentaje de remoción en promedio fue de 93,79%, presentándose diferencia no significativa entre los tratamientos. La mayor eliminación de materia orgánica se realizó por filtración del medio y por digestión de la fracción carbonada en forma anaerobia.

De acuerdo con la relación DQO/DBO, podemos inferir: que el agua proveniente de la piscícola tiene un componente bastante grande de materia moderadamente degradable. Después de los tres tratamientos la relación demostró que el agua contiene materia moderadamente degradable y poco degradable. Cabe destacar que la remoción de materia orgánica depende la cantidad de oxígeno disponible y de la acción de los microorganismos presentes en las biopelículas formadas en las raíces.

Para nitrógeno total el porcentaje de remoción en promedio fue de 74,38%, presentándose diferencia no significativa entre los tratamientos. Los niveles de amonio obtenidos después de los tratamientos fueron superiores a 0,5 mg/L, los cuales se consideran limitantes para el normal desarrollo y distribución de macroinvertebrados acuáticos y de la fauna íctica; y a la vez, indicadores de alteraciones drásticas en la calidad del agua por alta degradación de residuos orgánicos

El porcentaje de remoción de fosfato varió entre 71% y 80,3% y aunque hubo diferencia no significativa, los datos están dentro del valor esperado (60 a 80%), por lo cual la eficiencia obtenida se encuentra dentro del rango teórico. Se considera que existe una alta capacidad de inmovilización en el sustrato/sedimento del fósforo.

La eliminación de patógenos pudo haberse dado por diferentes mecanismos en los humedales H1 – H3 tales como: Filtración, sedimentación, adsorción en las partículas del sustrato, radiación ultravioleta, toxicidad que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas, acción depredadora de bacteriófagos y protozoo o por medio de decadencia natural. La

remoción de la contaminación biológica fue de 99.99% para los humedales en general, tanto para coliformes totales y fecales. Aunque no se encontró diferencias estadísticas, el *Hedychium coronarium*, mostró mayor eficacia para el sistema.

El análisis de correlación no paramétrica de Spearman evaluó la eficiencia de cada humedal en referencia al tiempo de muestreo, obteniéndose una diferencia significativa para coliformes totales, lo cual mostró una tendencia en la disminución de bacterias, por el contrario para coliformes fecales los resultados fueron no significativos, no detectándose cambio alguno con el transcurso del tiempo.

Phragmites es una planta que produce mucha biomasa que es conveniente cosechar periódicamente y retirar del humedal para que no ocurra reciclado de nutrientes en el humedal ni incremento de materia orgánica en el sistema.

Los Humedales de Flujo Subsuperficial tienen la ventaja de ofrecer un menor contacto de personas y animales con las aguas residuales, debido a que en estos sistemas se realizan gran cantidad de procesos que mejoran la calidad del agua. Estos sistemas proporcionan hábitats para la fauna y la flora, siendo muy apropiados para recuperar la vida en ecosistemas acuáticos contaminados.

Basados en los resultados obtenidos, se puede afirmar que estos sistemas pueden lograr niveles de tratamiento secundario consistentes, como una alternativa de descontaminación de afluentes para el desarrollo de actividades piscícolas con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

9. RECOMENDACIONES

Siguiendo las pautas generales sobre la elección del material vegetal para humedales artificiales, es recomendable que las plantas madres procedan de poblaciones naturales de la zona, a fin de asegurar su adaptación al lugar. Las plantas se desarraigan del sustrato, se fraccionan de modo que cada porción lleve en su parte subterránea rizomas, y se implantan individualmente en el sustrato del humedal.

En Colombia se debe explorar mucho más su aplicación al tratamiento de efluentes de origen agropecuario a gran escala, tales como las aguas residuales de piscícola, porcinos, avícolas, mataderos, agroindustrias, vitivinícolas, que se caracterizan por sus altas cargas de materia orgánica, sólidos en suspensión, DBO, DQO, nutrientes, y en caso de la agricultura, residuos de pesticidas.

Se recomienda en futuros trabajos evaluar diferentes tiempos de retención hidráulica, diferentes densidades de siembra, diferentes tipos de vegetación, actividad fotosintética y diferentes sustratos.

BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN, A., KOLB, P., MARULL, J. Recuperación mediambiental del tramo final del río Besós. Barcelona (Esp.) : s.n. 1997.

APHA-AWWA-WEF. Standard methods for the determination of water and wastewater". 20st Edition. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Enviroment Federation. USA. 1998.

ARCOS RAMOS, R., CANTELLANO DE ROSA, E., ALEJO NABOR, M., GARCÍA MORALES R., SOLÍS CASAS, R. Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Sta. María Nativitas Texcoco Edo. de México. México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM, 1999.

ASCUNTAR RIOS, D., TORO VÉLEZ, A., PEÑA VARÓN, M., MADERA, C. A. Influencia del Crecimiento Biológico en la Hidrodinámica y en la Remoción de Materia Orgánica en un Humedal de Flujo Sub-Superficial sin Vegetación (HFSSV), para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Regiones Tropicales. En : Conferencia Latinoamericana de Saneamiento. Cali : 2007.

AZCÓN-BIETO, J., TALÓN, M. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Barcelona (Esp.) : McGraw Hill, 2000.

BAPTISTA, J. D., DONELLY, T., RAYNE, D. DAVENPORT, R. J. Microbial mechanisms of carbon removal subsurface flow wetlands. *s.l* : *s.n*. Water Science and Technology, 2003.

BARCO, Sandra, MORA, Diana. Evaluación de la Eficiencia de Remoción de Bacterias Coliformes de un Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de Aguas Residuales de una Truchifactoría. Popayán, 2008. Trabajo de grado (Bióloga). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación.

BEASCOECHEA, E. CURT, M.D. FERNÁNDEZ, J. MUÑOZ, J. Manual de fitodepuración. Universidad Politécnica de Madrid. España : Edita, 2000.

