



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 19 de Junio de 2020

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

LEIDY ANDREA LOSADA GALINDO, con C.C. No. 26.552.448 de Rivera

ADRIANA MARCELA FERNANDEZ RAMIREZ, con C.C. No. 1075209951 de Neiva

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado Titulado “ **Fitorremediación. Una Alternativa Sostenible a la Problemática Ambiental Generada por las Aguas Residuales Porcinas en las Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila**” presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental; autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Firma:



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Fitorremediación. Una Alternativa Sostenible a la Problemática Ambiental Generada por las Aguas Residuales Porcinas en las Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
LOSADA GALINDO	LEIDY ANDREA
FERNÁNDEZ RAMÍREZ	ADRIANA MARCELA

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VALENCIA GRANADA	EDUARDO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MAGÍSTER EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2020 NÚMERO DE PÁGINAS: 107

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas_X__ Fotografías_X__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros_X__

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Rivera-Huila	Rivera – Huila	6. _____	_____
2. Fitorremediación	Phytoremediation	7. _____	_____
3. Aguas Residuales Porcinas	Swine wastewater	8. _____	_____
4. _____	_____	9. _____	_____
5. _____	_____	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Resumen

Se realizó la evaluación de un sistema piloto de fitorremediación compuesto de un sedimentador primario y tres canales sembrados con macrófitas (S1= Sedimentador + Canal sembrado con *Pistia Stratiotes*; S2= Sedimentador + Canal sembrado con *Eichhornia Crassipes* y S3= Sedimentador + Canal sembrado con *Lemna minor*), para el tratamiento de las aguas residuales generadas de la actividad porcícola de la Institución Educativa Núcleo Escolar el Guadual del



Municipio de Rivera.

Luego de la estabilización del montaje (fijación de microorganismos y adaptación del material vegetal) y por un periodo de tres meses, se suministró a los sistemas (S1, S2 y S3) agua residual porcícola a razón de $Q = 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$; con el fin de valorar la remoción de los parámetros objeto de estudio (DBO_5 , SST, PT, NT). Las remociones promedio para cada parámetro estudiado fueron: Para DBO_5 : S1=94,04%, S2= 86,91% y S3= 94,72%; para SST: S1=94,99%, S2=91,94% y S3=96,78%; para PT: S1=58,15%, S2=56,10% y S3=54,34% y para NT: S1=67,32%; S2=38,09% y S3=46,39. Lo que nos indica que Sistemas de Tratamiento que contemplan como tratamiento secundario canales sembrados con macrófitas es una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales porcinas.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Abstract

The evaluation of a pilot phytoremediation system consisting of a primary settler and three channels seeded with macrophytes was carried out (S1 = Settler + Channel seeded with *Pistia Stratiotes*; S2 = Settler + Channel seeded with *Eichhornia Crassipes* and S3 = Settler + Channel seeded with *Lemna minor*), for the treatment of wastewater generated from the pig activity of the Núcleo Escolar Educational Institution the Guadual of the Municipality of Rivera.

After the stabilization of the assembly (fixation of microorganisms and adaptation of the plant material) and for a period of three months, the systems (S1, S2 and S3) were supplied with porcine residual water at a rate of $Q = 0.01 \text{ m}^3/\text{día-1}$; in order to assess the removal of the parameters under study (BOD5, SST, PT, NT). The average removals for each parameter studied were: For BOD5: S1 = 94.04%, S2 = 86.91% and S3 = 94.72%; for SST: S1 = 94.99%, S2 = 91.94% and S3 = 96.78%; for PT: S1 = 58.15%, S2 = 56.10% and S3 = 54.34% and for NT: S1 = 67.32%; S2 = 38.09% and S3 = 46.39. Which indicates that Treatment Systems that contemplate as secondary treatment channels sown with macrophytes is a good alternative for the treatment of swine wastewater.



APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: MSc. LUZ MARINA BOTERO ROJAS

Firma:

Nombre Jurado: MSc. ANGELA GORETTY GARCÍA GÓMEZ

Firma:

Nombre Jurado: MSc. LUZ MARINA BOTERO ROJAS

Firma:

Fitorremediación. Una Alternativa Sostenible a la Problemática Ambiental Generada por las Aguas Residuales Porcinas en las Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila.

Leidy Andrea Losada Galindo

Adriana Marcela Fernández Ramírez

Universidad Surcolombiana

Notas del autor

Leidy Andrea Losada Galindo, Adriana Marcela Fernández R, Facultad de Ingeniería,

Universidad Surcolombiana

Este proyecto de investigación fue financiado con recursos propios

La correspondencia relacionada con el proyecto debe ser dirigido a Leidy Andrea Losada Galindo, Adriana Marcela Fernández R, Carrera 11 No. 3-52 Rivera Huila Colombia, E-mail: tita220885@hotmail.com,nantafer@hotmail.com,Director: Ingeniero Eduardo Valencia Granada

M.Sc.

La presente tesis está dedicada primero que todo a Dios padre celestial forjador de mi camino, a mis padres porque son ellos quien me brindan un amor incondicional y con su apoyo me han permitido culminar un ideal.

A mi esposo Duber Losada Losada por su amor, paciencia, comprensión, confianza y consejos para seguir adelante.

A mi familia, a esos verdaderos amigos, y demás personas que de una u otra manera han contribuido con el logro de mis objetivos

A mi amigo Oscar Fabián Artunduaga Cuellar quien compartió su conocimiento y con sus palabras de aliento fue un apoyo importante para terminar esta etapa.

Leidy Andrea Losada Galindo

Esta tesis se la dedico con todo mi amor a mis hijos, por ser mi mayor motivación para salir adelante, a mi esposo Nicolás Zea Cardozo, por su paciencia, esfuerzo y por brindarme su apoyo incondicional y creer en mis capacidades, a pesar de los momentos difíciles que hemos afrontado en la vida.

A mis compañeros y amigos quienes sin esperar nada a cambio me brindaron desinteresadamente su conocimiento y fortaleza para entender que jamás debemos desistir de los propósitos de Dios.

Adriana Marcela Fernández Ramírez

Agradecimientos

En primer lugar expresar nuestro más sincero agradecimiento al director de esta tesis, Ingeniero Eduardo Valencia Granada MSc, por la dedicación, disposición, asesoría y apoyo brindado a este trabajo de investigación y al ingeniero Oscar Fabián Artunduaga Cuellar MSc por su asesoría y apoyo durante todo este proceso.

