

## Tesis de Maestría

# Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia

Mena Cabrera, Paolo Alexander

2014-12-16

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in [digital.bl.fcen.uba.ar](http://digital.bl.fcen.uba.ar). It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

#### Cita tipo APA:

Mena Cabrera, Paolo Alexander. (2014-12-16). Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

#### Cita tipo Chicago:

Mena Cabrera, Paolo Alexander. "Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2014-12-16.

**EXACTAS** UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



**UBA**

Universidad de Buenos Aires

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**



**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HAFSSH) EN EL COLEGIO COMFAMILIAR SIGLO XXI, SEDE CAMPESTRE CORREGIMIENTO DE SAN FERNANDO, MUNICIPIO DE PASTO, COLOMBIA.**

Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de Buenos Aires en  
Ciencias Ambientales

**PAOLO ALEXANDER MENA CABRERA**

**Director de tesis**

**Mg. CARLOS ALBERTO OJEDA**

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
BUENOS AIRES  
MARZO DE 2014**

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**DEDICATORIA**

Con toda sinceridad agradezco a Dios y dedico este nuevo triunfo a las personas que han estado siempre orientando mi vida para que pueda lograr mis sueños; a ustedes los mejores deseos y los mejores momentos de mi vida.

Lina Cabrera, Segundo Mena, Natalia Camila y Albert Yezid

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

### **AGRADECIMIENTOS**

Expreso los más sinceros agradecimientos a las personas que de una u otra forma contribuyeron a que este trabajo de grado se culmine con éxito.

Al Mg. Carlos Alberto Ojeda, Director de tesis, por su orientación, supervisión durante todo el proceso de investigación y sobre todo por su amistad incondicional.

A la Dra. Ines Camillioni, docentes y equipo administrativo de la Maestría en Ciencias Ambientales, por hacer de la Universidad de Buenos Aires un lugar de aprendizaje internacional.

A mis padres, hermanos y familia, por el apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación profesional y personal.

A la Ing. Diana Villota, por el apoyo incondicional para el desarrollo del presente trabajo.

Al Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede Campestre, de propiedad de la Caja de Compensación Familiar de Nariño, COMFAMILIAR DE NARIÑO, por el apoyo en el desarrollo físico del presente trabajo de grado y por contribuir en el cuidado del ambiente, de forma sostenible.

Al Dr Jhon Alexander Rojas Cabrera, Director Administrativo de la Caja de Compensación Familiar de Nariño, COMFAMILIAR DE NARIÑO, por su amistad, su apoyo en lo personal y profesional.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

### **RESUMEN**

Los humedales artificiales son un reservorio construido en un terreno con paredes y pisos impermeabilizados que contienen un sustrato (grava o arena) y una vegetación acuática adecuada para tratar efluentes residuales; esta tecnología que busca una recuperación del recurso hídrico ha sido aplicada en países desarrollados y actualmente se está siendo implementada en países como Colombia por su bajos costos constructivos comparado con la tecnología convencional.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales Artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede Campestre Corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia.

Para el desarrollo del estudio se diseñó e implemento una trampa de grasas, un tanque séptico, un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), seguido del humedal artificial (HAFSSH), donde se llevó a cabo la evaluación del sistema mediante la medición y análisis de algunos determinantes de calidad del agua como  $DBO_5$ , DQO, Sólidos suspendidos TOTALES SST, nitrógeno total N, fósforo total P, grasas y aceites, Coliformes Totales y Escherichia Coli. Se realizó un monitoreo de calidad de agua a la entrada y salida de cada componente, que permitió determinar la eficiencia de remoción del sistema en los parámetros establecidos, posteriormente se hizo una comparación de las eficiencias obtenidas del humedal artificial respecto al tanque séptico y el FAFA y las eficiencias calculadas con los modelos matemáticos aplicados para el diseño.

Los resultados de la evaluación de la eficiencia del Humedal artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH) fueron los siguientes; Remoción de la  $DBO_5$  del 93.89% y de la DQO del 84.98%; la eficiencia de remoción de los SST fue del 40%.

El N y las grasas y aceites no presentaron eficiencias de remoción, debido a que al igual que los SST, el agua que ingreso al humedal, ya presentaba excelentes condiciones en estos tres parámetros, por motivo de la eliminación en los componentes

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

previos al humedal tal como tanque séptico y el FAFA. Para los parámetros microbiológicos como Coliformes Totales y E Coli, del humedal artificial se obtuvo eficiencias del 99,99 y 99,97% respectivamente. La remoción de los contaminantes a través del sistema implementado en este estudio, garantiza un aprovechamiento óptimo y eficaz del recurso hídrico. Sin embargo, se debe resaltar que la finalidad y uso de este recurso es para riego de los cultivos y jardines presentes en el Colegio.

# Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b>	<b>14</b>
<b>1. Antecedentes Bibliográficos</b>	<b>15</b>
1.1 Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales	15
1.2 Los Humedales Artificiales como Medio de Control de la Contaminación	16
1.3 Mecanismo de Depuración de dos Humedales Artificiales	18
1.3.1 Remoción de $DBO_5$ .	18
1.3.2 Remoción de nitrógeno.	19
1.3.3 Remoción de fósforo	21
1.3.4 Remoción de patógenos	22
1.3.5 Remoción de sólidos suspendidos	22
1.4 Tipos de Humedales Artificiales	23
1.4.1 Humedales artificiales de flujo superficial o libre SWF.	23
1.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial SSF	24
1.4.2.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal HAFSSH	24
1.4.2.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical SSFV	25
1.5 Aplicación y Usos de los Humedales Artificiales	25
1.6 Principales Constituyentes de los Humedales Artificiales	26
1.6.1 Agua residual	26
1.6.2 Vegetación	26
1.6.3 Sustrato poroso	27
1.6.4 Microorganismos (Biopelícula)	27
1.7 Eficiencia de Remoción de Contaminantes de los Humedales Artificiales	27
1.7.1 Eficiencia de remoción de nitrógeno	29
1.7.2 Eficiencia de remoción de fósforo	31
1.7.3 Eficiencia de remoción de $DBO_5$	33
1.7.4 Eficiencia de remoción de DQO	34
1.7.5 Eficiencia de remoción de patógenos	35
1.7.6 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos	35
1.8 Importancia de la Vegetación para el Tratamiento de Aguas Residuales en Humedales Artificiales	36
1.8.1 La fitorremediación	37
1.8.1.1 Mecanismos y fases de la fitorremediación	38
<b>2. Aspectos Generales de la Zona de Estudio</b>	<b>39</b>
2.1 Ubicación de la Zona	39
2.2 Condiciones Socioeconómicas	40
2.3 Estado de Contaminación de Aguas Superficiales y Subterráneas en el Departamento de Nariño Colombia	43

<b>Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)</b>	
2.4 Estado Actual del Acceso al Sistema de Acueducto y Saneamiento Básico del Municipio de San Juan de Pasto	45
2.5 Cuenca del Rio Pasto	47
<b>3. Antecedentes Ambientales y Sanitarios del Corregimiento de San Fernando Frente a la Contaminación del Recurso Hídrico</b>	<b>48</b>
3.1 Antecedentes Ambientales y Sanitarios del Corregimiento de San Fernando frente a la Contaminación del Recurso Hídrico	48
<b>4. Objetivos</b>	<b>53</b>
4.1 Objetivo General	53
<i>4.1.1 Objetivos específicos.</i>	53
<b>5. Hipótesis</b>	<b>53</b>
<b>6. Materiales y Métodos</b>	<b>54</b>
6.1 Metodología de Trabajo	54
<i>6.1.1 Reconocimiento de la zona de estudio</i>	54
<i>6.1.2 Recopilación de información Secundaria</i>	54
<i>6.1.2.1 Recopilación de información local</i>	55
<i>6.1.3 Recopilación de información primaria</i>	55
<i>6.1.3.1 Caracterización del efluente de las cámaras sépticas</i>	56
<i>6.1.4 Diseños hidráulicos y estructurales del sistema de tratamiento de agua residual</i>	56
<i>6.1.5 Construcción e implementación del sistema de Humedales Artificiales</i>	60
<i>6.1.6 Puntos de muestreo del sistema construido</i>	60
<i>6.1.6.1 Parámetros a analizar</i>	61
<i>6.1.7 Evaluación de la eficiencia en remoción de contaminantes del sistema de Humedales Artificiales</i>	61
<i>6.1.8 Procedimiento toma de muestras</i>	61
<i>6.1.8.1 Aforo</i>	62
<i>6.1.8.2 Tiempo de muestreo</i>	62
<i>6.1.8.3 Toma de muestras</i>	62
<b>7. Resultados</b>	<b>65</b>
7.1 Caracterización del Agua en la Salida de las Cámaras Sépticas Existentes	65
7.2 Cálculo y Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (Hafssh) y Sistema de Tratamiento Complementario	66
<i>7.2.1 Parámetros de diseño</i>	66
<i>7.2.2 Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales</i>	67
7.3 Parámetros de Calidad de Agua Esperados al Implementar el Sistema Diseñado	76
<i>7.3.1 Remoción de carga del sistema de tratamiento propuesto</i>	76
7.4. Proceso de Construcción del Sistema de Tratamiento	79
<i>7.4.1 Actividades Preliminares</i>	79
7.5 Remoción Real de Carga Contaminante del Sistema de Tratamiento Implementado	85



## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

<b>8. Discusión</b>	<b>95</b>
8.1 Componentes ambientales y sanitarios del corregimiento de san Fernando frente a la contaminación del recurso hídrico	95
8.2 Caracterización de la calidad del agua en la salida de las cámaras sépticas	97
8.3 Diseño y Características del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (Hafssh) y Sistema de Tratamiento Complementario en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, Sede Camprestre Corregimiento de San Fernando	99
<i>8.3.1 Características del humedal HAFSSH construido en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, Sede Camprestre en el corregimiento de San Fernando</i>	102
<i>8.3.1.1 Tipo de vegetación utilizada en el humedal artificial HAFSSH en el sector del corregimiento de San Fernando</i>	103
<i>8.3.1.2 Tipo y tamaño del sustrato poroso utilizado en el humedal artificial HAFSSH del Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede camprestre</i>	104
<i>8.3.1.3 Flujo en medio poroso</i>	105
<i>8.3.1.4 Cultivos posteriores al sistema de tratamiento</i>	105
8.4 Parámetros De Calidad De Agua Obtenidos En El Efluente Del Sistema Construido	106
<i>8.4.1 Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub></i>	106
<i>8.4.2 Eficiencia de remoción de DQO</i>	108
<i>8.4.3 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos</i>	109
<i>8.4.4 Eficiencia de remoción de fosforo Total en el humedal artificial</i>	111
<i>8.4.5. Eficiencia de remoción de nitrógeno N Total en el humedal artificial</i>	113
<i>8.4.6 Eficiencia de remoción de grasas y aceites</i>	114
<i>8.4.7 Eficiencia en remoción de coliformes totales y Escherichia Coli</i>	115
8.5 Eficiencia Productiva De La Reutilización De Aguas Residuales Para Agricultura	117
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>120</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>122</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>129</b>

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### FIGURAS

Figura 1	Procesos y mecanismos de depuración del agua en un humedal artificial	18
Figura 2	Humedal artificial de flujo superficial (SWF)	23
Figura 3	Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH)	24
Figura 4	Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (SSFV)	25
Figura 5	Eficiencia en la remoción de contaminantes en un humedal artificial	28
Figura 6	Ubicación municipio de San Juan de Pasto, República de Colombia	40
Figura 7	Mapa Político Administrativo, municipio de San Juan de Pasto	41
Figura 8	Descole de aguas residuales domésticas, directamente sobre el cuerpo de agua receptor sin ningún tipo de tratamiento	42
Figura 9	Acceso a sistema de Acueducto Municipio de San Juan de Pasto	45
Figura 10	Acceso al Sistema Cloacal, Municipio de San Juan de Pasto, Colombia	46
Figura 11	Número de habitantes, Municipio de San Juan de Pasto, Colombia	46
Figura 12	Ubicación de la Cuenca Alta del Río Pasto	47
Figura 13	Cuenca Alta Río Pasto, municipio de San Juan de Pasto	49
Figura 14	Acequias que conducen aguas residuales a los cursos hídricos o a los cultivos para ser irrigados	50
Figura 15	Letrina seca, en pésimo estado y en condiciones infrahumanas	50
Figura 16	Batería sanitaria con condiciones adecuadas para su uso	51
Figura 17	Pozo séptico de infiltración, diseñado con fondo en tierra	52
Figura 18	Toma de muestras para análisis de laboratorio. Salida de la cámara séptica existentes en la zona de estudio	56
Figura 19	Toma de muestras de campo	61
Figura 20	Cámara Toma de Muestra (CTM) final a la salida del Humedal Artificial	62
Figura 21	Recipientes para toma de muestras	63
Figura 22	Toma de Muestra a la salida del Humedal Artificial	64
Figura 23	Instalaciones Colegio Comfamiliar Siglo XXI Sede Campestre	67
Figura 24	Descapote, excavación manual en material común y roca del tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente	79
Figura 25	Explanación y descapote a máquina para construcción del humedal artificial	80
Figura 26	Descapote, excavación a máquina en material común y roca del humedal artificial	80
Figura 27	Viga de amarre en concreto impermeabilizado 3000 PSI de 0,25 x 0,25 m en el tanque séptico	81
Figura 28	Sistema de drenaje de agua freática sobre el humedal artificial, previo a la estabilización de taludes y aplicación de solado	81
Figura 29	Aplicación de solado y estabilización de taludes con suelo – cemento	82
Figura 30	Mampostería y viga de corona Tanque séptico, filtro anaerobio	82
Figura 31	Losa de cubierta tanque séptico, filtro anaerobio y lecho de	

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

	secado de lodos	83
Figura 32	Construcción de zanja de anclaje de la geomembrana	83
Figura 33	Instalación de la geomembrana	84
Figura 34	Instalación de lecho filtrante (grava de río de 25 mm)	84
Figura 35	Humedal artificial concluido	85
Figura 36	Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el sistema séptico	86
Figura 37	Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en kg /día en el sistema séptico	87
Figura 38	Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	88
Figura 39	Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en kg/día en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	88
Figura 40	Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal	89
Figura 41	Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en kg/día en el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal	90
Figura 42	Eficiencia total acumulada de Remoción de contaminantes	91
Figura 43	Eficiencia de Remoción total de contaminantes en kg/d.	92
Figura 44	Eficiencia de Remoción de contaminantes microbiológicos en el sistema séptico NMP /100MI	93
Figura 45	Eficiencia de Remoción de contaminantes microbiológicos en el filtro anaerobio de flujo ascendente NMP /100mL.	93
Figura 46	Eficiencia de Remoción de contaminantes microbiológicos en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal NMP /100mL.	94
Figura 47	Eficiencia total acumulada de Remoción de contaminantes microbiológicos NMP /100mL.	94
Figura 48	Visita a laboratorios especializados en tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales	100
Figura 49	Vegetación utilizada en el humedal artificial (HAFSSH) en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, Sede Campestre en el corregimiento de San Fernando, Género Scirpus	103
Figura 50	Esquema de tratamiento y disposición final de las aguas residuales para sistema de riego	106

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### TABLAS

Tabla 1	Procesos de transformación del nitrógeno en humedales artificiales	20
Tabla 2	Eficiencia en la remoción de contaminantes en sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal HAFSSH y vertical SSFV	29
Tabla 3	Magnitud potencial de las transformaciones de nitrógeno en distintos tipos de humedales construidos	30
Tabla 4	Potencial de transformación de fósforo en varios tipos de humedales artificiales	32
Tabla 5	Eficiencia de remoción de fósforo total en diferentes tipos de humedales artificiales	33
Tabla 6	Modelos matemáticos para diseño de humedales artificiales, sus componentes y sistemas complementarios	57
Tabla 7	Resultados de laboratorio de aguas residuales efluente cámaras sépticas	65
Tabla 8	Parámetros de diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), Colegio Comfamiliar Siglo XXI Sede Campestre, Corregimiento San Fernando.	74
Tabla 9	Memorias de Cálculos hidráulicos, humedal subsuperficial horizontal (HSSFH), Corregimiento de San Fernando	75
Tabla 10	Cálculo de Cargas y Eficiencias de Remoción Esperadas en el Tanque Séptico con los valores teóricos adoptados	77
Tabla 11	Cálculo de Cargas y Eficiencias de Remoción Esperadas en el en el filtro anaerobio de flujo ascendente con los valores teóricos adoptados	77
Tabla 12	Cálculo de cargas y eficiencias de remoción esperadas en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal HASSFH adoptando porcentajes de estudios e investigaciones	77
Tabla 13	Calculo de eficiencias de moción total del sistema con los valores teóricos adoptados	78
Tabla 14	Porcentaje de remoción de contaminantes en el sistema Séptico	86
Tabla 15	Porcentaje de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	87
Tabla 16	Porcentaje de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal	89
Tabla 17	Eficiencias de remoción total acumulada de contaminantes fisicoquímicos del Sistema	91
Tabla 18	Porcentaje de Remoción de contaminantes microbiológicos en el sistema séptico.	92
Tabla 19	Porcentaje Remoción de contaminantes microbiológicos en el filtro anaerobio de flujo ascendente	93
Tabla 20	Porcentaje de Remoción de contaminantes microbiológicos en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	94
Tabla 21	Porcentaje de remoción total acumulado de contaminantes microbiológicos del Sistema	94
Tabla 22	Criterios máximos admisibles para destinación del recurso hídrico en	

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

	el uso agrícola, según la normatividad colombiana	98
Tabla 23	Normas Mínimas de remoción de contaminantes establecidas en el Decreto 1594 de 1984, para aguas residuales en Colombia	99
Tabla 24	Comparación en porcentaje de eficiencia de retención de contaminantes en diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales	101
Tabla 25	Comparación de retención de contaminantes en humedales con diferentes tipos de vegetación	104
Tabla 26	Valores de eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en el Humedal Artificial	106
Tabla 27	Valores de eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente	107
Tabla 28	Valores de eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en el sistema completo de tratamiento	107
Tabla 29	Valores de eficiencia de remoción de DQO en el humedal artificial	108
Tabla 30	Valores de eficiencia de remoción de DQO en el sistema completo de tratamiento	108
Tabla 31	Valores de eficiencia de remoción de DQO en el sistema séptico y el filtro anaerobio de flujo ascendente	109
Tabla 32	Valores de eficiencia de remoción de Sólidos suspendidos en el sistema séptico y el filtro anaerobio de flujo ascendente	110
Tabla 33	Valores de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en el humedal artificial	110
Tabla 34	Valores de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en el sistema completo de tratamiento	111
Tabla 35	Valores de eficiencia de remoción de fósforo total en el humedal artificial	111
Tabla 36	Valores de eficiencia de remoción de fósforo total en el sistema de tratamiento primario y en el filtro anaerobio de flujo ascendente	112
Tabla 37	Valores de eficiencia de remoción de fósforo total en el sistema de tratamiento completo	112
Tabla 38	Valores de eficiencia de remoción de nitrógeno total en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente	113
Tabla 39	Valores de eficiencia de remoción de nitrógeno total en el sistema de tratamiento completo	114
Tabla 40	Valores de eficiencia de remoción de grasas y aceites en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente	115
Tabla 41	Valores de eficiencia de remoción de grasas y aceites en el sistema de tratamiento completo	115
Tabla 42	Valores de eficiencia de eliminación de patógenos en el Humedal Artificial	116
Tabla 43	Valores de eficiencia de eliminación de patógenos en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente	116
Tabla 44	Valores de eficiencia de eliminación de patógenos en todo el sistema de tratamiento	117
Tabla 45	Comparación de rendimientos de cultivos regados con fuentes de agua superficial, subterránea y residual tratada en Tacna, Perú (Tn/Ha/año)	118

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)****ANEXOS**

Anexo A	Planos 1, 2 y 3	130
Anexo B	Reporte de resultados de laboratorio	133
Anexo C	Parámetros hidráulicos y de operación recomendados por las Normas RAS 2000, Título E	145
Anexo D	Clasificación ambiental de las infecciones relacionadas con las excretas y el agua	155
Anexo E	Resultados de calidad de agua de los sistemas sépticos existentes en el corregimiento de San Fernando	159

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

### **INTRODUCCION**

La contaminación del recurso hídrico, ocasionada por el mal manejo de las aguas residuales que son vertidas directamente a los cuerpos receptores sin ningún tipo de tratamiento ni alternativas de mitigación, y que a su vez son utilizados por muchas comunidades aguas abajo, es una realidad que afecta la salubridad y calidad de vida de la población (Mena P. y Ojeda C., 2009).

Los humedales artificiales utilizados para tratar efluentes residuales, son sistemas muy eficientes que buscan una recuperación del recurso hídrico a través de tecnología que ha sido utilizada en países desarrollados, para contrarrestar los problemas ambientales y de salud en población vulnerable como niños y ancianos, a causa del consumo o manipulación de agua de estas fuentes (Mena P. y Ojeda C., 2009).

Los humedales artificiales son un reservorio construido en un terreno con paredes y pisos impermeabilizados que contienen un sustrato (grava o arena) y una vegetación acuática adecuada que remueve los residuos o contaminantes que trae el efluente a tratar, por ejemplo, materia orgánica, nutrientes y patógenos, metales pesados entre otros contaminantes.

El tiempo de retención hidráulica del efluente en el sistema es variable, sin embargo, el humedal construido se mantiene saturado de agua permitiendo el crecimiento de la vegetación acuática. En este sistema, la remoción de nutrientes y contaminantes se efectúa a través de reacciones químicas, físicas y procesos biológicos, los mismos que se desarrollan tanto en las plantas acuáticas, como en la columna de agua y el sustrato (Polprasert, 1996).

Estos sistemas, son adecuados para el tratamiento de las aguas residuales en toda la cadena de su degradación, donde el sustrato y las plantas acuáticas funcionan como filtros biológicos removiendo sustancias tanto biodegradables como no biodegradables, nutrientes, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos asociados comúnmente a las aguas servidas domésticas y desechos agrícolas (Lord, 1982).

## **1. Antecedentes Bibliográficos**

### **1.1 Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales**

La depuración de aguas residuales a través de humedales artificiales, es una alternativa eficaz para tratar las altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, patógenos y nutrientes (nitrógeno y fósforo), los cuales están presentes en los efluentes domésticos y agrícolas. La importancia de estos sistemas de humedales artificiales está dada básicamente, en prevenir la eutrofización de los cuerpos de agua receptores del efluente tratado. La eutrofización de estos cuerpos de agua receptores, está relacionada al aumento de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que lleva a un rápido crecimiento de productores primarios como las algas (Steinmann, *et al.* 2003), provocando bajas concentraciones de oxígeno que afecta principalmente a otros organismos acuáticos.

También se evita que el agua subterránea potencialmente utilizada para consumo humano, sea contaminada por altas concentraciones de estos nutrientes.

Los humedales son zonas de transición entre los ambientes terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. Los procesos críticos que dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales son: la dinámica microbial y la hidrodinámica. Los procesos microbiales son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las aguas residuales en los humedales (Llagas *et al.*, 2006).

Los humedales son sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad se da gracias al mecanismo de los humedales artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales. Los humedales artificiales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, precipitación, absorción, adsorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera (Llagas *et al.*, 2006).

Los humedales artificiales operan a velocidades de flujo y caudal constante y están sujetos a cambios drásticos en la remoción de DBO<sub>5</sub>, debido a variaciones en la



## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

temperatura del agua, por esta razón, en zonas templadas estos sistemas de tratamiento tienden a variar su eficiencia durante el año. En zonas cálidas y tropicales, los parámetros climatológicos: temperatura, radiación solar y evapotranspiración varían en un rango menor que en zonas templadas, generando una eficiencia constante en el año (Llagas *et al*, 2006).

Los humedales naturales son capaces de depurar concentraciones elevadas de nutrientes con mucha efectividad. Por ejemplo, los pantanos de cipreses de la Florida, retienen el 98% del nitrógeno y el 97% del fósforo que entra en los humedales con las aguas residuales y se eliminan antes de que dichos efluentes lleguen a las aguas subterráneas (Ramsar, 2007).

Está comprobado que muchas variedades de plantas acuáticas presentes en los humedales, son capaces de eliminar sustancias tóxicas procedentes de plaguicidas, descargas industriales y actividades mineras. Estas plantas acuáticas pueden llegar a acumular metales pesados en sus tejidos en concentraciones 100.000 veces superiores a la del agua que las rodea y son capaces de descontaminar ciertas clases de efluentes (Ramsar, 2007).

### **1.2 Los Humedales Artificiales como Medio de Control de la Contaminación**

Tanto la entrada, como la salida del agua a los humedales artificiales, está sujeta a múltiples variaciones; la mayor cantidad de agua que se aporta a los humedales artificiales es de origen antropogénico, por ejemplo, aguas residuales de poblaciones cercanas provenientes de la agricultura o de la industria. Los aportes de agua, al llegar al humedal, disminuyen su velocidad, lo que ayuda a que las sustancias en suspensión sedimenten. A partir de aquí, el humedal cumple la función de filtro de numerosos contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos. Es decir, que la cantidad de sustancias que entra a este ecosistema es mayor que la cantidad que sale. (Johnston, 1991; Olmedilla, 2000).

Las sustancias, incluida la materia orgánica, que entran a formar parte de un humedal o de un ecosistema acuático, pueden tener cambios diferentes, ya sea en su composición química o función biológica. La acumulación de sustancias pueden

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

constituir otro tipo de ecosistema (Mintcho y Verguinia, 2000). Las sustancias eliminadas del agua por sedimentación, en teoría, se eliminan de forma reversible, ya que podrían volver a resuspenderse en el medio, gracias a las perturbaciones físicas y a la actividad biótica (Johnston, 1991).

La capacidad depuradora de los humedales se basa, a grandes rasgos, en dos mecanismos: la utilización de los nutrientes disueltos en el agua por los productores primarios (macrófitas y microorganismos) y la sedimentación de las partículas que lleva el agua, al atravesar lentamente amplias superficies (Olmedilla, 2000).

El nitrógeno y el fósforo, son nutrientes disueltos en el agua y son utilizados por los productores primarios (microalgas y macrófitas). Las elevadas concentraciones de estos nutrientes, disminuyen la calidad del agua y pueden producir florecimientos masivos de algas, disminución de la penetración de la luz y pérdida de oxígeno en disolución, provocando la eutrofización de los ecosistemas acuáticos (Olmedilla, 2000; Steinmann *et al.* 2003).

La retención de nitrógeno y fósforo por parte del humedal, es una forma de depurar el agua que sale del mismo. Sin embargo, se debe determinar mediante estudios locales, la capacidad de depuración de cada humedal. Esto permite saber, hasta qué cantidades de nitrógeno y fósforo podría asimilar, sin que estos lleguen a causar cambios biológicos drásticos e irreversibles (Olmedilla, 2000).

La capacidad de los humedales artificiales para absorber nutrientes es bastante significativa; a nivel de laboratorio, está comprobado que los sustratos en humedales son capaces de eliminar cantidades sustanciales de nitrógeno y fósforo (Dierberg y Brezonic, 1985; De Busk y Reddy, 1987; Olmedilla, 2000). La fijación de los nutrientes tanto en productores como en el sedimento, hace que el humedal funcione como un sumidero, ayudando a mejorar la calidad del agua que sale del humedal (Steinmann, *et al.* 2003).

El aporte atmosférico de nitrógeno (N) y fósforo (P) es de 0,5 g de N/ m<sup>2</sup> / año y 0,04 g P/m<sup>2</sup> / año. Los aportes provenientes de aguas residuales, suelen superar los 6,0 g N/ m<sup>2</sup> / año y 1,7 g P/m<sup>2</sup> / año. La cantidad de nitrógeno proveniente de la fijación

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

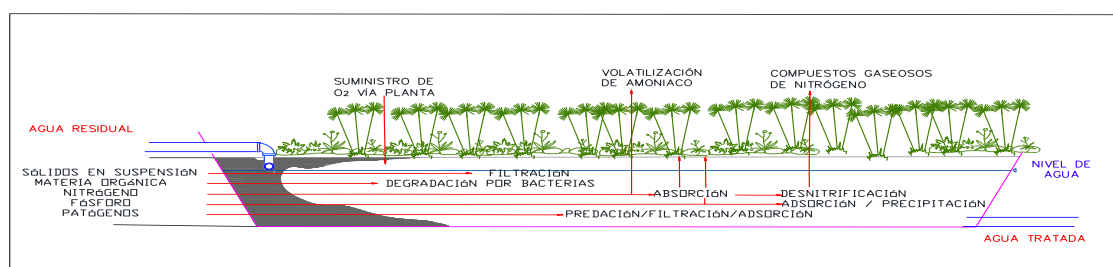
atmosférica, no es relevante comparada con los aportes de nitrógeno de origen antrópico (Olmedilla, 2000).

### 1.3 Mecanismo de Depuración de dos Humedales Artificiales

Los humedales artificiales, pueden tratar con efectividad niveles significativos de demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO<sub>5</sub>), sólidos suspendidos, nitrógeno, niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido al limitado contacto del agua residual y el suelo (Agreda, 1998; Lara, 1999).

Los procesos y mecanismos que intervienen en el tratamiento del efluente, por parte de un humedal artificial incluyen: sedimentación, filtración, adsorción, degradación microbiológica, así como, captación por parte de la vegetación acuática (Figura 1). Durante el paso del agua residual a través del medio poroso contenido por el humedal, se produce un contacto con zonas aerobias y anaerobias. La zona aerobia se encuentra cercana a la superficie, alrededor de las raíces y rizomas de las plantas y la anaerobia en el fondo del lecho. Los microorganismos que degradan la materia orgánica forman una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema (Mena *et al.* 2008).

**Figura 1.** Procesos y mecanismos de depuración del agua en un humedal artificial



Fuente. (Lara, 1999).

**1.3.1 Remoción de DBO<sub>5</sub>.** La demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), como se había mencionado antes, es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en el agua.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

La remoción de materia orgánica en los sistemas de humedales artificiales es sedimentada mucho más rápido, debido a que estos presentan un flujo laminar, permitiendo una conductividad hidráulica lenta. Esta materia orgánica es descompuesta en medios aerobios y anaerobios dependiendo del oxígeno disponible, la actividad biológica puede ser aerobia cerca de la superficie libre o la interfase agua aire, sin embargo, prevalece la actividad anaeróbica en el resto del sistema (Lara, 1999; Agreda, 1998).

Los resultados obtenidos en estudios, demuestran que mediante el uso de plantas acuáticas flotantes se pueden lograr buenas eficiencias en la remoción de los contaminantes más comunes de las aguas residuales domésticas, siendo el jacinto de agua una de las plantas más eficientes, lográndose remociones superiores al 70% en DBO<sub>5</sub>, con cargas orgánicas altas, con tan solo un día de tiempo de retención (Lara, 1999).

Los humedales artificiales tienen una alta eficiencia en remoción de DBO<sub>5</sub>, eliminándola rápidamente a la entrada del humedal, siendo suficiente un tiempo de retención máximo de dos días. Para el diseño de un humedal se debe tener en cuenta este aspecto en particular, al calcular los tamaños y la proporción largo – ancho (Lahora, 2000).

**1.3.2 Remoción de nitrógeno.** El nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico complejo con múltiples transformaciones bióticas y abióticas. Estas incluyen una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos de nitrógeno que son formas esenciales para todos los procesos biológicos. En fase acuosa, en este caso los humedales, las especies de nitrógeno mayoritarias son: el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). En fase gaseosa las especies de nitrógeno pueden existir como  $\text{N}_2$ , óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxido nítrico ( $\text{NO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}_4$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en medios aerobios (Vymazal, 2007).

Por lo general los procesos dentro de un humedal subsuperficial son anaerobios, limitando así los procesos de nitrificación, por la carencia de oxígeno. La desnitrificación también puede estar limitada por la falta de fuentes de carbono (Lahora, 2000).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Los principales procesos de transformación del nitrógeno en los humedales se presentan en la Tabla 1; dichos procesos son necesarios para que los ecosistemas presentes en estos humedales puedan contribuir al funcionamiento correcto de este y por lo tanto, un mejoramiento de la calidad del agua a tratar. La mayoría de los cambios químicos referidos en dicha tabla son controlados gracias a la producción de enzimas y catalizadores de los organismos vivos que ahí se benefician (Vymazal, 2007).

Los humedales son efectivos en la remoción de nitrógeno. Este puede ser asimilado por las plantas acuáticas que lo toman como nutriente, aunque la remoción de este tipo es mínima, de un 10 a un 15 % (Lara, 1999; Agreda, 1998), la mayor eficiencia de remoción está dado por acción de bacterias nitrosomonas y nitrobacter en medios aeróbicos (Mena P., 2006), a través del proceso de nitrificación, mediante el cual se realiza una eficiente remoción de amoníaco. La desnitrificación en cambio, puede darse en condiciones anaerobias. En conjunto estos procesos son fundamentales en la depuración del agua residual en un humedal (Lara, 1999).

**Tabla 1.** Procesos de transformación del nitrógeno en humedales artificiales

<b>PROCESO</b>	<b>TRANSFORMACION</b>
<b>Volatilización</b>	Amoníaco - N (acuoso) → amoníaco - N (gaseoso)
<b>Amonificación</b>	Orgánico - N → amoníaco - N
<b>Nitrificación</b>	Amoníaco - N → nitrito - N → nitrato - N
<b>Nitrato – amonificación</b>	nitrato - N → amoníaco - N
<b>Desnitrificación</b>	N - nitrato → nitrito -N → N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O (gaseoso)
<b>Fijación N<sub>2</sub></b>	N <sub>2</sub> (gaseoso) → amoníaco - N (N- orgánico)
<b>Absorción Planta / microbiana (asimilación)</b>	Amoníaco - N, nitrito - N , nitrato - N → N – orgánico
<b>Absorción de amoníaco</b>	-----
<b>N- orgánico fijado al suelo</b>	-----
<b>ANAMMOX (oxidación de amoníaco anaerobio)</b>	Amoníaco -N → N <sub>2</sub> (gaseoso)

**Fuente.** Vymazal, 2007

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**1.3.3 Remoción de fósforo.** La remoción de fósforo en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz, debido al limitado tiempo de retención hidráulica (TRH), por ende el contacto entre el agua residual y el terreno también. Existe un tipo de sistemas que utiliza arena en lugar de grava para aumentar el tiempo de retención del agua, pero este sistema requiere áreas mucho mas grandes para la conducción debido a que la arena posee una conductividad hidráulica muy baja (Lara, 1999).