BOYD, C. E. Effluents from catfish ponds during fish harvest. J. Environ. Qual. s./ : s.n. 1978,

BRIX, H. "Use of subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment – an overview". Natural and constructed wetlands for wastewater treatment and reuse – experience, goals and limits. Italy : Ramadori, R. *et al.*, 1995.

BURKE, D.J., WEIS, J.S. and WEIS, P. Release of metals by the leaves of the salt marsh grasses *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2000.

CASTAÑO, J.M. PAREDES, D. Criterios sobre diseño, operación y mantenimiento de filtros anaeróbicos de flujo ascendente. En : Revista Scientia et Technical. 2002.

CASTILLO, P. A., COLLARDO R. Eliminación de nitrógeno en sistemas naturales de depuración de aguas residuales: análisis comparativo. s.l. : Retema, 1996.

C.B.A. Chemical Bond Approach project. Sistemas químicos. España : Reverté, 1978.

CENAGUA. Sistemas de tratamiento de aguas servidas por medio de humedales artificiales. OPS, Societe Quebecoise d. assanissement des eaux. Santa fe de Bogota D.C.: Organización Panamericana de la Salud, 1999.

CHACÓN, C.H. Caracterización de la seguridad alimentaria en el Departamento del Cauca para el periodo 2000 a 2004. Popayán : Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Minero del Departamento del Cauca, Universidad del Cauca, 2006

COLEMAN, J, HENCH, K, GARBUTT, K, SEXSTONE, A, BISSONNETTE, G and SKOUSEN, J. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetland. Department of Biology. Morgantown : West Virginia University, 2000.

COLOMBIA. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento 3177. Bogotá : CONPES, 2002.

_____. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. El Medio Ambiente en Colombia. 2 ed. Bogotá : IDEAM, 2001.

_____. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. La cadena de la piscicultura en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica. Bogotá : El Ministerio, 1991 – 2005.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. Plan de manejo ambiental del sector piscícola. Subdirección de gestión ambiental. Popayán : C.R.C., 2004.

_____.CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. Proyectos a los cuales aplica el estudio de impacto ambiental. Instructivo de manejo ambiental de proyectos piscícolas. Popayán : C.R.C. 2004.

DAVILA, D. Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales. Perú : s.n. 2003.

DÍAZ, D. C. Sistema de recirculación de agua para cría de Alevín de Trucha Arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) y carpa común (*Cyprinus carpio*); En : Agua Potable para Comunidades Rurales: Reuso y Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Domesticas. [en línea] disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo07.html>. Colombia. [2000]

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY. Method 1604: Total Coliforms and *Escherichia coli* in Water by Membrane Filtration Using a Simultaneous Detection Technique (MI Medium). [en línea] disponible en: www.epa.gov/nerlcwww/1604sp02.pdf

ESCALANTE, V; CARDOZO, L. El reuso del agua tratada en México. México : Instituto Mexicano de Tecnología del agua, 2002.

ESTEVEZ S.F. Diseño y explotación de sistemas de depuración de aguas residuales en pequeños núcleos y comunidades. España : Asociación Nacional de Químicos Españoles, Agrupación Territorial de Castilla la Mancha, Sección Técnica de Medio Ambiente, 1982.

FASSMAN, E, SHAW, L, ASCE and RISCASSI, L. Planting strategies for constructed wetlands for stormwater treatment. Charlottesville : University Virginia, Dept. of Civil Engineering, 1999.

FERNANDEZ, J. E. Una producción piscícola ambientalmente sostenible, documento borrador. Propuesta doctoral en Ingeniería con énfasis en Ambiental y Sanitaria. Cali : Universidad del Valle, 2006.

FINDLATER, B.C., HOBSON, J. A. Y COOPER, P.F. Reed bed treatment systems: Performance evaluation. En: Constructed Wetlands in water Pollution Control. Cooper, P.F. y Findlater. Great Britain: B.C. Pergamon Press, 1990.

FRITIOFF, A., KAUTSKY, L. and GREGER, M. Influence of temperature and salinity on heavy metal uptake by submersed plants. Environmental Pollution. 2005.

GARCÍA, J; MORATO, J y BAYONA, J M. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos; una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. Barcelona (Esp.) : Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

GARCÍA, M., BÉCARES, E., SOTO, F., LUIS, E. Macrófitos en la depuración de aguas residuales. Su función en la eliminación de bacterias. Tecnología del agua. s.l.: s.n. 1999.

GARCÍA, J, RUIZ A, JUNQUERAS, X. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos, en tecnología del agua. España : s.n. 1997.

GERGSBERG, R, ELKINS, LYON, S and GOLDMAN, C. Wastewater. s.1984.

GIANLUIGI, N. Optimización de manejo y tecnologías sostenibles para tratamiento y eliminación de afluentes de granjas piscícolas con énfasis en pantanos construidos. En : World Aquaculture, (Septiembre, 2000) Vol 31, N° 3.

GÓMEZ, L.D. Las plantas acuáticas y anfibias de Costa Rica y Centroamérica. Costa Rica : Universidad Estatal a Distancia, 1984.

GUZMÁN, C., CAMPOS, C. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. En : Revista de la Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana. Vol. 9, N°1:59-67. [en línea]. Disponible en: www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum/vol9n1/articulo%207.pdf [2008]

HAMMER, D.A. Constructed Wetlands can Replace Conventional watertreatment. En : Waste Water International. (Oct., 1991).

HELLAWEL, J. Biological Indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier Applies Science. EEUU, 1989.

KADLEC ROBERT, H., Treatment Wetlands. 2 ed. Nueva York : Lewis Publisdhers, 1996.

LAHORA, A. Humedales controlados como tratamiento terciario de aguas residuales urbanas. En : Rivera, J. (ed.): Conclusiones del Encuentro Medioambiental (Junta de Andalucía), Instituto de Estudios Almerienses (Diputación Provincial de Almería). Almería (Esp.): Universidad de Almería, Grupo Ecologista Mediterráneo, 1998.

_____. Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo costo en la depuración de aguas residuales urbanas. Gestión de aguas del Levante Almeriense. Almería (Esp.) : 2000.