A la Universidad Surcolombiana, al Ingeniero Néstor Enrique Cerquera Peña MSc, coordinador de la Maestría y al ingeniero Nelson Gutiérrez Guzmán PhD por su asesoría.

A las Instituciones Educativas Agropecuarias del Huila en especial a la Institución Educativa Núcleo Escolar el Guadual en cabeza del rector Hernán Tejada Ossa por su apoyo y espacio brindado dentro de la Institución para el desarrollo del proyecto. Al laboratorio Diagnosticamos S.A.S de la ciudad de Neiva quienes nos brindaron todo su conocimiento.

A todo el cuerpo de docentes y administrativos de este programa que hicieron posible la culminación de este proceso. A todas esas personas que con su apoyo permitieron el desarrollo de este proyecto de investigación.

Leidy Andrea Losada Galindo

Dios, tu bondad y tu amor no tienen límites, me permites sonreír cuando alcanzo mis logros, los cuales son el resultado de tu presencia. Este trabajo debe de ser reconocido como una labor conjunta llevada a cabo por mi compañera Leidy Andrea Losada Galindo, mi asesor de tesis Eduardo Valencia, a quien le debemos todo el alcance proyectado en ese documento y gran parte del aprendizaje de la investigación desarrollada, al Ingeniero Oscar Artunduaga Cuellar,

quien fue un apoyo constante para la consolidación de las ideas metodológicas, a los directivos, docentes y estudiantes de las instituciones educativas agropecuarias del departamento del Huila, quienes amablemente abrieron sus mentes a nuestra propuesta, y finalmente a una parte esencial de mi vida, mi familia, por su apoyo y motivación constante. A todos y cada una de las personas que se involucraron directa o indirectamente en este trabajo mis más sinceros agradecimientos por su paciencia, conocimiento y compromiso para poder llevar a cabalidad un producto que impactará y aportará positivamente a nuestro medio ambiente y a nuestra comunidad en general.

Adriana Marcela Fernández Ramírez

Resumen

Se realizó la evaluación de un sistema piloto de fitorremediación compuesto de un sedimentador primario y tres canales sembrados con macrófitas (S1= Sedimentador + Canal sembrado con *Pistia Stratiotes*; S2= Sedimentador + Canal sembrado con *Eichhornia Crassipes* y S3= Sedimentador + Canal sembrado con *Lemna minor*), para el tratamiento de las aguas residuales generadas de la actividad porcícola de la Institución Educativa Núcleo Escolar el Guadual del Municipio de Rivera.

Luego de la estabilización del montaje (fijación de microorganismos y adaptación del material vegetal) y por un periodo de tres meses, se suministró a los sistemas (S1, S2 y S3) agua residual porcícola a razón de $Q= 0,01 \text{ m}^3.\text{día}^{-1}$; con el fin de valorar la remoción de los parámetros objeto de estudio (DBO₅, SST, PT, NT). Las remociones promedio para cada parámetro estudiado fueron: Para DBO₅: S1=94,04%, S2= 86,91% y S3= 94,72%; para SST: S1=94,99%, S2=91,94% y S3=96,78%; para P_T: S1=58,15%, S2=56,10% y S3=54,34% y para N_T: S1=67,32%; S2=38,09% y S3=46,39. Lo que nos indica que Sistemas de Tratamiento que contemplen como tratamiento secundario canales sembrados con macrófitas es una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales porcinas.

Keywords: Rivera-Huila, Fitorremediación, Aguas residuales porcinas.

Abstract

The evaluation of a pilot phytoremediation system consisting of a primary settler and three channels seeded with macrophytes was carried out (S1 = Settler + Channel seeded with *Pistia Stratiotes*; S2 = Settler + Channel seeded with *Eichhornia Crassipes* and S3 = Settler + Channel seeded with *Lemna minor*), for the treatment of wastewater generated from the pig activity of the Núcleo Escolar Educational Institution the Guadual of the Municipality of Rivera.

After the stabilization of the assembly (fixation of microorganisms and adaptation of the plant material) and for a period of three months, the systems (S1, S2 and S3) were supplied with porcine residual water at a rate of $Q = 0.01 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$; in order to assess the removal of the parameters under study (BOD5, SST, PT, NT). The average removals for each parameter studied were: For BOD5: S1 = 94.04%, S2 = 86.91% and S3 = 94.72%; for SST: S1 = 94.99%, S2 = 91.94% and S3 = 96.78%; for PT: S1 = 58.15%, S2 = 56.10% and S3 = 54.34% and for NT: S1 = 67.32%; S2 = 38.09% and S3 = 46.39. Which indicates that Treatment Systems that contemplate as secondary treatment channels sown with macrophytes is a good alternative for the treatment of swine wastewater.

Keywords: Rivera-Huila, Phytoremediation, Swine wastewater.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	14
2. Marco Conceptual.....	16
2.1. Producción Porcina.	16
2.2. Porcicultura y Ambiente.....	17
2.3. Fitorremediación	21
2.4. Vegetación Utilizada en Fitorremediación.....	25
2.4.1. Eichhornia Crassipes.....	26
2.4.2. Lemna Minor	27
2.4.3. Cyperus Papyrus.	28
2.4.4. Phragmites Australis	29
2.4.5. Pistia Stratiotes.....	30
2.5. Sistemas de Tratamiento con Fitorremediación	31
2.5.1. Humedales Artificiales.....	31
2.5.2. Albercas Biológicas	35
2.5.3. Lagunas con Plantas Acuáticas.....	36
2.6. Antecedentes del Tratamiento de Aguas Residuales Porcinas.....	37
3. Justificación.....	42
4. Objetivos.....	43
4.1. Objetivo General	43
4.2. Objetivos Específicos.....	43
5. Metodología.....	44
5.1. Localización.	44
5.2. Diagnóstico Ambiental de porcicultura en Colegios Agropecuarios del Huila.	45
5.2.1. Valoración de Impactos Ambientales.	46