La cantidad de fósforo en el afluente puede ser la misma que en el efluente de los humedales, en la mayoría de los casos; la cantidad de fósforo asimilada por la vegetación o fijada al sedimento es pequeña en relación a la aportada por agua residual, por tanto, los humedales no son un método muy efectivo para la eliminación de fósforo, excepto si se usan grandes áreas con grava rica en hierro, calcio y aluminio o tratamientos alternativos para la eliminación de fósforo (Gómez. *et al*, 2001).

Los procesos bioquímicos desarrollados en los humedales hacen que en este medio el fosforo se presente como fosfato orgánico e inorgánico. Se cree que el ortofosfato libre, es la única forma en que el fósforo puede ser absorbido y utilizado directamente por las algas y las macrófitas, por lo tanto, representa un enlace fundamental en el ciclo del fosforo en los humedales (Vymazal, 2007).

Los humedales proveen un ambiente propicio para la interconversión de todas las formas de fósforo. El cual en su forma soluble puede ser absorbido por las plantas y posteriormente convertido en tejido, o puede ser retenido por el suelo y los sedimentos del humedal (Vymazal, 2007).

La eliminación del fósforo por los mecanismos de retención varía dependiendo del diseño del humedal; dichos mecanismos consisten en la adsorción por sustratos, almacenamiento en la biomasa, transformaciones y acumulación en los sedimentos y el suelo (Kadlec y Knight, 1996). Sin embargo, estos sistemas son saturables, en el sentido que tienen una capacidad limitada y por lo tanto, no pueden contribuir a largo plazo, en la eliminación sostenible de fosforo (Dunne y Reddy, 2005; *Sensu* Vymazal, 2007).

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**1.3.4 Remoción de patógenos.** Los sistemas de humedales artificiales pueden presentar altos valores de remoción de coliformes con tiempos de retención hidráulica de tres a siete días, dependiendo de diferentes factores, sin embargo, en muchos casos no se cumplen las condiciones de retención adecuada debido a la presencia de lluvias que influyen negativamente en la eficiencia de remoción de coliformes fecales y totales por el aumento de caudal; para estos inconvenientes se puede utilizar sistemas alternativos para desinfección (Lara, 1999).

Los humedales con un sustrato de grava fina, poseen una retención promedio de coliformes fecales de:  $8 \cdot 10^4$  NMP/100 mL a 10 NMP/100 mL (Lara, 1999).

Los sistemas de remoción de patógenos no cuentan con un modelo hidrodinámico establecido, sino que se utiliza el mismo modelo de los sólidos suspendidos, por lo tanto cuando se diseña un sistema para remoción de una concentración de sólidos suspendidos, se puede esperar una remoción de patógenos comparable, si se mantienen las condiciones del diseño de flujo estables (Rodríguez. *et al*, 1998).

**1.3.5 Remoción de sólidos suspendidos.** Todos los cuerpos de aguas naturales poseen una acción de transporte de partículas, ya sea por arrastre, suspensión o dilución. Las partículas hasta de 200 micras permanecen en suspensión y aquellas menores de 0,01 micras se consideran como sólidos disueltos (Rodríguez. *et al*, 1998).

La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en los sistemas de humedales, además de ser rápida, se estima que gran parte de la retención ocurre entre el 12 y el 20% de la zona inicial del área total del humedal (Lara, 1999), o en los cinco primeros metros de distancia, consiguiendo valores de salida inferiores a 20 mg/l (Lahora, 2000).

En general, se alcanzan valores de remoción siempre mayores a los valores óptimos obtenidos en estudios a escala, independientemente de la concentración de entrada al sistema; siempre y cuando la velocidad de flujo no cambie de laminar a turbulento (Lara, 1999).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Los sólidos suspendidos suelen estar formados por materia orgánica, algas o microorganismos que pueden ser degradados hasta productos gaseosos, ocasionando que el tiempo de colmatación de un humedal sea extenso. Igualmente los sólidos suspendidos se encuentran formados por compuestos inorgánicos, tales como óxidos, arcillas, carbohidratos, entre otros. (Lahora, 2000).

### 1.4 Tipos de Humedales Artificiales

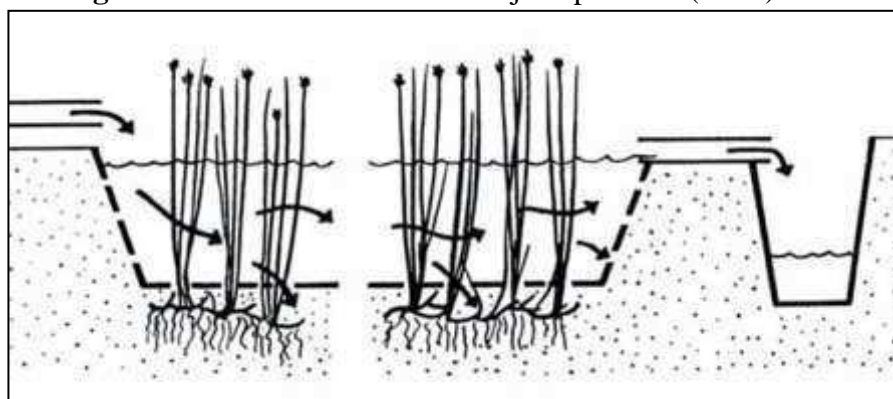
Los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales se clasifican según el régimen hídrico, o contacto de la columna del agua con la superficie, en dos tipos:

- a. Humedal artificial de flujo libre o superficial (SWF)
- b. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) o de flujo vertical (SSFV).

Además, pueden existir combinaciones entre estos para formar sistemas híbridos (Yalcuka y Ugurlu, 2009.)

**1.4.1 Humedales artificiales de flujo superficial o libre SWF.** En el sistema SWF el flujo de la corriente del agua residual, circula por encima del sustrato donde la vegetación emergente está arraigada, el fondo y sus paredes deben ser una superficie impermeable que contenga el lecho poroso donde se fija la vegetación. Los niveles de la columna de agua van desde 0,1 m a 0,6 m, además el efluente requiere un tratamiento primario o físico previo, antes de ingresar al sistema (Lara, 1999; Mena *et al*, 2008) (Figura 2).

**Figura 2.** Humedal artificial de flujo superficial (SWF)



Fuente. Brix H., 1994



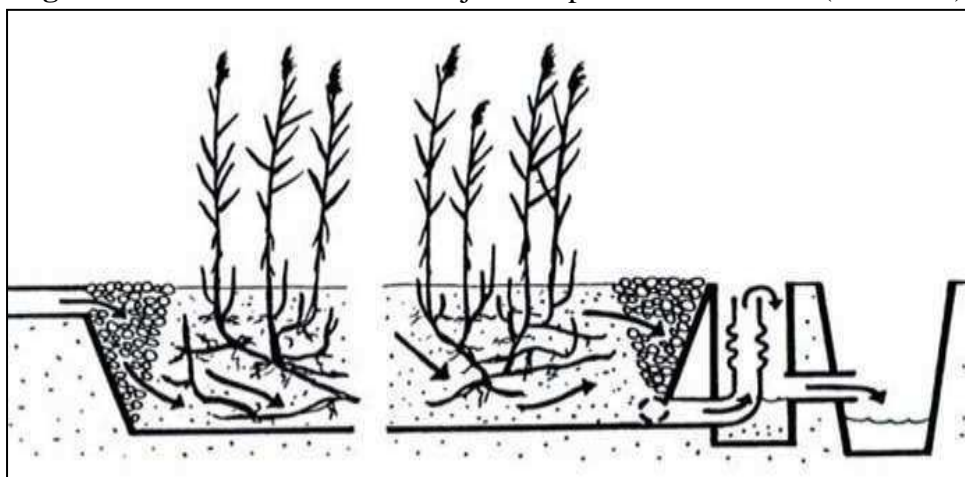
## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**1.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial SSF.** En el sistema (SSF) el flujo de la corriente del agua residual, está por debajo de la superficie del terreno circulando a través del medio poroso, la vegetación está arraigada sobre la superficie del sustrato del humedal, el fondo y las paredes como en sistema SWF, son una superficie impermeable.

Este sistema, al no tener una superficie libre o un espejo de agua en contacto directo con la atmosfera, posee algunas ventajas sobre el sistema SWF, donde se menciona que requiere una área menor que en los humedales de flujo superficial SWF, debido a que posee mayor volumen de sustrato poroso por ende, una mayor biopelícula y por lo tanto mayor eficiencia en remoción de contaminantes (Mena. *et al*, 2008). Por otra parte no produce malos olores y evita la proliferación de insectos y plagas, que puedan afectar por exposición a la población aledaña (Yalcuka y Aysenur, 2009; Mena. *et al*, 2008; Lara, 1999.)

**1.4.2.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal HAFSSH.** La Figura 3 indica el mecanismo de funcionamiento con un flujo continuo de agua que ingresa al sistema a lo largo de uno de los laterales. La salida del agua depurada debe ser de fondo y al lado opuesto al de la alimentación. En este sistema es de vital importancia que el lecho permanezca saturado de agua todo el tiempo.

**Figura 3.** Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH)



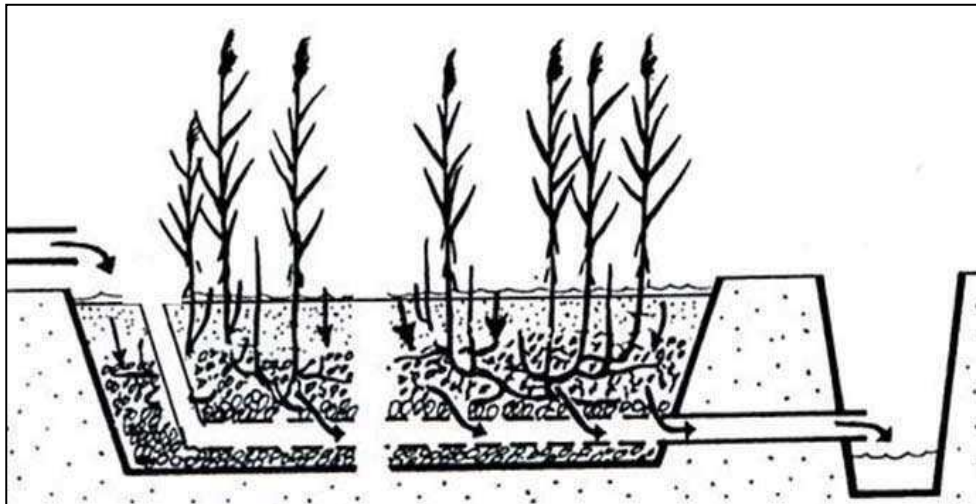
**Fuente.** Brix H., 1994

Este tipo de humedales se caracteriza por tener un tiempo de retención hidráulica (TRH) bastante amplio lo cual genera una eficiencia superiores a 80-90% en retención de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST (Yalcuka y Ugurlu, 2009).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

1.4.2.2 *Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical SSFV*. La entrada del agua residual, se realiza con una distribución intermitentemente por toda la superficie del humedal de flujo subsuperficial vertical (Figura 4), para que no baje la concentración de oxígeno y que prevalezca las condiciones aerobias, en cuanto a la salida se debe realizar a lo largo de todo el fondo (Yalcuka y Ugurlu, 2009). En este sistema el nivel del agua debe estar bajo para mantener las condiciones insaturadas en el medio poroso para conseguir un mayor contacto entre el agua residual y el aire dentro de los poros, por lo tanto, mejora los rendimientos (Mena. *et al*, 2008).

**Figura 4.** Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (SSFV)



Fuente. Brix H., 1994

### 1.5 Aplicación y Usos de los Humedales Artificiales

El uso de los humedales artificiales de flujo horizontal y vertical está aumentando en todo el mundo, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (Vymazal, 2002, 2005; Senzia *et al*, 2003; Liu *et al*, 2005). En los EE.UU. existe alrededor de 8000 instalaciones, mientras que en Alemania, la estimación es de aproximadamente 50.000. La mayoría de estos sistemas implementados son de flujo horizontal por sus numerosas ventajas respecto a los demás (Vymazal, 2005a).

Las características como los bajos costos de construcción y operación, la eficiencia en remoción de contaminantes y el bajo mantenimiento requerido, además de proporcionar un tratamiento secundario y/o terciario al efluente, hacen que los

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

humedales artificiales sean idóneos en sistemas rurales, sin redes cloacales y por tanto sin conexión a estaciones de tratamiento (Mena. *et al*, 2008). Sin embargo, el uso no es limitado, también son ideales en granjas industriales como las agroalimentarias que generen efluentes orgánicos y de elevada biodegradabilidad, así como también para la depuración de aguas ácidas de minas, aguas de industria agropecuaria o de lluvia (Mena. *et al*, 2008).

### **1.6 Principales Constituyentes de los Humedales Artificiales**

Un humedal artificial es una réplica de un humedal natural. Para que el funcionamiento de este sistema artificial sea óptimo es esencial simular y usar los componentes necesarios para albergar y generar todas las actividades biológicas que a su vez crean una sucesión ecológica para un buen rendimiento y eficiencia.

Los principales componentes funcionales de un humedal son los siguientes: el agua, las plantas emergentes y un sustrato compuesto con una porosidad efectiva significativa como la grava o la arena, que generen aptas condiciones para el desarrollo de comunidades de microorganismos y de invertebrados acuáticos, los cuales aparecen durante la incorporación de nutrientes a través del agua al humedal.

**1.6.1 Agua residual.** El agua es fundamental en toda la dinámica del humedal, en esta fase se realiza todas las reacciones fisicoquímicas y junto con los otros componentes sirve como medio de cultivo para la proliferación de organismos, que contribuyen a la depuración del agua residual.

**1.6.2 Vegetación.** Las plantas macrófitas en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales cumplen diferentes objetivos de importancia en su funcionamiento para la depuración de estas aguas y a su vez son un componente esencial en el diseño.

Las funciones más importantes de las macrófitas en relación a los procesos de tratamiento de aguas residuales son los efectos físicos de soporte al sustrato que brindan las raíces en relación a controlar la erosión al ayudar a la retención de sedimentos, ayudan a la filtración del agua y sirven como soporte para la proliferación de microorganismos, también absorben nutrientes como carbono, fósforo y nitrógeno

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

presentes en el agua residual como contaminantes, los cuales son esenciales para las funciones fisiológicas de las plantas (Pettecrew y Kalff, 1992), además retienen elementos traza y los bioacumulan en los tejidos de la planta (Dierberg y Brezonik, 1985; Vymazal, 1993).

Las plantas contribuyen a estabilizar el caudal e influyen reduciendo la conductividad hidráulica del terreno al disminuir la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación (Pettecrew y Kalff, 1992).

**1.6.3 Sustrato poroso.** Este medio actúa como una estructura de soporte de las plantas y como superficie para el crecimiento y desarrollo de la masa microbiana. Además actúa como un lecho filtrante de sedimentos facilitando los mecanismos de adsorción e intercambio iónico entre el agua residual y los componentes minerales del suelo y contribuyendo a la retención de contaminantes disueltos.

**1.6.4 Microorganismos (Biopelícula).** Muchas transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico en humedales son debidas al metabolismo microbiano y están directamente relacionadas con el crecimiento de los microorganismos. Éstos incluyen, principalmente, bacterias, hongos y protozoarios. Esta biomasa se encuentra formando una biopelícula alrededor de las partículas del lecho (Lara, 1999; Mena, *et al.* 2008).

Las condiciones ambientales y meteorológicas como temperatura, precipitación, entre otras; pueden afectar la actividad de los microorganismos en un humedal, además del ingreso de sustancias tóxicas, de uso agropecuario o industrial donde se debe tener mucha precaución para prevenir alteraciones en la dinámica de estas poblaciones, que afecten la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema.

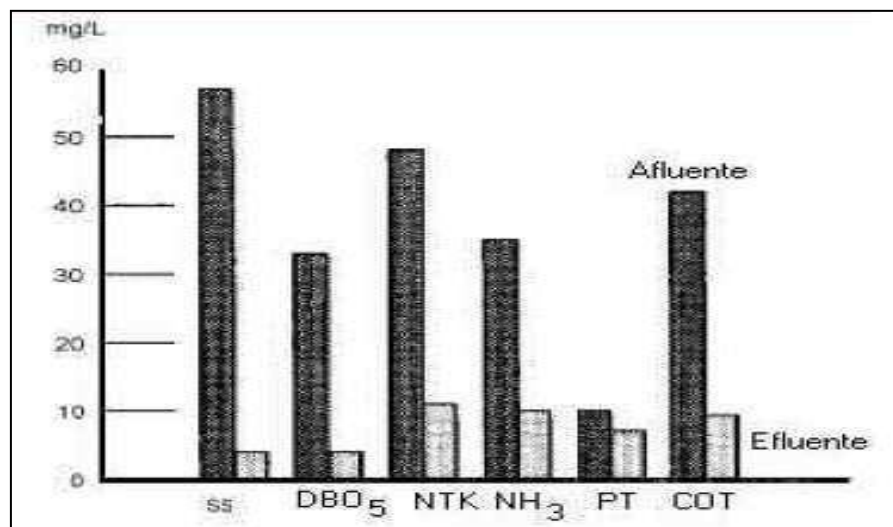
## **1.7 Eficiencia de Remoción de Contaminantes de los Humedales Artificiales**

Experiencias a escala piloto en Sydney – Australia, en sistemas de humedales artificiales con plantas emergentes, sembradas sobre sustratos arenosos, (Figura 5), demuestran la reducción significativa de los valores de contaminantes en la entrada de aguas residuales domésticas. La salida del agua del sistema de humedales artificiales,

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

registra valores significativamente menores en sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno tomada a 5 días ( $DBO_5$ ), nitrógeno total (NTK), amoníaco ( $NH_3$ ) y carbono orgánico total (COT), sin embargo, existe poca eficiencia en la remoción de fósforo total (PT), corroboradas bibliográficamente por otras experiencias (Lara, 1999).

**Figura 5.** Eficiencia en la remoción de contaminantes en un humedal artificial



**Fuente.** (Lara, 1999).

La tasa de eliminación de  $DBO_5$  oscila entre el 76,8 - 99,8%, para el COT los valores están entre 76,3 - 99,7%, así mismo para  $NH_3$  67 - 99,9% y SST de 80,0 a 99,0 % (Babatunde, *et al.* 2008), en cuanto retención de patógenos como coliformes fecales es de:  $8 \times 10^4$  NMP/100mL a 10NMP/100mL promedio (Lara, 1999).

El análisis bibliográfico de diferentes estudios y experiencias en depuración de aguas residuales con distintos tipos de humedales artificiales determina que la eficiencia en la eliminación de contaminantes fluctúa en función del diseño, tipo de humedal construido y condiciones climáticas (Jansson, *et a.* 1994; Leonardson, 1994; Tore, 2002), además del tipo de contaminante a remover o eliminar (Tabla 2).

Los compuestos a base de fósforo y nitrógeno no removidos, presentes en los efluentes de los humedales artificiales, pueden ser utilizados como aporte de nutrientes a través de sistemas de riego para cultivos agrícolas.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Tabla 2.** Eficiencia en la remoción de contaminantes en sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal HAFSSH y vertical SSFV

Parámetros	Eliminación HAFSSH (%)	Eliminación SSFV (%)
Nitrógeno Total	42,3 (a)	44,6 (a)
Fósforo Total	41,1 (a)	59,4 (a)
Sólidos Suspendedos Totales	77 (b)	61 (b)
DBO <sub>5</sub>	75 (b)	73 (b)
DQO	77 (b)	75 (b)

**Fuente.** a. Vymazal, 2007 b. Martín, *et al.* 2005.

**1.7.1 Eficiencia de remoción de nitrógeno.** No todos los procesos de transformaciones de nitrógeno en tratamientos de aguas residuales, en humedales artificiales, eliminan estos compuestos en una forma eficiente (Vymazal, 2007). La eficiencia de eliminación de contaminantes como el nitrógeno depende del tipo de humedal y su dinámica de interacción con los procesos biológicos anaeróbicos y aeróbicos, los cuales son difíciles de encontrar conjuntamente en el mismo sistema de humedal artificial.

Los humedales de flujo vertical SSFV remueven satisfactoriamente el amoníaco pero la desnitrificación es limitada. En cambio, los sistemas de flujo horizontal HAFSSH poseen condiciones propicias para la desnitrificación pero la remoción de amoníaco es limitada. Sin embargo, en todos los sistemas de humedales artificiales la captación de las plantas, la absorción de amoníaco, ANAMOX y la captación de nitrógeno orgánico en el sustrato, son muy bajos debido a cortos periodos de retención hidráulica (Vymazal, 2007) (Tabla 3).

**Tabla 3.** Magnitud potencial de las transformaciones de nitrógeno en distintos tipos de humedales construidos

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

	<b>FFP</b>	<b>SWF</b>	<b>HSSF</b>	<b>VSSF</b>
<b>Volatilización</b>	Bajo	Medio	Cero	Cero
<b>Amonificación</b>	Alto	Alto	Alto	Alto
<b>Nitrificación</b>	Bajo	Medio	Muy Bajo	Muy Alto
<b>Nitrato-amonificación</b>	-----	-----	-----	-----
<b>Desnitrificación</b>	Medio	Medio	Muy Alto	Muy Bajo
<b>N<sub>2</sub> fijación</b>	-----	-----	-----	-----
<b>Absorción microbiana</b>	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
<b>Absorción plantas</b>	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
<b>Absorción de amonio</b>	Cero	Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
<b>N Orgánico fijo en el suelo</b>	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Muy Bajo
<b>Lixiviación</b>	-----	-----	-----	-----
<b>ANAMOX</b>	-----	-----	-----	-----

**Fuente:** Vymazal, 2007.

Procesos como la amonificación o nitrificación, sólo transforman los compuestos a base de nitrógeno en otros compuestos diferentes, pero en realidad no eliminan el nitrógeno de las aguas residuales. Por ejemplo, el proceso de amonificación convierte el nitrógeno orgánico en amoníaco, aumentando la cantidad de este compuesto en el sistema (Vymazal, 2007).

La variación en los procesos de eliminación o transformación de contaminantes depende de la interacción del agua residual a tratar con los diferentes medios, sólido (suelo o sustrato) y gaseoso (atmósfera). Por ejemplo, los sistemas con plantas flotantes libres tipo (FFP) carecen de procesos en el suelo, mientras que los sistemas con macrofitas emergentes de flujo superficial SWF y subsuperficial SSF tienen procesos de interacción con el suelo, sin embargo, los sistemas SSF carecen de procesos aeróbicos debido a la falta de contacto del agua con la superficie libre o la atmosfera (Vymazal, 2007).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)



**1.7.2 Eficiencia de remoción de fósforo.** El fósforo (P) se encuentra en las aguas residuales en formas orgánicas e inorgánicas, principalmente como  $\text{H}_x\text{PO}_4^{-(3-x)}$ , cuyos principales derivados son el fosfato  $\text{PO}_4^{3-}$ , el fosfato monoácido  $\text{HPO}_4^{2-}$  y el ácido fosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  que componen el 80% del total de las formas en las que se encuentra el P en aguas residuales de tipo doméstico (Drizo, *et al.* 1997).

Las transformaciones del fósforo entre formas orgánicas e inorgánicas están estrechamente relacionadas, dado que el fósforo inorgánico es una fuente para los microorganismos y las plantas, y la forma orgánica al mineralizarse restituye la cantidad de fósforo inorgánico consumido (Luna y Ramírez, 2004).

Para la remoción o disminución de concentraciones de contaminantes presentes en este tipo de aguas residuales existe una variedad de sistemas de tratamiento, sin embargo, la mayoría de estos sistemas convencionales son eficientes para la remoción de compuestos de carbono, pero presentan deficiencias funcionales para la disminución de compuestos fosforados (Mazari, 2000). Existen tratamientos de tipo fisicoquímico capaces de remover fósforo con eficiencias mayores al 60% en aguas residuales de tipo doméstico, con una concentración promedio de 10 mg/L, medido como fósforo total (PT) en el afluente (Samutt, *et al.* 1994). En cuanto a los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal han demostrado ventajas en eficiencia y funcionamiento frente a otros sistemas variantes (Luna y Ramírez, 2004).

El mecanismo de remoción de fósforo en estos sistemas se efectúa principalmente por vía de precipitación y adsorción, pero su eficiencia depende del medio de soporte o sustrato mineral y del tipo de humedal artificial (Johansson, 1997) (Tabla 4).

Los humedales proveen un ambiente propicio para la conversión de todas las formas de fósforo. En estos sistemas el fósforo es absorbido por las plantas y es



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

convertido en tejido, también puede llegar a ser adsorbido por el sustrato o por los sedimentos (Vymazal, 2007).

**Tabla 4.** Potencial de transformación de fósforo en varios tipos de humedales artificiales

Tipo de humedal	FFP	SWF	HAFSSH	SSFV
<b>Acreción del suelo</b>	Muy Baja	Alta	Cero	Cero
<b>Adsorción</b>	Muy Baja	Baja	Alta (a)	Alta (a)
<b>Precipitación (b)</b>	Cero	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
<b>Absorción por plantas (c)</b>	Medio	Baja	Baja	Baja
<b>Absorción microbial</b>	Baja	Baja	Baja	Baja

**Fuente.** Vymazal, 2007.

- a. Con materiales de filtración especiales
- b. Con grava de río lavada o roca triturada
- c. Con cosecha de vegetación

Los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial con un tiempo de retención hidráulica significativamente largo pueden remover un máximo de 50% de fósforo total (PT) presente en el agua residual doméstica (Drizo, *et al.* 1997); del 50% de remoción de PT, del 6 al 15% es atribuible a la acción de las plantas emergentes (Brix H, 1997) y del 75 al 90% al sustrato, dependiendo del tipo (Drizo, *et al.* 1997). Comparado con el 95% de remoción de PT por el sedimento y las plantas presentes en humedales naturales (Vymazal, 2007), en cuanto a la remoción ocasionada por microorganismos es inferior al 5% (Davies y Cottingham, 1993).

Los materiales utilizados para los sistemas de flujo subsuperficial es decir, grava de río o roca triturada, por lo general tienen baja capacidad de proporcionar un medio adecuado para la adsorción y precipitación (Vymazal, 2007). No obstante, existen varios materiales con agregados de arcilla, que han sido evaluados en los humedales artificiales y han generado mayor remoción de fósforo obteniendo resultados satisfactorios. (Vohla, *et al.* 2005; Jenssen y Krogstad, 2003)

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

La eficiencia de retención de fósforo en sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales generalmente es mayor que en los humedales naturales, teniendo en cuenta que la carga de fósforo de los humedales naturales es inferior respecto al sistema de tratamiento donde ingresan afluentes con elevadas concentraciones de contaminantes y su eficiencia de retención varía dependiendo del tipo de humedal (Vymazal, 2007.; Richardson, 1985) (Tabla 5).

**Tabla 5.** Eficiencia de remoción de fósforo total en diferentes tipos de humedales artificiales

<b>Tipo de humedal</b>	<b>FFP</b>	<b>SWF</b>	<b>HAFSSH</b>	<b>SSFV</b>
<b>Eficiencia (%)</b>	42.1	48.8	41.1	59.5

**Fuente.** Vymazal, 2007

**1.7.3 Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub>.** La eficiencia en disminución de DBO<sub>5</sub> particulado, en sistemas de flujo subsuperficial se efectúa rápidamente por procesos de sedimentación y filtración en el medio poroso o sustrato; en sistemas de flujo superficial predominan los procesos de sedimentación y floculación.

En los humedales artificiales la remoción del DBO<sub>5</sub> soluble y suspendido se lleva a cabo por una serie de mecanismos físicos, químicos y biológicos. La DBO<sub>5</sub> que se encuentra en forma soluble, es removida mediante la degradación biológica realizada por microorganismos y detritos adheridos a la superficie del sustrato en los sistemas de flujo subsuperficial, generando una corteza denominada biopelícula (Rodríguez, 2003); en los sistemas de flujo libre o de flujo superficial la degradación biológica es realizada por los microorganismos que se encuentran en la columna de agua.

Los resultados obtenidos en estudios, demuestran que mediante el uso de plantas acuáticas flotantes se pueden lograr buenas eficiencias en la remoción de los contaminantes más comunes de las aguas residuales domésticas, con cargas orgánicas altas, siendo *Eichornia crassipes* la planta más eficiente, logrando remociones hasta del 70% en DBO<sub>5</sub>, con tan solo un día de tiempo de retención hidráulica (Lara, 1999),

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

aunque las variaciones estacionales pueden influir negativamente en la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> (Rodríguez, 2003). Sin embargo, en sistemas de flujo subsuperficial horizontal con plantas emergentes y tiempos de retención hidráulica de 1.5 días se han reportado eficiencias del 96% en sistemas maduros con tres años de funcionamiento (Lahora, 2000).

Las concentraciones de DBO<sub>5</sub> del efluente en sistemas de humedales artificiales pueden llegar a valores inferiores a 25 mg/L, sin embargo, no es posible encontrar concentraciones de DBO<sub>5</sub> por debajo de 7 – 10 mg/L, debido a que esta concentración parece proceder de residuos orgánicos del propio sistema y no del agua residual afluente (USEPA, 1993).

**1.7.4 Eficiencia de remoción de DQO.** En los sistemas de humedales artificiales la eficiencia de remoción de DQO tiene una dinámica parecida respecto a la eliminación de DBO<sub>5</sub>. En la revisión bibliográfica se encontraron valores de salida del sistema aproximados a 125 mg/L, exceptuando meses invernales (Lahora, 2000).

Los porcentajes de remoción de DQO en humedales artificiales oscilan entre 78 al 92% dependiendo de la carga contaminante del afluente, el tipo de humedal artificial y del tiempo de retención hidráulica. La eficiencia para eliminación de DQO en un sistema de flujo subsuperficial vertical es del 92%, como tratamiento terciario de aguas residuales domésticas y de procesos derivados de un beneficiadero de café (pileta donde se lava los granos de café cosechados) (Lahora, 2000). Juwarker, *et al.* (1995), reportó datos en eliminación de DQO con una eficiencia del 90 % en el mismo sistema como tratamiento terciario de efluentes de una población, sin embargo, existe información en eficiencias del 78% para el mismo sistema en tratamientos secundarios con tiempos de retención hidráulica cercanos a 1 día (Khateeb y Gohary 2003).

Con respecto a los sistemas de flujo subsuperficial horizontal se reportan eficiencias superiores al 90% de eliminación de DQO con tiempos de retención hidráulica de 1.5 días, siendo sistemas muy eficientes al controlar el flujo dinámicamente homogéneo y laminar desde la entrada del agua al sistema hasta la salida como efluente (Caselles, *et al.* 2006).

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**1.7.5 Eficiencia de remoción de patógenos.** En sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales domésticas, la eficiencia de remoción de patógenos, es del orden del 90%, en cuanto a eficiencia de los humedales artificiales con tiempos de retención hidráulica significativos se obtienen eficiencias hasta del 99.9%, en época de precipitaciones escasas (Seoánez, 1999).

En un sistema de flujo subsuperficial vertical se reportan eficiencias en remoción de organismos patógenos como *E. coli* y enterococos intestinales del orden de 98.6 al 99.7% (Martín, *et al.* 2005).

En sistemas de flujo subsuperficial horizontal se puede obtener una eliminación de patógenos con valores hasta del 99%, estos valores son significativos y de gran importancia para la implementación de estos sistemas como alternativa para mitigación de contaminantes biológicos presentes en aguas residuales domésticas (Rodríguez, 2003).

**1.7.6 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos.** La remoción de los sólidos suspendidos y sedimentables presentes en las aguas residuales se realiza fundamentalmente en las unidades de tratamiento primario, las cuales usualmente se instalan delante de los humedales. Los sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual después del tratamiento primario son removidos por sedimentación y filtración.

La remoción de los sólidos suspendidos es muy efectiva tanto en los humedales con flujo libre como con flujo subsuperficial. En el caso de los sistemas con flujo libre la remoción óptima de los sólidos suspendidos sólo se logra cuando hay una gran cantidad de plantas, las cuales facilitan la filtración y sedimentación. En los humedales con flujo subsuperficial los mecanismos de remoción se efectúan a través de filtración en el medio o sustrato, generando mayor eficiencia con respecto a los sistemas de flujo libre, por lo que la concentración de los sólidos suspendidos en el efluente es menor.

En humedales de flujo subsuperficial horizontal se pueden presentar eficiencias muy altas de eliminación de sólidos suspendidos dependiendo del sustrato y del tipo de vegetación presente en el sistema, como el caso de la *Typha dominguensis* y la *Typha*

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

*latifolia* en medios de soporte de grava fina donde se presentan valores de retención hasta de 94% (Giácoman, *et al.* 2008)

### **1.8 Importancia de la Vegetación para el Tratamiento de Aguas Residuales en Humedales Artificiales**

En el tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales de flujo subsuperficial la mayoría de reacciones bioquímicas se producen en las interfases sólido – líquido y en los de flujo libre en la interfase aire – líquido. La fase sólida o medio granular, es el medio de soporte que junto con las raíces de las plantas, albergan la biopelícula donde ocurre un conjunto de procesos abióticos (físicos/químicos) y bióticos (microbianos/fitológicos) que tienen lugar en un humedal artificial. Estos procesos provocan una reducción del número de microorganismos patógenos, constituyendo dicho humedal como un sistema eficiente para eliminar microorganismos perjudiciales para el ambiente y por lo tanto para la salud humana, además de mejorar la calidad sanitaria de los efluentes tratados (Vymazal, 2009).

En estos sistemas, empleados en todo el mundo como alternativa de tratamiento de aguas residuales, se utilizan diversidad de especies vegetales para su funcionamiento. Sin embargo, la vegetación en humedales en zonas extra tropicales crece y emerge durante la primavera y el verano, pero al llegar el otoño empieza a decaer y se va degradando durante el resto del año, ocasionando un aporte extra de materia orgánica al sistema, además de la recibida por el afluente (Álvarez y Becares, 1998); en zonas tropicales no se presenta esta situación debido a la carencia de estaciones y la presencia vegetación perenne que generan así resultados óptimos en la depuración de aguas residuales.