LARA, J.A. Depuración de Aguas Residuales Urbanas Mediante el Uso de Humedales Artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña (Esp.) : Instituto Catalán de Tecnología, 2000.

_____. Depuración de Aguas Residuales Urbanas Mediante Humedales Artificiales. Cataluña (Esp.) : Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.

LEVENSPIEL, O. Chemical reaction engineering. 3 ed. New York (USA) : Jhon Wiley and Sons, 1999.

LOVERA, D. Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, Perú; usando tecnologías de humedales artificiales. [en línea] disponible en: www.unmsm.edu.pe/iigeo/lacabamba/documentos/revista_IIGEO_SEMA.pdf [2008]

MARTÍNEZ M. Depuración de aguas con plantas emergentes, en hojas divulgadoras. España : Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, 1989.

METCALF y EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. España : McGraw-Hill/interamericana, 1995.

MILLÁN-HERNÁNDEZ, S.E. Operación de una planta piloto tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales y su uso en riego agrícola. (Tesis). México : UNAM, 2000.

MITSCH, W. GOSELINK, J. Wetlands. 3 ed. USA : Wiley, 1998.

MOELLER, G., RIVAS, A. Tecnología de punta para el reuso de aguas residuales en México. México : s.n., 1997.

MORATÓ, J. Eliminación de microorganismos y dinámica del biofilm en humedales construidos de flujo subsuperficial. Barcelona (Esp.) : Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

MOSCOSO, J., EGOICHEAGA, L. Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS/OPS), 2004

NOVOTNY, V. and OLEM, H. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution. New York (USA) : Van Nostrand Reinhold, 1994.

NUTTALL, P.M., Boon, A.G. y Rowell, M.R. Review of the design and management of constructed wetlands. Report 180. Great Britain : Construction Industry Research and Information Association, 1997.

ÑIQUE, A, Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, 2000. [en línea]. disponible en: http://www.Geocities.com/sociedadpqa/publicaciones/anoInro1/humedales_tratamiento_aguas.htm. [2009]

OJEDA, A., PACHECO, M. ORTIZ, D. Identificación y Conteo de Huevos de Helminthos y Coliformes en lodos crudos y tratados anaeróticamente. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [en línea] disponible en: [mail.femisca.org/publicaciones/Xcongreso/XCNIS046.pdf](mailto:femisca.org/publicaciones/Xcongreso/XCNIS046.pdf) [2009]

OTTO, S., GROFFMAN, P.M., FINDLAY, S.E. and ARREOLA, A.E. Invasive plant species and microbial processes in a tidal freshwater marsh. J. Environ. Q. 1999.

OVERALL, R. AND PARRY, D. The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland filter. Environmental Pollution, 2004.

PIGEM, J., MARZO, R., DE LA PEÑA, J. L., LLAGOSTERA, R. Infiltración/percolación y humedales como tratamientos blandos en la depuración de aguas residuales. Tecnología del Agua. 1999.

PLATA, C. Extracción y manejo de lodos provenientes de los estanques en la cría industrial de la trucha. En: Encuentro Piscícola. Medellín (Abril 2005).

PULIDO, M. Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. Bogotá: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, 2005

RAMÍREZ, C., AÑAZCO, N. Variaciones estacionales en el desarrollo de *scirpus californicus*, *typha latifolia* y *phragmites comunis* en pantanos valdivianos de Chile. Santiago de Chile : Agro Sur, 1982.

REINOSO, R. Mecanismos de eliminación de patógenos microbianos en humedales construidos. Universidad de León. [en línea] disponible en: www.tecspar.org/Documentos/workshop%20%20Terrassa/03-07-02/05_FReinoso.pdf [2009]

RIVAS, H.A. Lechos de plantas acuáticas (LPA) para el tratamiento de aguas residuales. Ingeniería Hidráulica en México. México : 1997.

RIVERA, F., WARREN, A., RAMÍREZ, E., DECAMP, O., BONILLA, P., GALLEGOS, E., CALDERÓN, A., SÁNCHEZ, J. T. Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). Water Science and Technology, 1995.

ROLDÁN, G. Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia, 1992.

SEN, N.S., KAPOOR, V.K. and GOPALKRISHNA, G. Seasonal growth of *Eichhornia crassipes* (Mart.) and its possible impact on the primary productivity and fishery structure in a tropical reservoir. Acta Hydrochim. Hydrobiol. 1990.

SHANNON, R., FLITE, O., MICHAEL and HUNTER, S. Subsurface flow constructed wetlands performance at a Pennsylvania campground and conference center. 2000.

SVENGSOUK, L, MITSCH, W. Dynamics of mixtures of *typha latifolia* and *schoenoplectus tabernaemontani* in nutrient-enrichment wetland experiments. American Naturalist, 2001.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010. Cincinnati: US EPA Office of Research and Development, 2000.

UNIVERSITY OF SOUTH ALABAMA. Constructed wetlands page. (2002) [en línea] disponible en: (<http://www.usouthal.edu/usa/civileng/wetlands.htm>) [2009]

UUSI-KAMPPA, J., BRASKERUD, B., JANSSON, H., SYVERSEN, N. and UUSITALO, R. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. 2000.

VÁSQUEZ, G. Evaluación de la calidad de las aguas naturales. Significado y alcances en la determinación y análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos fundamentales. Grupo de Recursos Hidrobiológicos Continentales. Popayán : Unicauca, 2001.

YASNO, J., GARCIA, C. Selección y diseño de alternativa para el tratamiento de afluente y efluente del proceso de producción piscícola, caso específico trucha. Trabajo de grado. (borrador). Universidad del Valle, 2006.