5.3.	Diseño y construcción del Sistema Piloto de Fitorremediación.....	47
5.3.1.	Sedimentador primario.....	47
5.3.2.	Material vegetal, adaptación y siembra	49
5.3.3.	Diseño de los Canales.	51
5.3.4.	Agua residual porcina, caracterización y dosificación	51
5.3.5.	Alimentación del Sistema	52
5.4.	Parámetros Evaluados	53
5.4.1.	Parámetros in situ.....	54
5.4.2.	Parámetros ex situ.	54
5.4.3.	Análisis de Laboratorio.....	55
5.4.4.	Análisis de Resultados	56
6.	Resultados.....	57
6.1.	Diagnóstico Ambiental de la Porcicultura en las Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila.....	57
6.1.1.	Estado Actual	57
6.1.2.	Valoración de Impactos	60
6.2.	La Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual de Rivera Huila.....	61
6.3.	Explotación porcina de la Institución Educativa.....	62
6.4.	Caracterización del Agua Residual Porcina.	63
6.5.	Contaminación producida por la porqueriza.	63
6.6.	Diseño, Construcción y Evaluación del Sistema Experimental Piloto	64
6.6.1.	Diseño.	66
6.6.2.	Construcción	69
6.6.3.	Evaluación de la Eficiencia del Sedimentador Primario.....	71
6.6.4.	Evaluación de la Eficiencia de Remoción en los Canales de Fitorremediación	72

6.6.5.	Evaluación de la Eficiencia de Remoción en los Sistemas Pilotos.....	76
6.7.	Proponer alternativas de sistemas de tratamiento para las aguas residuales porcinas de los colegios agropecuarios del departamento del Huila.....	79
6.7.1.	Rejillas o Cribado	79
6.7.2.	Tratamiento Primario	80
6.7.3.	Tratamiento Secundario	81
6.8.	Diseño del Sistema de Tratamiento de las Aguas Residuales Porcinas de la Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual.	84
6.8.1.	Dimensionamiento de Rejilla.	86
6.8.2.	Dimensionamiento del Sedimentador Primario	86
6.8.3.	Dimensionamiento del Canal de Fitorremediación.....	88
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	90
8.	Bibliografía.....	92

Listas de Figuras

Figura 1. Estrategias de fitorremediación.	23
Figura 2. Eichhornia crassipes	27
Figura 3. Lemna minor	28
Figura 4. Cyperus Papyrus.....	29
Figura 5. Phragmites Australis.....	30
Figura 6. Pistia stratiotes.....	31
Figura 7. Humedal Artificial de Flujo Superficial –HAFS-	32
Figura 8. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Horizontal –HAFSSH-	33
Figura 9. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Vertical –HAFSSV-.....	34
Figura 10. Corte longitudinal de una Alberca Biológica	35
Figura 11. Interacciones y Tipos de Lagunas	36
Figura 12. Sistema Piloto de Lagunas con Macrófitas	37
Figura 13. Sistema Piloto de Fitorremediación.....	44
Figura 14. Formato de encuesta diligenciada en Instituciones Educativas.....	45
Figura 15. Especificaciones Sedimentador	48
Figura 16 Sedimentador primario y recolección efluente de las porquerizas	48
Figura 17. Adaptación del material vegetal	50
Figura 18. Siembra del material vegetal en los canales del sistema piloto.....	50
Figura 19. Alimentación de los canales de fitorremediación con el agua residual.....	52
Figura 20. Dosificador de caudal	53
Figura 21. Recolección, transporte y conservación de las muestras.....	54
Figura 22. Aspecto de las aguas residuales en las Unidades del Sistema.....	55
Figura 23. Diagrama de entradas, procesos y salidas de la actividad porcícola.	57
Figura 24. Esquema de sistema piloto	65
Figura 25. Procesos llevados a cabo por cada unidad de tratamiento.....	65
Figura 26. Esquema del Sistema Experimental Piloto de fitorremediación	67
Figura 27. Sección transversal de los canales de fitorremediación	68
Figura 28. Construcción del Sedimentador Primario.....	69
Figura 29. Construcción de los Canales de Fitorremediación	69

Figura 30. Sistema Piloto de Fitorremediación en Funcionamiento.....	70
Figura 31. Remoción de contaminantes para T1, T2 Y T3.....	73
Figura 32. Dispersión de datos para DBO ₅ , N _T , P _T , CF y SST.....	73
Figura 33. Remociones para los sistemas objeto de estudios	77
Figura 34. Especificación del Cribado.....	79
Figura 35. Especificaciones del Sedimentador primario y biodigestor	81
Figura 36. Esquemas de Alternativas de tratamiento.....	83
Figura 37. Caudales agua residual porcina de Institución Educativa El Guadual	85
Figura 38. Especificaciones de Rejillas en I.E. El Guadual.....	86
Figura 39. Dimensiones Sedimentador Primario	87
Figura 40. Dimensiones del Canal de Fitorremediación.....	88
Figura 41. Propuesta en zig-zag del Canal de fitorremediación	87

Listas de Tablas

Tabla 1. Producción de Materia Fecal y Orina como proporción del peso vivo (%)	18
Tabla 2. Caracterización vertimientos porcícola	19
Tabla 3. Valores máximos permisibles para cría y beneficio porcino. Min. Ambiente (2015)....	20
Tabla 4. Procesos de Fitorremediación	22
Tabla 5. Ventajas y Limitaciones de uso de la Fitorremediación	24
Tabla 6. Plantas en Fitorremediación.....	26
Tabla 7. Criterios para la valoración del impacto	46
Tabla 8. Adaptación, tiempo y porcentaje de aguas para la adaptación del material vegetal.....	49
Tabla 9 Caracterización del agua residual porcina en Institución Educativa El Guadual	51
Tabla 10. Métodos utilizados para análisis de las muestras.....	55
Tabla 11. Instituciones Educativas con porcicultura en el Departamento del Huila	58
Tabla 12. Características de las porquerizas de las Instituciones Educativas.....	58
Tabla 13. Matriz de Importancia Ambiental en Porcicultura	60
Tabla 14. Valores medios de parámetros evaluados en agua residual porcina.....	63
Tabla 15. Valores de Carga contaminante (Kg/día) de la Institución Educativa El Guadual.....	64
Tabla 16. Remociones Teóricas de las unidades de tratamiento.	66
Tabla 17. Dimensiones de los canales de fitorremediación	68
Tabla 18. Remociones obtenidas en el Sedimentador	71
Tabla 19. Remociones de los canales de fitorremediación	72
Tabla 20. Medias de LSD para remoción de los canales de fitorremediación.....	74
Tabla 21. Remociones de los sistemas evaluados.....	76
Tabla 22. Medias de LSD para DBO ₅ , NT, PT, SST y CF.....	77
Tabla 23. Remociones Teóricas y Experimentales del Tratamiento Primario.....	80

Listas de Anexos

Anexo A. Formato de encuesta aplicado a las instituciones educativas objeto de estudio..... 104

1. Introducción

La porcicultura es una de las actividades agropecuarias que hoy en día se mantienen, generando, una de las principales fuentes de proteína consumidas por la población mundial. En Colombia, esta actividad data de la época colonial, pero fue en la década de los 70's que surgió la industrialización de la porcicultura (Min. Ambiente, 2002). Generando consigo, la creación de fuentes de empleo en diferentes regiones del país y el sustento económico a miles de agricultores, pero también, el surgimiento de diversos problemas de índole ambiental y social (Martínez et al, 2010).