En los países tropicales como Colombia, con estabilidad de climas además de riqueza de la biodiversidad; se puede utilizar especies de plantas ornamentales no convencionales, con un valor comercial para la construcción de humedales artificiales. Estas plantas además de mejorar la infraestructura del sistema de tratamiento, pueden aportar beneficios económicos a la comunidad a través de la producción de flores.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**1.8.1 La fitorremediación.** Esta es una tecnología verde que utiliza plantas acuáticas para complementar el tratamiento y la depuración de aguas residuales tanto industriales como domésticas (Dushenkov, *et al.* 1994). Este es un sistema donde las plantas toman parte de los componentes del efluente residual, principalmente nitrógeno y fósforo para su crecimiento, de la misma manera, son capaces de retener y por lo tanto, disminuir las concentraciones de metales pesados, hidrocarburos, isotopo radioactivos entre otros tipos de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua (Vymazal y Kröpfelová, 2008).

Los humedales artificiales se presentan como una alternativa con respecto a otros sistemas de tratamiento, debido a que se aprovecha la capacidad filtrante de los rizomas de las plantas acuáticas y su relación con los microorganismos (Álvarez y Becares, 1998); siendo ampliamente demostrado que las plantas están involucradas en casi todas las funciones dentro de cada uno de los principales sistemas de tratamiento de los humedales (Vymazal y Kröpfelová, 2008).

En la revisión bibliográfica se encontró una cantidad significativa de estudios que confirman que el tratamiento de aguas residuales es más eficiente en sistemas con vegetación que en aquellos que carecen de esta, sin embargo, la mayoría de estudios se han realizado con plantas en estado juvenil o en periodo de crecimiento activo (Stottmeister, *et al.* 2003), debido a que en esta etapa las plantas absorben abundante cantidad de nutrientes, minerales y agua; como resultado se generan grandes cantidades de biomasa, por esta razón en humedales artificiales, la tasa de crecimiento y desarrollo tiende a ser mayor debido a que ingresan abundantes nutrientes presentes en el afluente (Vymazal, 1993).

Cuando la biomasa aumenta, el papel de esta en el tratamiento de aguas se optimiza; sin embargo, al comenzar la senescencia de esta vegetación puede producir numerosos problemas, perjudicando la eficiencia de retención de contaminantes debido a que la materia muerta producto de la biomasa se acumula sumándose como materia orgánica en descomposición al afluente. (Stottmeister, *et al.* 2003).

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Los problemas que pueden surgir como resultado de la presencia de abundante vegetación senil en el tratamiento de aguas residuales en humedales, son las bajas concentraciones de oxígeno disuelto (OD) generando valores inferiores a 1,0 mg/L (Kadlec y Knight, 1996; Stottmeister, *et al.* 2003), que puede restringir la nitrificación, así como disminuir la actividad microbiana y de los macroinvertebrados que pueden descomponer la materia orgánica (Vymazal, 1993).

*1.8.1.1 Mecanismos y fases de la fitorremediación.* Los mecanismos por el cual las plantas disminuyen la concentración de contaminantes presentes en el medio son los siguientes: fitoextracción, rizofiltración, fitoestimulación, fitoestabilización, fitovolatilización y fitodegradación.

La fitoextracción o fitoacumulación consiste en la absorción de los contaminantes presente en un medio a través de las raíces de las plantas. Estas tienen la capacidad para acumular contaminantes no solo en los tejidos que forman las raíces, sino también en aquellos que hacen parte del tallo o follaje. Este mecanismo ha sido ampliamente estudiado en plantas que acumulan metales pesados (Dushenkov, *et al.* 1994). y actualmente se está realizando estudios con materiales radioactivos (Dushenkov, 2003).

La rizofiltración se basa en la utilización de plantas cultivadas en medios hidropónicos; dichas plantas poseen características como: alta tasa de crecimiento y cobertura de área superficial. para absorber, concentrar y precipitar contaminantes (Leto, *et al.* 2013).

La fitoestimulación o rizodegradación. Estas plantas presentan zonas radiculares que estimulan el crecimiento de los microorganismos capaces de degradar compuestos orgánicos xenobióticos (Borin, *et al.* 2012).

La fitoestabilización es un mecanismo que utiliza a las plantas para desarrollar un sistema denso de raíces que permite reducir la biodisponibilidad y la movilidad de los contaminantes, evitando el transporte a capas subterráneas o a la atmósfera (Borin, *et al.* 2012, Zalem, Z., *et al.* 2013)

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

La fitodegradación consiste en la transformación de los contaminantes orgánicos en moléculas más simples, dichos contaminantes y los productos de su degradación pueden ser utilizados por la planta para su metabolismo y en otros casos los contaminantes pueden ser biotransformados. (Lara, 1999., Zalem, Z., *et al.* 2013).

La fitovolatilización se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con los contaminantes orgánicos solubles. Algunos de los contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse a la atmósfera (Borin, *et al.* 2012).

Una planta fitorremediadora realiza cualquiera de los mecanismos anteriores siguiendo tres fases: Absorción, excreción y desintoxicación de contaminantes.

- La absorción de contaminantes se realiza a través de las raíces y las hojas mediante los estomas y la cutícula de la epidermis (Xion J., *et al.* 2011). Esta absorción ocurre en la rizodermis de las raíces jóvenes, que absorben los compuestos por ósmosis dependiendo de factores externos como la temperatura y el pH del suelo. Otros factores importantes que inciden en la penetración del contaminante son su peso molecular e hidrofobicidad que determinan que estas moléculas atraviesen las membranas celulares de la planta. Después de cruzar la membrana, los contaminantes son distribuidos a través de toda la planta (Xion J., *et al.* 2011, Borin, *et al.* 2012).
- Los contaminantes que se absorben por las raíces, se eliminan vía hojas (fitovolatilización). Cuando las concentraciones de los contaminantes son elevadas, solo pequeñas fracciones (menos del 5 %) se excretan sin cambios en su estructura química (Harvey *et al.* 2002).
- La desintoxicación de los compuestos orgánicos se lleva a cabo por la vía de la mineralización hasta dióxido de carbono (Newman *et al.* 1999).

## **2. Aspectos Generales de la Zona de Estudio**

### **2.1 Ubicación de la Zona**

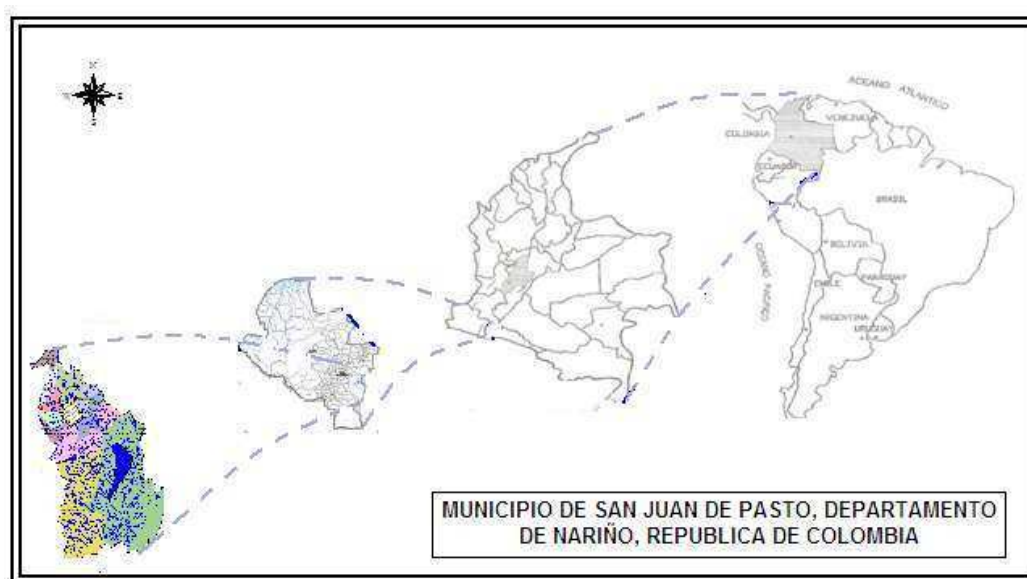
El municipio de San Juan de Pasto, capital del Departamento de Nariño, está localizado, sobre la Cordillera de los Andes en el macizo montañoso denominado Nudo de Los Pastos, al sur occidente de la República de Colombia (Figura 6). Sobre este



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

municipio de 1.112,17 Km<sup>2</sup>, se ubica la ciudad de San Juan de Pasto con un área de 24,16 Km<sup>2</sup> de superficie y 1.088,01 Km<sup>2</sup> de área rural. Este municipio cuenta con cuencas de gran importancia departamental como las Cuencas del Río Pasto, Río Bobo y Río Guamuéz, esta última hace parte del humedal La Cocha, catalogado como sitio RAMSAR N° 1047, Decreto 648 del 18 de Abril del 2000.(Mena P. y Ojeda C., 2009)

**Figura 6.** Ubicación municipio de San Juan de Pasto, República de Colombia



**Fuente:** Esta investigación.

### 2.2 Condiciones Socioeconómicas

San Juan de Pasto posee una población aproximada de 424.283 habitantes, que basan su economía principalmente en la actividad agropecuaria, debido a que aporta una tercera parte del producto departamental; en menor escala se desarrollan actividades como la ganadería, la industria, las artesanías, el comercio y el turismo (Viloria de la Hoz, 2007). Sin embargo, en este municipio se observa un bajo desarrollo socioeconómico ocasionado por la falta de oportunidades laborales y educativas, además de carencia de servicios adecuados de salud y saneamiento básico.

Los bajos niveles de industria y comercio de este municipio y del Departamento de Nariño, en comparación con otros departamentos de Colombia, han generado falta de oportunidades laborales para esta población ocasionando la búsqueda de sustento en

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

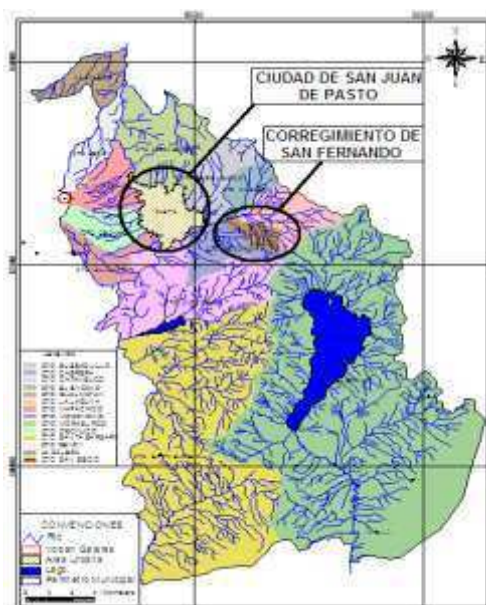
otras actividades no formales que generan inestabilidad económica a largo plazo y que han sido la causa del desplazamiento y en sí, de la pobreza (Viloria de la Hoz, 2007). Esta problemática se ve reflejada en mayor magnitud en el área rural del departamento, al observar la carencia de servicios básicos para estas comunidades, que por falta de recursos económicos de los municipios no se han podido mitigar sus efectos.

El municipio de San Juan de Pasto está dividido político administrativamente en 15 corregimientos; entre los cuales esta San Fernando, (Figura 7), como área u objeto de estudio; este corregimiento se encuentra ubicado al oriente a ocho (8) Km del casco urbano de este municipio, en la vía que conduce a la ciudad de Mocoa, Departamento del Putumayo.

La población de estos corregimientos se caracteriza por ser campesinos que basan principalmente su economía en la producción agropecuaria, artesanal, turística y ecológica; y en un menor grado la industria a pequeña escala.

Entre la problemática que se encuentra en este corregimiento se puede destacar que por ser un área rural con grandes extensiones de terreno disponibles especialmente como granjas o casas rurales, no es viable la construcción de sistemas de alcantarillado con plantas de tratamiento adecuadas por el alto costo de inversión para su construcción.

**Figura 7.** Mapa Político Administrativo, municipio de San Juan de Pasto



**Fuente:** POT Municipio de Pasto

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

A pesar del amplio conocimiento de los efectos de la contaminación sobre la salud humana y el medioambiente, por problemáticas sociales producto de las severas condiciones económicas imperantes, la disposición final de las aguas residuales domésticas o de desechos agropecuarios, se realiza sin ningún tipo de tratamiento en las fuentes receptoras (Figura 8). Por ello, se hace necesaria la búsqueda de técnicas de bajo costo de inversión y bajo consumo energético que solucionen de forma óptima este problema.

**Figura 8.** Descole de aguas residuales domésticas, directamente sobre el cuerpo de agua receptor sin ningún tipo de tratamiento



**Fuente:** Esta investigación

El corregimiento sobre la zona de estudio, por su cercanía al casco urbano y por tener vías de acceso en excelentes condiciones, se está convirtiendo en polo de desarrollo y urbanización, lo que implica que muchas de las firmas constructoras estén llevando a cabo proyectos de construcción de vivienda, lo que implica que se desarrolle infraestructura adecuada para la prestación de servicios públicos, según el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Pasto, sin embargo, hay un incremento en la construcción de casas campestres, además de proyectos turísticos e infraestructura de educación como colegios e instituciones campestres los cuales se están localizando de forma difusa sobre esta zona, lo que ha agudizado el problema de contaminación de las fuentes hídricas, a pesar de que estos proyectos han implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales, estos son poco eficientes lo que no garantizan remociones adecuadas de contaminantes.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

### **2.3 Estado de Contaminación de Aguas Superficiales y Subterráneas en el Departamento de Nariño Colombia**

El recurso hídrico en el Departamento de Nariño, República de Colombia, se considera abundante, sin embargo, el uso del agua para actividades como el consumo humano, riego de cultivos o las necesidades agropecuarias e industriales están haciendo que su disponibilidad sea cada vez más limitada. El agua dulce es un recurso sobre el cual se ejerce una amplia demanda, alcanzando sólo en consumo humano un total de 272.888 m<sup>3</sup> al día (PGA Departamento de Nariño, 2004; PGAR Departamento de Nariño, 2012).

Muchas de las cuencas Nariñenses se encuentran sobre explotadas, bien por el aprovechamiento excesivo de terrenos para las actividades agropecuarias, o directamente con la intensa extracción de los recursos naturales renovables y no renovables sin contemplar un mínimo principio de sostenibilidad del patrimonio natural del Departamento.

El deterioro de los cuerpos de agua lo constituye principalmente la incorporación de sustancias contaminantes de origen orgánico e inorgánico generadas fundamentalmente por las actividades antrópicas que soportan la estructura económica de la región. En el Departamento de Nariño se desarrollan fundamentalmente las actividades agrícolas y ganaderas con un marginal desarrollo de la industria, sin embargo, el centro de la degradación ambiental está dado por la contaminación de las fuentes de agua debido al vertimiento inadecuado de los residuos municipales; en términos generales se puede afirmar que el 80% de la carga contaminante que afecta la red hídrica del Departamento proviene del inadecuado manejo y disposición final de las aguas servidas y residuos sólidos municipales (PGA Departamento de Nariño, 2004; PGAR Departamento de Nariño, 2012).

En vista a lo anteriormente expuesto, las aguas superficiales, subterráneas y sus ecosistemas asociados son los que se ven gradualmente deteriorados por la constante incorporación de sustancias contaminantes, afectadas en su estado natural mediante su aporte que han sido arrastrados por la red fluvial y directamente por el vertido de residuos líquidos y sólidos industriales entre otros, igualmente es altamente significativo

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

el aporte de aguas servidas desde los núcleos poblacionales asentados, además de los nuevos proyectos de vivienda e infraestructura que se están desarrollando en la zona.

La escasez y contaminación del recurso hídrico genera graves consecuencias sanitarias en la población, en consecuencia la aparición de focos patológicos y por lo tanto epidémicos en distintos núcleos poblacionales, siendo más frecuentes en zonas rurales, que carecen de sistemas cloacales, en los que se consume aguas sin previo tratamiento o que son contaminadas con efluentes domésticos, agropecuarios e industriales. Esta situación incrementa el problema de deterioro ambiental y por lo tanto un progresivo problema de salud pública.

Si se observa el estado actual de la infraestructura de servicios en el Departamento, la situación no es muy alentadora. Se estima que el 69% de las viviendas en el Departamento de Nariño poseen conexión a un sistema de acueducto. Sin embargo, al comparar la zona rural con la urbana, se observa una situación crítica en la zona rural, donde tan sólo el 52% tiene sistema de abastecimiento de agua, con respecto al 91% de cobertura en la zona urbana. (PGA Departamento de Nariño, 2004; PGAR Departamento de Nariño, 2012).

Con relación a la disposición final de aguas servidas, el 54,63% del Departamento posee conexión con sistemas cloacales o algún sistema de eliminación de residuos, comparando el área urbana con la rural se observa que presentan un 84% y un 32% respectivamente de cobertura de dichos sistemas (PGA Departamento de Nariño, 2004; PGAR Departamento de Nariño, 2012).

De los 64 municipios del Departamento de Nariño, actualmente ninguno ha implementado sistemas de tratamiento de aguas servidas, con los cuales se mitigue la contaminación de los cuerpos de agua y se dé cumplimiento a las normas de vertimiento contempladas en el Decreto 1594/84 de la legislación Colombiana.

Considerando la población de los 64 municipios de Nariño, con el vertimiento incontrolado de las aguas residuales domésticas, se estima un aporte anual de carga contaminante del orden de 23.905 toneladas expresadas en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y de 35.857 toneladas expresadas en Sólidos

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

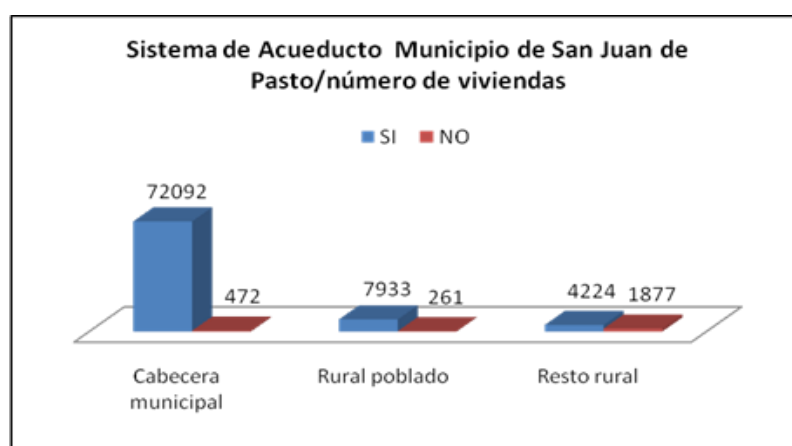
Suspendidos (SS). Si sólo se aborda el sector urbano, las cabeceras municipales aportan anualmente 11.035 toneladas de DBO<sub>5</sub> y 16.552 toneladas de Sólidos Suspendidos (PGA Departamento de Nariño, 2004; PGAR Departamento de Nariño, 2012).

### 2.4 Estado Actual del Acceso al Sistema de Acueducto y Saneamiento Básico del Municipio de San Juan de Pasto

El municipio de San Juan de Pasto por su condición político administrativa al ser la capital del Departamento de Nariño, posee las mejores condiciones de calidad de vida y acceso a servicios públicos, sin embargo a pesar de estas condiciones, la zona rural continúa teniendo dificultades para el acceso de agua potable y la situación más crítica es la carencia de sistemas cloacales que han afectado la salubridad y las condiciones ambientales de esta zona.

En el censo del año 2005 se analizó el estado actual del acceso al servicio de acueducto en la cabecera municipal donde se observa que la mayor cobertura está en esta zona con un 98.8% y un 1.2% sin cobertura, la situación es similar en la zona rural poblada con un 96.81% con acceso al sistema y un 3.19% sin acceso. El estado actual no es alentador en la zona rural donde se estima que el 69.2% de las viviendas de este municipio poseen conexión a un sistema de acueducto. Sin embargo, el 30.7% no tienen acceso al sistema, siendo obligados a conseguir este recurso por otros medios y sin tratamientos adecuados, aumentando así el riesgo a contraer enfermedades y generar epidemias (Figura 9) (DANE Colombia, 2005).

**Figura 9.** Acceso a sistema de Acueducto Municipio de San Juan de Pasto

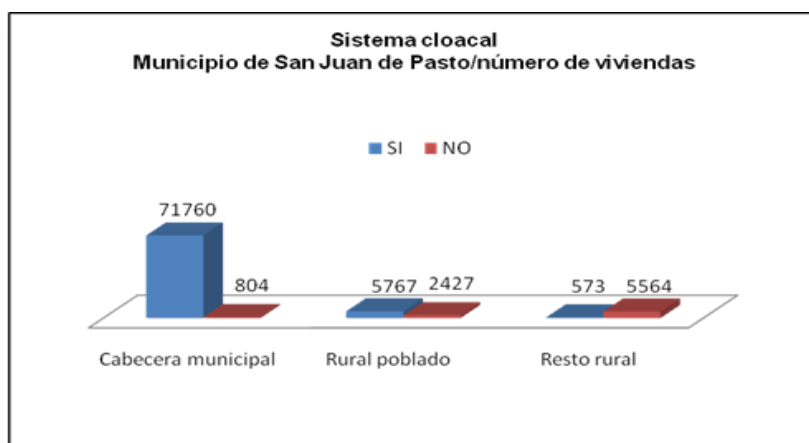


**Fuente.** DANE Colombia, 2005

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

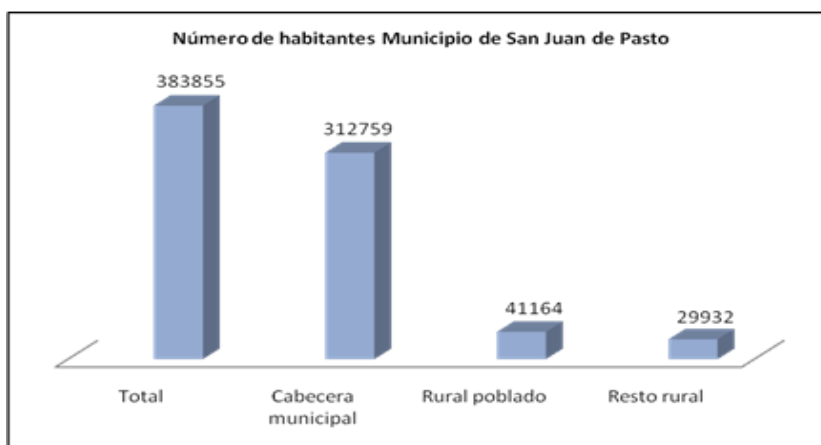
Con relación a la disposición final de aguas servidas, en el casco urbano el 98.8% tiene acceso a un sistema cloacal, mientras que el 1.1% no lo posee, al compararse con el área rural poblada se observa que la problemática se agudiza debido a que únicamente el 70.3% de esta zona cuenta con un servicio adecuado y el 29.7% no tiene acceso al sistema. Sin embargo, la problemática en la zona rural es preocupante porque tan sólo el 8.7% de la población tiene acceso a un sistema cloacal y el 91.3% no tiene acceso a este sistema (Figura 10) (DANE Colombia, 2005), por lo tanto el estado de los cuerpos de agua es crítico perjudicando considerablemente las condiciones ambientales de esta región y por ende, incrementa la vulnerabilidad y el riesgo patológico causado por las malas condiciones sanitarias de los 29.932 habitantes del área rural del Municipio de San Juan de Pasto (Figura 11).

**Figura 10.** Acceso al Sistema Cloacal, Municipio de San Juan de Pasto, Colombia



**Fuente.** DANE Colombia, 2005

**Figura 11.** Número de habitantes, Municipio de San Juan de Pasto, Colombia



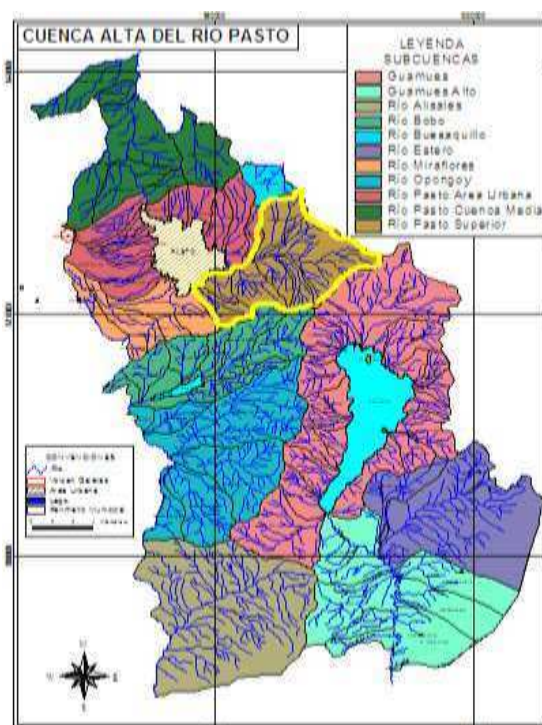
**Fuente.** DANE Colombia, 2005

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### 2.5 Cuenca del Río Pasto

La cuenca del río Pasto tiene 49.044 hectáreas y cuenta con 14 quebradas (Figura 12), parte de ellas son captadas para el acueducto que abastece de agua potable a la ciudad de San Juan de Pasto y otra parte es tomada para acueductos y distritos de riego en zonas rurales. En la estación hidrológica de la Universidad de Nariño, el aforo de caudal es de 2.92 m<sup>3</sup>/seg, con oscilaciones que van de 9.69 a 1.23 en los últimos 11 años (Corponariño, 2006).

**Figura 12.** Ubicación de la Cuenca Alta del Río Pasto



**Fuente.** POT Municipio de Pasto

Un estudio de un tributario de la cuenca alta demuestra que sólo el 31% de esta se encuentra cubierta de bosques en el ecosistema protector. El caudal se aproxima a los 400 litros/seg., con grandes oscilaciones, pues del bajo caudal fácilmente pasa al desbordamiento e inundaciones. A la escasez de agua se agrega el problema de calidad, ya que en su trayecto el río sufre múltiples impactos por talas, quemas, uso de biocidas, basuras, vertimientos domésticos, sobrepastoreo, etc. que afectan drásticamente la calidad del agua (Jiménez, *et al.* 1999). Este problema se incrementa drásticamente en la



## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

cuenca media y baja del río Pasto, cuyo grado de contaminación aumenta debido a la presencia de sectores industriales y asentamientos urbanos.

Los corregimientos de la zona de estudio por la ubicación corresponden a la cuenca alta del Río Pasto

### **3. Antecedentes Ambientales y Sanitarios del Corregimiento de San Fernando Frente a la Contaminación del Recurso Hídrico**

#### **3.1 Antecedentes Ambientales y Sanitarios del Corregimiento de San Fernando frente a la Contaminación del Recurso Hídrico**

En el año de 1996, un equipo de investigación de la Universidad San Buenaventura de Cali y la Universidad Mariana de Pasto, desarrollaron para el corregimiento de San Fernando un proyecto de tratamiento de aguas residuales domésticas, encaminado al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad y del ambiente, mediante la reducción de la contaminación causada por estos efluentes.

El proyecto constaba de una etapa inicial de acercamiento a la comunidad de San Fernando, para la cual se utilizó como metodología, la observación participativa. Con esta metodología se pudo detectar que la falta de educación y capacitación de las comunidades campesinas, en este caso del corregimiento de San Fernando, influyen en el desarrollo personal y comunitario, en el sentido que predisponen a la comunidad a una situación de atraso socioeconómico, cultural, ambiental y político. Sin embargo, el equipo de investigación pudo detectar que los habitantes de este corregimiento eran conscientes de dicha problemática. (Mena y Obando, 1996)

En una etapa posterior, con la metodología aplicada en el proyecto, se determinó que la problemática principal de esta región es a nivel ambiental, afectando específicamente el recurso hídrico y por lo tanto la sustentabilidad de la Cuenca Alta del Río Pasto, donde se encuentra localizado la zona de estudio de San Fernando (Figura 13), la cual es de gran importancia porque provee de agua potable a la ciudad de San Juan de Pasto. (Mena y Obando, 1996).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

El problema ambiental relacionado con esta Cuenca, que actualmente persiste, es causado por la carencia de redes y sistemas cloacales en la zona rural, donde los habitantes se ven obligados a construir acequias que llevan las aguas residuales domésticas directamente a los cursos hídricos o a los cultivos para ser irrigados, sin tener en cuenta el problema sanitario que esto representa (Figura 14.)

**Figura 13.** Cuenca Alta Río Pasto, municipio de San Juan de Pasto



**Fuente:** Esta investigación

Anteriormente esta carencia de sistema cloacales, llevó a la construcción de letrinas secas, (Figura 15) donde los habitantes hacían sus necesidades fisiológicas; estas letrinas, al poco tiempo de uso, ya se encontraban en pésimo estado y en condiciones infrahumanas. Sin embargo, el Gobierno Municipal y la Entidad Ambiental Regional, no se preocuparon por mejorar la prestación del servicio de saneamiento básico, lo que hubiera mejorado la calidad de vida y las condiciones ambientales de esta comunidad (Mena y Obando, 1996).

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**Figura 14.** Acequias que conducen aguas residuales a los cursos hídricos o a los cultivos para ser irrigados



**Fuente.** Esta investigación.

**Figura 15.** Letrina seca, en pésimo estado y en condiciones infrahumanas



**Fuente:** Esta investigación

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Con el proyecto se planteó la construcción de un sistema de tratamiento primario, que constaba de una batería sanitaria con condiciones adecuadas para su uso (Figura 16), y una cámara séptica con sistemas de paneles o pantallas para retención de sedimentos, paredes en mampostería recubiertas por mortero. Inicialmente este sistema estaba diseñado con el fondo en tierra, generando una infiltración hacia el suelo donde terminaba el proceso de tratamiento de forma incompleta (Figura 17); actualmente la comunidad ha impermeabilizado el fondo con el propósito de coleccionar agua que posteriormente es destinada para riego, sin que el agua cumpla con las condiciones óptimas de calidad para este uso.

**Figura 16.** Batería sanitaria con condiciones adecuadas para su uso

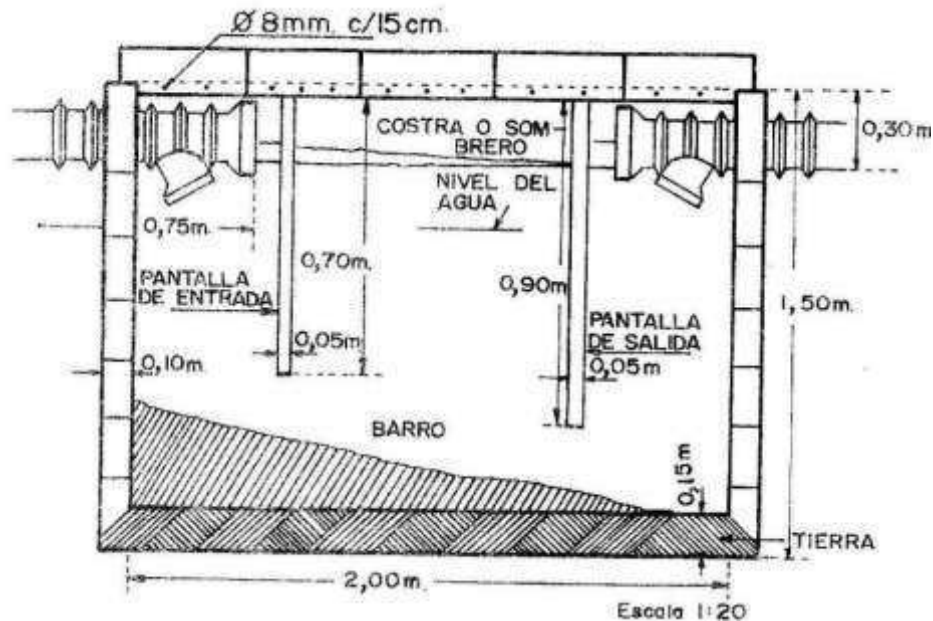


A través del proyecto se consiguió la participación gubernamental y comunitaria dándole viabilidad y solidez a los objetivos propuestos. El apoyo gubernamental fue aprobado, gracias a la organización de la comunidad, el cual permitió financiar todos los materiales que esta infraestructura demandaba. Por parte del equipo de investigación y

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

de la comunidad, se obtuvo la asesoría calificada y la mano de obra, para la construcción de la infraestructura (Mena y Obando, 1996).

**Figura 17.** Pozo séptico de infiltración, diseñado con fondo en tierra



**Fuente.** Mena y Obando, 1996

Este sistema actualmente sigue siendo aplicado ya que ha generado óptimos resultados que se reflejan en mejores condiciones de vida de los habitantes de esta zona, sin embargo, por su funcionamiento y aumento demográfico ha surgido una nueva problemática debido a que este sistema aporta aguas a la capa freática, que en la zona de estudio está aproximadamente a 3 m de profundidad, sin un tratamiento completo, generando una contaminación difusa, que de seguir así incrementará la contaminación del recurso hídrico subterráneo.

Sumado a esto, la comunidad se ha visto obligada a recolectar el agua a la salida de las cámaras sépticas, donde esta es transportada a través de acequias, implementando sistemas de riego inadecuados, como medida de compensación ante la pérdida de sus cultivos en la época seca. Sin embargo, la calidad de dicha agua es de pésimo estado ocasionando problemas sanitarios por presencia de patógenos, además de no ser apta para riego de cultivos, los cuales son comercializados posteriormente en la ciudad de San Juan de Pasto y consumidos por los mismos productores.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

### **4. Objetivos**

#### **4.1 Objetivo General**

Evaluar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales Artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede Campestre Corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia.

**4.1.1 *Objetivos específicos.*** Recopilar información ambiental y sanitaria de la zona de estudio, realizar la descripción y el diagnóstico de la infraestructura existente para tratamiento de aguas residuales.

Realizar el diseño hidráulico y constructivo del sistema de tratamiento de aguas residuales para el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede Campestre, a través de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), un filtro anaeróbico de flujo ascendente, una cámara séptica y una trampa de grasas, que se adapte a las condiciones locales y necesidades de la institución educativa.

Construir y poner en funcionamiento el sistema de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones del Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede Campestre, de acuerdo al diseño calculado teóricamente

Evaluar la eficiencia de tratamiento calculada teóricamente, respecto a la obtenida de los análisis del efluente de cada componente del sistema de tratamiento a través de pruebas realizadas en un laboratorio certificado.