El agua. [en línea] disponible en: <http://www.aula21.net/Nutriweb/agua.htm#agua>. [2009]

El agua. [en línea] disponible en: <http://www.aula21.net/Nutriweb/agua.htm>. [2009]

El ciclo del agua. [en línea]: disponible en: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>, [2009]

Humedales artificiales. Tecnologías Print. URL: depuranat.itccanarias.org/index2.php?option=com_tecnologias&func=ver&id=8-10k

Microorganismos acuáticos que provocan enfermedades. [en línea] disponible en: <http://www.lentech.es/faq-microbiologia-del-agua.htm>. [2009]

Propiedades del agua. [en línea] disponible en: <http://www.profesorenlinea.cl/Quimica/AguaCaracterisFM.htm> [2009]

ANEXOS.

Anexo 1. Tabla de datos de parámetros fisicoquímicos hídricos

N	T°C	pH	SDT	Cond.E	SST	[O2]	%SATO2	DQO	DBO5	NT	NNH3	PO4
1	15,30	6,36	65,00	103,80	1093,33	6,30	83,90	4424,00	1633,66	24,15	5,69	15,51
1	15,70	6,22	200,00	138,22	1230,00	4,30	55,70	2531,00	1321,78	19,32	5,00	30,59
1	17,60	6,20	260,00	71,20	62,00	3,70	48,80	139,00	39,50	2,85	1,29	4,74
1	15,30	5,50	175,00	258,00	656,67	2,50	32,10	2155,00	594,06	17,68	4,31	15,77
1	16,00	6,00	150,00	177,50	430,00	1,80	24,80	1315,00	831,68	11,64	0,50	9,09
1	14,60	5,90	120,00	82,40	154,00	3,00	38,10	677,00	59,41	21,65	0,54	5,60
1	16,00	6,10	160,00	80,80	458,00	3,60	47,00	795,00	611,88	4,20	1,22	7,75
1	14,50	6,10	130,00	111,80	682,00	2,90	36,30	1850,00	154,46	8,26	1,90	11,72
1	15,40	6,00	143,33	75,10	536,00	4,20	54,70	714,00	201,98	6,30	2,65	1,93
1	14,20	6,10	100,00	71,10	450,00	3,70	47,00	889,00	77,23	9,56	2,10	6,53
1	18,90	5,80	93,33	137,90	334,00	2,90	39,00	715,00	293,07	0,76	0,34	5,58
1	15,10	6,20	100,00	75,70	292,00	2,70	34,40	592,00	89,11	8,69	1,74	5,58
1	14,70	6,10	120,00	100,30	44,00	0,20	2,20	855,00	231,68	11,34	0,20	19,79
1	15,70	6,10	105,80	222,00	1640,00	0,10	1,70	1068,00	257,43	10,77	4,14	10,95
1	15,80	6,00	56,80	199,90	1286,67	4,30	56,40	1862,00	451,49	23,50	1,60	17,06
1	13,90	6,36	54,90	115,60	502,00	0,40	5,20	2366,00	53,47	20,43	1,17	12,40
1	15,10	6,51	49,70	104,80	1153,33	5,50	71,20	1240,00	540,59	27,84	3,40	39,72
1	13,40	7,06	35,60	75,30	523,33	4,10	50,90	276,00	166,34	8,77	1,06	12,23
1	14,20	6,72	71,30	149,50	440,00	7,10	92,30	940,00	433,66	15,31	2,24	3,57
1	13,80	6,98	49,80	104,80	380,00	4,90	60,80	592,00	190,10	14,47	1,47	10,06
1	17,80	6,89	44,80	94,30	198,00	5,90	80,20	194,00	160,40	5,32	0,49	4,33
1	14,50	6,80	62,50	132,00	1706,67	7,60	95,50	1440,00	1300,99	26,51	2,38	20,92
1	21,50	6,00	75,80	158,80	986,67	2,20	31,80	744,00	243,56	21,37	1,19	15,54
1	17,80	6,60	73,00	153,20	534,00	2,90	39,50	981,00	326,73	17,45	3,43	24,79
1	21,30	6,10	76,30	159,90	1960,00	0,70	10,90	1278,00	427,72	39,09	4,14	39,29
1	18,20	5,90	100,10	209,00	3195,00	2,70	36,60	3356,00	712,87	21,65	8,06	70,34
1	14,60	6,91	42,40	89,60	357,50	6,20	81,40	530,00	232,00	8,77	1,74	14,61
1	14,80	6,52	70,50	147,80	362,50	5,00	63,90	280,00	59,41	8,77	1,68	11,54
1	14,50	5,97	44,20	93,30	36,00	7,00	88,00	35,00	28,51	0,37	0,28	0,12
1	14,10	6,39	71,00	148,80	546,67	4,40	55,50	400,00	178,22	11,85	0,84	12,17
2	15,10	6,42	230,00	93,30	64,00	5,90	84,90	70,00	15,80	4,24	0,91	2,26
2	14,90	6,25	160,00	138,10	146,00	4,20	57,60	464,00	16,00	8,30	0,43	10,72
2	17,80	6,10	215,00	108,30	24,00	2,30	30,40	115,00	37,43	2,64	0,54	4,56
2	14,90	5,60	165,00	211,00	88,00	1,90	24,40	269,00	127,72	7,40	1,35	9,40
2	15,40	6,20	140,00	169,30	70,00	1,30	16,80	116,00	55,84	4,17	0,32	5,11
2	14,60	6,10	50,00	81,80	74,00	2,10	27,60	141,00	38,02	2,37	0,27	3,01
2	16,00	6,50	130,00	88,20	88,00	4,00	52,60	165,00	73,66	3,40	0,98	4,32
2	14,70	6,00	90,00	91,80	112,00	2,40	30,40	138,00	35,64	3,33	0,60	2,79
2	15,60	5,80	120,00	120,50	80,00	3,30	44,10	87,00	24,36	1,70	0,71	1,98
2	14,90	5,70	83,33	106,50	66,00	2,90	36,90	129,00	50,50	3,42	1,68	2,41