Es importante analizar la relación entre las actividades productivas con el medio ambiente, pues la primera no puede conllevar la degradación de la segunda. Es claro que el tratamiento de desechos porcinos adquiere más importancia debido a la dimensión del problema, no solo por la intensificación de la producción, sino también, por la degradación de los recursos naturales, la proliferación de vectores, además, de los olores poco deseables por la incorrecta disposición o tratamiento de los residuos. Es por esta razón que un factor importante para la sustentabilidad en la producción porcina es el manejo adecuado de las excretas (Vicari, 2012)

Actualmente, las Autoridades Ambientales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible) son los entes encargados de realizar el control y vigilancia tanto a los vertimientos como disposición final de los residuos generados en la industria porcícola (a gran escala), sin embargo, se hace necesario encontrar alternativas eficientes, económicamente viables, de fácil construcción y mantenimiento para implementar en las pequeñas explotaciones porcinas y así, reducir la contaminación, la problemática social y de salud asociada.

En la medida en que se implementen soluciones y alternativas de tratamiento a los diferentes subproductos porcícola, los beneficiarios; entre otros, las comunidades rurales y educativas con enfoque agropecuario podrían establecerse como modelo a seguir, realizando un manejo adecuado a los residuos y vertimientos, disminuyendo el riesgo en el entorno y más aún la salud, ya que en este tipo de producción, genera altas cargas contaminantes.

Con el fin de proponer alternativas viables para el tratamiento de las aguas residuales generadas en la actividad porcícola a pequeña y mediana escala; se realizó la evaluación a escala piloto, tres especies vegetales: Buchón de agua (*Eichornia crassipes*), Lenteja de Agua (*Lemna Minor*) y Lechuga de Agua (*Pistia Stratiotes*) en la remoción de DBO₅, Nitrógeno Total, Fosforo Total, Sólidos Suspendidos y Coliformes Fecales. Dicho montaje se construyó en la Institución Educativa Núcleo Escolar el Guadual, ubicado en la Vereda el Guadual, Rivera – Huila.

Los resultados del Proyecto, servirán para retroalimentar la docencia en el Núcleo Escolar y en las demás instituciones agropecuarias del departamento del Huila, así como para posteriormente hacer extensión a la comunidad teniendo en cuenta que los educandos, docentes, padres de familia y comunidad educativa en general son ejes fundamentales dentro de las comunidades de cada municipio en el departamento, por lo cual pueden contribuir a la replicación de los resultados.

2. Marco Conceptual

2.1. Producción Porcina.

Según proyección realizada para el año 2018, el consumo de productos cárnicos a nivel mundial será de 336,2 millones de toneladas, de los cuales, el 36% corresponderían al consumo de carne de cerdo (FAO, 2018); convirtiéndose así, en la segunda carne más consumida en el mundo. En Colombia, para el año 2017, el consumo de carne porcina aumentó en un 9% respecto al año anterior (PorkColombia, 2018); quedándose así, con el tercer lugar de los productos cárnicos más consumidos después de la carne de pollo y de res que ocuparon el primero y segundo lugar respectivamente.

A cierre del año 2017, el beneficio porcino en Colombia llegó a 4.134.811 cabezas. Las regiones que cuentan con mayor participación en actividades asociadas a cría y beneficio del cerdo son: Antioquía (45%), Bogotá D.C. (20,9%), Valle del Cauca (16,2%), Risaralda (4,5%), Atlántico (2,8%), Caldas (1,9%), Quindío (1,8%), Meta (1,7%), Nariño (1,0%), Huila (1,0%), Santander (0,7%), Cundinamarca (0,5%), Boyacá (0,4%), Departamentos restantes (1,5%) (PorkColombia, 2018).

La demanda en consumo de carne y el aumento de las actividades pecuarias merecen una atención especial, pues en la cría de cerdo se concentra la generación de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la producción ganadera, además, de la contaminación de los recursos naturales y la afectación de la salud humana, a causa de los purines producidos por el ganado porcino (FAO, 2014).

2.2. Porcicultura y Ambiente

La contaminación de fuentes hídricas, suelos, gases efecto invernadero y pérdida de biodiversidad, por vertimientos generados por actividades antrópicas (industriales, pecuarias, agrícolas y demás), están afectando gravemente las fuentes hídricas de América Latina, poniendo en riesgo no solo la salud y la vida, sino también, los recursos naturales.(ONU, 2017).

Dentro de las actividades pecuarias se destaca la porcicultura que en las últimas décadas ha tomado mayor importancia en el sector agropecuario colombiano. La producción porcina es tal vez, una de las actividades agropecuarias más vigilada por las autoridades ambientales. (Machado et al., s.f.), debido a los daños causados a los recursos naturales y la salud. Por ello, es necesario tener o contar con sistemas de tratamiento viables, de fácil construcción y operación, eficientes y que cumplan con la legislación ambiental. (Arias et al., 2010).

El agua residual generada en la porcicultura; se caracteriza por ser una mezcla de residuos sólidos y líquidos que son arrastrados por el agua de lavado; conformado principalmente por excretas (heces y orina), desperdicios de alimentos, suelo, entre otras (Viancelli et al., 2013). La disposición inadecuada de estas aguas residuales puede generar deterioro de suelos, contaminación de aguas subterráneas y superficiales (Arias et al. 2010; Antezana et al., 2016) y afectaciones a la salud humana; debido a las altas concentraciones en materia orgánica (Sánchez et al., 2005; Bosco et al., 2016) y la presencia de microorganismos patógenos (Sánchez et al., 2005). Desafortunadamente, las tecnologías encargadas de tratar o disponer los residuos generados en esta actividad no van a la par con dicho crecimiento. (Pietra & Drucker, 2000).

Dicha caracterización de residuos sólidos (excretas porcinas) identificada dentro de la Guía Ambiental para el subsector porcícola (2002) expresa lo siguiente: “La orina representa

aproximadamente el 45% de la excreta y las heces el 55%”. Esta tasa de producción de excretas porcinas se puede ver afectada por varios factores, en los que se pueden destacar: Edad del animal, madurez fisiológica, cantidad y calidad de alimento ingerido, volumen de agua consumida y clima (Guía Ambiental para el subsector porcícola, 2002).