### **5. Hipótesis**

El sistema de humedales artificiales podría ser una alternativa eficaz para tratar las aguas residuales domésticas en el corregimiento de San Fernando, Municipio de San Juan de Pasto, Colombia.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

### **6. Materiales y Métodos**

Para realizar la evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales con Humedales Artificiales en el sector de San Fernando, Municipio de San Juan de Pasto, se llevó a cabo las siguientes actividades:

- a. Recolección de información.
- b. Diseño y construcción del sistema de tratamiento adecuado a la zona de estudio y a las necesidades de la institución educativa.
- c. Medición de parámetros de calidad del agua a través de monitoreo.
- d. Análisis de los datos obtenidos y estimación de la eficiencia de remoción de contaminantes en las unidades que componen el sistema de tratamiento.

La financiación de las actividades llevadas a cabo para la construcción del sistema de tratamiento y la realización de los muestreos, tales como obtención de información secundaria y ensayos de laboratorio fue soportada por La Caja de Compensación Familiar de Nariño, (COMFAMILIAR) como propietaria del Colegio Comfamiliar Siglo XXI sede campestre, donde se llevó a cabo todo el proceso de investigación. Cada una de las actividades mencionadas y los productos esperados se describen a continuación:

#### **6.1 Metodología de Trabajo**

**6.1.1 Reconocimiento de la zona de estudio.** Para el desarrollo de esta etapa se llevaron a cabo recorridos de campo sobre el Corregimiento de San Fernando, con la finalidad de determinar las características físicas de la zona, además de identificar diversos focos de contaminación ocasionados por la inadecuada disposición de aguas residuales, con el propósito de iniciar la elaboración de la metodología considerando las áreas de trabajo previamente identificadas.

**6.1.2 Recopilación de información Secundaria.** Se hizo una extensa revisión bibliográfica obtenida a través de Internet en la base de información científica: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) y de la base de ACS\_Journals (American Chemical Society)

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

www.pubs.acs.org, además del servicio de biblioteca del Centro Argentino de Información Científica y Tecnológica (CAICYT) o por pedido directo a sus autores; la cual se utilizó como base de referencia para la elaboración del diseño y la implementación del sistema de humedales artificiales para el tratamiento aplicado a la zona, el cual está adaptado a las condiciones climáticas de la localidad, generando resultados óptimos en beneficio social y medioambiental.

*6.1.2.1 Recopilación de información local.* Esta información se obtuvo a través de entes nacionales y locales como la Corporación Autónoma Regional de Nariño CORPONARIÑO, que es la autoridad ambiental competente; el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM, donde se adquirieron los datos climatológicos pertinentes (Anexo 1); También el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, en el que encontró la información sobre necesidades básicas insatisfechas del Municipio de San Juan de Pasto en referencia a saneamiento básico rural y urbano.

En el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Municipio de Pasto se observaron las zonas de expansión urbana y rural, asimismo los proyectos contemplados para equipamientos, servicios públicos y características socioeconómicas de la zona, además se tuvo en cuenta el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Rio Pasto (POMCA, 2005).

*6.1.3 Recopilación de información primaria.* La información primaria se obtuvo a través de los análisis de calidad del agua de la salida de las cámaras sépticas en los sistemas existentes, identificados previamente en los recorridos de campo sobre la zona (Figura 18). Dichos resultados se compararon con la información obtenida en experiencias locales y en diferentes regiones, esta información se recopiló para identificar los parámetros operativos apropiados para tratar la carga contaminante del afluente, y como base de datos para realizar el diseño a través de cálculos hidráulicos y parámetros de funcionamiento del sistema de humedales artificiales.

**Figura 18.** Toma de muestras para análisis de laboratorio. Salida de la cámara séptica existentes en la zona de estudio



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)



*6.1.3.1 Caracterización del efluente de las cámaras sépticas.* Con base a los resultados obtenidos se realizó un análisis y comparación de los resultados del efluente de las cámaras sépticas presentes en la zona de estudio con los estándares establecidos en el Decreto 1594 de 1984, Artículo 72, de la Legislación de Colombia, donde se especifica las normas de tratamiento y remoción mínima de contaminantes en sistemas existentes y en los que se implementarán para vertimientos domésticos, antes de ser volcados en un cuerpo receptor y así realizar los cálculos hidráulicos que cumplan con la normativa Colombiana.

### *6.1.4 Diseños hidráulicos y estructurales del sistema de tratamiento de agua residual.*

Para efectuar los cálculos hidráulicos se usaron los modelos matemáticos recomendados por Lara (1999), Mena, *et al.* (2005) y el Documento Técnico Normativo del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia (RAS – 2000) (Tabla 6). Para el diseño estructural del sistema se tuvo en cuenta la utilización de materiales presentes y

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

accesibles en la zona, los resultados esperados de eficiencia en remoción de contaminantes, las características estructurales, funcionales y componentes como tipos de sustrato y vegetación, obtenidos en experiencias similares, además de la información primaria obtenida en campo.

**Tabla 6.** Modelos matemáticos para diseño de humedales artificiales, sus componentes y sistemas complementarios

CAUDAL DE DISEÑO	
Modelo Matemático	Componentes del modelo
$Q_{ar} = \frac{0.8 \times poblac \times dotacion}{1000}$	<p><math>Q_{ar}</math> Caudal Agua residual  <i>Población.</i> Número de personas a atender  <i>Dotación.</i> Caudal diario por persona</p>
$Q_{ar}$	Caudal de agua residual de diseño

TEMPERATURA DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL	
Modelo Matemático	Componentes del modelo
$K_t = k_{20}(1.06)^{(t-20)}$	<p><math>K_{20}</math> Constante de Temperatura a 20°C  <math>t</math> Temperatura media del agua</p>
$K_t$	Constante de temperatura

AREA SUPERFICIE REQUERIDA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL	
Modelo Matemático	Componentes del modelo
$A_s = \frac{Q(\ln Co - \ln Ce)}{Kt(y)(n)}$	<p><math>Q</math> Caudal  <math>Co</math> Concentración contaminante afluente  <math>Ce</math> Concentración contaminante efluente  <math>Kt</math> Conductividad hidráulica  <math>y</math> Profundidad humedal  <math>n</math> Porosidad efectiva</p>
$A_s$	Área superficial humedal artificial HAFSSH

TIEMPO DE RETENCION HIDRAULICA DEL AGUA EN EL HUMEDAL	
Modelo Matemático	Componentes del modelo
$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$	<p><math>A_s</math> Área superficial  <math>y</math> Profundidad humedal  <math>n</math> Porosidad efectiva  <math>Q</math> Caudal</p>
$TRH$	Tiempo de retención hidráulica

Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

<b>TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$U = \frac{1}{\frac{y1}{k1} + \frac{y2}{k2} + \frac{y3}{k3}}$	<b>y (1-n)</b> Conductividad hidráulica de las capas 1 a n <b>k (1-n)</b> Espesor de las capas 1 a n
<b>U</b>	Coficiente termodinámico a la superficie del lecho del humedal
$T_c = \frac{(U)(\sigma)(t)}{(Cp)(\delta)(y)(n)}(T_o - T_a)$	<b>U</b> Coficiente termodinámico <b>δ</b> Densidad del agua <b>σ</b> Factor de conversión 86400 s/día <b>t</b> Tiempo de residencia hidráulica <b>Cp</b> Calor específico del agua <b>y</b> Profundidad humedal <b>n</b> Porosidad efectiva <b>To</b> T °C agua afluyente <b>Ta</b> T °C promedio atmosfera
<b>T<sub>c</sub></b>	Cambio de temperatura en el humedal
$T_e = T_o - T_c$	<b>To</b> T °C agua afluyente <b>Tc</b> Cambio de temperatura en el humedal
<b>T<sub>e</sub></b>	Temperatura en el efluente
$T_w = \frac{T_o + T_e}{2}$	<b>To</b> T °C agua afluyente <b>Te</b> T °C agua efluente
<b>T<sub>w</sub></b>	Temperatura promedio del agua en el reactor
<b>HUMEDAL RELACION ANCHO (W): LARGO (L)</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$b = \sqrt{\frac{As}{3}}$	<b>As</b> Area Superficial
<b>B</b>	Ancho Humedal
$L = b \times 3$	<b>b</b> ancho
<b>L</b>	Largo Humedal

<b>ESTIMACION DE REMOCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN EL HUMEDAL</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$CH = \left( \frac{Q}{As} \right) 10$	<b>Q</b> Caudal <b>As</b> Área superficial
<b>CH</b>	Carga hidráulica
$C_e = (C_o)(0.1058 + 0.0014(ch))$	<b>Co</b> Concentración SST afluyente <b>CH</b> Carga hidráulica
<b>C<sub>e</sub></b>	Concentración de sólidos suspendidos en el efluente

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

<b>VOLUMEN TOTAL DE LA TRAMPA DE GRASAS</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$V_{tgrasas} = Q \times Tr \times 60$	Vt Volumen total Q caudal aguas grises Tr Tiempo de retención hidráulico
Vt	Volumen total

<b>AREA SUPERFICIAL DE LA TRAMPA DE GRASAS</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$As = Fd \times Qar$	As Área superficial Fd Factor de diseño $0.25 \text{ m}^2/\text{lbs}$ Qar Caudal aguas grises
As	Area superficial

<b>VOLUMEN UTIL SISTEMA SEPTICO</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$Vu = 1000 + Nc(CT + KLF)$	Vu Volumen útil Nc Número de contribuyentes C Dotación de agua residual por contribuyente T Periodo de retención por tasa de contribución diaria K Tasa de acumulación de lodo digerido en días F Factor
Vu	Volumen útil

<b>VOLUMEN UTIL FILTRO ANAEROBICO DE FLUJO ASCENDENTE</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Componentes del modelo</b>
$Vu = TRH \times Qd$	Vu Volumen útil TRH Tiempo de retención hidráulico Qd Caudal diario
Vu	Volumen útil

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

VOLUMEN TOTAL FILTRO ANAEROBICO DE FLUJO ASCENDENTE	
Modelo Matemático	Componentes del modelo
$VT = \frac{Vu}{0.6(P)}$	VT Volumen total P Porosidad medio filtrante
VT	Volumen total

**6.1.5 Construcción e implementación del sistema de Humedales Artificiales.** En el proceso de identificación de los principales focos de contaminación por aguas residuales sobre la zona, se observó que se está desarrollando un proyecto de construcción del Colegio Comfamiliar Siglo XXI sede campestre, de propiedad de la Caja de Compensación Familiar de Nariño (COMFAMILIAR), el cual podría ser uno de los focos de contaminación más significativo por su magnitud, al tener una capacidad de albergar a 700 personas, además la mencionada empresa en todas sus construcciones contempla los lineamientos ambientales que cumplan con la legislación y su compromiso ambiental, sin embargo, Comfamiliar observo en el sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales una alternativa sostenible y amigable con el ambiente, por lo cual adopto y aprobó el proyecto de construcción y evaluación del sistema propuesto, con el propósito de implementar un sistema modelo en la zona.

La etapa de construcción de la obra civil tuvo una duración de 4 meses y la fase de maduración natural del sistema tuvo una duración de 5 meses desde la puesta en funcionamiento del Colegio.

**6.1.6 Puntos de muestreo del sistema construido.** La toma de muestras de campo se realizó de manera puntual en los siguientes puntos de muestreo (Figura 19).

Afluente al Sistema primario de sedimentación (sistema séptico), filtro anaeróbico de flujo ascendente y Humedal artificial.

Efluente al Sistema primario de sedimentación (sistema séptico), filtro anaeróbico de flujo ascendente y Humedal artificial.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 19.** Toma de muestras



*6.1.6.1 Parámetros a analizar.* De acuerdo con la función y características de cada una de las estructuras que componen el sistema de tratamiento y siguiendo las recomendaciones del RAS 2000 los parámetros seleccionados a evaluar fueron:

- Temperatura, pH (in-situ).
- Sólidos SST, DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrógeno total, fósforo total, coliformes totales y fecales.

*6.1.7 Evaluación de la eficiencia en remoción de contaminantes del sistema de Humedales Artificiales.* La etapa de evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes se desarrolló una vez construido el sistema y de puesta en marcha del mismo. Para el análisis de los resultados se realizó los análisis físico-químicos y microbiológicos del agua residual tanto del afluente como el efluente de cada componente del sistema, en Laboratorio del Valle, certificados por el ICONTEC.

*6.1.8 Procedimiento toma de muestras.* Una vez establecidos los puntos de muestreo se realizó el aforo de caudal y la recolección de las muestras, siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

*6.1.8.1 Aforo.* Se procedió a realizar la medición del caudal a través de aforo volumétrico, en el punto efluente del sistema del humedal artificial (Figura 20), el balde aforado se colocó bajo el vertimiento, simultáneamente se activó el cronómetro y se midió el tiempo transcurrido hasta que se tomó un volumen de muestra determinado. El caudal se determinó mediante la relación entre el volumen de la muestra y el tiempo empleado en obtener dicho volumen.

**Figura 20.** Cámara Toma de Muestra (CTM) final a la salida del Humedal Artificial



**Fuente:** Esta investigación.

*6.1.8.2 Tiempo de muestreo.* La hora establecida para la toma de muestras fue seleccionada teniendo en cuenta los tiempos de mayor aporte al sistema de tratamiento. Las muestras fueron tomadas en un periodo comprendido entre las 10:00 am y la 11:00 am, horario de salida al descanso de los estudiantes.

*6.1.8.3 Toma de muestras.* Los laboratorios del Valle, suministró para la toma y traslado de las muestras una nevera, frascos adecuados para la preservación y las correspondientes cadenas de custodia.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Para la toma de muestras se utilizaron varios recipientes, el primero de plástico de 1 litro para análisis de  $\text{DBO}_5$ , 1 litro para sólidos, un recipiente de 500 mL para análisis de DQO, un recipiente para análisis nitrógeno y fosforo total y un frasco de vidrio previamente esterilizado para análisis microbiológico (Figura 21 y 22).

**Figura 21.** Recipientes para toma de muestras



**Fuente:** Esta investigación.

Las muestras ya tomadas, se procedieron inicialmente a codificarlas colocándole la fecha y el código de la muestra correspondiente. Luego los frascos con las muestras fueron ubicados dentro de la nevera contenida con gel congelado. Culminada la toma de muestras se realizó el registro en las cadenas de custodia para cada muestra donde se señaló la fecha, hora, temperatura, datos de aforo y otros datos que pudieran influir en las determinaciones analíticas.



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 22.** Toma de Muestra a la salida del Humedal Artificial



Adicional a la toma de muestras se realizó una valoración visual del estado del humedal de manera cualitativa, verificando la aparición de especies vegetales invasoras, así como la presencia de olores y mosquitos. La valoración de las plántulas se basó en la revisión de aspectos como densidad, color y tamaño.

Los análisis fueron realizados siguiendo los criterios de muestreo y conservación de acuerdo con los protocolos establecidos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater y los procedimientos de los laboratorios del Valle.

## 7. Resultados

### 7.1 Caracterización del Agua en la Salida de las Cámaras Sépticas Existentes

En la Tabla 7., se observa los resultados fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual doméstica, estos datos fueron obtenidos a la salida del sistema de cámaras sépticas existentes en la zona, las cuales cumplen un tratamiento anaeróbico primario, además de sedimentar los lodos y retener sustancias flotantes, grasas y aceites.

**Tabla 7.** Resultados de laboratorio de aguas residuales efluente cámaras sépticas

<b>REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO</b>		
<b>Tipo de muestra</b>	Agua Residual	
<b>Sitio de Toma</b>	Corregimiento de San Fernando Municipio de San Juan de Pasto	
<b>Tipo de análisis</b>	Físico-Químico y Microbiológico	
<b>Toma de muestra</b>	Efluente Cámaras Sépticas	
<b>PARAMETRO</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA</b>	<b>RESULTADO</b>
<b>pH</b>	UPC	7,21
<b>SOLIDOS TOTALES</b>	mg/L	221
<b>SOLIDOS DISUELTOS</b>	mg/L	139
<b>SOLIDOS SUSPENDIDOS</b>	mg/L	82
<b>SOLIDOS SEDIMENTABLES</b>	mg/L	0,4
<b>FOSFORO TOTAL</b>	mg P-PO <sub>4</sub> /L	0,37
<b>NITROGENO TOTAL</b>	mg N/L	35,8
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg O <sub>2</sub> /L	125
<b>DQO</b>	mg O <sub>2</sub> /L	125
<b>COLIFORMES TOTALES</b>	UFC 100 mL	120000
<b>COLIFORMES FECALES</b>	UFC 100 mL	100000

Estos datos del efluente de las cámaras sépticas, las normas y estándares mínimos de remoción de contaminantes, Artículo 72 del Decreto 1594 de 1984, de la legislación Colombiana, sirvieron de base y punto de partida para realizar el análisis de los parámetros de operación del sistema propuesto, dando cumplimiento a la normativa ambiental.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Con base en la información recolectada y con el aval del Colegio Siglo XXI de propiedad de la Caja de Compensación Familiar de Nariño COMFAMILIAR DE NARIÑO, los cálculos se hicieron en base a la implementación de un sistema completo de tratamiento de aguas residuales que se componen de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, un filtro anaeróbico de flujo ascendente, una cámara séptica y una trampa de grasa para el sector del Restaurante, para un total de 700 personas entre estudiantes, profesores y personal administrativo, cuyo caudal de diseño es de 0.11 Lt/s. El caudal de diseño se estimó con la norma RAS 2000, título E.

Debe tenerse en cuenta que el sistema propuesto posee flexibilidad para adaptarse a diferentes usos y número de viviendas o de habitantes equivalentes, o cuando se cambian las condiciones de cantidad y calidad de descarga del afluente. Para adaptarse a estos cambios, sólo se debe seguir la metodología que se plantea a continuación.

### **7.2 Cálculo y Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (Hafssh) y Sistema de Tratamiento Complementario**

#### **7.2.1 Parámetros de diseño**

**Horario y frecuencia de generación de vertimientos:** El Colegio COMFAMILIAR Siglo XXI Sede Campestre, realiza sus actividades de lunes a viernes en un horario comprendido entre las 7 hasta las 14 horas.

**Descripción general del proyecto:** El Colegio COMFAMILIAR Siglo XXI Sede Campestre (figura 23) es una Institución Educativa campestre la cual cuenta dentro de sus instalaciones con salones, laboratorios, escenarios deportivos y culturales, para la prestación de los servicios de educación básica primaria y bachillerato, atendiendo a una población aproximada de 700 personas entre estudiantes, profesores y del personal administrativo.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 23.** Instalaciones Colegio Comfamiliar Siglo XXI Sede Campestre



**Fuente:** Esta investigación.

La generación de aguas residuales domésticas en la mencionada institución educativa principalmente se producen por el funcionamiento de las baterías sanitarias, las cuales cuentan con sanitarios, lavamanos además de orinales para los hombres. Por otra parte, también se generan aguas residuales domésticas en el área de restaurante puesto que se cuenta con la instalación de lavavajillas, en el cual se vierten todas las aguas residuales de los procesos de preparación de alimentos.

**Disponibilidad de servicios públicos:** El Colegio cuenta con suministro de agua potable por parte del acueducto rural de la zona, sin embargo, el sector no cuenta con la prestación de servicio de alcantarillado por estar localizado en zona rural, por lo que los habitantes se ven obligados a volcar las aguas residuales domésticas directamente sobre los cuerpos receptores o infiltradas en el terreno; también cuenta con suministro de energía por parte de la empresa CEDENAR de Nariño, por otra parte el manejo y retiro de residuos sólidos es realizado por la empresa metropolitana de aseo EMAS de la ciudad de San Juan de Pasto.

### *7.2.2 Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales*

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

CAUDAL DE DISEÑO		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$Q_{ar} = \frac{0,8 \times poblac \times dotacion}{1000}$	$Q_{ar} = \frac{0,8 \times 700 \times 50 L/Habdia}{1000}$	28 m <sup>3</sup> /dia
<b><i>Q<sub>ar</sub> promedio</i></b>	28 m <sup>3</sup> /día*      1,11 LPS	

\* Día comprendido únicamente en el horario de trabajo de 7 a 14 hrs

**Caudal de Diseño:** En base a muestreos realizados en otras instituciones educativas se determinó que la tercera parte del caudal total corresponde a las aguas grises provenientes del restaurante por lo tanto:

$$Q_{ar} \text{ (aguas negras)} = 0,77 \text{ LPS} = 0,00077 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{ar} \text{ (aguas grises)} = 0,33 \text{ LPS} = 0,00033 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Tratamiento primario.** Es el Conjunto de operaciones encaminadas hacia la remoción de sólidos sedimentables o de material flotante mediante procesos gravitacionales o mecánicos.

**Trampa grasas.** El tiempo de retención hidráulica para este sistema es el recomendado por la norma RAS 2000 título E, tabla E 3.2 (ver anexo C) (3 minutos para caudales entre 2 – 9 LPS). Por seguridad y debido a que el caudal de diseño es muy bajo se adopta un tiempo de retención de 5 minutos.  $Tr = 5$  minutos

VOLUMEN DEL SISTEMA		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$V_{tgrasas} = Q \times Tr \times 60$	$V = 0,0033 m^3/s \times 5 \text{ min} \times 60s$	0,099 m <sup>3</sup>
<b><i>Volumen trampa de grasas</i></b>	0,099 m <sup>3</sup>	
AREA SUPERFICIAL		
La norma RAS 2000 título E, recomienda tener en cuenta un factor de diseño de 0,25 m <sup>2</sup> /1 Lps. Se tiene entonces que:		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$As = 0,25 m^2 / 1 lps \times Q_{ar}$	$As = 0,25 m^2 / 1 lps \times 0,33 lps$	0,085 m <sup>2</sup>
<b>As</b>	0,085 m <sup>2</sup>	

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

El tanque debe tener una relación ancho: longitud de 1:4 hasta 1:18, por lo cual se asume para el diseño una relación de 1:4 como criterio del diseñador.

$$L = 4b$$

$b = \sqrt{\frac{0,085m^2}{4}} = 0,15m$	$L = 4(0,15m) = 0,6m$
$h = \frac{V}{A} = \frac{0,099m^3}{0,085m^2} = 1,15m$	

Dimensiones calculadas

$$b = 0,15 \text{ m}$$

$$L = 0,6 \text{ m}$$

$$h = 1,15 \text{ m}$$

De acuerdo a los cálculos obtenidos y teniendo en cuenta la Norma RAS 2000, se toma como medidas mínimas para facilitar el manejo, operación y mantenimiento de la trampa de grasas las siguientes dimensiones:

Dimensiones finales (ver plano 1 y 2 anexo A)

$$b = 0,5 \text{ m} \quad L = 1,0 \text{ m} \quad h = 1,15 \text{ m} \quad \text{Borde libre} = 0,25 \text{ m}$$

En esta estructura se empleará tubería de policloruro de vinilo (PVC) de 4 pulgadas de diámetro; con muros en concreto reforzado de 0,15 m de espesor, con una protección química impermeabilizante (mortero zika 1) para evitar filtraciones.

**Diseño del sistema séptico.** Un tanque séptico es aquella fosa que recibe y trata las aguas servidas que provienen en este caso de la institución educativa “Colegio COMFAMILIAR Siglo XXI Sede Campestre”. En esta fosa la parte sólida de las aguas servidas es separada por un proceso de sedimentación, a través del denominado “proceso séptico” que actúa por acción de una población bacteriana se estabiliza la materia orgánica de esta agua, para lograr transformarla en un barro o lodo menos ofensivo.

Para el cálculo del volumen útil se utiliza la siguiente modelo

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

$V_u = 1000 + N_c(CT + KLF)$
$Contribución / diaria = 1,1 lps \times \frac{7hrs}{1dia} \times \frac{3600seg}{1hr} = 27972 lts / dia$

Número de contribuyentes: corresponde a la población de 700 habitantes

Tiempo de retención: con base en la contribución diaria y con la tabla E.7.2 de la norma RAS 2000 (ver anexo C) se obtiene que el tiempo de retención será de 12 horas o 0,5 días

Contribución de Aguas residuales: El valor para escuelas e instituciones educativas es de 50 lt/día obtenido a partir de la tabla E.7.1 de la RAS 2000 (ver anexo C). Caudal obtenido.

Contribución de lodos: este valor se obtiene de la tabla E.7.1 de la RAS 2000 y equivale a 0,20 lt /día de lodo (ver anexo C).

Valores de Tasa de Acumulación de lodos: el valor de K se obtiene de la tabla E.7.3 de la RAS 2000 (ver anexo C), donde con base en la temperatura ambiente y el periodo de limpieza se tiene el factor adecuado.

Para el caso, la temperatura está entre 10 y 20° C y el periodo de limpieza se recomienda para cada año, entonces  $K = 65 d^{-1}$

<b>VOLUMEN DEL TANQUE SEPTICO</b>		
<b>Modelo Matemático</b>	<b>Desarrollo modelo</b>	<b>Result.</b>
$V_u = 1000 + N_c(CT + KLF)$	$V_u = 1000 + 700(50l / h / d \times 0,5d + 65d^{-1} \times 20)$	27600 L
<b>VOLUMEN DEL TANQUE SEPTICO</b>	27,600 lts    27,6 m <sup>3</sup>	
DIMENSIONES: Se contempla construir un tanque de dos de compartimentos con una división en mampostería ubicada a los 2/3 del ingreso, de acuerdo a las recomendaciones de las normas RAS 2000, de tal manera que mejore la eficiencia de retención de sólidos así:		
Vcámara 1: $V_1 = 2/3$	$V_u = 2/3 \times 27,6 m^3 = 18,4 m^3$	
Vcámara 2: $V_2 = 1/3$	$V_u = 1/3 \times 27,6 m^3 = 9,2 m^3$	

### Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

- Profundidad útil: se asume una profundidad útil de 2 m según la norma RAS 2000 (Tabla E.3.3) (ver anexo C).
- Relación largo – ancho: según el numeral E.3.4.3.3 de la RAS (ver anexo C), se asume una relación 2 : 1 para tanques rectangulares

$A = \frac{V}{H} = \frac{27,6m^3}{2m} = 13,8m^2$	$b = \sqrt{\frac{13,8m^2}{2}} = 2,62m$
$L = 2b = 2(2,62)m = 5,25m$	

\* Dimensiones finales: B = 2,62 m      L = 5,25 m      H = 2 m

\* Dimensiones por cámara

Vcámara 1 =

$A1 = \frac{V}{H} = \frac{18,4m^3}{2m} = 9,2m^2$	$L1 = \frac{9,2m^2}{2,62m} = 3,51m$
--	-------------------------------------

Vcámara 2 =

$A2 = \frac{V}{H} = \frac{9,2m^3}{2m} = 4,6m^2$	$L2 = \frac{4,6m^2}{2,62m} = 1,75m$
---	-------------------------------------

Por seguridad y por facilidad en la construcción se establecen las siguientes medidas para el pozo séptico (ver plano 1 y 2 anexo A).

Largo de la cámara 1 = 3,55m

Largo de la cámara 2 = 1,75 m

Ancho del tanque = 2,65 m

Altura útil del tanque = 2 m

**Diseño de filtro anaerobio de flujo ascendente.** El filtro anaerobio de flujo ascendente constituye un sistema de eliminación de materia orgánica soluble utilizado frecuentemente para el tratamiento de aguas residuales domésticas; están compuestos



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

por un lecho de relleno, utilizado en la reducción de materia orgánica disuelta con la ayuda de microorganismos anaerobios, que se encuentran adheridos sobre la superficie del material de relleno.

Caudal de diseño

$$Q = 27972 \text{ lt/día}$$

$$\text{Contribución / horaria} = \frac{27972 \text{ lt / día}}{7 \text{ horas}} = 3996 \text{ lts / hora}$$

Tiempo de retención hidráulico: tomando como base la tabla E.4.29 de la norma RAS 2000 (ver anexo C) y estableciendo que la DBO<sub>5</sub> total para aguas residuales de origen doméstico tiene unos valores en mg / L siguientes:

Mínima: 80

Co (media): 190

Máxima: 300

Entonces el tiempo de retención hidráulico se calcula así:

$$\text{Trh} = \frac{(td1 + td2)}{2 \text{ horas}}$$

$$\text{Trh} = \frac{(4 + 6,5)}{2 \text{ horas}} = 5,25 \text{ h}$$

$$\text{Trh} = 0,22 \text{ días} = 5,25 \text{ horas}$$

VOLUMEN UTIL		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$Vu = TRH \times Qd$	$Vu = 5,25 \text{ h} \times 3996 \text{ lts / h}$	20979 L
<b>VOLUMEN UTIL</b>	20979 lts	20,97 m <sup>3</sup>

VOLUMEN TOTAL		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$VT = \frac{Vu}{0,6(\text{porosidad medio filtrante})}$	$VT = \frac{20,97 \text{ m}^3}{0,6} = 34,96 \text{ m}^3$	34,96 m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN TOTAL</b>	34,96 m <sup>3</sup>	

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Se adopta una profundidad de 1,8 m según las proporciones geométricas establecidas por la norma RAS 2000 donde se establece que la profundidad estará entre 0,6 m y 1,8 m.

$A = \frac{V}{H} = \frac{20,97m^3}{1,8m} = 11,65m^2$	$B = \sqrt{\frac{11,65m^2}{2}} = 5,82m$
--	---

Se establece una relación ancho:largo de 2:1 según las proporciones geométricas establecidas por la norma RAS 2000.

Dimensiones finales (ver plano 1 y 2 anexo A)

$$B = 2,41 \text{ m}$$

$$L = 4,82 \text{ m}$$

Profundidad total	=	Canaleta recolectora	=	0,30 m
		Zona de sedimentación	=	0,20 m
		Lecho filtrante	=	1,80 m
		Falso fondo	=	0,20 m
		Altura total	=	2,5 m

### DISEÑO DEL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HAFSSH):

Según las experiencias bibliográficas existentes, las concentraciones de contaminantes de los afluentes claramente decrecen con todos los sistemas de humedales artificiales, sin embargo, el sistema de flujo subsuperficial es el sistema más adecuado para el tratamiento del agua residual doméstica del Corregimiento de San Fernando. Este sistema genera resultados ajustados a la normativa vigente, produciendo un porcentaje de eliminación hasta del 95% de contaminantes del efluente dependiendo del área del humedal, generando así condiciones de reutilización de esta agua en sistemas de riego para uso agrícola o simplemente para volcarlos a través de sistemas de cañerías de infiltración al agua freática, pero con una calidad del agua adecuada, que genere sustentabilidad a este recurso natural.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

A través de los modelos matemáticos recomendados por Lara (1999) y Mena, *et al.* (2005) y el Documento Técnico Normativo del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS – 2000) de Colombia, se efectuaron los cálculos hidráulicos (Tablas 8 y 9), para el diseño de construcción y los parámetros operativos del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (Plano 3 anexo A) y el sistema de tratamiento complementario. Además se tuvo en cuenta la utilización de materiales presentes y accesibles en la zona que permitan que los resultados de eficiencia obtenidos cumplan con la legislación Ambiental Colombiana con una buena relación costo beneficio.

**Tabla 8.** Parámetros de diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), Colegio Comfamiliar Siglo XXI Sede Campestre, Corregimiento San Fernando.

PARAMETROS		VALORES
<b>Eficiencia a Calcular</b>		64%
<b>DBO<sub>5</sub> Entrada</b>	Co	100 mg/L
<b>DBO<sub>5</sub> Salida</b>	Ce	36 mg/L
<b>Q Diseño</b>	Q	28 m <sup>3</sup> /d
<b>Sustrato</b>	N	grava media Ø 25 mm
<b>Vegetación</b>		<i>S. californicus</i>
<b>Profundidad</b>	Y	0,80 m
<b>T° Critica inferior</b>		7,3 °C
<b>T° Agua entrada</b>		17 °C
<b>T° de diseño</b>		17°C

Grava media Ø 25 mm n= 0,38 (n)  
 Conductividad Hidráulica (CH) 25000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día.

De acuerdo a criterio del diseñador se estableció una eficiencia del 64%, para el humedal artificial, debido a que el agua residual ya tiene un sistema de tratamiento previo como es el filtro anaerobio de flujo ascendente, por lo tanto, se establece una eficiencia de diseño menor para el humedal artificial, lo que implica una disminución del área para este sistema y por ende reducción en los costos de inversión.

**Tabla 9.** Memorias de Cálculos hidráulicos, humedal subsuperficial horizontal (HSSFH), Corregimiento de San Fernando

Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

TEMPERATURA DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL HAFSSH 17°C		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$Kt = k_{20}(1,06)^{(t-20)}$	$K_{17} = 1,104(1,06)^{(17-20)}$	$0,926 \text{ d}^{-1}$
$K_t$	Constante de temperatura	

AREA SUPERFICIE REQUERIDA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL HAFSSH		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$A_s = \frac{Q(\ln Co - \ln Ce)}{Kt(y)(n)}$	$A_s = \frac{28m^3(\ln 100mg/L - \ln 36mg/L)}{0,926d^{-1}(0,70m)(0,38)}$	$120 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$
$A_s$	Área superficial humedal artificial HAFSSH	
TIEMPO DE RETENCION HIDRAULICA DEL AGUA EN EL HUMEDAL		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$	$TRH = \frac{120m^2 d^{-1} * 0,70m * 0,38}{28m^3}$	$1,3 \text{ d}$
$TRH$	Tiempo de retención hidráulica	

TEMPERATURA PROMEDIO DEL AGUA EN EL HUMEDAL ARTIFICIAL		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$U = \frac{1}{\frac{y_1}{k_1} + \frac{y_2}{k_2} + \frac{y_3}{k_3}}$	$U = \frac{1}{\frac{0,15m}{0,05} + \frac{0,08m}{1,5} + \frac{0,70m}{2}}$	$0,29$
$U$	Coeficiente termodinámico a la superficie del lecho del humedal	
$T_c = \frac{(U)(\sigma)(t)}{(Cp)(\delta)(y)(n)}(T_o - T_a)$	$T_c = \frac{(0,29w/m^2)(86400s/d)(1,3d)}{(4215J/kg^\circ C)(999,1kg/m^3)(0,7m)(0,38)}(17,5 - 7,3^\circ C)$	$29^\circ C$
$T_c$	Cambio de temperatura en el humedal	
$T_e = T_o - T_c$	$T_e = 17,5 - 0,29$	$17,21^\circ C$
$T_e$	Temperatura en el efluente	
$T_w = \frac{T_o + T_e}{2}$	$T_w = \frac{17,5 + 17,21}{2}$	$17,35^\circ C$
$T_w$	Temperatura promedio del agua en el reactor	

RELACION ANCHO (B): LARGO (L)		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$b = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$	$b = \sqrt{\frac{120m^2}{3}}$	$6,34 \text{ m}$
$B$	Ancho humedal	
$L = 3b$	$L = 6,34m \times 3$	$19,02 \text{ m}$
$L$	Largo humedal	

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

ESTIMACION DE REMOCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES		
Modelo Matemático	Desarrollo modelo	Resultado
$CH = \left(\frac{Q}{As}\right)10$	$CH = \left(\frac{10}{57,74}\right)10$	1,73 dm/d
$CH$	Carga hidráulica	
$Ce = (Co)(0,1058 + 0,0014(ch))$	$Ce = (221mg/L)(0,1058 + 0,0014(17,31))$	40 mg/L
$C_e$	Concentración de sólidos suspendidos en el efluente	

### 7.3 Parámetros de Calidad de Agua Esperados al Implementar el Sistema Diseñado

Al diseñar los sistemas, también se puede calcular la eficiencia teórica de eliminación de contaminantes que se podría obtener con la implementación del sistema; observándose una reducción significativa de dichas concentraciones, de contaminantes presentes en el agua residual.