N	T°C	pH	SDT	Cond.E	SST	[O2]	%SATO2	DQO	DBO5	NT	NNH3	PO4
2	20,20	5,90	73,33	134,00	40,00	2,80	39,00	86,00	48,12	0,68	0,38	0,98
2	15,40	5,90	103,33	77,90	40,00	2,50	32,30	52,00	19,01	3,26	1,18	0,98
2	14,30	6,70	50,00	97,40	46,00	0,10	1,30	68,00	29,11	3,42	0,16	3,07
2	15,70	6,30	106,60	223,00	132,00	0,10	1,80	216,00	96,83	6,79	3,15	1,45
2	17,60	6,20	44,90	94,70	16,00	2,90	40,50	28,00	11,88	0,37	0,43	0,74
2	15,70	6,22	35,50	75,30	18,00	3,80	49,80	12,00	5,70	2,23	0,59	0,76
2	15,10	6,31	15,50	112,10	200,00	5,40	69,50	276,00	135,45	8,45	1,06	8,30
2	13,50	7,39	35,20	74,60	62,00	4,10	50,70	93,00	27,33	1,79	0,50	3,47
2	16,50	6,57	88,90	185,90	16,00	3,60	48,60	147,00	84,06	2,59	1,12	0,37
2	14,10	6,94	44,40	93,70	22,00	4,50	56,50	62,00	23,17	1,96	0,34	1,20
2	15,80	6,91	70,10	147,00	272,00	5,40	69,80	247,00	140,20	6,58	0,73	4,43
2	16,50	6,70	63,40	133,40	29,00	5,50	73,10	51,00	15,15	2,94	0,39	0,48
2	21,20	6,30	80,10	167,60	260,00	0,70	10,40	314,00	130,10	14,63	0,78	7,21
2	20,30	6,90	68,60	143,90	514,00	1,30	18,90	873,00	294,65	25,62	4,13	16,68
2	21,90	6,30	89,50	187,20	316,00	0,60	8,70	184,00	169,31	9,97	3,92	7,96
2	18,20	6,60	99,70	208,00	244,00	2,60	36,20	210,00	141,39	11,65	1,59	10,85
2	15,60	7,06	51,00	107,40	21,00	4,50	58,40	37,00	28,51	2,24	1,18	1,62
2	17,40	6,69	57,20	120,40	133,00	1,50	20,40	170,00	39,80	2,24	1,18	4,16
2	16,80	6,83	51,00	107,40	35,00	5,30	70,80	38,00	19,90	0,42	0,39	0,86
2	16,40	6,61	76,20	159,70	126,00	1,80	24,60	225,00	80,20	3,78	0,56	4,75
3	20,20	6,81	112,00	181,20	15,00	3,80	54,80	26,00	6,24	1,85	1,55	1,15
3	18,30	6,70	114,00	184,70	3,00	2,90	40,10	34,00	4,10	2,03	1,16	2,02
3	17,90	6,90	142,00	157,40	1,00	3,10	41,10	31,00	4,75	1,90	1,16	1,77
3	16,80	6,30	128,00	164,40	4,00	1,70	22,60	32,00	7,49	3,92	0,43	1,48
3	19,20	6,50	114,00	163,30	5,00	1,20	16,60	16,00	5,61	1,60	1,08	1,99
3	18,90	6,90	134,00	170,10	1,00	3,20	45,20	19,00	5,31	1,03	0,91	1,63
3	20,50	7,00	116,00	176,90	1,00	3,20	46,10	14,00	5,27	1,77	1,52	1,24
3	18,10	6,50	98,00	149,10	6,00	3,00	41,80	27,00	2,14	1,41	1,14	1,75
3	20,40	7,40	96,00	99,00	7,00	2,00	28,20	16,00	2,97	0,98	0,71	1,61
3	19,90	6,30	80,00	103,50	6,00	3,40	48,40	27,00	4,08	2,06	0,81	1,09
3	21,90	6,50	120,00	181,30	16,00	2,90	42,00	79,00	12,32	1,09	0,49	1,54
3	18,80	6,90	120,00	187,40	18,00	1,80	25,80	34,00	4,10	3,04	0,22	1,15
3	18,10	6,90	134,00	122,20	6,00	0,10	1,80	16,00	5,47	0,54	0,33	1,35
3	18,40	7,50	63,20	132,70	5,00	0,20	2,60	17,00	4,71	1,30	0,16	1,43
3	18,90	7,10	64,30	135,10	4,00	4,00	58,00	20,00	3,30	1,22	0,53	0,92
3	18,40	7,33	54,70	115,00	3,00	4,10	57,10	10,00	2,58	1,70	0,80	0,67
3	17,80	7,20	53,10	111,70	3,00	4,70	65,00	6,00	2,26	0,27	0,16	0,43
3	16,80	7,31	62,40	131,00	3,00	3,80	52,10	11,00	1,19	0,34	0,28	0,64
3	17,40	8,21	68,10	142,80	1,00	5,00	67,40	15,00	1,63	0,17	0,17	0,23
3	17,50	8,25	62,50	131,40	1,00	5,00	69,20	3,00	2,11	1,29	0,39	0,36
3	18,80	8,29	71,00	148,90	3,00	3,40	47,30	13,00	2,94	0,50	0,34	0,62
3	18,30	7,80	66,80	140,30	1,00	4,40	61,90	12,00	1,51	1,40	0,78	0,74
3	21,60	7,10	72,20	151,40	5,00	4,70	70,20	10,30	3,74	1,23	0,34	0,58
3	19,40	7,00	71,70	150,20	4,00	2,70	38,50	10,80	2,55	0,62	0,22	1,08
3	20,20	7,00	84,20	176,10	8,00	2,40	34,50	276,00	7,87	0,39	0,28	1,32
3	18,50	6,60	97,30	203,00	10,00	1,80	24,60	21,20	8,82	0,73	0,34	1,37
3	18,10	7,37	88,90	185,90	1,00	2,40	33,20	22,70	5,17	1,51	0,22	1,14