La producción de porquinaza se cuantifica en términos de cantidades de excretas generadas por día y por animal (CEGA, 2008). Se puede expresar cantidad de heces que produce un cerdo (Kg de heces / 100 Kg de PV; PV = peso vivo). A continuación, en tabla 1 se muestra.

Tabla 1. Producción de Materia Fecal y Orina como proporción del peso vivo (%)

<i>Estado</i>	<i>Promedio</i>	<i>Rango</i>	<i>Peso x kg/animal</i>	<i>Estiércol kg/cab/día</i>
Hembra vacía	4,61	3,3 – 6,4	160	7,38
Hembra gestante	3,00	2,7 – 3,2	180	5,40
Hembra lactante	7,72	6,0 – 8,9	190	14,67
Macho reproductor	2,81	2,0 – 3,3	200	5,62
Lechón lactante	8,02	6,8 – 10,9	3,5	0,28
Precebos	7,64	6,6 – 10,6	16	1,22
Levante	6,26	5,9 – 6,6	35	2,19
Finalización	6,26	5,7 – 6,5	80	5,01

Kg/cab/día: Cantidad promedio en kilogramos de estiércol producido por cabeza porcícola.
Fuente: Guía Ambiental para el subsector porcícola, (2002)

Garzón-Zúñiga & Buelna, (2014) mencionan los graves problemas ambientales y sociales debido a la contaminación de las aguas y del suelo en zonas de influencia de la actividad porcícola que, además, son acompañados de olores desagradables y proliferación de vectores. Otros estudios; tales como de Cervantes et al., (2007), reportan el impacto ambiental ocasionado por la actividad porcícola realizada de forma intensiva plantean diferentes estrategias para la

disminución de las afectaciones medioambientales ocasionadas por este sector. Por otra parte, Restrepo, (1995) y Martínez et al., (2015) manifiestan la crítica situación que se está viviendo en zonas rurales en Colombia, por causa del mal manejo de las aguas residuales porcinas.

Garzón-Zúñiga & Buelna, (2014) mencionan la variación de la DQO; pues para una granja pequeña (la DQO varía entre 3478 y 9300 mg.L⁻¹); granjas medianas (la DQO entre 19344 y 38544 mg.L⁻¹); granjas grandes (la DQO entre 34310 y 40498 mg.L⁻¹). Cabe mencionar que el proceso productivo (Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014), ubicación (Beccaccia et al., 2015), cantidad de agua utilizada en la limpieza de las instalaciones y el manejo dado a los residuos (Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014), influyen y condicionan la concentración de contaminantes en los efluentes. Por ello, Suero-Sánchez (2016), realiza compilación de autores sobre caracterizaciones de aguas residuales porcinas. A continuación, en tabla 2, se muestran.

Tabla 2. Caracterización vertimientos porcícola

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>Autores de las caracterizaciones</i>					
		Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014	Buelna, citado por Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014	Paat, citado por Escalante, 2002	Garzón & Buelna, 2013	Perez, citado por Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014	Garzón-Zúñiga, citado por Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014
Grasas y Aceites	mg.L ⁻¹	-	-	550,10	-	-	-
DQO	mg.L ⁻¹	5330,00	-	32621,20	-	-	15462,00
DBO ₅	mg.L ⁻¹	-	13000,00	5496,03	7922,00	-	9320,00
Fósforo Total	mg.L ⁻¹	101,60	650,00	18,69	-	2226,00	-
Nitrógeno Total	mg.L ⁻¹	1018,00	2300,00	880,75	-	-	2080,00
SST	mg.L ⁻¹	3269,00	-	7554,80	-	-	1970,00
H. helminto	Huevo.L ⁻¹	-	-	-	-	-	-
Coliformes Termo-tolerantes	NMP/L	-	-	3,3 E+12	1,3 E +12	-	-

Fuente: Adaptado de Suero-Sánchez (2016)

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el ente encargado de controlar los vertimientos. Por ello, y con el fin de regular la cantidad de carga orgánica e inorgánica presente en las aguas residuales producto de actividades domésticas, industriales y agropecuarias, en 2015 expide la Resolución 631. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.” (Min. Ambiente, 2015). Dentro del artículo noveno (9) se establece los valores máximos permisibles en para la actividad de cría y beneficio porcino. A continuación, en tabla 3, se muestran.

Tabla 3. Valores máximos permisibles para cría y beneficio porcino. Min. Ambiente (2015)

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES	
		PORCINOS CRÍA	PORCINOS BENEFICIO
pH	Unidades de pH	6,00 – 9,00	6,00 – 9,00
DQO	mg.L ⁻¹ O ₂	900,00	800,00
DBO ₅	mg.L ⁻¹ O ₂	450,00	450,00
SST	mg.L ⁻¹	400,00	200,00
Solidos Sedimentables	MI/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg.L ⁻¹	20,00	30,00
SAAM (Sustancias activas al azul de metileno)	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de fósforo			
Fosforo Total	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Orto fosfato	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO ₃)	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂)	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
N. Amoniacal (N-NH ₃)	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg.L ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones			
Cloruros	mg.L ⁻¹		500,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg.L ⁻¹		500,00
Otros Parámetros para Análisis y Reporte			
Acidez Total	mg.L ⁻¹ CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg.L ⁻¹ CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg.L ⁻¹ CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg.L ⁻¹ CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real	M ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Fuente: Min. Ambiente, 2015

Es aquí, donde las llamadas tecnologías alternativas entran a jugar un papel preponderante en el tratamiento de las aguas residuales, pues además de ser métodos sencillos y eficientes, también suelen ser menos costosos en cuanto a operación y mantenimiento que los sistemas convencionales, además, suelen ser igualmente eficaces en la eliminación en la remoción de patógenos, metales pesados y nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo (Burton et al, 1995), el consumo energético es mínimo, los costos de mantenimiento son muy bajos y no se requiere de personal especializado para su operación. (Delgadillo, 2010). De estos, se destacan los humedales artificiales y albercas biológicas, sistemas sustentables que tienen como componente principal la fitorremediación y que son igual de eficaces para tratar aguas residuales.