**7.3.1 Remoción de carga del sistema de tratamiento propuesto.** Como base del diseño de tratamiento, es necesario partir de unos parámetros fisicoquímicos los cuales deben cumplir con lo exigido en el decreto 1594 de 1984; para realizar el cálculo de cargas se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Carga (kg/día)} = \text{Concentración Parámetro (mg/l)} * \text{Caudal (LPS)} * 0,0864$$

$$\text{Eficiencia de Remoción} = \frac{(\text{carga entra} - \text{carga sale})}{\text{Carga entra}} * 100$$

Los cálculos de las cargas contaminantes se realizan asumiendo una eficiencia de remoción para cada parámetro que depende de la unidad de tratamiento y son establecidos por la norma RAS 2000 (Tabla E.4.2: Eficiencias típicas de remoción) (Ver Anexo C.), los resultados se presentan en la Tabla 10 a la 13.

Se adopta el porcentaje de remoción más alto de la norma RAS 2000 para el cálculo de la carga contaminante que sale de cada estructura de tratamiento, esperando que se alcance la mayor eficiencia una vez esta se haya construido cumpliendo con todos los estándares y la normatividad vigente.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Tabla 10.** Cálculo de Cargas y Eficiencias de Remoción Esperadas en el Tanque Séptico con los valores teóricos adoptados

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia de Remoción Norma RAS 2000
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/L	kg/día	mg/L	kg/día	
DBO <sub>5</sub>	1,11	113,86	10,92	68,316	6,55	40
DQO		312	29,92	187,2	17,95	40
SS		30	2,88	10,5	1,01	65

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia de Remoción Norma RAS 2000
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/mL	kg/día	mg/mL	kg/día	
P total	1,11	2,05	0,20	1,64	0,16	20
N total		42	4,03	33,6	3,22	20

**Tabla 11.** Cálculo de Cargas y Eficiencias de Remoción Esperadas en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente con los valores teóricos adoptados

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia de Remoción Norma RAS 2000
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/L	kg/día	mg/L	kg/día	
DBO <sub>5</sub>	1,11	68,316	6,55	13,6632	1,31	80
DQO		187,20	17,95	37,44	3,59	80
SS		10,5	1,01	3,15	0,30	30

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia de Remoción
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/mL	kg/día	mg/mL	kg/día	
P total	1,11	1,64	0,16	0,984	0,09	40
N total		33,6	3,22	—	—	—

En el filtro anaerobio de flujo ascendente, la norma RAS 2000 no reporta datos de teóricos eficiencia en remoción nitrógeno.

**Tabla 12.** Cálculo de Cargas y Eficiencias de Remoción Esperadas en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal HASSFH adoptando porcentajes de estudios e investigaciones

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia de Remoción
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/L	kg/día	mg/L	kg/día	
DBO <sub>5</sub>	1,11	13,66	1,31	3,42	0,33	75 (a)
DQO		37,44	3,59	8,61	0,83	77 (a)
SS		3,15	0,30	0,72	0,07	77 (a)

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia de Remoción
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/mL	kg/día	mg/mL	kg/día	
P total	1,11	0,98	0,09	0,58	0,06	41 (b)
N total		33,60	3,22	19,49	1,87	42 (b)

Fuente: a. Vymazal. 2007 b. Martin, et al. 2005

**Tabla 13.** Cálculo de Eficiencias de Remoción Total del Sistema con los valores teóricos adoptados

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia acumulada de remoción del sistema
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/L	kg/día	mg/L	kg/día	
DBO <sub>5</sub>	1,11	113,86	10,92	3,42	0,33	97,00
DQO		312,00	29,92	8,74	0,84	97,20
SS		30,00	2,88	0,69	0,07	97,70

Parámetro	Q (LPS)	Entrada al sistema		Salida del Sistema		Eficiencia acumulada de remoción del sistema
		Concentración	Carga	Concentración	Carga	
		mg/mL	kg/día	mg/mL	kg/día	
P total	1,11	2,05	0,20	0,60	0,06	70,70
N total		42,00	4,03	19,49	1,87	53,60

Los valores de remoción de nitrógeno y fósforo son los más bajos, respecto a los otros parámetros debido a que los sistemas presentan un área reducida. Sin embargo, el objetivo del sistema no es remover estos parámetros porque el agua del efluente será utilizada en la irrigación de jardines y cultivos, los cuales necesitan de estos nutrientes para su crecimiento y desarrollo (Vymazal, 2007).

La eliminación de Coliformes fecales y totales, siguen un patrón hidrodinámico paralelo a la retención de sólidos, este patrón garantiza una eliminación teórica del 97.6%, esta eficiencia se obtiene a través de medios físicos, sin embargo, se debe tener en cuenta que el porcentaje es mayor porque el modelo matemático no tiene en cuenta factores biológicos como predación, competencia y mortalidad natural; sin embargo, existen estudios que reportan datos reales de eficiencia superiores al 90% de eliminación (Neralla, *et al.* 2000).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### 7.4. Proceso de Construcción del Sistema de Tratamiento

**7.4.1 Actividades Preliminares.** Entre las actividades previas a la iniciación del trabajo, se realizaron visitas de reconocimiento al sitio de la obra, identificando las condiciones iniciales y existentes del proyecto, determinando la localización y cobertura general para que el constructor inicie las actividades de localización y replanteo con la comisión de topografía.

**Excavaciones y Rellenos.** En el proceso de realización de las excavaciones se observa que hay presencia de roca, generando cortes en gran cantidad y conglomerado en varios sectores; las profundidades de las excavaciones varían en un promedio de 3,5 a 4 m (Figura 24-26).

**Figura 24.** Descapote, excavación manual en material común y roca del tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente





## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 25.** Explanación y descapote a máquina para construcción del humedal artificial



**Figura 26.** Descapote, excavación a máquina en material común y roca del humedal artificial



**Estructuras y Concretos.** Una vez terminadas las excavaciones se continúa con la aplicación del solado, estabilización de suelos y taludes, además del figurado y armado de hierro para vigas, columnas y concretos para la construcción de las diferentes estructuras que hacen parte del sistema para el tratamiento de aguas residuales (Figura 27 -29)

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**Figura 27.** Viga de amarre en concreto impermeabilizado 3000 PSI de 0,25 x 0,25 m en el tanque séptico



**Figura 28.** Sistema de drenaje de agua freática sobre el humedal artificial, previo a la estabilización de taludes y aplicación de solado



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 29.** Aplicación de solado y estabilización de taludes con suelo – cemento



**Acero de Refuerzo.** Se utiliza en las diferentes etapas de construcción donde implica el refuerzo estructural tanto en vigas, columnas, losa de fondo de concretos y canaletas.

**Mampostería y Repellos.** La mampostería en ladrillo se utilizó en las paredes del tanque séptico, filtro anaerobio, cajas de inspección y toma de muestras, aplicando mortero 1:3 con impermeabilizante Sika 1, para repellos de 1,5 cm de espesor (Figura 30 y 31).

**Figura 30.** Mampostería y viga de corona Tanque séptico, filtro anaerobio



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 31.** Losa de cubierta tanque séptico, filtro anaerobio y lecho de secado de lodos



**Instalaciones sanitarias.** Las instalaciones sanitarias se realizaron con tubería sanitaria PVC de 4, 6 y 8” ubicadas entre las diferentes estructuras del sistema de tratamiento, cuyo fin es conducir las aguas residuales en los diferentes sistemas de tratamiento.

**Impermeabilización de los humedales.** Los humedales se impermeabilizaron con geomembrana recubierta con geotextil para evitar el contacto directo con el lecho filtrante (Figura 32 a 35).

**Figura 32.** Construcción de zanja de anclaje de la geomembrana



**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

**Figura 33.** Instalación de la geomembrana



**Capas filtrantes.** Para este tipo de tratamiento de aguas se utilizó grava de río la cual presenta características poco cortantes para evitar la ruptura de la geomembrana y de 1 pulgada de diámetro la cual garantiza un flujo laminar.

**Figura 34.** Instalación de lecho filtrante (grava de río de 25 mm)



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 35.** Humedal artificial concluido



### 7.5 Remoción Real de Carga Contaminante del Sistema de Tratamiento Implementado

El cálculo de la remoción real de la carga contaminante se realizó con base en los resultados del análisis de laboratorio (Anexo B), las muestras fueron tomadas en el afluente y efluente de cada componente del sistema de tratamiento. Los resultados se calcularon de acuerdo a la siguiente fórmula y se presentan en la Tabla 14 a la 21 y la Figura 36 a la 47.

$$\text{Carga (kg/día)} = \text{Concentración Parámetro (mg/l)} * \text{Caudal (LPS)} * 0,0864$$

$$\text{Eficiencia de Remoción} = \frac{(\text{carga entra} - \text{carga sale})}{\text{Carga entra}} * 100$$

#### A. Remoción de contaminantes fisicoquímicos

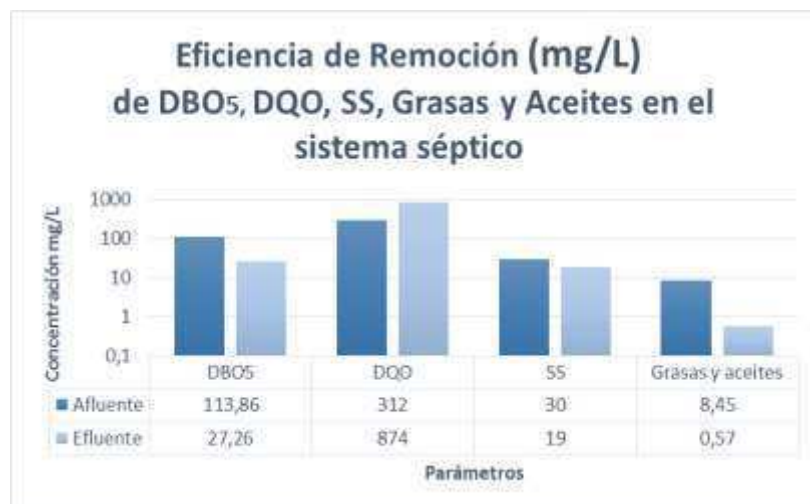
#### Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el sistema séptico

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Tabla 14.** Porcentaje de remoción de contaminantes en el sistema Séptico

Parámetro	Eficiencia en Remoción Sistema Séptico (%)
DBO <sub>5</sub>	76,06
DQO	—
SS	36,67
P Total	—
N Total	47,14
Grasas y Aceites	93,25

**Figura 36.** Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el sistema séptico



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 37.** Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en kg/día en el sistema séptico



### Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el filtro anaerobio de flujo ascendente

**Tabla 15.** Porcentaje de remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

Parámetro	Eficiencia en remoción FAFA (%)
DBO <sub>5</sub>	21,94
DQO	51,26
SS	73,68
P Total	—
N Total	95,5
Grasas y Aceites	12,28



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 38.** Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente



**Figura 39.** Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en kg/día en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

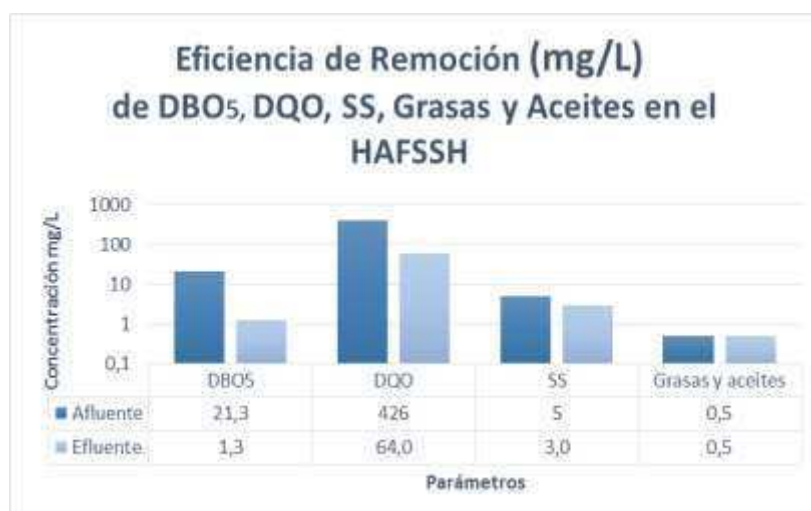


**Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.**

**Tabla 16.** Porcentaje de remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

Parámetro	Eficiencia en Remoción HAFSSH (%)
DBO <sub>5</sub>	93,89
DQO	84,98
SS	40,00
P Total	96,90
N Total	—
Grasas y Aceites	—

**Figura 40.** Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal



**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**



**Figura 41.** Eficiencia de Remoción de contaminantes fisicoquímicos en kg/día en el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal



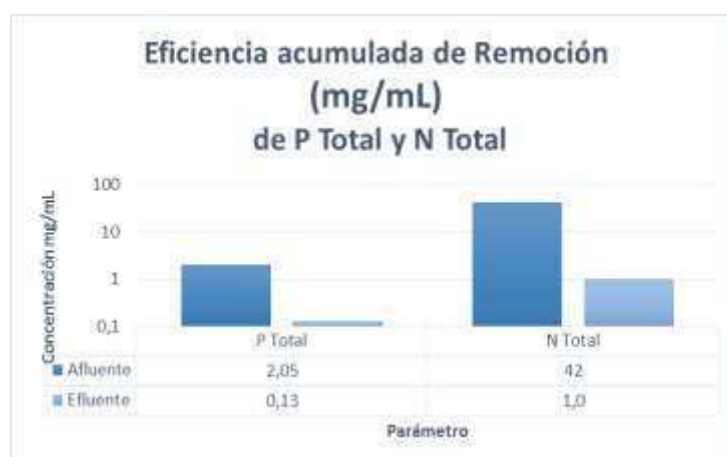
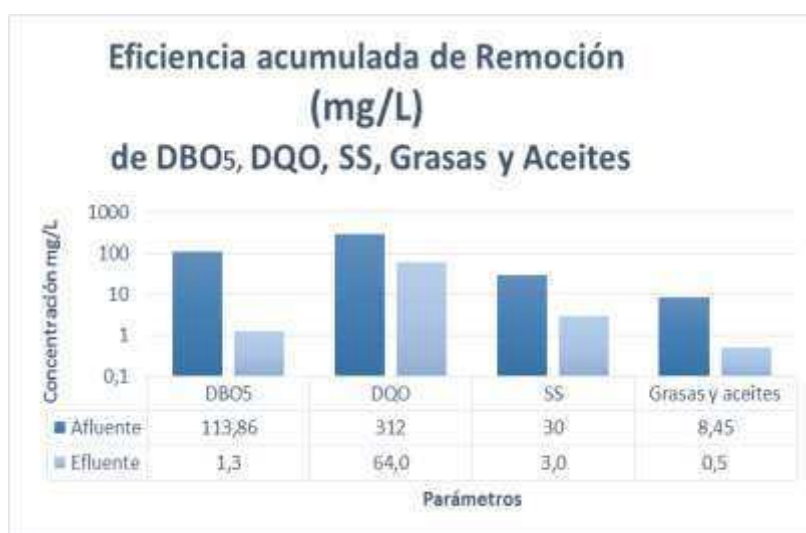
**Remoción de contaminantes fisicoquímicos en el sistema completo**

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Tabla 17.** Eficiencias de remoción total acumulada de contaminantes fisicoquímicos del Sistema

Parámetro	Eficiencia total acumulada (%)
DBO <sub>5</sub>	98,86
DQO	79,49
SS	90,00
P Total	93,66
N Total	97,62
Grasas y Aceites	94,08

**Figura 42.** Eficiencia total acumulada de Remoción de contaminantes.



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 43.** Eficiencia de Remoción total de contaminantes en kg/d.



### B. Remoción de contaminantes microbiológicos

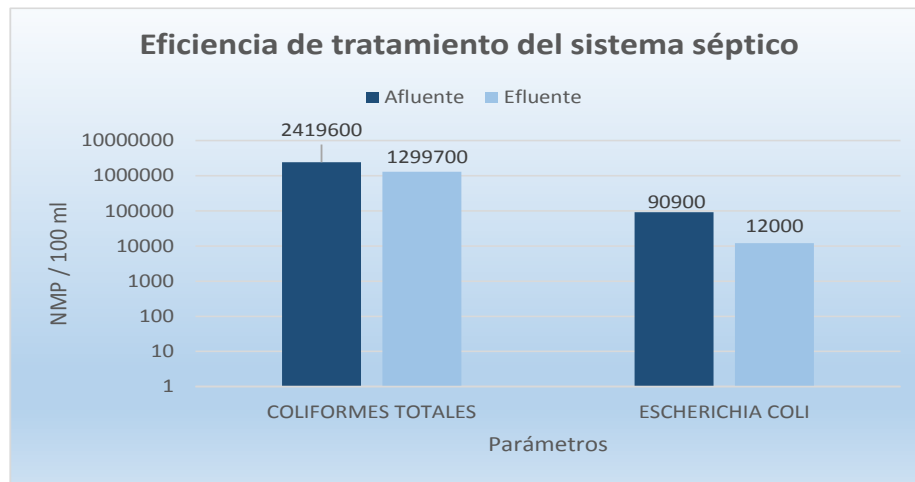
#### Remoción de contaminantes microbiológicos en el sistema séptico

**Tabla 18.** Porcentaje de remoción de contaminantes microbiológicos en el sistema séptico.

Parámetro	Eficiencia en Remoción Sistema Séptico (%)
C TOTALES	46,28
E. COLI	86,8

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 44.** Eficiencia de Remoción de contaminantes microbiológicos en el sistema séptico NMP /100mL.

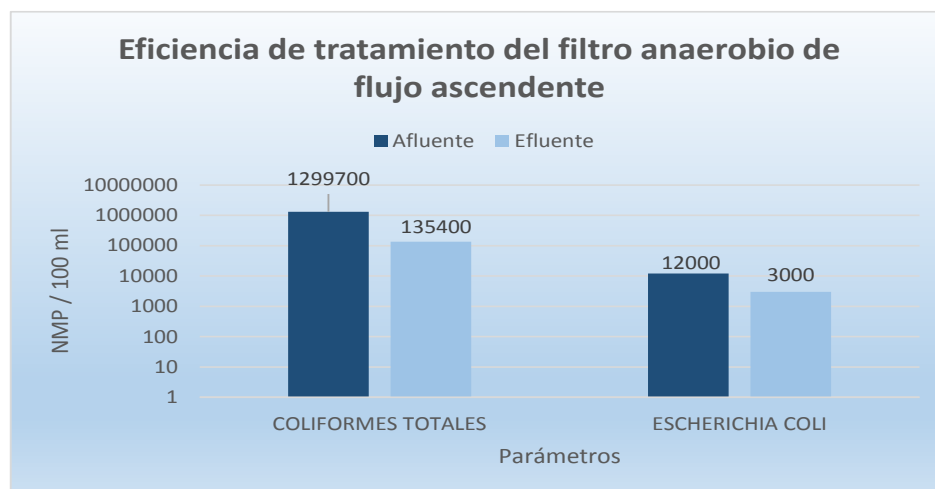


## Remoción de contaminantes microbiológicos en el filtro anaerobio de flujo ascendente

**Tabla 19.** Porcentaje de remoción de contaminantes microbiológicos en el filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia en Remoción FAVA (%)
C TOTALES	89,58
E. COLI	75,00

**Figura 45.** Eficiencia de Remoción de contaminantes microbiológicos en el filtro anaerobio de flujo ascendente NMP /100mL.



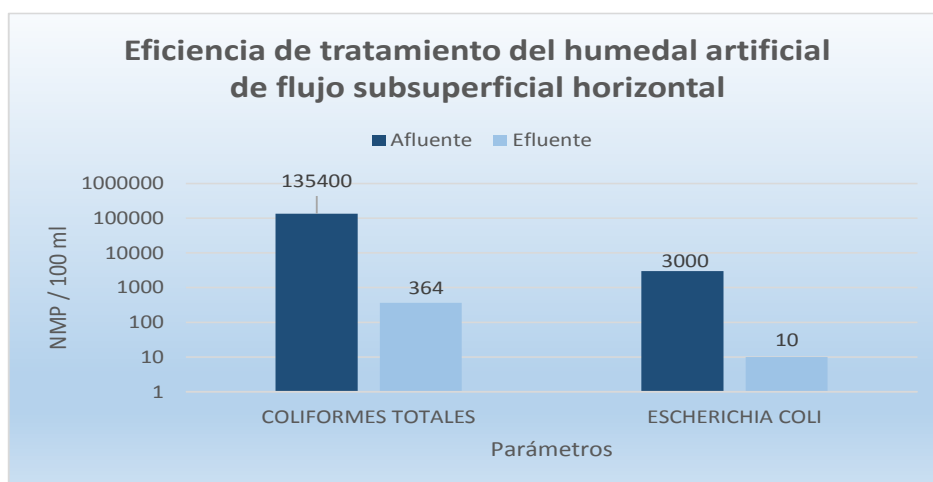
## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### Remoción de contaminantes microbiológicos en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

**Tabla 20.** Porcentaje de remoción de contaminantes microbiológicos en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

Parámetro	Eficiencia en Remoción HAFSSH (%)
C TOTALES	99,73
E. COLI	99,67

**Figura 46.** Eficiencia de Remoción de contaminantes microbiológicos en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal NMP /100mL.



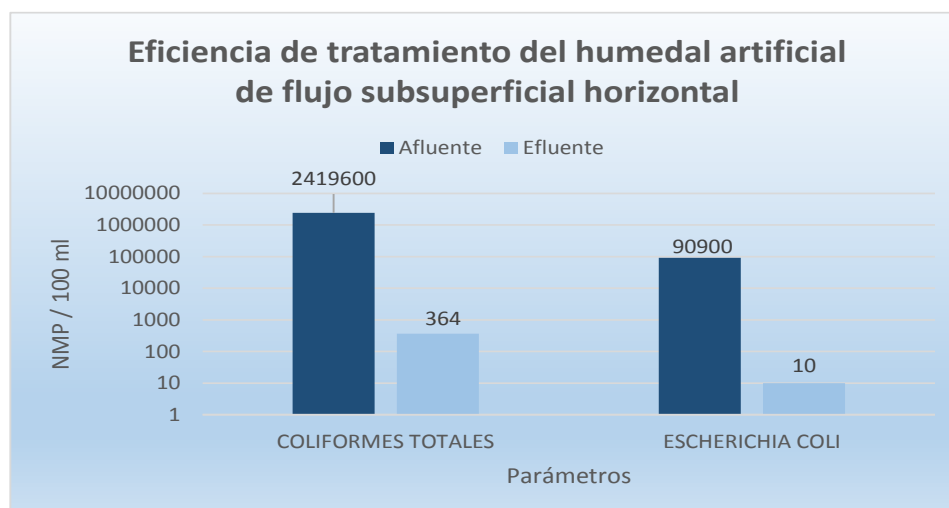
### Remoción de contaminantes microbiológicos en el sistema completo

**Tabla 21.** Porcentaje de remoción total acumulado de contaminantes microbiológicos del Sistema

Parámetro	Eficiencia en Remoción HAFSSH (%)
C TOTALES	99,98
E. COLI	99,99

**Figura 47.** Eficiencia total acumulada de Remoción de contaminantes microbiológicos NMP /100mL.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)



### 8. Discusión

#### 8.1 Componentes ambientales y sanitarios del corregimiento de san Fernando frente a la contaminación del recurso hídrico

El proyecto denominado: Proceso de Intervención Comunitaria Orientado al Mejoramiento del Ambiente en el Recurso Hídrico y por lo tanto en la Calidad de Vida, en el Corregimiento de San Fernando (Mena y Obando, 1996), fue un paso importante en la mitigación de la contaminación de este recurso y a nivel social generó resultados positivos al erradicar las letrinas secas que habían ocasionado pésimas condiciones de vida a los habitantes de esta localidad, a causa de la proliferación de vectores que han generado mayor vulnerabilidad para contraer enfermedades principalmente en la población infantil y de avanzada edad, (Mena y Obando, 1996); la eliminación de las letrinas se logró con la implementación de un tratamiento primario de los efluentes cloacales mediante pozos sépticos. Además, desde la perspectiva de la gestión, este proyecto incentivó a la comunidad a organizarse en busca del desarrollo de estrategias que reduzcan la problemática económica, social y ambiental intensificada por el incremento poblacional, por ser una zona de expansión urbana, además del desarrollo y mejora de vías presente en la zona.

Esta problemática se presenta porque el planteamiento y diseño del proyecto mencionado, es eficiente para una comunidad de menor población debido a que el



## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

tratamiento realizado al recurso es a través de un sistema primario que al ser aplicado en una comunidad con mayor población genera una contaminación significativa que requiere un tratamiento más efectivo y completo. Actualmente el crecimiento poblacional de este corregimiento, demanda la construcción de nuevas viviendas, e infraestructura las cuales están tomando como base dicho proyecto planteado en el año 1996, para solucionar el problema de vertimientos, sin tener en cuenta que el incremento de estos emisores ha agudizado la contaminación difusa y la vulnerabilidad de la calidad del agua subterránea y por consiguiente perjudica la sostenibilidad de la cuenca.

El problema ambiental no sólo está relacionado con la contaminación del recurso hídrico, sino también con la contaminación de cultivos, que como consecuencia de la escasez de agua en la época seca, son irrigados con el efluente de los pozos sépticos existentes, generando un problema sanitario del cual la comunidad es consciente.

Antiguamente las cámaras sépticas construidas infiltraban el agua directamente a al suelo y por ende al nivel freático, debido a que la base era en tierra; hoy en día se han implementado sistemas con base en concreto simple que evitan la infiltración, permitiendo usar el caudal efluente para riego de sus huertas, mitigando así el efecto de las sequias, debido a la inexistencia de otra fuente de agua aparte de la destinada para consumo humano.

Este sistema de irrigación ha generado un problema sanitario crónico, a causa del incremento de vectores que producen enfermedades gástricas por consumo de alimentos contaminados con microorganismos patógenos. Sin embargo, con la implementación de los humedales artificiales el efluente de este sistema estaría en condiciones adecuadas para uso agrícola mejorando la calidad sanitaria de los productos cultivados por los campesinos de la zona.

Hoy en día las autoridades ambientales competentes tienen pleno conocimiento del problema de contaminación del recurso hídrico y de los cultivos, por esta razón se estableció el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), Resolución 1304 del 2004; actualmente dichas autoridades están en busca de alternativas de

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

implementación del PSMV. Los sistemas de tratamientos de aguas residuales, como los humedales artificiales, surgen como una opción para reducir la problemática de contaminación difusa en zonas rurales, además genera alternativas de reutilización del recurso.

La participación gubernamental es fundamental para la solución de problemas sociales y ambientales a nivel global y local, sin embargo, se requiere participación comunitaria activa que le de viabilidad y solidez a las metas propuestas. En este aspecto el corregimiento de San Fernando se caracteriza por presentar una comunidad participativa, organizada e integral (Mena y Obando, 1996), con atributos para la gestión y búsqueda de oportunidades que facilitan el desarrollo de proyectos que mantengan el equilibrio social, ambiental y económico, generando así, la sustentabilidad de los recursos naturales y específicamente del agua.

### **8.2 Caracterización de la calidad del agua en la salida de las cámaras sépticas**

El uso y manejo sostenible del recurso hídrico se complementa con lo establecido en la Resolución 1304 de 2004 de la legislación Colombiana, referente al Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV), con el fortalecimiento de la capacidad regional en el control de la contaminación hídrica, de manera que se mejore la calidad de agua vertida garantizando el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico, mitigando riesgos en la salud pública y favoreciendo los procesos ecológicos. Los humedales artificiales a su vez, se plantean como un instrumento de implementación de los PSMV en la zona rural, garantizando excelentes resultados en remoción de contaminantes a un bajo costo energético, de construcción y mantenimiento.

Estudios de diferentes sistemas de tratamiento para aguas residuales domésticas, como los sistemas de tanques sépticos, han comprobado que no cumplen con el 80% de remoción de cargas de DBO<sub>5</sub> y DQO establecido por la legislación Colombiana, en consecuencia se han evaluado modificaciones a esta tecnología incluyendo el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial como tratamiento para dar cumplimiento a la normatividad (Villegas, *et al.* 2006).

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Con la caracterización de la calidad del efluente a la salida del sistema de cámaras sépticas existentes en la zona, como tratamiento primario, se pudo identificar la presencia de alta carga contaminante, observándose claramente la necesidad de plantear obras y acciones que mitiguen el impacto de la contaminación de estos vertimientos.

Estos parámetros obtenidos a través de análisis de laboratorio al efluente de la salida de la cámara séptica, arrojaron datos preocupantes de contaminantes, principalmente los referidos a Coliformes fecales y totales, DBO<sub>5</sub> y DQO, en menor grado, los sólidos suspendidos, nitrógeno total y fósforo total (Tabla 7). Los parámetros de coliformes fecales y totales, según la normatividad de Colombia, Decreto 1594 de 1984, Capítulo IV (Tabla 22), indican que dichos vertimientos no se ajustan a ningún criterio de calidad que permita destinar el efluente en algún tipo de reutilización o volcamiento directo a un cuerpo receptor, convirtiéndose en causante de deterioro ambiental.

**Tabla 22.** Criterios máximos admisibles para destinación del recurso hídrico en el uso agrícola, según la normatividad colombiana

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>pH</b>	4,5 – 9
<b>Coliformes fecales</b>	1000 NMP/100 mL
<b>Coliformes totales</b>	5000 NMP/100 mL

El colegio Comfamiliar de Nariño, siglo XXI sede campestre, ubicado en la zona de estudio, es uno de los principales proyectos de desarrollo de la localidad, sin embargo, para el tratamiento de las aguas residuales se planteó y se construyó como medida de mitigación de esta problemática un sistema de tratamiento de aguas residuales que involucre humedales artificiales, que permitan la remoción de los contaminantes garantizando así un aprovechamiento óptimo y eficaz del recurso hídrico para riego de los cultivos agrícolas y ornamentales en la institución.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### 8.3 Diseño y Características del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal (Hafssh) y Sistema de Tratamiento Complementario en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, Sede Camprestre Corregimiento de San Fernando

En el marco de la ordenación y planificación sostenible de la cuenca se plantean programas y proyectos específicos, dirigidos a conservar y/o prevenir el deterioro ambiental, Decreto 1729 de 2002 de la legislación de Colombia, con el fin de mantener o restablecer un equilibrio entre el aprovechamiento económico de los recursos y la conservación de la estructura físico – biótica de la cuenca.

En base al Decreto 1594 de 1984 de Colombia, en el que se establecen los usos del agua y residuos líquidos, se ordena la implementación de sistemas de tratamiento que cumplan con la norma de retención de contaminantes de forma eficiente y significativa (Tabla 23).

**Tabla 23.** Normas Mínimas de remoción de contaminantes establecidas en el Decreto 1594 de 1984, para aguas residuales en Colombia

<b>NORMAS MÍNIMAS ESTABLECIDAS PARA AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS</b>		
<b>Referencia</b>	<b>Usuario Existente</b>	<b>Usuario Nuevo</b>
<b>pH</b>	5 a 9	5 a 9
<b>Material Flotante</b>	Ausente	Ausente
<b>Grasas y Aceites</b>	Remoción > 80 % en carga	Remoción > 80% en carga
<b>Sólidos Suspendidos</b>	Remoción > 50 % en carga	Remoción > 80% en carga
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga

Después de desarrollar un estudio previo de la zona y establecer sus necesidades, se elaboró una investigación sobre sistemas de tratamiento y más específicamente sobre Humedales Artificiales, basándose en experiencias de autores nacionales e internacionales, visitas a centros de investigación (Figura 48) y referencias bibliográficas, determinándose que estos sistemas son los más adecuados para las condiciones del corregimiento de San Fernando, debido a sus excelentes resultados comprobados, después de numerosos estudios, como una tecnología adecuada para el

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

tratamiento de aguas residuales municipales y una amplia gama de aguas residuales industriales (Stottmeister, *et al.* 2003)

En la Tabla 24, claramente se observa que el sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal HAFSSH es el más eficiente para implementarse en el Corregimiento de San Fernando respecto a los demás sistemas de humedales artificiales y lagunaje; este sistema ofrece porcentajes de retención de contaminantes superiores al 70% en los parámetros prioritarios a reducir, garantizando una mejor calidad de agua para la reutilización del recurso, aumentando así su disponibilidad en la zona, además, minimiza el impacto generado por la contaminación ambiental (Poch, 2003).

**Figura 48.** Visita a laboratorios especializados en tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales



Comparando el sistema de tratamiento con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal respecto al filtro anaerobio de flujo ascendente, el segundo es

### Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

más eficiente en parámetros como DBO<sub>5</sub> y DQO, sin embargo, por su elevado costo de construcción es un limitante para su implementación.

**Tabla 24.** Comparación en porcentaje de eficiencia de retención de contaminantes en diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales

Parámetros	SSFH (%)	SSFV (%)	SWF (%)	Lagunaje (%)	Filtro anaeróbico de flujo ascendente (%)
Nitrógeno total	42,3 (a)	44,6 (a)	39,4 (a)	27,02 (c)	_____
Fósforo total	41,1 (a)	59,4 (a)	48,8 (a)	68,06 (c)	40,0 (d)
Sólidos s. totales	77 (b)	61 (b)		8,49 (c)	70,0 (d)
DBO <sub>5</sub>	75 (b)	73 (b)	67,6 (a)	68,95 (c)	80,0 (d)
DQO	77 (b)	75 (b)	69,9 (a)	44,18 (c)	80,0 (d)
C. Totales	_____	_____	_____	_____	_____
C. fecales	_____	_____	_____	_____	_____

**Fuente.** a. Vymazal, 2007 b. Martin, *et al.* 2005 c. Gonzalés, *et al.* 2000 d. RAS, 2000

Los sistemas más eficientes en remoción de contaminantes son el SSFV y HAFSSH. Sin embargo, el primero posee una menor eficiencia, respecto al segundo, en remoción de parámetros como: DBO<sub>5</sub>, DQO y SST (Tabla 24). Esto se debe a que el ingreso del afluente en el SSFV, es distribuido en toda la superficie del humedal con tiempos de retención hidráulica diferentes, a causa de la ubicación de la red de caños alimentadores del afluente respecto a la salida del humedal, en este caso el agua que entra al sistema por el alimentador más cercano a la salida del efluente tendrá un tiempo de retención menor al del primer alimentador, por ende se somete a un menor tratamiento y los parámetros removidos por medios físicos y biológicos serán menores.