N	T°C	pH	SDT	Cond.E	SST	[O2]	%SATO2	DQO	DBO5	NT	NNH3	PO4
3	17,90	7,18	84,40	176,70	19,00	3,60	49,80	19,10	4,51	1,51	0,67	1,80
3	17,70	6,84	86,00	180,00	51,00	5,90	81,20	45,00	6,89	0,84	0,28	1,98
3	19,00	7,41	87,50	183,00	30,00	6,20	86,60	46,50	4,69	1,01	0,45	1,80
4	20,70	6,93	120,00	186,70	15,00	4,00	59,90	37,00	7,60	1,68	1,34	1,53
4	18,20	6,91	114,00	185,70	8,00	3,80	57,00	20,00	5,78	1,90	0,43	1,87
4	17,40	6,70	144,00	161,70	5,00	2,40	32,00	31,00	5,79	0,73	1,12	1,52
4	17,30	6,50	96,00	179,00	9,00	2,40	32,60	37,00	9,18	2,33	0,65	1,00
4	19,10	6,60	122,00	180,60	8,00	1,10	15,70	30,00	6,83	1,51	0,86	1,68
4	19,10	6,90	128,00	184,70	6,00	2,70	38,00	31,00	7,60	1,42	0,34	1,62
4	20,50	7,20	126,00	167,90	4,00	3,90	58,60	30,00	5,35	1,42	1,25	1,24
4	18,50	7,00	94,00	146,10	12,00	3,30	47,00	14,00	2,57	0,71	0,60	0,94
4	20,80	7,70	46,00	113,60	3,00	3,80	59,80	12,00	2,89	0,81	0,43	1,08
4	20,20	6,70	88,00	116,70	10,00	4,40	63,20	29,00	3,33	0,65	0,43	0,64
4	20,40	7,10	124,00	134,30	14,00	3,50	49,00	66,00	7,45	0,87	0,49	1,37
4	19,30	8,10	62,00	140,40	16,00	2,40	34,10	22,00	5,19	2,93	0,50	1,37
4	18,00	6,90	128,00	133,40	2,00	0,10	2,00	20,00	2,26	0,81	0,43	0,86
4	18,70	7,70	75,20	157,70	6,00	0,20	3,10	21,00	1,94	1,41	0,33	0,65
4	19,60	7,20	83,10	173,90	1,00	3,20	45,80	16,00	2,79	0,90	0,80	0,49
4	19,00	7,09	50,60	106,50	6,00	3,80	52,40	5,00	3,83	1,17	0,53	0,54
4	18,00	7,56	59,70	125,40	3,00	4,90	67,10	6,00	1,43	0,27	0,16	0,37
4	18,00	7,73	71,80	150,50	6,00	3,10	44,80	14,00	3,15	1,34	0,45	0,68
4	17,80	8,08	68,60	144,00	1,00	4,90	66,80	18,00	2,32	0,17	0,17	0,21
4	17,70	8,32	67,80	141,80	1,00	5,40	74,00	5,00	2,23	0,39	0,17	0,32
4	17,70	8,34	75,10	157,40	6,00	3,90	53,30	14,00	2,47	0,39	0,34	0,42
4	17,40	7,90	81,70	171,10	3,00	4,50	60,90	13,00	0,80	2,24	0,50	0,47
4	20,70	7,50	81,00	169,60	8,00	4,10	59,90	10,70	2,35	1,34	0,39	0,58
4	22,40	7,40	85,30	178,50	15,00	3,00	44,40	16,40	2,88	1,29	0,78	1,02
4	20,10	7,60	89,00	186,20	15,00	3,80	55,20	19,30	3,30	0,78	0,78	1,19
4	18,20	6,80	97,20	203,00	8,00	2,00	27,80	18,10	2,14	1,40	1,23	0,79
4	17,80	7,79	93,40	196,30	1,00	3,50	47,20	15,70	1,43	0,95	0,50	0,40
4	18,10	7,56	94,00	196,00	30,00	4,60	61,00	30,20	5,23	1,01	0,62	1,37
4	18,20	7,48	97,30	203,00	38,00	5,20	71,80	36,00	7,37	1,74	1,29	1,56
4	19,30	7,79	94,70	198,00	28,00	5,30	74,70	46,00	4,07	1,12	0,56	1,58
5	21,30	6,58	130,00	163,70	17,00	3,60	53,40	36,00	5,64	2,07	1,16	1,07
5	18,00	7,09	96,00	182,10	18,00	4,80	66,00	35,00	5,98	1,90	1,16	1,36
5	17,50	6,60	126,00	165,90	14,00	3,90	50,60	19,00	5,23	2,03	1,21	1,26
5	17,20	6,60	126,00	163,60	12,00	2,90	38,60	20,00	7,19	2,16	0,78	0,16
5	19,40	6,80	104,00	158,90	9,00	2,40	36,00	30,00	5,67	1,55	1,08	1,17
5	18,90	7,00	134,00	185,10	5,00	3,80	53,60	21,00	5,11	1,08	0,99	0,38
5	21,50	7,50	128,00	169,70	7,00	4,50	66,60	21,00	4,12	1,08	0,81	0,80
5	18,90	7,10	100,00	138,10	11,00	3,20	45,60	10,00	3,37	1,14	0,87	0,72
5	20,50	7,80	108,00	108,70	15,00	3,90	57,00	20,00	5,19	0,98	0,54	1,43
5	20,10	6,90	74,00	108,40	13,00	4,20	58,90	33,00	5,47	2,72	0,71	0,46
5	20,20	7,50	76,00	114,20	7,00	3,80	53,30	51,00	3,37	1,09	0,49	0,93
5	19,00	7,70	64,00	115,80	12,00	2,40	33,20	24,00	4,16	3,10	0,90	0,93
5	18,10	7,10	134,00	119,50	5,00	0,10	1,60	30,00	3,09	0,76	0,22	0,79
5	18,30	7,80	71,00	149,00	11,00	0,30	4,20	11,00	2,76	2,72	0,27	0,70