2.3. Fitorremediación

La palabra fitorremediación se constituye de un prefijo griego *phyto*, que significa planta, y un subfijo latino *remedium*, que significa eliminar algo dañino. La fitorremediación compone una variación de las técnicas de biorremediación, pero se concreta en el uso de plantas y los microorganismos asociados a ellas, así como las enmiendas del suelo y técnicas agronómicas dirigidas a liberar, contener, o transformar en compuestos inocuos a los contaminantes del suelo. (López Lafuente, A. 2009).

Núñez et al, (2004) definen la fitorremediación como una tecnología emergente, sustentable, de bajo costo, ideal en la remediación de suelos, sedimentos, agua superficial y subterránea, que se basa en el uso de especies vegetales como principal agente descontaminador de sustancias peligrosas para el medio ambiente. En este proceso, las plantas son seleccionadas principalmente por su potencial fisiológico para tolerar y asimilar sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento, la profundidad de sus raíces y su habilidad para bioacumular y/o degradar

contaminantes. (Peña-Salamanca et al, 2013). Dicha descontaminación se da a través de seis (6) procesos básicos en los que las plantas pueden contribuir a la recuperación de suelos, sedimentos y aguas contaminadas. (Ortega, Benavides, Arteaga, & Zermeño, 2007). En la Tabla 4, se describen los procesos de fitorremediación.

Tabla 4. Procesos de Fitorremediación

<i>Tipo</i>	<i>Proceso Involucrado</i>	<i>Contaminación Tratada</i>
<i>Fitoextracción</i>	Las plantas se utilizan para concentrar los contaminantes en las partes cosechables	Diversas aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio y zinc.
<i>Rizofiltración</i>	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar los contaminantes y degradar compuestos orgánicos	Aguas contaminadas con cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc, isotopos radioactivos y compuestos fenólicos.
<i>Fitoestabilización</i>	Las plantas tolerantes se usan para reducir su movilidad y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.	Lagunas de desecho de yacimientos mineros, aguas residuales. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
<i>Fitoestimulación</i>	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromaticos, benceno, tolueno, atrazina, etc, aguas residuales agropecuarias.
<i>Fitovolatilización</i>	Las plantas captan y modifican los contaminantes o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Aguas residuales agropecuarias, aguas con mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
<i>Fitodegradación</i>	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Aguas residuales agropecuarias, municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: Tomado de Arias S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J. y Hernández, M. (2010).

En la figura 1, se muestran los procesos de fitorremediación mencionados anteriormente.

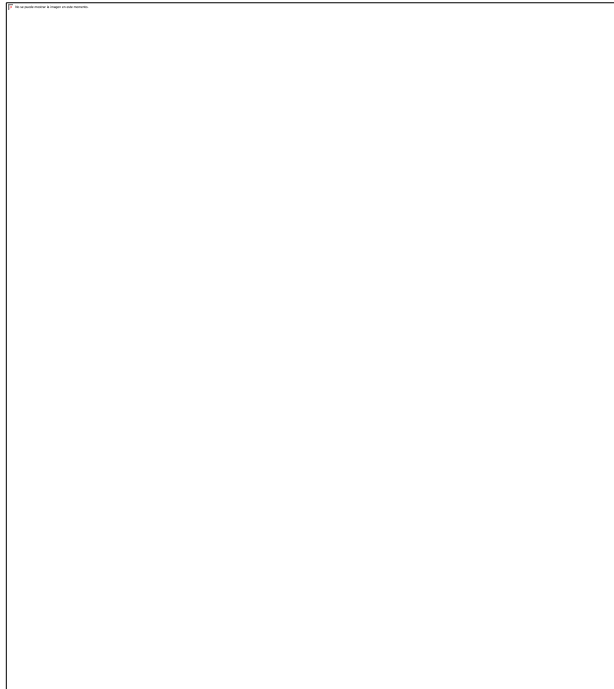


Figura 1. Estrategias de fitorremediación.

Fuente: Tomado de Favas, Pratas, Varun, D'Souza & Paul (2014)

También se viene trabajando con especies vegetales nativas o poco estudiadas en los procesos de fitorremediación (Bioprospección). Para Romero (2017) la bioprospección una estrategia de interés mundial y su desarrollo no solo basado en el descubrimiento de nuevas especies si no también, en la modificación estructural de los ya existentes, pueden dar solución a problemas de índole ambiental.

Delgadillo & López (2011) citado por Oquendo (2016) mencionan las ventajas y limitaciones en la implementación de la fitorremediación; estas observaciones pueden tenerse en cuenta a la hora de pensar utilizar esta tecnología o simplemente para comparar con los sistemas o tratamientos convencionales. En tabla 5 se plasman.

Tabla 5. Ventajas y Limitaciones de uso de la Fitorremediación

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden utilizar <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> • Las plantas pueden ser como sistemas extractores de bajo costos para la depuración de aguas y suelos contaminados (pueden llegar a ser hasta 10 veces más económicos que los métodos tradicionales). • Las plantas emplean energía solar, por ello, no hay consumo de combustible. • Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos, pues estas, ayuda o facilitan los procesos. • Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos • Es una metodología con buena aceptación pública 	<ul style="list-style-type: none"> • El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o a aguas poco profundas. • Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta. • La fitotoxicidad es un limitante en áreas fuertemente contaminadas • Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados • Deben considerarse contaminaciones potenciales de la cadena alimentaria y napas de agua. • Se requiere comprender mejor la naturaleza de los productos de degradación (Fitodegradación). • En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos

Fuente: Delgadillo – López, et al. (2011)

2.4. Vegetación Utilizada en Fitorremediación

El material vegetal juega un papel preponderante en la fito-remediación; pues es la encargada en gran medida de la remoción, adsorción y precipitación de nutrientes y contaminantes presentes en el agua residual a través del tallo, raíces y los rizomas. Las plantas utilizadas en estos tratamientos, deben ser tolerables a las altas cargas orgánicas, poseer un gran sistema de raíces y contribuir a la oxigenación de las zonas adyacentes a los rizomas y tener alta biomasa con el fin de aislar el sistema en época de invierno en regiones frías y templadas y para eliminación de nutrientes a través de la cosecha. (García, Morató & Bayona, 2004).

Las plantas contribuyen de muchas maneras en el tratamiento del agua residual; pues se destacan: estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo, promueven velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen o sedimenten, toman el carbono y demás nutrientes y los incorporan a los tejidos de la planta, transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos, proporciona espacios para la fijación de microorganismos, favorece la conductividad hidráulica, aireación de la rizósfera que permite el transporte de oxígeno en el sistema, liberación de diferentes sustancias entre ellas antibióticos para el control del plagas, entre otros. (Bondía, 2014; Romero, 2008; García & Corzo, 2008; Lara, 1999).