Para la remoción de nitrógeno y fósforo, existen modelos más eficientes como el sistema de humedales artificiales SSFV, en los cuales la hidrodinámica del tratamiento se efectúa en dos medios, uno anaerobio en el fondo del humedal, el cual favorece procesos de desnitrificación y el otro aerobio en la superficie, que permite las condiciones oportunas para la nitrificación; esto ocurre por los procesos de óxido-reducción o potencial Redox que permiten la remoción de nitrógeno del afluente (Vymazal, 2007). En cuanto a remoción de fósforo los métodos más efectivos se

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

realizan a través del uso de plantas y sustratos a base de cationes como  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , en sistemas HAFSSH, los cuales reaccionan con iones de fosfatos precipitándose en forma de cristales sólidos amorfos; uno de los sustratos más comunes es a base de conchillas las cuales están compuestas de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Vymazal, 2007).

Los humedales de flujo libre FWS y los sistemas de tratamiento con lagunaje poseen los porcentajes más bajos de remoción de contaminantes, respecto a los sistemas de flujo subsuperficial SSF (Tabla 24), además, necesitan mayor área para tratamiento y estar ubicados lejos de lugares o centros poblados (Poch, 2003; Russel, 1999), esto se debe a que presentan un espejo de agua a superficie libre, generando un hábitat idóneo para la proliferación de vectores como moscas, mosquitos y roedores, atraídos por los malos olores que se producen, los cuales son causantes de enfermedades y epidemias (Knight, *et al.* 2003) (Anexo D). La columna de agua presente en estos sistemas posee una gran carga de materia orgánica y nutrientes, los cuales generan una sobrepoblación de algas deteriorando la calidad del efluente (Steinmann C., *et al.* 2003).

Los humedales de flujo subsuperficial (SSF) eliminan en gran medida el potencial de producción de roedores, mosquitos, malos olores y algas (Steinmann C., *et al.* 2003), convirtiéndolos en sistemas idóneos para zonas con poblaciones cercanas (Yalcuka y Ugurlu, 2009; Mena, *et al.* 2008; Lara, 1999). Sin embargo, los SSF suelen costar entre 1,4 a 7,1 veces más, que los humedales SWF (Kadlec y Knight, 1996)

**8.3.1 Características del humedal HAFSSH construido en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, Sede Campestre en el corregimiento de San Fernando.** Basado en las características de los diferentes sistemas de tratamiento se determinó que el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), es el adecuado para solucionar los problemas sanitarios y de contaminación del Corregimiento de San Fernando.

Para la implementación de este sistema se realizaron los cálculos hidráulicos para obtener un porcentaje no inferior al 60% de eficiencia en remoción de contaminantes, que en conjunto con los sistemas complementarios, garantizan el cumplimiento de la legislación ambiental de Colombia. Algunas de las ventajas de este

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

sistema son su fácil operación, requerimiento de pequeñas áreas que disminuyen la cantidad de obra y utilización de materiales de la región, minimizando así los costos de construcción y operación; además, no requiere de energía convencional debido a su funcionamiento hidráulico a gravedad, reduce el impacto sobre ambientes acuáticos por vertido de sustancias y nutrientes y mitiga impactos visuales en áreas afectadas por vertimientos líquidos de caudales residuales.

*8.3.1.1 Tipo de vegetación utilizada en el humedal artificial HAFSSH en el sector del corregimiento de San Fernando.* El tipo de vegetación que se desarrolla sobre lugares anegados y húmedos en las zonas del corregimiento de San Fernando son macrófitas de la especie *Scirpus californicus* (compers.) (Figura 49), las cuales son idóneas en la implementación de este sistema por su fácil adaptación y eficiencia en retención de contaminantes, comprobada en numerosos casos de estudio para tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales.

**Figura 49.** Vegetación utilizada en el humedal artificial (HAFSSH) en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, Sede Campestre en el corregimiento de San Fernando, Género *Scirpus*



Los sistemas de humedales artificiales son eficientes en retención de contaminantes a pesar de no presentar vegetación (Tabla 25); sin embargo, algunos



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

géneros vegetales incrementan la eficiencia del humedal, según el estudio de Lara (1999), el género *Scirpus* es el más eficiente para el tratamiento de residuos debido a la alta penetración de las raíces, generando un sustrato filtrante altamente efectivo. Los Géneros *Phragmites* y *Typha* presentan un buen porcentaje de remoción de contaminantes por lo cual se pueden plantear como alternativa en la implementación de este sistema.

La densidad de siembra del *Scirpus californicus*, según recomendaciones de expertos en el tema, se hizo con una planta por m<sup>2</sup>, para evitar la saturación de raíces a causa de altas densidades de siembra, que pueden colapsar el sistema por cortocircuitos rebosando el humedal (*compers.*)

**Tabla 25.** Comparación de retención de contaminantes en humedales con diferentes tipos de vegetación

Condiciones del lecho*	Penetración de las raíces (cm)	Calidad del efluente (mg/l)		
		DBO	SST	NH <sub>3</sub>
<i>Scirpus</i>	76	5,3	3,7	1,5
<i>Phragmites</i>	>60	22,3	7,9	5,4
<i>Typha</i>	30	30,4	5,5	17,7
Sin vegetación	0	36,4	5,6	22,1

\*Q=3,04 m<sup>3</sup>/d, TRH=6 d, dimensiones del lecho, L=18,5 m, W=3,5 m, y=0,76 m, el agua es agua residual primaria, DBO=118 mg/l, SST=57 mg/l, NH<sub>3</sub>=25 mg/l

**Fuente.** Lara, 1999

8.3.1.2 *Tipo y tamaño del sustrato poroso utilizado en el humedal artificial HAFSSH del Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede campestre.* Para la elección del sustrato poroso se tuvo en cuenta el Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS - 2000), del Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico de la República de Colombia (Sección II. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales).

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

El sustrato implementado es a base de grava de 25 mm de diámetro, el cual garantiza un correcto funcionamiento del sistema porque permite una conductividad hidráulica de  $25.000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ , que genera un flujo sumergido para las condiciones de caudales altos y bajos, incluyendo el incremento por precipitaciones.

Alrededor de los caños de entrada y salida del humedal, se utilizó grava de diámetro entre 50 y 100 mm, con una longitud de 0.6 m sobre el perímetro de dicha infraestructura (RAS, 2000), para evitar el taponamiento de la tubería de alimentación y de los colectores de descarga, a causa de la acumulación de sedimentos.

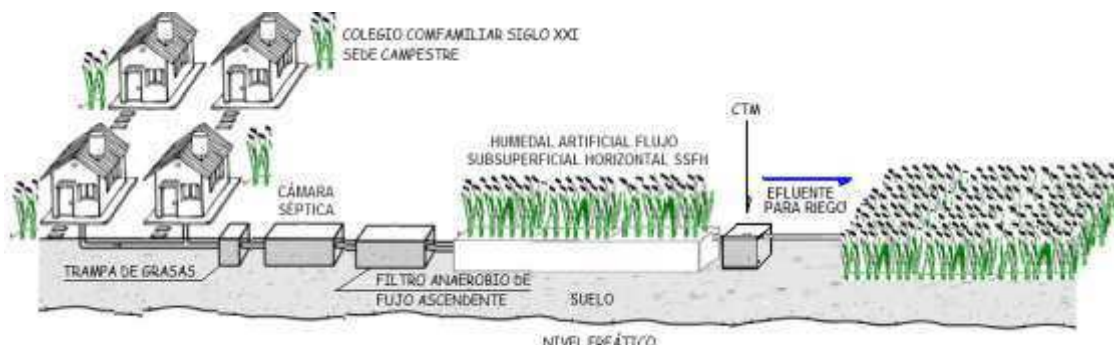
*8.3.1.3 Flujo en medio poroso.* En el humedal construido, la dinámica del agua cumple con la Ley de Darcy, donde se presenta un flujo desde los sitios de mayor potencial hidráulico, hacia los de menor potencial, adicionalmente, el tamaño de la grava usada genera un flujo laminar (Salazar y Sánches, 2007), esto contribuye a que todos los procesos de retención de contaminantes en estos sistemas sean óptimos. Gravas de mayor diámetro pueden generar alteraciones en la dinámica de los flujos provocando turbulencia y por ende la disminución significativa de la eficiencia del humedal. (Vymasal, 2007)

*8.3.1.4 Cultivos posteriores al sistema de tratamiento.* Para evitar el vertimiento directo del agua residual tratada al cuerpo receptor, anexo a la salida del humedal, se construyó una red de caños de PVC que conducen el agua a los jardines presentes en el colegio. (Figura 50).

La finalidad de esta red es que el agua tratada se use para el sistema de riego a través, de caños donde el agua sale por las perforaciones hasta la zona radicular de los cultivos, donde las plantas y colonias de microorganismos absorben y digieren los contaminantes, como fósforo y nitrógeno, finalizando de forma satisfactoria el tratamiento del agua residual doméstica, penetrando el suelo y percolando a la napa freática, en condiciones que no alteren los aspectos naturales del agua subterránea y por ende se mantenga el equilibrio ecológico de la cuenca (Mariñelarena, 2006)

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Figura 50.** Esquema de tratamiento y disposición final de las aguas residuales para sistema de riego



### 8.4 Parámetros De Calidad De Agua Obtenidos En El Efluente Del Sistema Construido

**8.4.1 Eficiencia de remoción de  $DBO_5$ .** El humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal presentó una remoción de  $DBO_5$  alto, de 21,28 mg/L presente en el afluente a 1,3 mg/L, equivalente al 93.89 % de eficiencia, valor superior al 75% reportado por estudios a escala experimental, citados por Martin, *et al.* 2005. y al porcentaje estimado en el modelo matemático equivalente al 64% (tabla 26), sin embargo, en sistemas de humedales con funcionamiento mayor a dos años, se puede presentar una disminución en la eficiencia de eliminación de la  $DBO_5$ , posiblemente influenciado por la producción de  $DBO_5$  residual, debido a la descomposición de la materia orgánica restante de las plantas y en el sustrato presente en el humedal (Lahora, 2000, Borin, M., 2012), condición que hace que en estos sistemas sea poco probable lograr una remoción cercana al 100% en  $DBO_5$ , independientemente del tiempo de retención hidráulico (Xion J. *et al.*, 2011).

**Tabla 26.** Valores de eficiencia de remoción de  $DBO_5$  en el Humedal Artificial

Parámetro	Eficiencia calculada HAFSSH (%)	Eficiencia HAFSSH (%) valor de referencia	Eficiencia real HAFSSH (%)
$DBO_5$	64 (a)	75 (b)	93,89

**Fuente** a. % de referencia en el modelo matemático b. Martin, *et al.* 2005.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Analizando los otros sistemas de tratamiento evaluados, se observa una reducción significativa de  $\text{DBO}_5$  en el sistema séptico con una concentración de 113,86 mg/L en el afluente y 27,26 mg/L en el efluente, correspondiente al 76.06 % de eliminación, valor que supera al porcentaje citado en la norma RAS 2000, equivalente al 40% para esta fase de tratamiento (tabla 27). Los valores altos en remoción se dan probablemente por la alta eficiencia de separación de la fase sólida de la líquida del agua residual (Martin, *et al.* 2005).

De igual manera, se observa una remoción baja de  $\text{DBO}_5$  en el filtro anaerobio de flujo ascendente donde se observa que la concentración del afluente es de 27,26 mg/L y la del efluente es de 21,28 mg/L, correspondiente al 21.94% de eficiencia en remoción, siendo este un valor cuestionable con respecto al 80 % de eficiencia en remoción de este parámetro según la norma RAS 2000.

**Tabla 27.** Valores de eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente.

Parámetro	Eficiencia calculada sistema séptico (%)	Eficiencia real sistema séptico (%)	Eficiencia calculada FAFA (%)	Eficiencia real FAFA (%)
$\text{DBO}_5$	40	76,06	80	21,94

Al analizar la remoción de  $\text{DBO}_5$  de todo el sistema de tratamiento, se observa una eficiencia del 98,86 %, respecto al 97 % calculado (tabla 28), lo cual indica que la remoción de  $\text{DBO}_5$  se realizó satisfactoriamente gracias a los procesos de sedimentación de la materia orgánica, de reacciones anaeróbicas y aeróbicas, además de ser removida por la acción de los microorganismos situados en la zona radicular de las plantas del humedal, cumpliendo así con el Decreto 1594 de 1984.

**Tabla 28.** Valores de eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  en el sistema completo de tratamiento.

Parámetro	Eficiencia calculada sistema completo (%)	Eficiencia real sistema completo (%)
$\text{DBO}_5$	97	98,86

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**8.4.2 Eficiencia de remoción de DQO.** En el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se presentó un porcentaje de remoción de DQO del 84.98%, donde la concentración en el afluente fue de 426 mg/L y en la salida fue de 64 mg/L, valor superior al 77% reportado por estudios a escala experimental, citados por Martin, *et al.* 2005. y al porcentaje estimado en el modelo matemático equivalente al 64%. (tabla 29).

**Tabla 29.** Valores de eficiencia de remoción de DQO en el humedal artificial

Parámetro	Eficiencia calculada HAFSSH (%)	Eficiencia HAFSSH (%) valor de referencia	Eficiencia real HAFSSH (%)
DQO	64 (a)	77 (b)	84,98

**Fuente** a. porcentaje (%) estipulado para el cálculo del modelo matemático  
b. Martin, *et al.* 2005.

La alta eficiencia de remoción de DQO se obtiene debido a la acción metabólica de los microorganismos que utilizan los compuestos orgánicos e inorgánicos del agua para la producción de biomasa, sin embargo, existen estudios que explican que el arrastre de raíces o desprendimiento de la biopelícula formada alrededor la cual acumula compuestos inorgánicos en los tejidos, en el momento de desprenderse incrementa la concentración de la DQO en el efluente (Borin, M., 2012); de la misma manera, Vymazal, 2007., reporta que los humedales artificiales en alguna etapa no presentan reducciones en la concentración de DQO, por el contrario en muchos casos los valores se incrementan.

Al evaluar la eficiencia de remoción de la DQO para todo el sistema de tratamiento, se obtuvo una remoción del 79,49%, como resultado de procesos de degradación de los microorganismos de la materia orgánica e inorgánica contenida en el agua residual, con respecto al 97,2% de la eficiencia calculada según el modelo matemático (tabla 30).

**Tabla 30.** Valores de eficiencia de remoción de DQO en el sistema completo de tratamiento.

Parámetro	Eficiencia calculada sistema completo (%)	Eficiencia real sistema completo (%)
DQO	97,2	79,49

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

En la eficiencia total se observa un valor inferior al calculado en los modelos matemáticos, debido a que la reducción de la DQO en el sistema séptico fue nula, por el contrario se incrementó de 312 mg/L a 874 mg/L de DQO, posiblemente por el excesivo uso y la acumulación de productos químicos en el proceso de limpieza de las instalaciones del colegio.

Por otro lado, se evidenció una baja eficiencia de remoción del filtro anaerobio de flujo ascendente, donde se obtuvo una reducción de 874 mg/L en el afluente a 426 mg/L de DQO en el efluente, correspondiente a un 51.26 % de eficiencia, con respecto al 80 % que cita la norma RAS 2000 para este sistema de tratamiento (Tabla 31). Todo esto conllevó a obtener resultados totales, inferiores al 80% de remoción que se establece en el Decreto 1594 de 1984, para aguas residuales en Colombia.

**Tabla 31.** Valores de eficiencia de remoción de DQO en el sistema séptico y el filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia calculada sistema séptico (%)	Eficiencia real sistema séptico (%)	Eficiencia calculada FAFA (%)	Eficiencia real FAFA (%)
DQO	40	—	80	51,26

**8.4.3 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos.** La remoción de sólidos es muy efectiva en los humedales de flujo subsuperficial, donde la dinámica del agua cumple con establecido en la Ley de Darcy, presentando un flujo laminar dependiendo del tamaño de la grava (Vymazal, 2007), esto contribuye a que todos los procesos de retención de contaminantes en estos sistemas sean óptimos. Gravas de mayor diámetro pueden generar alteraciones en la dinámica de los flujos provocando turbulencia y por ende la disminución significativa de la eficiencia del humedal. (Vymasal, 2007; Leto *et al.*, 2013)

Según los análisis de eficiencia en remoción de sólidos suspendidos de los sistemas evaluados en este estudio, el mayor porcentaje de remoción de sólidos en el agua residual se presentó en el filtro anaerobio de flujo ascendente, donde ingresaron 19 mg/L en el afluente y presentó una reducción a 5 mg/L de SS, correspondiente a un

### Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

eficiencia de remoción del 73.68% (tabla 32), el porcentaje obtenido supera al 70 % citado por la norma RAS 2000, para este tipo de tratamiento.

**Tabla 32.** Valores de eficiencia de remoción de Sólidos suspendidos en el sistema séptico y el filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia calculada sistema séptico (%)	Eficiencia real sistema séptico (%)	Eficiencia calculada FAFA (%)	Eficiencia real FAFA (%)
SS	65	36,67	70	73,68

En el sistema séptico, en el afluente ingresaron 30 mg/L de sólidos suspendidos y en el efluente se obtuvo 19 mg/L donde se calcula una remoción del de 36.67% de eficiencia, este valor es inferior 65% al citado en la norma RAS 2000.

En el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se presentó una eficiencia de remoción baja equivalente al 40% (Tabla 33), condición atribuida a la baja concentración de sólidos suspendidos que el ingreso al humedal artificial, presentando una reducción de 5 mg/L, a 3 mg/L de S.S., como consecuencia de que ya se han realizado remociones significativas en los sistemas de tratamiento previos al humedal artificial.

La baja eficiencia del humedal artificial, respecto 64% de la eficiencia calculada y al 77% del eficiencia presente en sistemas experimentales (Tabla 33), se debe a que el agua residual que ingresa al sistema, ya presenta condiciones excelentes de remoción de sólidos, por lo tanto, en este caso la reducción es mínima, por el contrario, el sistema puede aportar sólidos al efluente por desprendimiento de la biopelícula o arrastre de sólidos en época invernal (Leto c. *et al.*, 2013).

**Tabla 33.** Valores de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en el humedal artificial

Parámetro	Eficiencia calculada HAFSSH (%)	Eficiencia HAFSSH (%) valor de referencia	Eficiencia real HAFSSH (%)
SS	64	77	40

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Al evaluar la eficiencia total de remoción de los sólidos suspendidos para todo el sistema de tratamiento, se obtuvo una remoción del 90% con respecto al 97.6 % calculado (tabla 34), sin embargo, este resultado es óptimo con referencia al 80% mínimo establecido en el Decreto 1594 de 1984.

**Tabla 34.** Valores de eficiencia de remoción de sólidos suspendidos en el sistema completo de tratamiento

Parámetro	Eficiencia calculada sistema completo (%)	Eficiencia real sistema completo (%)
SS	97,6	90

**8.4.4 Eficiencia de remoción de fósforo Total en el humedal artificial.** En los humedales artificiales la reducción de fósforo presente en el agua residual, se lleva a cabo principalmente por el fenómeno de adsorción, el cual depende directamente de las características del sustrato y la presencia de vegetación (Borin, M., 2012).

Pese a que el humedal artificial del colegio Comfamiliar Siglo XXI no fue diseñado para la remoción de fósforo, En la tabla 35 se observa una reducción equivalente a 96,9 % de los 4,2 mg/mL que ingresan al humedal, obteniendo una concentración de 0,13 mg/mL de fósforo total en el efluente, lo que representa una eficiencia alta de remoción de este parámetro, en comparación al 41% de eficiencia obtenida en sistemas experimentales a pequeña escala (Salazar y Sánchez, 2007).

**Tabla 35.** Valores de eficiencia de remoción de fósforo total en el humedal artificial

Parámetro	Eficiencia calculada HAFSSH (%)	Eficiencia HAFSSH (%) valor de referencia	Eficiencia real HAFSSH (%)
P	—	41 a	96,9

**Fuente** a. Martin, *et al* 2005.

La alta eficiencia en remoción de fósforo total a escala real, se obtuvo debido a que el humedal objeto de estudio es un sistema nuevo, además de la capacidad de las



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

plantas en incorporar este compuesto para generar biomasa; a medida que el sistema funciona, esta eficiencia se reduce estabilizando su remoción (Salazar y Sánchez, 2007).

En el sistema de tratamiento primario (sistema séptico), el efluente presentó un incremento en la concentración de fósforo, de 0,16 a 0,31 mg/mL y en el filtro anaerobio de flujo ascendente se obtuvo un incremento de 4,0 a 4,2 mg/mL de fósforo total, respecto a este resultado se observa una tendencia de la concentración a ser constante, evidenciando una eficiencia nula en remoción, por ende una acumulación de este parámetro en estos dos sistemas (tabla 36), posiblemente por el uso de productos químicos en el proceso de limpieza de las instalaciones del colegio. Sin embargo la concentración de fósforo es baja comparando las características de las aguas residuales urbanas donde se reporta que concentraciones hasta de 5 mg/mL de fósforo total son bajas (MAVDT, 2004).

**Tabla 36.** Valores de eficiencia de remoción de fósforo total en el sistema de tratamiento primario y en el filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia calculada sistema séptico (%)	Eficiencia real sistema séptico (%)	Eficiencia calculada FAFA (%)	Eficiencia real FAFA (%)
P Total	20		40	

Al evaluar la eficiencia total de remoción de fósforo en el sistema de tratamiento completo, se obtuvo una eficiencia del 93.66% (tabla 37), gracias al aporte del humedal artificial; estos resultados cumplen con el Decreto 1594 de 1984, el cual establece remociones mínimas del 80%, sin embargo, es recomendable evaluar los resultados negativos obtenidos de los sistemas previos al humedal, teniendo en cuenta los valores de eficiencia citados en la norma RAS 2000 para cada componente del sistema de tratamiento.

**Tabla 37.** Valores de eficiencia de remoción de fósforo total en el sistema de tratamiento completo

Parámetro	Eficiencia calculada sistema completo (%)	Eficiencia real sistema completo (%)
P Total	71,9	93,66

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**8.4.5. Eficiencia de remoción de nitrógeno N Total en el humedal artificial.** Los procesos de nitrificación y desnitrificación en medios aerobios y anaerobios son la principal vía para remover nitrógeno presente en las aguas residuales domésticas (Xion J. *et al.*, 2011). En el sistema de tratamiento del Colegio siglo XXI, predomina los procesos anaerobios, por lo tanto, se obtuvo resultados positivos en remoción de nitrógeno total.

En el sistema séptico se obtuvo una remoción del 47.14 % de los 42 mg/mL de nitrógeno total presente en el afluente, obteniendo un efluente con una concentración de 22,2 mg/mL, este resultado supera al 20 % de eficiencia que cita la norma RAS 2000 para este sistema de tratamiento (tabla 38).

Por otra parte, en el filtro anaerobio de flujo ascendente se obtuvo un 95.50% (tabla 38) de remoción de la concentración de nitrógeno total que ingreso a este sistema, que de 22,2 mg/mL presentes en el afluente, redujo a 1 mg/mL en el efluente, proceso llevado a cabo debido a la desnitrificación y volatilización del nitrógeno por medios anaerobios.

**Tabla 38.** Valores de eficiencia de remoción de nitrógeno total en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia calculada sistema séptico (%)	Eficiencia real sistema séptico (%)	Eficiencia calculada FAFA (%)	Eficiencia real FAFA (%)
<b>N Total</b>	20	47,14	—	95,5

El valor de remoción de nitrógeno total obtenido en los humedales artificiales, no es significativo, debido a que la concentración de nitrógeno total que ingreso al humedal fue de 1 mg/mL, siendo este un valor muy bajo para registrar porcentajes de eliminación.

En los sistemas de tratamiento de aguas residuales como el sistema séptico, el filtro anaerobio de flujo ascendente y los humedales artificiales de flujo subsuperficial, están presentes los procesos anaerobios, donde la desnitrificación de las aguas servidas,

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

los compuestos como los nitratos y nitritos son usados por las bacterias facultativas, que como producto final se obtiene la formación de CO<sub>2</sub>, agua y nitrógeno gaseoso.

En la tabla 39, se observa la remoción general de nitrógeno total en todo el sistema de tratamiento, la cual fue de 97.62%, superando al 53.6% de eficiencia calculada y al 80% de remoción mínimas establecida en el Decreto 1594 de 1984.

**Tabla 39.** Valores de eficiencia de remoción de nitrógeno total en el sistema de tratamiento completo

Parámetro	Eficiencia calculada sistema completo (%)	Eficiencia real sistema completo (%)
<b>N Total</b>	53,6	97,62

**8.4.6 Eficiencia de remoción de grasas y aceites.** La remoción de grasas y aceites es muy efectiva en los humedales de flujo subsuperficial, debido al material filtrante y a la dinámica de flujo laminar del agua, sin embargo, es indispensable implementar un sistema de trampa de grasas para tratar el agua gris previo al ingreso de la PTAR, para evitar la saturación y obstrucción de los procesos de tratamiento.

En este caso de estudio, en el humedal artificial de Colegio siglo XXI no se pudo cuantificar la eficiencia de remoción debido a que el colegio cuenta con una trampa de grasas, además, los sistemas previos al humedal eliminaron significativamente las grasas y los aceites presentes en el agua residual observando los siguientes resultados:

En el tratamiento primario o sistema séptico, se obtuvo un 93,25% de eficiencia de remoción de grasas y aceites (Tabla 40), donde el afluente presento 8,45 mg/L de concentración de grasas y en el efluente se obtuvo una reducción a 0,57 mg/L, debido principalmente a la acumulación de natas sobre la superficie del agua. En el filtro anaerobio de flujo ascendente se obtuvo una eficiencia del 12,28% de remoción con base a la concentración de 0,57 mg/L que ingresa a este filtro, donde se obtiene una concentración de 0,5 mg/L de grasas y aceites en el efluente.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Tabla 40.** Valores de eficiencia de remoción de grasas y aceites en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia calculada sistema séptico (%)	Eficiencia real sistema séptico (%)	Eficiencia calculada FAFA (%)	Eficiencia real FAFA (%)
Grasas y aceites	—	93,25	—	12,28

En el sistema completo de tratamiento se presentó una eficiencia del 94,08% (Tabla 41) en la remoción de grasas y aceites, obteniendo resultados óptimos, superando al mínimo establecido en la norma ambiental, Decreto 1594 de 1984.

**Tabla 41.** Valores de eficiencia de remoción de grasas y aceites en el sistema de tratamiento completo

Parámetro	Eficiencia calculada sistema completo (%)	Eficiencia real sistema completo (%)
Grasas y aceites	—	94,08

**8.4.7 Eficiencia en remoción de coliformes totales y *Escherichia Coli*.** El humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal presentó excelentes resultados de eliminación de coliformes totales, obteniendo una reducción de 135400 NMP/100mL presentes en el afluente a 364 NMP/100mL, equivalente al 99,99% de eficiencia en reducción; respecto a *Escherichia Coli* se obtuvo una reducción de 3000 NMP/100mL a 10 NMP/100mL correspondiente al 99,97% de eficiencia de eliminación (tabla 42).

Estos excelentes resultados se obtuvieron posiblemente por el avanzado crecimiento de raíces de las plantas donde se desarrollan los microorganismos como protozoarios que se alimentan de patógenos, además de procesos como sedimentación y muerte natural (Seoánez, 1999).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

**Tabla 42.** Valores de eficiencia de eliminación de patógenos en el Humedal Artificial

Parámetro	Eficiencia HAFSSH (%) valor de referencia	Eficiencia real HAFSSH (%)
COLIFORMES TOTALES	99,73 a	99,99
E COLI	99,67 a	99,97

Fuente a. Martin, *et al.* 2005.

Analizando los sistemas de tratamiento evaluados, se observa una reducción significativa en cada componente de la PTAR. En el sistema séptico se presentó una eliminación de coliformes totales de 2419600 NMP/100mL presentes en el afluente a 1299700 NMP/100mL, equivalente al 46,28% de eficiencia en remoción y un 86,80% (tabla 43), de eficiencia de eliminación de *Escherichia Coli*, donde el afluente presentó una reducción de 90900 NMP/100mL a 12000 NMP/100mL presente a la salida de este sistema.

En el filtro anaerobio de flujo ascendente se obtuvo una eficiencia de reducción del 89,58% para Coliformes totales obteniendo una eliminación de patógenos de 1299700 NMP/100mL a 135400 NMP/100mL en la salida del sistema, del mismo modo un 75% de eficiencia en reducción (tabla 43) para *Escherichia Coli*, que de 12000 NMP/100mL, en la salida se obtiene una reducción a 3000 NMP/100mL; lo que significa que los sistemas en conjunto reportan resultados excelentes en remoción de patógenos, los cuales contribuyen a mejorar significativamente la calidad del agua al efluente.

**Tabla 43.** Valores de eficiencia de eliminación de patógenos en el sistema séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Eficiencia sistema séptico (%)	Eficiencia real FAFA (%)
COLIFORMES TOTALES	46,28	89,58
E COLI	86,80	75,00

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

La eficiencia acumulada en el sistema de tratamiento completo, se observa excelentes resultados en eliminación de patógenos, presentando una eliminación cercana al 100% (tabla 44), lo que garantiza un adecuado tratamiento para aprovechar este recurso para riego de cultivos.

**Tabla 44.** Valores de eficiencia de eliminación de patógenos en todo el sistema de tratamiento

Parámetro	Eficiencia real sistema completo (%)
COLIFORMES TOTALES	99,97
E COLI	99,99

Las mínimas poblaciones de coliformes totales y E Coli, como indicadores presentes en el efluente, reportan a su vez la probabilidad de que algún número de patógenos, virus y microorganismos diferentes sobrevivan el paso a través de los humedales (Gersberg et al. 1987; Gearheart, 1992; *Sensu* Neralla, et al. 2000). Sin embargo, es recomendable implementar sistemas de cloración a la salida del humedal que mejore la calidad del efluente para una reutilización que brinde seguridad sanitaria a los cultivos irrigados. La desinfección con cloro granulado, en tabletas o hipoclorito al 13% puede garantizar una eliminación del 100% de las bacterias presentes en el afluente (Cepis, 1999).

Con el modelo diseñado e implementado para el Colegio Comfamiliar Siglo XXI, se puede reducir considerablemente los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, de forma tal que cumplan con la normativa ambiental Colombiana, Decreto 1594 de 1984, generando sustentabilidad al recurso hídrico, además, incrementa su disponibilidad a través de la reutilización para agricultura a pequeña escala.

### 8.5 Eficiencia Productiva De La Reutilización De Aguas Residuales Para Agricultura

Experiencias en Tacna, Perú; Ibagué, Colombia; Mendoza, Argentina, entre otros, son las referencias mejor documentadas donde se reporta mayor rendimiento

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

productivo de los cultivos regados con agua residual. Este efluentes esencial para los cultivos, al punto que en algunos de estos casos no se utiliza agroquímicos, incluso en actividades a escala comercial (Cepis, 2004).

El agua residual contiene en promedio 5 gramos de nitrógeno por cada gramo de fósforo, además de oligoelementos que son fundamentales para la actividad agrícola (Cepis, 2004); asimismo, el contenido de materia orgánica de esta agua mejora la textura del suelo.

Los estudios realizados por la Cepis, (2004), corroboran la finalidad del diseño del sistema de reutilización de aguas residuales, con el propósito de mejorar el rendimiento productivo agrícola de esta zona, aprovechando al máximo la tecnología de tratamiento de aguas residuales no convencionales como los sistemas de humedales artificiales, los cuales mejoran la calidad del efluente para este uso.

En Tacna, Perú, se riega tanto con agua superficial como con agua residual tratada, registrándose por años las diferencias de rendimiento entre cultivos y demostrando la superioridad en los cultivos regados con agua residual (Cepis, 2004) (Tabla 45).

**Tabla 45.** Comparación de rendimientos de cultivos regados con fuentes de agua superficial, subterránea y residual tratada en Tacna, Perú (Tn/Ha/año)

<b>Cultivo</b>	<b>Agua superficial y subterránea</b>	<b>Agua residual</b>	<b>Incremento de eficiencia productiva (%)</b>
<b>Maíz</b>	2	5	150
<b>Trigo</b>	2	3	50
<b>Cebada</b>	2	4	100
<b>Tomate</b>	18	35	94
<b>Forrajes</b>	10	12	20

**Fuente.** Cepis, 2004.

Otros casos relevantes de mencionar son los de Argentina, donde ya se está promoviendo comercialmente el agua residual tratada como fertilizante líquido debido

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

a su contenido de nutrientes, y el de Brasil, donde se ha lanzado una iniciativa federal con el nombre de aguas verdes, en contraposición del término aguas negras, que denota a los desagües urbanos sin tratar y que se asocian a serios impactos a la salud y al ambiente (Cepis, 2004).

Con los humedales artificiales, se proporciona una alternativa de reutilización del agua residual doméstica tratada (aguas verdes), se difundirá su uso con fines productivos en la agricultura y el mejoramiento del ambiente del corregimiento de San Fernando, garantizando óptimas condiciones sanitarias.



## CONCLUSIONES

El Agua Residual del Colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede campestre ubicado en el Corregimiento de San Fernando Municipio de Pasto, luego de ser tratada por el sistema de tratamiento con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HASSFH), genera una calidad de agua óptima para realizar una descarga a un cuerpo receptor, sin embargo, el agua residual tratada puede ser reutilizada para uso agrícola según los resultados obtenidos.

Los valores de eficiencia de remoción obtenidos para DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, coliformes totales y Escherichia Coli, indican que de acuerdo a los límites exigidos por la norma para el control de los vertimientos en Colombia (Decreto 1594 de 1984), cumplen con lo estipulado, presentando valores de remoción mayores al 80% en cada parámetro.