N	T°C	pH	SDT	Cond.E	SST	[O2]	%SATO2	DQO	DBO5	NT	NNH3	PO4
5	19,30	7,30	67,90	142,60	1,00	3,00	44,90	13,00	2,91	3,03	0,85	0,57
5	19,50	6,88	62,00	130,20	7,00	3,80	55,40	3,00	4,46	0,90	0,27	0,43
5	17,90	8,15	55,50	116,70	5,00	5,10	70,70	11,00	5,52	0,27	0,32	0,44
5	17,50	7,87	65,40	137,30	3,00	3,80	54,00	8,00	1,40	0,22	0,11	0,68
5	17,80	8,59	67,60	141,90	6,00	5,50	74,60	14,00	1,46	0,17	0,17	0,68
5	17,70	8,46	58,90	123,90	1,00	4,70	61,30	3,00	1,78	0,50	0,39	0,33
5	18,60	8,41	61,90	130,10	2,00	4,20	58,30	3,00	2,05	0,39	0,34	0,35
5	18,10	8,40	65,70	138,00	9,00	6,00	81,30	37,00	1,25	5,15	0,34	0,69
5	20,20	7,90	65,80	138,10	3,00	4,10	59,80	7,70	1,84	1,06	0,22	0,40
5	19,80	7,20	67,00	140,50	8,00	3,00	41,90	11,40	3,68	0,62	0,28	1,04
5	19,80	7,80	75,60	158,50	10,00	1,70	24,70	11,90	2,67	0,50	0,39	1,31
5	19,10	6,50	88,70	185,50	22,00	3,20	44,70	8,30	4,31	0,73	0,34	0,64
5	17,90	7,95	83,60	175,00	2,00	2,00	26,60	8,70	4,78	1,06	0,90	1,04
5	17,90	8,15	92,00	191,00	8,00	4,80	66,80	8,00	3,80	0,95	0,50	0,87
5	18,00	7,41	113,80	237,00	26,00	1,70	23,10	34,00	5,92	0,56	0,28	1,47
5	18,70	7,35	92,60	193,00	23,00	4,40	61,50	47,00	3,39	1,68	0,84	1,91

(N) Factor o puntos de muestreo: 1 (Entrada al Sedimentador); 2 (Caja de distribución); 3 (Efluente humedal con *Phragmites a.*); 4 (Efluente humedal control, sin macrófitas); 5 (Efluente humedal con *Hedychium c.*)

DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES

En los **anexos 2-27**, se detallan las concentraciones de coliformes totales y fecales de acuerdo a los diferentes niveles o puntos de muestreo.

Anexo 2. Muestreo 29/04/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
COLIFORMES FECALES	Humedal H3	4	1	2,5
	Sedimentador	81	49	65000
	Caja de Distribución	229	179	204000
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	68	52	60
	Humedal H2	209	207	208
	Humedal H3	140	153	146,5
	Sedimentador	324	281	302500
	Caja de Distribución	153	181	167000

Anexo 3. Muestreo 09/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
	Humedal H1	3	1	2
	Humedal H2	3	4	3,5
COLIFORMES FECALES	Humedal H3	2	1	1,5
	Sedimentador	427	364	395500
	Caja de Distribución	772	683	727500
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	46	59	52,5
	Humedal H2	383	411	397
	Humedal H3	51	61	56
	Sedimentador	543	566	554500
	Caja de Distribución	623	530	576500

Anexo 4. Muestreo 13/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
	Humedal H1	3	2	2,5
	Humedal H2	5	2	3,5
COLIFORMES FECALES	Humedal H3	0	0	0
	Sedimentador	219	261	240000
	Caja de Distribución	380	286	333000
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	78	72	75
	Humedal H2	228	219	223,5
	Humedal H3	52	45	48,5

	Sedimentador	800	890	845000
	Caja de Distribución	1124	1009	1066500

Anexo 5. Muestreo 16/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	426	460	443
	Humedal H2	48	69	58.5
	Humedal H3	11	5	8
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
		1	2	
	Sedimentador	62	53	57.5
Caja de distribución	52	74	63	

Anexo 6. Muestreo 20/05/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	845	778	811,5
	Humedal H2	7	12	9,5
	Humedal H3	51	47	49
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	>400	>400	489
	Humedal H2	134	125	129,5
	Humedal H3	195	214	204,5
COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
	Sedimentador	14	9	11,5
	Caja de Distribución	0	6	3
COLIFORMES	Sedimentador	60	74	67

TOTALES	Caja de Distribución	116	114	115
----------------	----------------------	-----	-----	-----

Anexo 7. Muestreo 06/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	3	2	2,5
	Humedal H2	5	3	4
	Humedal H3	24	28	26
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	64	68	66
	Humedal H2	192	271	231,5
	Humedal H3	83	87	85
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	16	21	18,5
	Caja de Distribución	27	32	29,5
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	827	874	850,5
	Caja de Distribución	832	643	737,5

Anexo 8. Muestreo 10/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	3	4	3,5
	Humedal H2	2	1	1,5
	Humedal H3	1	49	25
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	283	300	291,5
	Humedal H2	1023	1134	
	Humedal H3	425	408	416,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml

COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	19	30	24,5
	Caja de Distribución	3	2	2,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	778	714	746
	Caja de Distribución	986	1037	1011,5

Anexo 9. Muestreo 17/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	8	5	6,5
	Humedal H2	4	10	7
	Humedal H3	0	6	3
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	493	469	481
	Humedal H2	297	290	293,5
	Humedal H3	298	294	296
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	4	2	3
	Caja de Distribución	6	3	4,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	612	641	626,5
	Caja de Distribución	812	921	866,5

Anexo 10. Muestreo 24/06/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	5	7	6
	Humedal H2	8	6	7
	Humedal H3	7	9	8
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	191	166	178,5
	Humedal H2	215	245	230
	Humedal H3	98	173	135,5

COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
	Sedimentador	5	4	4,5
	Caja distribución	7	6	6,5
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	82	96	89
	Caja de Distribución	156	159	157,5