Diferentes especies vegetales se han estudiado e implementado en el tratamiento de aguas residuales y así, reducir la contaminación de cuerpos hídricos y suelo principalmente. Torres & Vásquez (2010) y Prasad (2004), realizan una compilación de las principales plantas utilizadas en fitorremediación y su potencial en la eliminación de contaminantes criterios de aguas residuales industriales. En la Tabla 6, se compilan especies vegetales tropicales utilizadas en la remoción de diferentes contaminantes criterios.

Tabla 6. Plantas en Fitorremediación

<i>Especie vegetal</i>	<i>Papel en fitorremediación</i>
<i>Alyssum sp</i>	Acumula Níquel
<i>Armoracia rusticata</i>	Retirar metales pesados
<i>Altriplex prostrata</i>	Retira sal del suelo
<i>Azolla pinnata</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro
<i>Brassica juncea, Cannabis sativa, Cardamonopsis hallerii</i>	Hiperacumuladora de metales
<i>Cyperus conglomeratus</i>	Remediación e hidrocarburos de petróleo
<i>Eucalyptus spp.</i>	Retira sodio y arsénico
<i>Eichornia crassipes</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio e hierro
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	Acumula plomo, cobre, cadmio e hierro
<i>Thypha spp.</i>	Volatilización del Selenio
<i>Heliconia Psittacorum</i>	Eliminamateria orgánica, Nitrógeno y Fósforo
<i>Lemna minor</i>	Acumula Plomo, Cobre, Cadmio Y hierro
<i>Phragmites australis</i>	Tratamiento de contaminantes orgánicos

Nota. Modificada de Prasad, 2004 y Torres & Vásquez, 2010

Dentro del material vegetal más utilizado en los procesos de fitorremediación se encuentran:

2.4.1. Eichhornia Crassipes. Pertenece a la familia Pontederiaceae, del grupo de las monocotiledóneas, ampliamente distribuido en el geotrópico; es considerada como una macrófita en la que sus raíces cuelgan por sobre el agua. Sus hojas forman roseta, sin hojas sumergidas y con pedúnculo largo (Valera, 2001). Sus raíces son de color similar a las flores y alcanzan longitudes superiores a los 40 cm, Su multiplicación se realiza fácilmente mediante la división de los estolones que la planta produce. Crece a una temperatura comprendida entre 16°C y 30°C, con un rango óptimo comprendido entre 20°C y 26°C., pH con tendencia neutra (6 a 8 unidades).

Para crecer necesita de iluminación intensa. (Malik, 2007; Pertuz & Brochero-Pertuz, 2008). En figura 2, se muestra *Eichhornia crassipes*. (Buchón de agua o Jacinto de agua).



Figura 2. *Eichhornia crassipes*

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5182956>

2.4.2. Lemna Minor. Denominado comúnmente como “Lenteja de agua”, pertenece a la familia Lemnaceae. Es una planta con una estructura plana, verde y una sola raíz delgada de color blanco, con un tamaño reducido, alcanzando de 2 a 4 mm de longitud y 2 mm de ancho. (Cook & Gut, 1974). Se ha encontrado en varias regiones de los hemisferios norte y sur, incluyendo América, Europa, Asia, Australia y Nueva Zelanda. Se encuentra principalmente en reservorios de agua dulce, ciénagas, lagos y ríos calmados (Armstrong 2003).

La planta puede desarrollarse en un rango amplio de temperaturas, que varía entre 5° y 30°C. Se adapta bien a cualquier condición de iluminación. Crece rápidamente en partes calmadas y ricas en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno (N) y fosfatos (PO₄). Con frecuencia el hierro (Fe) es un elemento limitante para el adecuado desarrollo de la planta. Pueden además tolerar un rango de pH amplio, siendo el óptimo entre 4,5 y 7,5 (Rook 2002).

En figura 3, se muestra *Lemna minor* (Lenteja de Agua).



Figura 3. **Lemna minor**

Fuente: https://www.researchgate.net/profile/Ulrich_Kutschera

2.4.3. Cyperus Papyrus. Conocidos popularmente como “papiro”, pertenecen a la familia Cyperaceae. Son especies con altura considerable (de 0,5 a 1,5 metros), son plantas que prosperan adecuadamente entre 6 y 8,5 unidades de pH, toleran temperaturas de 20 a 33 °C. Debido a la facilidad en su reproducción (ya sean por medio de sus rizomas y/o por producción de semillas), profundidad radical hasta de 0,4 metros, además, de soportar altos niveles de insolación y su adaptabilidad a suelos arenosos son muy utilizados en procesos de fitorremediación. (Hammel, Grayum, Herrera & Zamora, 2003; Pérez, Alfaro, Sasa & Agüero, 2013).

Actualmente junto con el *Phragmites Australis*, el *Cyperus Papyrus* son de las especies vegetales más utilizadas en Fitorremediación debido al potencial en la remoción de contaminantes y su gran adaptabilidad a diferentes suelos y aguas contaminadas.

En figura 4 se muestra *Cyperus Papyrus*.



Figura 4. *Cyperus Papyrus*

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31221918>

2.4.4. Phragmites Australis. Llamado comúnmente como “carrizo”, “carrillo”, “caña de río”, o “cañavera”, pertenecen a la familia de las Gramíneas o Poaceae, es una planta perenne. Esta especie vegetal llega a alcanzar alturas de 1,5 a 4 m, 2 cm de diámetro y profundidad radical cercana al metro de longitud, presenta una gran inflorescencia al final del tallo, suelen habitar en terrenos húmedos, prosperan en climas templados y cálidos 20-24°C, se adapta y se puede desarrollar sin problema en aguas residuales con pH ácidas o neutras entre (Celis, Junod & Sandoval, 2005; García, 2013).

El *Phragmites Australis* es una de las especies vegetales más utilizadas en procesos de biorremediación y en el tratamiento de aguas residuales industriales, agrícolas y domésticas; gracias a su fácil consecución, su efectividad y adaptabilidad a diferentes tipos de contaminantes.

En figura 5 se muestra *Phragmites Australis*.