El diseño construido para reducir los niveles de contaminación del agua residual del Colegio Comfamiliar Siglo XXI, logra depurar alrededor de 28 m<sup>3</sup> de agua residual al día de manera eficiente y puede admitir una población aproximada de 700 habitantes, contribuyendo a reducir el impacto ecológico que genera la descarga de agua residual sin tratamiento a un cuerpo receptor.

Este tipo de tecnología para depuración de Agua Residuales por su baja complejidad de construcción es una de las alternativas más eficientes y de bajo costo, lo cual facilita su implementación en fincas, casas campestres, colegios, urbanizaciones, comunas, entre otros.

El humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HASSFH) construido, servirá como herramienta para la ejecución del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) Resolución 1304 del 2004 de la legislación ambiental de la República de Colombia, por el cual se regulan los tipos de vertimientos que se vuelcan a las fuentes hídricas y los diferentes niveles de descontaminación que los municipios deben realizar para cumplir un proceso sinérgico que beneficie al ambiente.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

El diseño y la construcción del sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HASSFH) del colegio Comfamiliar siglo XXI, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, servirá como modelo para dar solución al problema planteado en la localidad de San Fernando.

El mejoramiento en la calidad de vida de una comunidad, que puede obtenerse a través de este tipo de iniciativas, no se limita únicamente a la zona de estudio. La Argentina, dada su gran extensión, posee poblaciones rurales con contaminación difusa difícil de tratar con plantas convencionales, debido a la relación costo-beneficio, para las cuales se podría plantear estos sistemas de humedales artificiales como una solución adecuada.

Durante el funcionamiento del sistema no se ha percibido malos olores ni presencia de vectores como mosquitos y roedores, lo que indica que este es un sistema adecuado para implementarlo en lugares cercanos donde hay presencia continua de población.

Mediante la comparación de tecnologías se puede decir que el sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HASSFH), presenta varias ventajas sobre el filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), puesto que este ofrece mayor eficiencia de remoción, no requiere mantenimiento continuo, ni demanda personal especializado para su construcción y operación.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### BIBLIOGRAFIA

Agreda C., 1998. Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (ISPJAE). Cuba. 52 pp.

Álvarez J.; Bécares E., 1998. El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Instituto de medio ambiente (IMA). Universidad de León., Departamento de Ecología, Genética y Microbiología. Campus de Vegazana 12 pp.

Babatunde A.; Zhao Q.; O'Neill M.; O'Sullivan B., 2008. Constructed wetlands for environmental pollution control: A review of developments, research and practice in Ireland Centre for Water Resources Research, School of Architecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin. *Environment International*. Vol. 34. 116–126 pp.

Brix H., 1994. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 30. 209-223 pp.

Brix H., 1997. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetlands plants the root zone method. *Wat. Sci.* Vol. 19. 107-118 pp.

I. Borin M.; Salvato M., 2012. Effects of five macrophytes on nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms. *Ecological Engineering*. Vol 46, 34–42 pp.

Cepis, 2004. <http://www.cepis.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>

Caselles A.; Garcia J.; Comas J.. 2006. Influence of the characteristics of organic matter on the efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Engineering and Biotechnology of the Technical University of Catalonia and University of Atlantic*. 147 pp.

CORPONARIÑO (Corporación Autónoma Regional de Nariño): <http://www.corponarino.gov.co>

DANE, 2005. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), República de Colombia.

Davies T. y Cottingham P., 1993. Phosphorus removal from wastewater in a constructed wetland. En: *Constructed wetland for water quality improvement*. Lewis Publishers. 720 pp.

De Busk T. y Reddy K., 1987. BOD removal in floating aquatic macrophyte based wastewater treatment system. *Water Sci. Technol.* Vol.19. 273 p p.

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Dierberg F. y Brezonik P., 1985. Nitrogen and phosphorus removal by cypress swamp sediments. *Water Air Soil Pollut.* Vol. 24. 207 pp.

Drizo A.; Frost C.; Smith K. y Grace j., 1997. Phosphorus removal by horizontal reed beds using shale as a substrate *Wat. Environ.* Vol. 68. 951-954 pp.

Dunne E. y Reddy K., 2005. Phosphorus biogeochemistry of wetlands in agricultural watersheds. In: Dunne EJ, Reddy R, Carton OT, editors. *Nutrient management in agricultural watersheds: a wetland solution.* Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers. 105-119 pp.

Dusherncov.; Raskin I.; Kumar N.; Salt D., 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology.* Vol 5, Issue 3, 285–290 pp.

Giácoman G.; Ponce M.; Tapia F., 2008. Evaluation of the efficiency of parameters químico/biológicos removal in an subsurface flow horizontal artificial wetland, which is operating in a form discontinuously., XXXI Congreso Interamericano (AIDIS) Santiago Chile. 45 pp.

Gómez R. ; Suares M. y Vidal M., 2001. The performance of a multistage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semi arid region of Spain. *Ecological Engineering.* 501- 517 pp.

González J.; Bécares E.; y Luis E., 2000. Limnología de sistemas experimentales de lagunaje para el tratamiento de aguas residuales. Universidad de León, Campus de Vegazana, España. 267-277 pp.

Harakeh M., 1984. Inactivation of enteroviruses, rotaviruses and bacteriophages by peracetic acid in a municipal sewage effluent. *FEMS Microbiology Letters.* Vol. 23. pp. 27-30.

Jansson M.; Andersson R.; Berggren H.; Leonardson L., 1994. Wetlands and lakes as nitrogen traps. *Ambio* Vol. 23. 320 - 325 pp.

Jenssen P. y Krogstad T., 2003. Design of constructed wetlands using phosphorus sorbing lightweight aggregate (LWA). In: Mander Ü, Jenssen PD, editors. *Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climates.* Southampton, UK. WIT Press. 259 - 271 pp.

Jiménez A.; Navas R.; Ortiz Luis.; Solarte A., 1999. Declaración de Impacto Ambiental en las Aguas Superficiales en la Microcuenca del Río Mijitayo Pasto Colombia. Trabajo de Grado. Universidad de Nariño. Escuela de Postgrado. Pasto, Colombia, 170. pp.

Johansson L., 1997. The use of LECA (light expanded clay aggregates) for the removal of phosphorus from waste-water. *Wat. Sci.* Vol. 35. 87 - 93 pp.

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Johnston C., 1991. Sediment and Nutrient Retention by Freshwater wetlands: Effects on Surface Water Quality. *Critical Reviews in Environmental Control*, Vol. 21 (5, 6). 491- 565. pp.

Juwarker A.; Oke B. and Patnaik M., 1995. Domestic wastewater treatment through constructed wetlands un India. *Wat. Sc. Tech.* vol.12. No. 3: 292 - 294 pp.

Kadlec R.; Knight R., 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, Florida. 823 pp.

Khateeb M., and Gohary F., 2003. Combining UASB technology and constructed wetlands for domestic wastewater reclamation and reuse. *Wat. Sc.Tech. Water Supply*. Vol.3 No 4: 201 – 208 pp. Knight R.; Walton W.; O'Mearac G.; Reisen W.; Wass R., 2003. Strategies for effective mosquito control in constructed treatment wetlands. *Ecological Engineering* Vol. 21. 211–232 pp.

Lahora A., 2000. Depuración de aguas con humedales artificiales: la EDAR de los Gallardos Almeria. *Gestión de las aguas del Levante Almeriense S.A GALASA 99 - 111 pp.*

Lara J., 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. *Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona España*. 122 pp.

Leonardson L., 1994. Va tmarker som kva'vfa'llor: svenska och internationella erfarenheter [Wetlands as nutrient sinks: Swedish and international experience]. Report Swedish Environmental Protection Agency EPA, Stockholm, in Swedish.

Leto C.; Tuttolomondo T.; La Bella S.; Leone R.; Licata M., 2013. Effects of plants pecies in a horizontal subsurface flow constructed wetland – phytoremediation of treated urban waste water with *Cyperusalternifolius* L. and *Typha latifolia* L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*. Vol 61, 282–291 pp.

Llagas W., 2006. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones* Vol. 15. N° 17: 85 - 96 pp.

Lord R., 1982. Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Serie bibliográfica, C.P.E.H.S., OPS, OMS*.

Luna V. y Ramirez H., 2004. Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista de Contaminación Ambiental*. Vol 20. 31-38 pp.

Mariñelarena A., 2006. *Manual de autoconstrucción de sistemas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias*. FREPLATA Editores 1ª edición. 72 pp.

Martín I.; Salas J.; Pidre J., 2005. The use of constructed wetlands to improve the quality of coastal and recreational waters. *Centro de investigación, fomento y*

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

aplicación de las nuevas tecnologías del agua (CENTA)., Encuentro Internacional en Fitodepuración. Sevilla, España. 95–100 pp.

Mazari M., 2000. Dualidad población-agua. Inicio del tercer milenio. Colegio Nacional. D. F., Mexico. 481 pp.

Mena P., Ojeda C. 2009. Diseño de un sistema de humedales artificiales como base para una futura implementación en el corregimiento de San Fernando, Municipio de San Juan de Pasto, Republica de Colombia. Universidad de Buenos Aires, Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua CETA. 139 pp.

Mena P., 2006. Evaluación de la toxicidad aguda de nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ -) en juveniles de Bagre Rayado *Pseudoplatystoma fasciatum*. Universidad de Nariño. 82 pp.

Mena Cortes S.; Obando E., 1996. Proceso de intervención comunitaria orientado al mejoramiento del medio ambiente, en el recurso hídrico y por lo tanto en la calidad de vida, en el corregimiento de San Fernando, municipio de San Juan de Pasto. Universidad de San Buenaventura. Colombia 214 pp.

Mena J.; Rodríguez L.; Núñez J.; Fernández F. y Villaseñor J., 2008. Design of horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands treating industrial wastewaters. Proceedings of the Ninth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Water Pollution. Witpress. 672 pp.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial Departamento Nacional de Planeación, Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia. Bogotá: 2004

Mintcho M. y Verguinia S., 2000. Tecnologías alternativas para tratamiento de aguas residuales municipales. Ingeniería de Potabilización y Tratamiento de Aguas.

Neralla Srinivasan; Weaver Richard; Lesikar Bruce; Persyn Russell., 2000. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands. Bioresource Technology. Vol. 75. 19–25 pp.

Olmedilla, 2000. Función depuradora de los humedales II: Una revisión bibliográfica sobre el papel del sedimento. Humedales Mediterráneos. Vol 1. 123–130 pp.

Pettecrew E. y Kalff J., 1992. Water Flow and Clay Retention in Submerged Macrophyte Bed. Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 49. 2483 - 2489 pp.

PGA, 2004. (Plan de Gestión Ambiental de Nariño), Departamento de Nariño, Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO) República de Colombia.

PGAR, 2012. (Plan de Gestión Ambiental Regional de Nariño) Departamento de Nariño, Colombia. Corporacion Autonom Regional de Nariño (CORPONARIÑO)

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Poch M, 1999. La calidad de las aguas. Editorial Rubes, Barcelona, España Vol. 1. 159. pp.

POMCA, 2005. (Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Rio Pasto). Corporacion Autonom Regional de Nariño (CORPONARIÑO)

Polprasert C. 1996. Organic waste recycling. Technology and management. Ed. Wiley & Sons, England. 412 pp.

RAS - 2000. Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de agua potable y saneamiento básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico Bogota. D.C., República de Colombia.

Ramsar: <http://www.ramsar.org/indexsp.htm>

Richardson C., 1985. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. Science Vol. 228. 1424–1427 pp.

Rodríguez C., 2003. Humedales construidos. Estado del arte Ingeniería hidráulica y Ambiental Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana Vol. 24. 35-41 pp.

Rodrigues P.; Díaz M.; Guerra D.; Hernández A., 1998. Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (ISPJAE). La Habana, Cuba.

Russell Richard C., 1999. Constructed wetlands and mosquitoes: Health hazards and management options—An Australian. Ecological Engineering Vol. 12. 107-124 pp.

Salazar R. y Sánchez I., 2007. Infraestructura hidráulica para acuicultura. Universidad de Nariño., San Juan de Pasto, Colombia. 351 pp.

Salem Z.; Laffray X.; Ashoor A.; Ayadi H.; Aleya L., 2013. Metal accumulation and distribution in the organs of Reeds and Cattails in a constructed treatment wetland (Etuefont, France). Ecological Engineering. Volume 64, March 2014, Pages 1–17

Samutt F.; Rogalla F.; Gonçalves R. y Penillard P., 2004. Practical experiences with removing nitrogen and phosphorus on aerated biofilters. Nutrient removal from wastewaters. Langer J. and Person C. Techconomic Publishing Co. Pensilvania, EUA 335 – 344 p.p

Seoánez C., 1999. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Ingeniería del Medio Ambiente, Ediciones Mundi Prensa. España 325 pp

## **Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

Steinmann Christian R.; Weinhart Sabine; Melzer Arnulf., 2003. A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment. *Water Research* Vol. 37. 2035–2042 pp.

Stottmeister U.; Wießner A.; Kusch P.; Kappelmeyer U.; Ka'stner M.; Bederski O.; Mu'ller R.; Moormann R., 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. Vol. 22. 93–117 pp.

Tore So D., 2002. Constructed wetlands as nitrogen sinks in southern Sweden: An empirical analysis of cost determinants Beijer International Institute of Ecological Economics. *Ecological Engineering* Vol 19. 161-173 pp.

USEPA, 1993. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. A technology assessment, USEPA Office of Water. Washington, DC. EPA 832-R-93-001.

Viloria de la Hoz J., 2007. Economía del departamento de Nariño: ruralidad y aislamiento geográfico. Banco de la República - Economía Regional., Colombia. 82 pp.

Villegas J.; Guerrero J.; Castaño J.; Paredes D., 2006. Septic tank (ST) - up flow anaerobic filter (UFAF) – subsurface flow constructed wetland (SSF-CW) systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia. *Revista Tecnológica de Ingeniería.*, Universidad de Zulia. Venezuela. Vol. 29. 3–15 pp.

Vohla C.; Põldvere E.; Noorvee A.; Kuusemets V.; Mander Ü., 2005 Alternative filter media for phosphorus removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *J Environ Sci Health*. Vol. 40. 1251-1264 pp.

Vymazal Jan, 1993. Constructed wetlands for wastewater treatment in Czechoslovakia: state-of-the-art. In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 255-260 pp.

Vymazal Jan, 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment* Vol. 380. 48–65 pp.

Vymazal Jan y Kröpfelová Lenka, 2008. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience of the total environment. 12 pp.

Vymazal Jan., 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological engineering*. Vol. 35. 1–17 pp.

Xion J.; Guo G.; Mahmood Q. Yue M., 2011. Nitrogen removal from secondary effluent by using integrated constructed wetland system. *Ecological Engineering* Vol 37, 659–662 pp.

Yalcuka y Ugurlu., 2009. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology* Vol.100.



**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

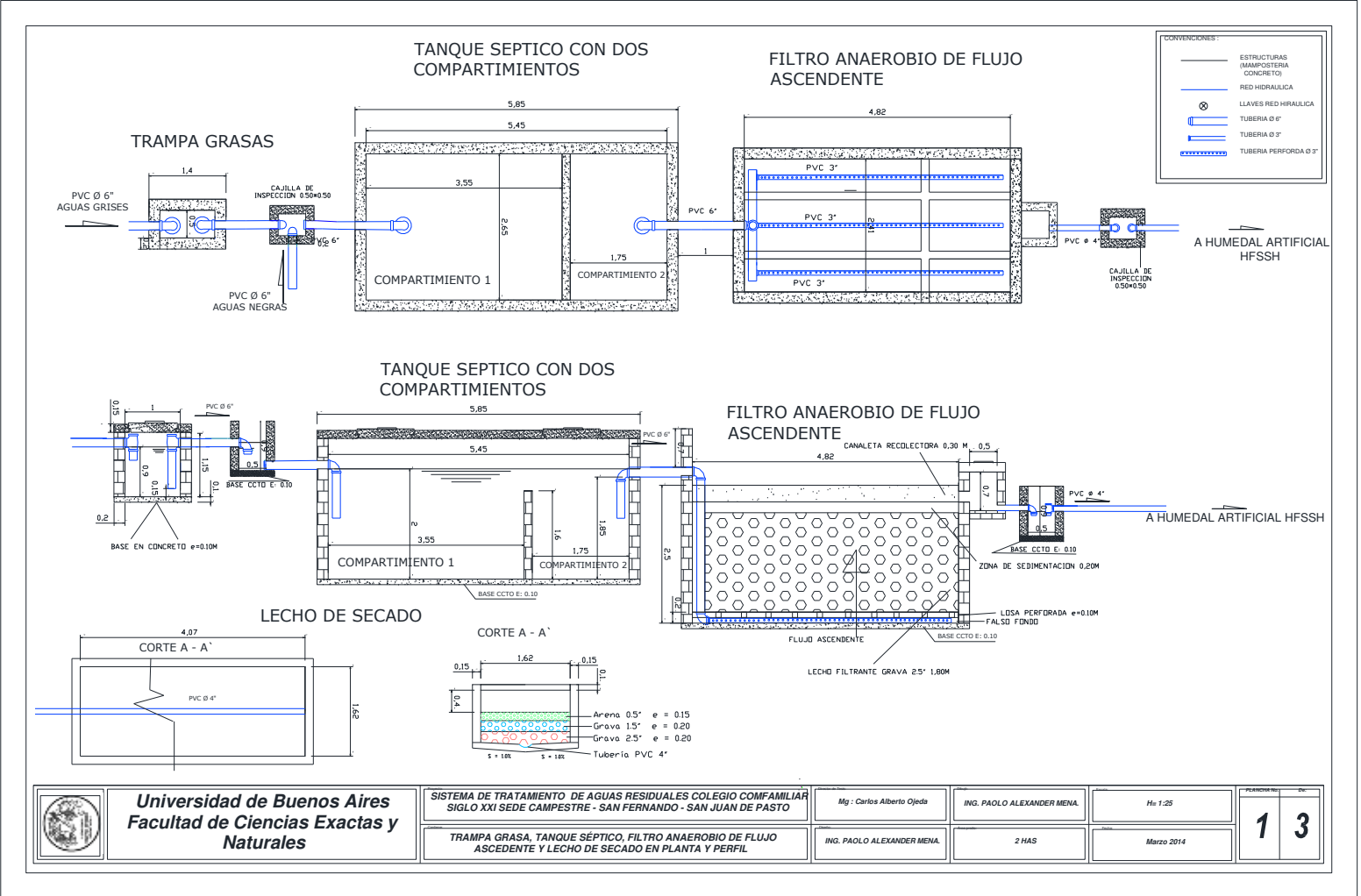
2521–2526 pp.

## **ANEXOS**

Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Anexo A

Planos 1, 2 y 3



Universidad de Buenos Aires  
 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COLEGIO COMFAMILIAR SIGLO XXI SEDE CAMPESTRE - SAN FERNANDO - SAN JUAN DE PASTO

Mg. Carlos Alberto Ojeda

ING. PAOLO ALEXANDER MENA.

H: 1:25

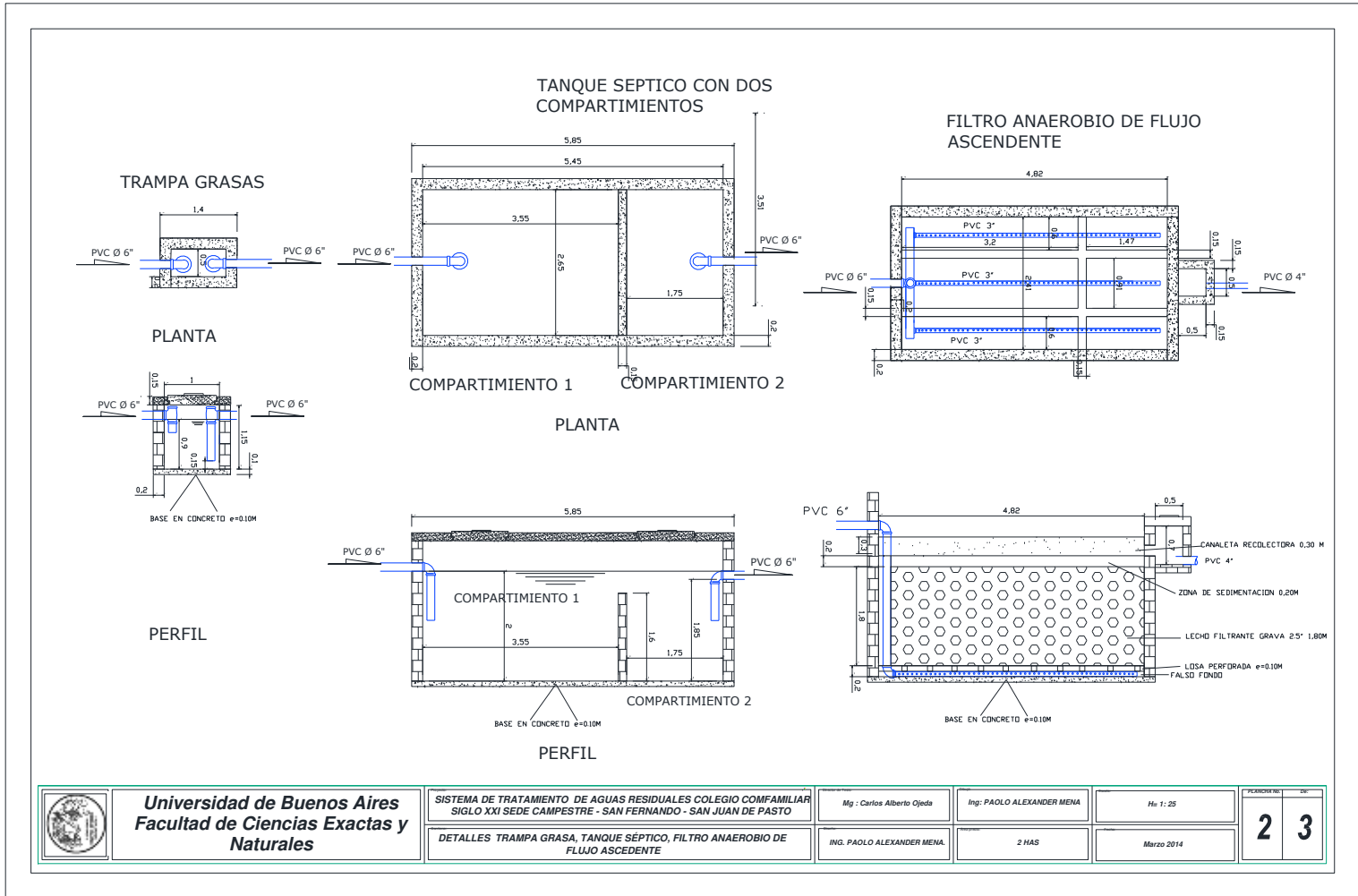
1 3

TRAMPA GRASA, TANQUE SEPTICO, FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE Y LECHO DE SECADO EN PLANTA Y PERFIL

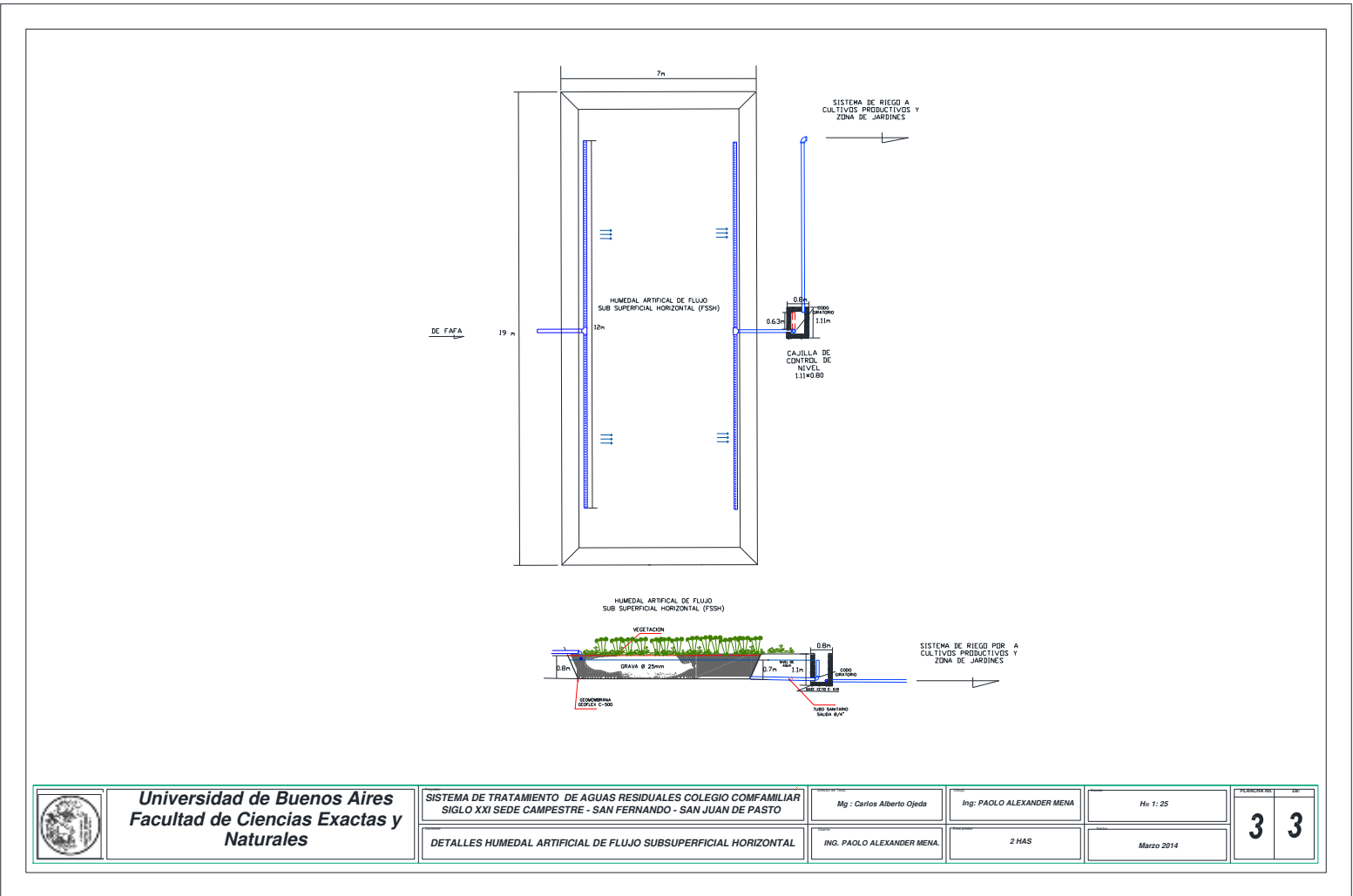
ING. PAOLO ALEXANDER MENA.

2 HAS

Marzo 2014



<p><b>Universidad de Buenos Aires</b> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales</p>	<p>SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COLEGIO FAMILIAR SIGLO XXI SEDE CAMPESTRE - SAN FERNANDO - SAN JUAN DE PASTO</p>	<p>Mg - Carlos Alberto Ojeda</p>	<p>Ing: PAOLO ALEXANDER MENA</p>	<p>Hs 1: 25</p>	<p>PROYECTO: 201</p>
	<p>DETALLES TRAMPA GRASA, TANQUE SEPTICO, FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCEDENTE</p>	<p>ING. PAOLO ALEXANDER MENA,</p>	<p>2 HAS</p>	<p>Marzo 2014</p>	<p>2 3</p>



Universidad de Buenos Aires  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COLEGIO CONFAMILIAR SIGLO XXI SEDE CAMPESTRE - SAN FERNANDO - SAN JUAN DE PASTO

Mg : Carlos Alberto Ojeda

Ing: PAOLO ALEXANDER MENA

Hs: 1:25

PROYECTO NO.	03
FECHA	03

DETALLES HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

ING. PAOLO ALEXANDER MENA

2 HAS

Marzo 2014

# Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

## Anexo B

### Resultados de laboratorio

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FISCOQUIMICO</b>			
GRASAS Y ACEITES	8.45 ✓	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 5520 C			
Técnica Analítica: PARTICION/INFRARROJO			
Muestra remitida:			
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	113.86 ✓	mg/L O <sub>2</sub>	
Normatividad: Decreto 1594/84			
OBSERVACIONES: METODO: METODOS VIGESIMOPRIMERA EDICION METODO 5210 B			
PAG 5-2			
LUMINISCENCIA			
LIMITES DE DETECCION: 1.3mg/mL			
LIMITES PERMISIBLES: HASTA 1000 mg/mL			
MUESTRA REMITIDA:			
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	312 ✓	mg/l O <sub>2</sub>	
Método: Fotométrico			
Normatividad: Decreto 1594/84			
OBSERVACIONES: LIMITES PERMISIBLES: HASTA 2000mg/mL			
FGSFORD TOTAL PARA AGUAS	2.05 ✓	mg/mL P	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-P B.4 SM 4500-P E			
Técnica Analítica: DIGESTION -COLORIMETRICO			
Muestra remitida:			
SOLIDOS SUSPENDIDOS	30 ✓	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 2540 D			
Técnica Analítica: SECADO A 103-105°C -GRAVIMETRICO			
Muestra remitida:			



 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL  
 AMBIENTES, ALIMENTOS Y AGUAS

**LABORATORIOS DEL VALLE** *Su salud en buenas manos en un mundo de servicios!*

PBX: 7313838 - Telefax: 7310460- Cels. 301 425 9409 - 316 522 9462 - 316 522 9467 - Carrera 31C Nº 19 - 19  
 www.labovalle.com - Email: labovalle@gmail.com NIT. 30712570 - 1 - Pasto - Nariño - Colombia

Fecha Recepción: 2014-01-28-15:00:44  
 Fecha Impresión: 2014-02-24 18:01:06  
 Remite: MEDICOS VARIOS  
 Telefono: 3007111681  
 Fecha Toma Muestra: 28/01/2014 HORA 11:00AM  
 Punto Toma Muestra: POZO SEPTICO AFLUENTE  
 Numero De Acta:



\* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas. \*  
 \*\* Para verificar la conformidad del resultado, ver los limites admisibles según norma. \*\*

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO</b>			
NITROGENA EN AGUAS RESIDUALES	42	mg/mL N	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-Norg C SM 4500-NH3 C Técnica Analítica: KJELDAHL - TITULOMÉTRICO Muestra remitida:			
pH PARA AGUAS RESIDUALES	4.36	Unidades de pH	
Método: Potenciómetro			
<p><i>María Angélica Vera C.</i>  <small>INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMAS DE ANÁLISIS QUÍMICO            P. 1176</small>  <small>MARIA ANGELICA VERA CORDOBA            QUITO 19</small></p>			
<h1>Grupo del Valle</h1>			
<p><b>Laboratorio Clínico de Alta Complejidad Sur Nivel</b></p>			
<p>* El resultado es válido únicamente para las muestras analizadas. *            ** Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. **</p>			

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>MICROSCOPIA</b>			
COLIFORMES TOTALES <input type="checkbox"/> MAYOR DE 2419600 ✓			
Por 100ml			
Método <input type="checkbox"/> Numero Mas Probable (NMP)			
Técnica <input type="checkbox"/> Sustrato Definido			
Escherichia coli <input type="checkbox"/> 90900 ✓			
Por 100ml			
Método <input type="checkbox"/> Numero Mas Probable (NMP)			
Técnica <input type="checkbox"/> Sustrato Definido			
 SONIA LUCIA ZAPATA PERDOMO BACTERIOLOGA - T.R. 1993-00			
 <b>Grupo del Valle</b>			
 			
<b>Laboratorio Clínico de Alta Complejidad Sur Nivel</b>			
* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas.* ** Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. **			



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

ANALISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO</b>			
GRASAS Y ACEITES	0.57	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 5520 C			
Técnica Analítica: PARTICION/INFRARROJO			
Muestra remitida:			
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	27.26	mg/L O <sub>2</sub>	
Normatividad: Decreto 1594/84			
OBSERVACIONES: METODO: METODOS NORMALIZADOS VIGESIMOPRIMERA EDICION			
METODO 5210 B PAG 5-2			
LUMINISCENCIA			
LÍMITES DE DETECCIÓN: HASTA 1.3mg/mL			
LÍMITES PERMISIBLES: HASTA 1000mg/mL			
MUESTRA REMITIDA:			
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	874	mg/L O <sub>2</sub>	
Método: Fotométrico			
Normatividad: Decreto 1594/84			
OBSERVACIONES: LÍMITES PERMISIBLES: HASTA 2000mg/mL			
FOSFORO TOTAL PARA AGUAS	4.0	mg/mL P	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-P B 4 SM 4500-P E			
Técnica Analítica: DIGESTION-COLORIMETRICO			
Muestra remitida:			
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	19.0	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 2540 D			
Técnica Analítica: SECADO A 103-105°C -GRAVIMETRICO			
Muestra remitida:			




**Laboratorio Clínico de Alta Complejidad**  
**Sur Nivel**

\* El resultado es válido únicamente para las muestras analizadas. \*  
 \*\* Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. \*\*

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO</b>			
NITROGENA EN AGUAS RESIDUALES	22.7	mg/ml N	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-Norg C SM 4500-NH3 C Técnica Analítica: KJELDAHL - TITULOMÉTRICO Muestra remitida:			
pH PARA AGUAS RESIDUALES	7.13	Unidades de pH	
Método: Potenciómetro			
<p><i>Para: Alejandra Mera</i>  <small>Para: ANÁLISIS QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES            P.O. 2476</small></p> <p>ANALISIS QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES            QUÍMICO</p>			
<b>Grupo del Valle</b>			
 			
<b>Laboratorio Clínico de Alta Complejidad</b> <b>Sur Nivel</b>			
<p>* El resultado es válido únicamente para las muestras analizadas *</p> <p>** Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. **</p>			

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>MICROSCOPIA</b>			
COUFORMES TOTALES	1295700 ✓		
Por	100ml		
Método	Numero Mas Probable (NMP)		
Técnica	Sustrato Definido		
Escherichia coli	12000 ✓		
Por	100ml		
Método	Numero Mas Probable (NMP)		
Técnica	Sustrato Definido		
 <p>EDNA LUCA ZARASA REFINOSA BACTERIOLOGA - T.F. 1995-02</p> <p><b>Grupo del Valle</b></p>			
 <p><b>Laboratorio Clínico de Alta Complejidad Sur Nariño</b></p>			
<p>* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas.*</p> <p>** Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma.**</p>			