Anexo 11. Muestreo 04/07/2008

COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
	Humedal H1	3	1	2
	Humedal H2	5	2	3,5
	Humedal H3	2	1	1,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	539	491	515
	Humedal H2	186	125	155,5
	Humedal H3	182	189	185,5
COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
		1	2	
	Sedimentador	6	4	5
	Caja de Distribución	1	3	2
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	1000	264	632
	Caja de Distribución	519	560	539,5

Anexo 12. Muestreo 08/07/2008

COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
	Humedal H1	2	5	3,5
	Humedal H2	21	22	21,5
	Humedal H3	2	3	2,5
	Humedal H1	216	198	207

COLIFORMES TOTALES	Humedal H2			DNPSC
	Humedal H3	11	41	26
COLIFORMES FECALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10⁸/100 ml
		1	2	
	Sedimentador	5	3	4
	Caja de Distribución	2	3	2,5
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	147	137	142
	Caja de Distribución	58	55	56,5

Anexo 13. Muestreo 11/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10³/100 ml
COLIFORMES TOTALES		1	2	
	Humedal H1	121	149	135
	Humedal H2	306	357	331,5
	Humedal H3	24	21	22,5
COLIFORMES TOTALES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10⁸/100 ml
		1	2	
	Sedimentador	29	39	34
	Caja de Distribución	13	19	16

Anexo 14. Muestreo 15/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Humedal H1	7	4	5,5
	Humedal H2	9	11	10
	Humedal H3	8	3	5,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	308	286	297
	Humedal H2	53	46	49,5
	Humedal H3	48	32	40
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Sedimentador	8	10	9
	Caja de Distribución	4	6	5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	20	27	23,5
	Caja de Distribución	45	52	48,5

Anexo 15. Muestreo 18/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES				
	Humedal H1	244	234	239
	Humedal H2	13	9	11
	Humedal H3	11	20	15,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	44	312	178
	Caja de Distribución	93	94	93,5

Anexo 16. Muestreo 22/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	0	0	0
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	0	0
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	54	43	48,5
	Humedal H2	21	16	18,5
	Humedal H3	15	12	13,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Sedimentador	0	0	0
	Caja de Distribución	0	2	1
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	61	50	55,5
	Caja de Distribución	18	23	20,5

Anexo 17. Muestreo 26/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	113	128	120,5
	Humedal H2	15	16	15,5
	Humedal H3	5	3	4
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	41	36	38,5
	Caja de Distribución	33	40	36,5

Anexo 18. Muestreo 29/07/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	2	0	1
	Humedal H2	8	7	7,5
	Humedal H3	0	6	3
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	118	173	145,5
	Humedal H2	218	221	219,5
	Humedal H3	582	541	561,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	3	5	4
	Caja de Distribución	5	29	17
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	46	49	47,5
	Caja de Distribución	47	46	46,5

Anexo 19. Muestreo 01/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES		1	2	
	Humedal H1	116	132	124
	Humedal H2	215	200	207,5
	Humedal H3	102	74	88
COLIFORMES	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	

TOTALES	Sedimentador	182	185	183,5
	Caja de Distribución	133	126	129,5

Anexo 20. Muestreo 05/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10³/100ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	135	128	131,5
	Humedal H2	5	2	3,5
	Humedal H3	0	2	1
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	823	925	874
	Humedal H2	46	54	50
	Humedal H3	80	87	83,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10⁸/100ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	7	6	6,5
	Caja de Distribución	8	9	8,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	73	55	64
	Caja de Distribución	169	153	161

Anexo 21. Muestreo 12/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10³/100ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	2	1	1,5
	Humedal H2	0	0	0
	Humedal H3	0	1	0,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	113	117	115
	Humedal H2	41	34	37,5
	Humedal H3	50	47	48,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10⁸/100ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	9	11	10
	Caja de Distribución	14	9	11,5
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	31	27	29
	Caja de Distribución	23	38	30,5

Anexo 22. Muestreo 15/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	28	35	31,5
	Humedal H2	41	36	38,5
	Humedal H3	67	72	69,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
		1	2	
	Sedimentador	87	41	64
Caja de distribución	152	204	178	

Anexo 23. Muestreo 22/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES	Humedal H1	2	0	1
	Humedal H2	2	3	2,5
	Humedal H3	1	0	0,5
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	5	4	4,5
	Humedal H2	186	192	189
	Humedal H3	585	544	564,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	0	0	0
	Caja de Distribución	0	0	0
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	3	5	4
	Caja de Distribución	6	4	5

Anexo 24. Muestreo 26/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Humedal H1	2	1	1,5
	Humedal H2	0	2	1
	Humedal H3	0	0	0
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	29	24	26,5
	Humedal H2	14	19	16,5
	Humedal H3	8	7	7,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES				
	Sedimentador	0	1	0,5
	Caja de Distribución	2	3	2,5
COLIFORMES TOTALES				
	Sedimentador	56	49	52,5
	Caja de Distribución	118	93	105,5

Anexo 25. Muestreo 29/08/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	27	54	40,5
	Humedal H2	9	6	7,5
	Humedal H3	4	9	6,5
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
		1	2	
	Sedimentador	4	7	5,5
Caja de distribución	2	3	2,5	

Anexo 26. Muestreo 02/09/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Humedal H1	4	3	3,5
	Humedal H2	1	2	1,5
	Humedal H3	5	1	3
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	18	13	15,5
	Humedal H2	23	26	24,5
	Humedal H3	9	11	10
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100 ml
		1	2	
COLIFORMES FECALES		1	2	
	Sedimentador	6	3	4,5
	Caja de Distribución	5	9	7
COLIFORMES TOTALES	Sedimentador	114	120	117
	Caja de Distribución	41	164	102,5

Anexo 27. Muestreo 05/09/2008

	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ³ /100ml
		1	2	
COLIFORMES TOTALES	Humedal H1	16	15	15,5
	Humedal H2	10	19	14,5
	Humedal H3	13	7	10
	SITIO	NUMERO DE COLONIAS		UFCx10 ⁸ /100ml
	1	2		
	Sedimentador	110	93	101,5
Caja de distribución	51	46	48,5	