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FISICOQUIMICO</b>			
GRASAS Y ACEITES	Menor 0.50 ✓	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 5520 C. Técnica Analítica: PARTICION/INFRARROJO Muestra remitida:			
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	21.28 ✓	mg/L O <sub>2</sub>	
Normatividad: Decreto 1594/84 OBSERVACIONES: METODO: METODOS NORMALIZADOS VIGESIMOPRIMERA EDICION METODO 5210 B PAG 5-2 LUMINISCENCIA LIMITE DE DETECCION: HASTA 3mg/mL LIMITE ADMISIBLES: HASTA 2000mg/mL MUESTRA REMITIDA:			
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	426 ✓	mg/L O <sub>2</sub>	
Método: Fotométrico Normatividad: Decreto 1594/84 OBSERVACIONES: LIMITE PERMISIBLES: 1000mg/mL			
FOSFORO TOTAL PARA AGUAS	4.20 ✓	mg/mL P	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-P B.4 SM 4500-PE Técnica Analítica: DIGESTION- COLORIMETRICO Muestra remitida:			
SOLIDOS SUSPENDIDOS	5.0 ✓	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: 2540 D Técnica Analítica: SECADO A 103-105°C -GRAVIMETRICO Muestra remitida:			

\* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas. \*

\*\* Para verificar la conformidad del resultado, ver los limites admisibles segun norma. \*\*

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO</b>			
NITROGENA EN AGUAS RESIDUALES	Menor de 1,0	✓ mg/mL N	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-Norg SM 4500-NH3 C			
Técnica Analítica: KJELDAHL- TITULOMÉTRICO			
Muestra remitida:			
pH PARA AGUAS RESIDUALES	7,72	Unidades de pH	
Método: Potenciómetro			
<p><i>Para: Alexander Mera C.</i>  <small>INSTRUMENTACIÓN Y ANÁLISIS QUÍMICO</small>  <small>BOGOTÁ - COLOMBIA</small></p> <p><small>PARA AVISOS, CAMBIO CORREO</small>  <small>QUÍMICO 72</small></p>			
<h1>Grupo del Valle</h1>			
<p><b>Laboratorio Clínico de Alta Complejidad Sur Nivel</b></p> <p>* El resultado es válido únicamente para las muestras analizadas. *</p> <p>** Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. **</p>			

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>MICROSCOPIA</b>			
COLIFORMES TOTALES ..... 135400 ✓			
	Por 100ml		
Método	Numero Mas Probable (NMP)		
Técnica	Sustrato Definido		
Escherichia coli ..... 3000 ✓			
	Por 100ml		
Método	Numero Mas Probable (NMP)		
Técnica	Sustrato Definido		

EDU LUCIA ZARAYA PERINOSA  
BACTERIOLOGA N° 1685-00

**Grupo del Valle**

**Laboratorio Clínico de Alta Complejidad Sur Nariño**

\* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas. \*

\*\* Para verificar la conformidad del resultado, ver los limites admisibles segun norma. \*\*

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO</b>			
GRASAS Y ACEITES	Menor de 0.50 ✓	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 5520 C Técnica Analítica: PARTICIÓN/INFRARROJO Muestra remitida			
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO	MENOR DE 1.3 ✓	mg/L O <sub>2</sub>	
Normatividad: Decreto 1594/84 OBSERVACIONES: METODO: METODOS NORMALIZADOS VIGESIMOPRIMERA EDICION METODO 5210 B PAG 5-2 LUMINISCENCIA: LÍMITES DE DETECCIÓN: HASTA 1.3 mg/mL LÍMITES ADMISIBLES: HASTA 2000 mg/mL MUESTRA REMITIDA			
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	64 ✓	mg/l O <sub>2</sub>	
Método: Fotométrico Normatividad: Decreto 1594/84 OBSERVACIONES: LÍMITES PERMISIBLES: HASTA 1000 mg/mL			
FOSFORO TOTAL PARA AGUAS	0.130 ✓	mg/mL P	
OBSERVACIONES: Método: SM 4500-P B 4 SM 4500-PE Técnica Analítica: DIGESTION-COLORIMETRICO Muestra remitida			
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	Menor de 3.0 ✓	mg/L	
OBSERVACIONES: Método: SM 2540 D Técnica Analítica: SECADO A 103-105°C GRAVIMETRICO Muestra remitida			

**Laboratorio Clínico de Alta Complejidad Sur Occ**

\* El resultado es válido únicamente para las muestras analizadas. \*  
\*\* Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. \*\*

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

		LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD INDUSTRIAL AMBIENTES, ALIMENTOS Y AGUAS	Página 2 de 3
<b>LABORATORIOS DEL VALLE</b>		<i>¡Su salud en buenas manos en un mundo de servicios!</i>	
PBX: 7313638 - Telefax: 7310460- Cels. 301 425 9409 - 316 522 9462 - 316 522 9467 - Carrera 31C N° 19 - 19 www.labovalle.com - Email: labovalle@gmail.com NIT. 30712570 - 1 - Pasto - Nariño - Colombia			
Solicitud	: 03002440	Fecha Recepción	: 2014-01-28-16:00:37
Cliente	: COMFAMILIAR DE NARIÑO	Fecha Impresión	: 2014-02-26 16:17:36
Identificación	: 891280005-1	Remite	: MEDICOS VARIOS
Convenio	: PARTICULARES	Telefono	: 3007111681
Dirección	: SEDE AD. PARQUE INFANTIL	Fecha Toma Muestra	: 28/01/2014 HORA 11:00AM
Tipo Muestra	: AGUA RESIDUAL TRATADA	Punto Toma Muestra	: HUMEDAL ARTIFICIAL
Tomada Por	: ALEXANDER MERA	Numero De Acta	:

ANALISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>ANALISIS FISICOQUIMICO</b>			
NITROGENA EN AGUAS RESIDUALES	Menor de 1,0	mg/mL N	
OBSERVACIONES:	Metodo: SM 4500-Norg C SM 4500-NH3 C		
Técnica Analítica: KJELDAHL-TITULOMETRICO			
Muestra remitida:			
pH PARA AGUAS RESIDUALES	7.40	Unidades de pH	
Metodo	Potenciómetro		
<p><i>Dr. Alexander Mera C.</i>  <small>INGENIERO QUIMICO ESPECIALISTA EN  ANÁLISIS DE AGUAS  C.I. 4772</small></p> <p>PARA AUSENTE SA UERA DORCOSA  QUIMICO TO</p>			
			
<h1>Grupo del Valle</h1>			
 		<b>Laboratorio Clínico de Alta Complejidad</b> <b>Sur Nivel</b>	
<p>* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas.*  ** Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. **</p>			



**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
<b>MICROSCOPIA</b>			
COLIFORMES TOTALES	364		
	Por: 100ml		
Método	Numero Mas Probable (NMP)		
Técnica	Sustrato Definido		
Escherichia coli	10		
	Por: 100ml		
Método	Numero Mas Probable (NMP)		
Técnica	Sustrato Definido		

ESPECIALIZADA EN SERVICIOS  
BACTERIOLÓGICA - TR-1893-00

Grupo del Valle

**Laboratorio Clínico de Alta Complejidad**  
Sur Nivel

\* El resultado es válido únicamente para las muestras analizadas. \*  
\*\* Para verificar la conformidad del resultado, ver los límites admisibles según norma. \*\*

**Anexo C**

**Parámetros hidráulicos y de operación recomendados por la norma  
RAS 2000 Título E.**

**REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE  
AGUA POTABLE Y  
SANEAMIENTO BÁSICO  
RAS - 2000**

SECCION II

TÍTULO E

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**



República de Colombia  
Ministerio de Desarrollo Económico  
Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico

BOGOTÁ D.C., NOVIEMBRE DE 2000

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

RAS 2.000.Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

TABLA E.3.1  
Capacidades de retención de grasa

Tipo de afluente	Caudal (L/min)	Capacidad de retención de grasa (kg)	Capacidad máxima recomendada (L)
Cocina de restaurante	56	14	190
Habitación sencilla	72	18	190
Habitación doble	92	23	240
Dos habitaciones sencillas	92	23	240
Dos habitaciones dobles	128	32	330
Lavaplatos para restaurantes			
Volumen de agua mayor de 115 litros	56	14	115
Volumen de agua mayor de 190 litros	92	23	240
Volumen entre 190 y 378 litros	144	36	378

### E.3.3.3 Entradas y salidas

Deben colocarse elementos controladores de flujo en las entradas para protección contra sobrecargas o alimentaciones repentinas. El diámetro de la entrada debe ser de un diámetro mínimo de 50 mm y el de la salida de por lo menos 100 mm. El extremo final del tubo de entrada debe tener una sumergencia de por lo menos 150 mm. El tubo de salida haga la recolección debe localizarse por lo menos a 150 mm del fondo del tanque y con una sumergencia de por lo menos 0,9m.

TABLA E.3.2  
Tiempos de retención hidráulicos

Tiempo de retención (minutos)	Caudal de entrada (L/s)
3	2 - 6
4	10 - 19
5	20 o más

### E.3.3.4 Operación y mantenimiento

Las trampas de grasa deben operarse y limpiarse regularmente para prevenir el escape de cantidades apreciables de grasa y la generación de malos olores. La frecuencia de limpieza debe determinarse con base en la observación. Generalmente, la limpieza debe hacerse cada vez que se alcance el 75% de la capacidad de retención de grasa como mínimo. Para restaurantes, la frecuencia de bombeo varía desde una vez cada semana hasta una vez cada dos o tres meses. Estas unidades deben ser dotadas de las siguientes características:

1. Capacidad suficiente de acumulación de grasa entre cada operación de limpieza
2. Condiciones de turbulencia mínima suficiente para permitir la flotación del material.
3. Dispositivos de entrada y salida convenientemente proyectados para permitir una circulación normal del afluente y el efluente.
4. Distancia entre los dispositivos de entrada y salida, suficiente para retener la grasa y evitar que este material sea arrastrado con el efluente.
5. Debe evitarse el contacto con insectos, roedores, etc.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

RAS 2.000 Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

### E.3.4.3.3 Medidas internas mínimas recomendadas:

- Profundidad útil debe estar entre los valores mínimos y máximos dados en la Tabla E.3.3, de acuerdo con el volumen útil obtenido mediante la ecuación E.7.1.
- Diámetro interno mínimo de 1.10 m, el largo interno mínimo de 0.80 m y la relación ancho / largo mínima para tanques prismáticos rectangulares de 2 : 1 y máxima de 4 : 1

TABLA E.3.3  
Valores de profundidad útil

Volumen útil (m <sup>3</sup> )	Profundidad útil mínima (m)	Profundidad útil máxima (m)
Hasta 6	1.2	2.2
De 6 a 10	1.5	2.5
Más de 10	1.8	2.8

### E.3.4.3.4 Número de cámaras:

Se recomiendan cámaras múltiples, en serie para tanques de volúmenes pequeños a medianos, que sirvan hasta 30 personas. Para otros tipos de tanques, se recomienda lo siguiente:

- Tanques cilíndricos: tres cámaras en serie.
- Tanques prismáticos rectangulares: dos cámaras en serie.

### E.3.4.3.5 Filtro de grava

Se recomienda para el dimensionamiento utilizar la siguiente metodología:

#### E.3.4.3.5.1 Volumen útil del medio filtrante

El diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Atascamiento.
- Área específica.
- Tiempo de contacto.
- Granulometría.

En el anexo E se tiene una metodología de cálculo usual

#### E.3.4.3.5.2 Área $Ah = \frac{Vu}{1.80}$ horizontal

(E.3.1)

#### E.3.4.3.5.3 Además, se recomiendan los siguientes detalles constructivos:

El medio filtrante debe tener una granulometría uniforme; la profundidad (h) útil es 1.80 m para cualquier volumen de dimensionamiento; el diámetro (d) mínimo se recomienda de 0.95 m; el diámetro máximo y el largo (L) no deben exceder tres veces la profundidad útil y el volumen útil mínimo será 1,250 L.

### E.3.4.4 Operación y mantenimiento

Los lodos y las espumas acumuladas deben ser removidos en intervalos equivalentes al periodo de limpieza del proyecto (Ver tabla E.7.3, Anexo E).

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### RAS 2.000 Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

#### E.4.3.4 Modularización y Expansión

Se deben tener por lo menos dos trenes paralelos de tratamiento. Se deben hacer estudios de modularización de los trenes de tratamiento y de expansión del sistema, los cuales deben estar en concordancia. Para los niveles medio alto y alto de complejidad se deben hacer estudios de costo mínimo para definir el plan de expansión y la modularización del proceso. Los estudios de costo mínimo deben seguir los lineamientos contenidos en el Título A.

#### E.4.3.5 Estudios de Análisis de Alternativas

De acuerdo al nivel de tratamiento deseado existen diferentes alternativas para lograr el objetivo. La tabla E.4.2 presenta un resumen de los rendimientos típicos que se logran con las diferentes etapas y procesos de tratamiento, la tabla E.4.3 presenta una matriz con las ubicaciones más probables de generación de olores, así como su agente generador, en la tabla E.4.4 se presenta una lista de los parámetros que deben ser regulados para prevenir la generación de olores. Todas estas tablas deben ser usadas por el diseñador de forma que sirva de guía en la selección del proceso.

TABLA E.4.2  
Eficiencias típicas de remoción

Unidades de tratamiento	Eficiencia en la remoción de constituyentes, porcentaje						
	DBO	DOO	SS	P	N Org	Nit-N	Patógenos
Rejillas	desp.	desp.	desp.	Desp.	desp.	desp.	Desp.
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	Desp.	desp.	desp.	Desp.
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0	desp.
Lodos activados (convencional)	80-95	80-95	80-90	10-25	15-20	8-15	desp.
Filtros percoladores							desp.
Alta tasa, roca	85-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15	
Super tasa, plástico	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15	
Cloración	desp.	desp.	desp.	Desp.	desp.	desp.	100
Reactores UASB	65-80	60-80	60-70	30-40	—	—	desp.
Reactores RAP	65-80	60-80	60-70	30-40	—	—	desp.
Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	30-40	—	—	desp.
Lagunas de oxidación							
Lagunas anaerobias	50-70	—	20-60	—	—	—	90-99.99
Lagunas aireadas	80-95	—	85-95	—	—	—	90-99.99
Lagunas facultativas	80-90	—	63-75	30	—	—	90-99.99
Lagunas de maduración	60-80	—	85-95	—	—	—	90-99.99
Ultravioleta	desp.	desp.	desp.	Desp.	desp.	desp.	100

<sup>1</sup> despreciable

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

RAS 2.000. Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

$$V_i = \frac{V}{n} \quad (\text{E.4.16})$$

8. Se asume la profundidad,  $h$ , un buen valor puede ser 2.7 m

La campana de separación en la última cámara debe obedecer a los mismos criterios que los especificados para los reactores UASB.

9. Distancia entre pantallas

$$d = \frac{Q}{a \cdot u} \quad (\text{E.4.17})$$

E.4.7.8.5 Control de olores

Debe seguirse lo especificado en el literal E.4.7.5.

E.4.7.8.6 Operación y mantenimiento

Debe seguirse lo especificado para reactores UASB en el literal E.4.6.7.11.

**E.4.7.9 Filtros anaerobios**

E.4.7.9.1 Tiempo de retención hidráulica

En la tabla E.4.29 aparecen los valores de tiempo de retención hidráulica que se deben usar.

TABLA E.4.29  
Tiempos de retención hidráulica

Rango de la concentración orgánica del afluente al filtro anaerobio. (Expresada en $\text{DBO}_{5\text{TOTAL}}$ en mg/L)	Rango del tiempo de retención hidráulica en el filtro anaerobio. Se expresa $t_{\text{min}}$ , $t_{\text{med}}$ , $t_{\text{ar}}$ y $t_{\text{má}}$ . Donde el tiempo de diseño $t_d$ es igual a $(t_{\text{ar}} + t_{\text{má}})/2$ (horas)				Valores del coeficiente característico del sustrato en digestión, $K$ , para un sustrato "típico" doméstico o municipal, correspondiente a los $t$ expresados en la columna anterior			
	$t_{\text{min}}$	$t_{\text{ar}}$	$t_{\text{má}}$	$t_{\text{má}}$	Para $t_{\text{min}}$	Para $t_{\text{ar}}$	Para $t_{\text{má}}$	Para $t_{\text{má}}$
Mínima: 50 Co (media): 65 Máxima: 80	3.0	4.0	6.5	12	1.4	1.5	1.6	1.8
Mínima: 80 Co (media): 190 Máxima: 300	2.5	4.0	6.5	12	1.0	1.1	1.3	1.7
Mínima: 300 Co (media): 650 Máxima: 1000	2.5	4.0	6.5	12	1.4	1.6	1.8	2.1
Mínima: 1000 Co (media): 3000 Máxima: 5000	3.0	6.0	8.0	12	1.7	1.9	2.1	2.5

E.4.7.9.2 Proporciones geométricas

Se recomiendan las siguientes proporciones geométricas

- $h = 0.10H$

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### CAPITULO E.7

#### E.7. METODOLOGÍAS DE DISEÑO

##### E.7.1 ALCANCE

El propósito del presente capítulo es proporcionar un compendio de las metodologías de diseño, fórmulas y parámetros más comunes que han reportado una validez hasta el momento a lo largo de la experiencia que se tiene en el tratamiento de las aguas residuales. Dichos procedimientos a su vez son susceptibles a ser sujetos a modificaciones por parte de la entidad competente en caso de que se encuentre una metodología más óptima que reemplace a la anterior.

##### E.7.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO EN EL SITIO DE ORIGEN

###### E.7.2.1 TANQUE SEPTICO

###### E.7.2.1.1 Volumen útil del tanque séptico

Para el cálculo del volumen útil del tanque séptico se recomienda el siguiente criterio:

$$V_u = 1000 + N_s (CT + KL_s) \quad (E.7.1)$$

TABLA E.7.1  
Contribución de aguas residuales por persona

Predio	Unidades	Contribución de aguas residuales (C) y lodo fresco L <sub>r</sub> (L / día)	
		C	L <sub>r</sub>
<b>Ocupantes permanentes</b>			
Residencia			
Clase alta	persona	160	1
Clase media	persona	130	1
Clase baja	persona	100	1
Hotel (excepto lavandería y cocina)	persona	100	1
Alojamiento provisional	persona	80	1
<b>Ocupantes temporales</b>			
Fábrica en general	persona	70	0.30
Oficinas temporales	persona	50	0.20
Edificios públicos o comerciales	persona	50	0.20
Escuelas	persona	50	0.20
Baras	persona	6	0.10
Restaurantes	comida	25	0.01
Cines, teatros o locales de corta permanencia	local	2	0.02
Baños públicos	tasa sanitaria	480	4.0

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

RAS 2.000. Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

TABLA E.7.2  
Tiempos de retención

Contribución diaria (L)	Tiempo de retención (T)	
	días	horas
Hasta 1.500	1,00	24
De 1.501 a 3.000	0,92	22
De 3.000 a 4.500	0,83	20
4.501 a 6.000	0,75	18
6.001 a 7.500	0,67	16
7.501 a 9.000	0,58	14
mas de 9.000	0,50	12

TABLA E.7.3  
Valores de tasa de acumulación de lodos digeridos

Intervalo de limpieza (años)	Valores de K por intervalo temperatura ambiente (t) en °C		
	1 ≤ t ≤ 10	10 ≤ t ≤ 20	t ≥ 20
1	94	65	57
2	134	105	97
3	174	145	137
4	214	185	177
5	254	225	217

E.7.2.1.2 Volumen útil del medio filtrante

$$V_f = 1,60 \cdot N \cdot C \cdot T \quad (\text{E.7.2})$$

E.7.2.2 Dimensionamiento de los filtros sumergidos aireados

1. Cámara de reacción

$$V_{re} = 400 + 0,25 N \cdot C \quad (\text{E.7.3})$$

2. Cámara de sedimentación

$$V_{sed} = 150 + 0,20 N \cdot C \quad (\text{E.7.4})$$

3. Área superficial de la cámara de sedimentación.

$$A_s = 0,07 + \frac{N \cdot C}{1,5} \quad (\text{m}^2) \quad (\text{E.7.5})$$

### E.7.3 SISTEMAS CENTRALIZADOS

E.7.3.1 Tratamiento primario

E.7.3.1.1 Operación y mantenimiento

Deben establecerse registros adecuados sobre el plan de limpieza, ya sea mecánica o manual, de los lodos del tanque. En caso de ser mecánica, debe tenerse un control del plan de trabajo del equipo. Se recomienda hacer funcionar estos equipos entre 2 y 8 horas al día, según el tamaño de la planta y la cantidad de lodos que se acumulen. Antes que se descarguen los lodos del tanque, hay que hacer funcionar el mecanismo durante un tiempo suficiente para tener la seguridad de recolectar satisfactoriamente los sólidos sedimentados en la tolva de lodos. Los lodos deben descargarse del tanque



## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### E.3.5.3 Humedales artificiales de flujo sumergido

#### E.3.5.3.1 Localización

Los humedales deben localizarse aguas abajo de un tanque séptico. Para esto, debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para localizar adecuadamente el humedal.

#### E.3.5.3.2 Parámetros de diseño

El diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Conductividad hidráulica.
- Granulometría.
- Flujo sumergido para todas las condiciones de caudales.

Además, se recomiendan los siguientes parámetros, para el caso de humedales de flujo subsuperficial:

##### E.3.5.3.2.1 Área superficial

Para la determinación del área superficial del humedal se recomiendan dos alternativas:

- a) Usar los siguientes valores de carga hidráulica: 0.032 m<sup>3</sup>/L/día (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio), y 0.021 m<sup>3</sup>/L/día (para zonas donde haya restricciones de espacio)
- b) Método incluyendo la cinética del proceso

$$A_s = Qd \cdot (LnC_0 - LnC_e) / (K_f \cdot D \cdot D) \quad (E.3.2)$$

##### E.3.5.3.2.2 Sección transversal

Para determinar el área de la sección transversal se recomienda el uso de la ley de Darcy

$$A_v = \frac{Q}{(K_f \cdot S)} \quad (E.3.3)$$

La conductividad utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales.

3. Pendiente de fondo: se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando hayan condiciones de bajo caudal. = 1%
4. Usar piedra entre 50 y 100 mm para una longitud de 0.6 m alrededor del influente distribuidor y las tuberías colectoras del efluente para reducir el taponamiento
5. Usar solo sustrato lavado para eliminar los granos finos que pueden taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial.
6. Construir la berna al menos 150 mm por encima del sustrato y al menos 150 mm por encima de la superficie de la tierra.
7. Pendiente exterior 3H:1V
8. Pendiente interior 2H:1V

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

9. Ancho mínimo de la balsa = 0.60 m
10. Carga orgánica máxima = 4 m<sup>3</sup>/kg. de DBO<sub>5</sub>/día
11. Tiempo de llenado del lecho con agua = 1 - 2 días
12. Profundidad. Se recomienda que la profundidad media del lecho sea 0.6 m y que la profundidad en la entrada no debe ser menor de 0.3 m. Con profundidades mayores a 0.6 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse. Se recomienda que los lechos se construyan con al menos 0.5 m de cabeza sobre la superficie del lecho. Para lechos pequeños, esta puede reducirse.
13. Medio. Cuando se utilice grava como medio que carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.

### E.3.5.3.3 Operación y mantenimiento

Se recomienda que la superficie del humedal se cubra con vegetación. La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal. Se deben usar dos celdas en serie. Las celdas deben ser impermeabilizadas para evitar la infiltración. Es esencial que las raíces tengan siempre acceso a agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), se recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho.

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

### Propiedades físicas del Agua

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica ×10 <sup>3</sup> (N*s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática ×10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s)
0	999,8	1,781	1,785
5	1.000,0	1,518	1,519
10	999,7	1,307	1,306
15	999,1	1,139	1,139
20	998,2	1,102	1,003
25	997,0	0,890	0,893
30	995,7	0,708	0,800
40	992,2	0,653	0,658
50	988,0	0,547	0,553
60	983,2	0,466	0,474
70	977,8	0,404	0,413
80	971,8	0,354	0,364
90	965,3	0,315	0,326
100	958,4	0,282	0,294

### Características hidráulicas de sustratos comúnmente usados en humedales artificiales

Tipo de material	Tamaño efectivo D <sub>10</sub> (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

## Anexo D

## Clasificación ambiental de las infecciones relacionadas con excretas y el agua

## 4. Clasificación ambiental de las enfermedades infecciosas

A FINES de 1970 se empezó a estudiar las enfermedades infecciosas con un mayor énfasis en las estrategias más adecuadas para su control. Desde este punto de vista, las enfermedades se clasifican por sus vías de transmisión y su ciclo, a diferencia de la clasificación biológica clásica que agrupa a las enfermedades según el agente: virus, bacteria, protozooario o helminto (Feachem et al., 1983a). A partir de estas clasificaciones, la comprensión de la transmisión de las enfermedades relacionadas con el saneamiento se constituye en un instrumento para planificar las intervenciones con el fin de optimizar su impacto en la salud.

La clasificación ambiental de las infecciones relacionadas con el agua, según Cairncross & Feachem (1900), es producto de la comprensión de los mecanismos de transmisión que se agrupan en cuatro categorías:

- *transmisión hídrica*: se produce cuando el patógeno se encuentra en el agua ingerida;
- *transmisión relacionada con la higiene*: aquella que puede ser interrumpida por prácticas de higiene personal y doméstica;
- *transmisión basada en el agua*: cuando el patógeno desarrolla parte de su ciclo vital en un animal acuático;
- *transmisión por un insecto vector*: cuando los transmisores son los insectos que se reproducen en el agua o cuya picadura se produce cerca a ésta.

**Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)**

CATEGORÍA	INFECCIÓN
1. Fecal-oral (transmisión hídrica o relacionada con la higiene)	Diarreas y disentería Disentería amébrica Balantidiasis Enteritis campylobacteriana Cólera Diarrea por <i>Escherichia coli</i> Giardiasis Diarrea por rotavirus Salmonelosis Disentería bacilar Fiebres entéricas Fiebre tifoidea Fiebre paratifoidea Poliomielitis Hepatitis A Leptospirosis Ascariasis Tricuriasis
2. Relacionada con la higiene	
a) Infecciones de la piel y ojos	Enfermedades infecciosas de la piel Enfermedades infecciosas de los ojos
b) Otras	Tifo transmitido por pulgas Fiebre recurrente transmitida por pulgas
3. Basada en el agua	
a) Por penetración en la piel	Esquistosomiasis
b) Por ingestión	Difilobotriasis y otras infecciones por helmintos
4. Transmisión por insecto vector	
a) Picadura cerca al agua	Enfermedad del sueño
b) Reproducción en el agua	Filariasis Malaria Enfermedades por arbovirus Fiebre amarilla Dengue

## Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

Tomando en cuenta los mecanismos de transmisión, la clasificación ambiental de las enfermedades relacionadas con el agua presenta cuatro categorías que se muestra en el cuadro 3.

Con el mismo enfoque, se desarrolló una clasificación ambiental de infecciones relacionadas con las excretas. En esta clasificación se parte del concepto de que en el proceso de transmisión de una enfermedad originada por excretas influyen las siguientes variables:

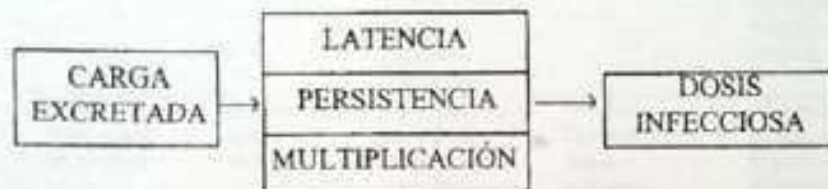


Figura 11. Factores que intervienen en la transmisión de las infecciones

Fuente: Feachem et al. (1983)

El cuadro 5 reproduce la caracterización de las seis categorías que componen la clasificación ambiental de las infecciones relacionadas con las excretas.

En cuanto a la clasificación de las enfermedades transmisibles relacionadas con los residuos, Mara & Alabaster (1995) proponen dos categorías presentadas en el cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación ambiental de las enfermedades relacionadas con los residuos

CATEGORÍA	ENFERMEDADES	CONTROL
1. Enfermedades relacionadas con insectos vectores	Infecciones transmitidas por moscas o cucarachas Filariasis Tuberculosis	Mejora del acondicionamiento y recolección de residuos Control de insectos
2. Enfermedades relacionadas con roedores	Peste Leptospirosis Otras enfermedades relacionadas con la vivienda, agua y excretas transmitidas por roedores	Mejora del acondicionamiento y recolección de residuos Control de roedores

Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)


CATEGORÍA	CARACTERÍSTICA EPIDEMIOLÓGICA	INFECCIÓN	VÍA DOMINANTE DE TRANSMISIÓN	PRINCIPALES MEDIDAS DE CONTROL
1. Enfermedades fecal-orales no bacterianas	No latentes Baja dosis infecciosa	Enterobiasis Infecciones por enterovirus Himenolepsias Amibiasis Giardiasis Balantidiasis	Personal Doméstica	Abastecimiento doméstico de agua Educación sanitaria Mejora de viviendas Instalación de letrinas
2. Enfermedades fecal-orales bacterianas	No latentes Medio o alta dosis infecciosa Moderadamente persistentes Capaces de multiplicarse	Fiebre tifoidea y paratifoidea Salmonelosis Disenteria bacilar Úlcera Diarrea por <i>E. Coli</i> Enteritis por campylobacter	Personal Doméstica Agua Alimentos	Abastecimiento doméstico de agua Educación sanitaria Mejora de viviendas Instalación de letrinas Tratamiento de las excretas antes de la disposición o reúso
3. Helmintos del suelo	Latentes Persistentes Sin huésped intermediario	Ascariasis Tricuriasis Anquilostomiasis	Jardín Campos Agricultura	Instalación de letrinas Tratamiento de las excretas antes de la aplicación en el terreno
4. Ternas	Latentes Persistentes Con huésped intermediario	Ternas	Jardín Campos Pastizales	Instalación de letrinas Tratamiento de excretas antes de la aplicación en el terreno Cocción, inspección de la carne
5. Helmintos del agua	Latentes Persistentes Con huésped intermediario	Triquinosis y otras enfermedades provocadas por helmintos	Agua	Instalación de letrinas Tratamiento de excretas antes de la disposición en el agua Control del reservorio animal
6. Enfermedades transmitidas por insectos	Insectos vectores relacionados con las excretas	El zanzano y todas las infecciones mencionadas en las categorías 1 a 5, en donde las moscas y las cucarachas pueden ser vectores	Varios lugares contaminados por heces, en donde se reproducen los insectos	Identificación y eliminación de los lugares adecuados para la reproducción

# Evaluación de la eficiencia de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) (San Juan de Pasto – Colombia)

## Anexo E

### Resultados de calidad de agua de los sistemas sépticos existentes

UNIVERSIDAD DE NARIÑO SECCION DE LABORATORIOS		CÓDIGO:			
5. REPORTE DE RESULTADOS		PÁGINA:			
FECHA EMISIÓN RESULTADOS: 12/03/2009		VERSION:			
REPORTE No: LAQ-09-77		VIGENTE A PARTIR DE:			
FECHA EMISIÓN RESULTADOS: 12/03/2009		Sep-08			
<b>DATOS USUARIO</b> Solicitante: PAOLO ALEXANDER MENA Dirección: HZA 10 CASA 5 TAMASAGRA 1 Teléfono: 3007851744 cel: 32751655 e-mail: ples_82mena@unariño.edu		<b>DATOS MUESTRAS</b> Tipo de Muestra: AGUA RESIDUAL Tipo de Muestra: SIMPLE Sitio de Toma: CORREGIMIENTO SANFERNANDO - SECTOR SAN FERNANDO ALTO - MUNI DE PASTO - EXTERNO ING. PAOLO MENA Responsable del Muestreo: Fecha de Muestreo: 04/03/2009 Fecha Recepción Muestra en Laboratorio: 04/03/2009			
TIPO DE ANALISIS SOLICITADOS		FISICOQUIMICO AGUA RESIDUAL			
Código Muestra <b>LAQ-09-239</b>		DESCOLE CAMARA SEPTICA - CASA HABITACION - RAIL MATARANCHÓY -			
PARAMETRO	METODO	TECNICA	UNIDAD DE MEDIDA	UNIDAD DE DETECCION	CODIGO MUESTRA <b>LAQ-09-239</b>
PH	ETANDEA METODO EDICION No 17 490 - H	ELECTROMETRICA	UPE	-	7,21
SOLIDOS TOTALES	ETANDEA METODO EDICION No 17 296 - B	GRAVIMETRICA	mg/L	-	221
SOLIDOS DISUELTOS	ETANDEA METODO EDICION No 17 296 - B	GRAVIMETRICA	mg/L	-	139
SOLIDOS SUSPENDIDOS	ETANDEA METODO EDICION No 17 296 - B	GRAVIMETRICA	mg/L	-	82
SOLIDOS SEDIMENTABLES	ETANDEA METODO EDICION No 17 296 - B	GRAVIMETRICA	mg/L	-	0,4
FOSFORO TOTAL	ETANDEA METODO EDICION No 17 490 - H	ESPECTROFOTOMETRICA	mg P/PO4 L	0,1	0,37
NITROGENO NTC	ETANDEA METODO EDICION No 17 490 - H	ESPECTROFOTOMETRICA	mg N/L	-	35,8
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	ETANDEA METODO EDICION No 17 226 - B	ESPECTROFOTOMETRICA	mg O2/L	-	125
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	ETANDEA METODO EDICION No 17 226 - B	ELECTROMETRICA	mg O2/L	0,1	125
COLIFORMES TOTALES	ETANDEA METODO EDICION No 17 502 - B	PL. T. & MEMBRANA	UFC/100ml	-	120000
ECHEMIONA COLI	ETANDEA METODO EDICION No 17 502 - B	PL. T. & MEMBRANA	UFC/100ml	-	100000
OBSERVACIONES	<LD BAJO DEL LIMITE DE DETECCION				

  
 MARY LUZ VALENCIA ENRÍQUEZ  
 Química PQ - 1748 CPQ  
 Técnico Laboratorio de Aguas

Nuestro Compromiso Universitario es la Excelencia  
 Calle Universitaria - Torobajo - Teléfono 7313850 - 7311449 fax 222 - 256 7466w 7314077 - AA. 1175 y 1176