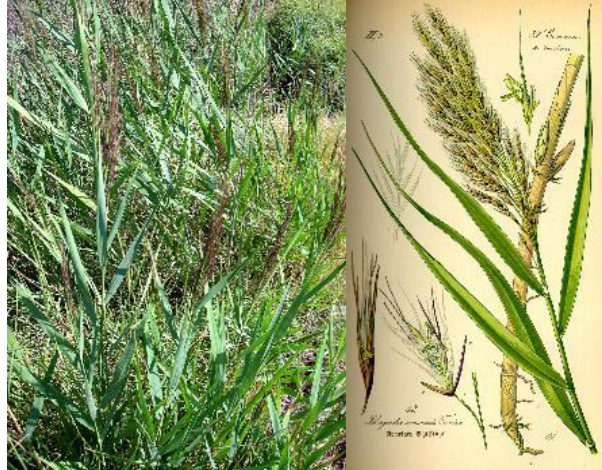


Figura 5. *Phragmites Australis*

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9547>

2.4.5. Pistia Stratiotes. Su nombre común es lechuga o repollito de agua. Pertenece a la familia de las Aráceas. Esta especie es la única que conforma el género *Pistia* dentro de las Aráceas y goza de una amplia distribución en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo. (Armstrong 2003). Tiene hojas flotantes modificadas en forma de roseta, de las cuales las centrales son aéreas. Tienen raíces bien desarrolladas, con caliptra pero sin pelos absorbentes, que sirven principalmente para asegurar el equilibrio de la planta sobre el agua. Su tamaño es de 5 a 20 cm de circunferencia aproximadamente.

Su propagación es por estolones, aunque también se puede propagar por semillas. Prospera en temperaturas comprendidas entre 17°C y 30°C, con iluminaciones muy altas. (Pertuz & Brochero-Pertuz, 2008).

En figura 6 se muestra *Pistia Stratiotes* (Lechuga de agua).



Figura 6. *Pistia stratiotes*

Fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6267287>

2.5. Sistemas de Tratamiento con Fitorremediación

2.5.1. Humedales Artificiales. García & Corzo (2008) definen los humedales artificiales como: “lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna”. García & Corzo (2008).

Bernal-López (2014), los definen como sistemas acuáticos diseñados con el fin de suplir las necesidades de tratamiento en los que se buscan aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que suceden en el agua, medio filtrante, macrófitas y la atmósfera. (Bernal-López, 2014). Dentro de estos procesos se destacan: biodegradación de la materia orgánica gracias a la presencia de microorganismos aerobios y anaerobios. (Delgadillo, 2010), remoción de metales pesados atribuida al fenómeno de precipitación y absorción. (Bernal-López, 2014), ajuste de pH y Remoción de sólidos suspendidos (SS) por sedimentación y filtración (Lara, 1999), entre otros.

Los humedales artificiales (García & Corzo, 2008; Villegas et al, 2006) se clasifican en dos grandes grupos: de flujo superficial y el de sub-superficial (horizontal y vertical).

Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS). Superficie de suelo en el que las macrófitas se encuentran inundadas de agua residual (AR). En estos humedales denominados de tipo superficial, el agua fluye sobre la superficie, cuentan con una profundidad no mayor a 0,45 m; presencia de vegetación emergente, flotante, sumergida o su combinación de ellas que se utilizan dentro de los humedales, con el fin de optimizar y/o mejorar la remoción de los contaminantes (Romero, 2008). En algunos casos, teniendo en cuenta la radiación solar y otros factores climáticos, porcentaje considerable de agua contenida dentro de los sistemas se pierde a través de la evapotranspiración, evaporación o percolación (Commission, 2000). Ver figura 7

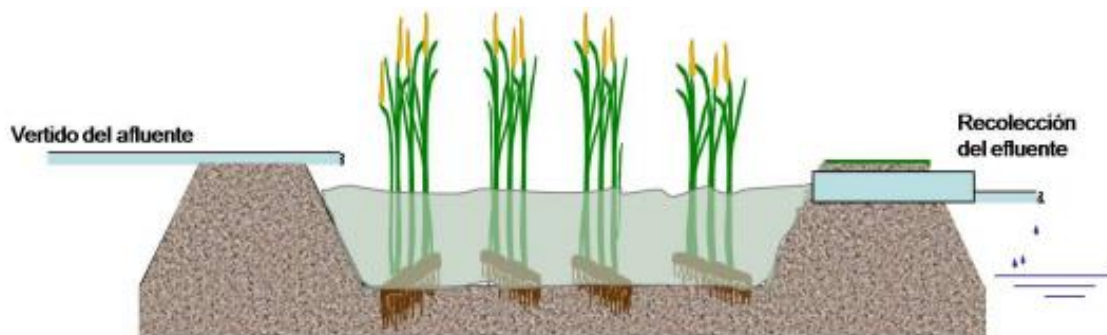


Figura 7. Humedal Artificial de Flujo Superficial –HAFS-

Fuente: García & Corzo (2008).

Humedal Artificial de Flujo Sub-Superficial (HAFSS). Estos sistemas son principalmente excavaciones poco profundas rellenos de material granular (grava, suelo, piedra o una combinación de estas), donde el agua circula por debajo de la superficie del medio de soporte, sembrado de plantas emergentes. La profundidad del medio en estos humedales de flujo sub-superficial tiene un rango de 0,30 a 0,90 m. (Lara, 1999), son considerados como reactores biológicos tipo “proceso bio-películas sumergida” (García, Morató & Bayona, 2004).

Los sistemas con flujo sub-superficial no generan malos olores durante el proceso de depuración, pero si llegasen a producir, esto sería un indicio que alguno de los procesos bioquímicos llevados dentro se limitaron por la falta de oxígeno (O_2) y ello, implica hacer modificaciones al respecto (Cooper, 2005).

• *HAFSS Flujo Horizontal*: El agua atraviesa el sistema (material de soporte, raíces y rizomas) de forma horizontal. La profundidad de la lámina de agua varía entre 0,30 y 0,90 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (García & Corzo, 2008). Trabajan con una alimentación continua (suministro continuo de agua residual –AR-). La recolección del agua ya tratada, se realiza en el extremo opuesto al de la alimentación. La altura de la lámina de agua y el tiempo de retención hidráulico (TRH) en el sistema es regulado mediante tuberías diseñadas para garantizar que el material de soporte siempre se encuentre inundado (Vymazal, 2006).

Los humedales construidos de flujo horizontal sub-superficial (HAFSS), han resultado ser una solución atractiva para tratar aguas residuales de comunidades rurales, municipales e industriales. (Romero, 2008), (García & Corzo, 2008), (Lara, 1999). Ver figura 8

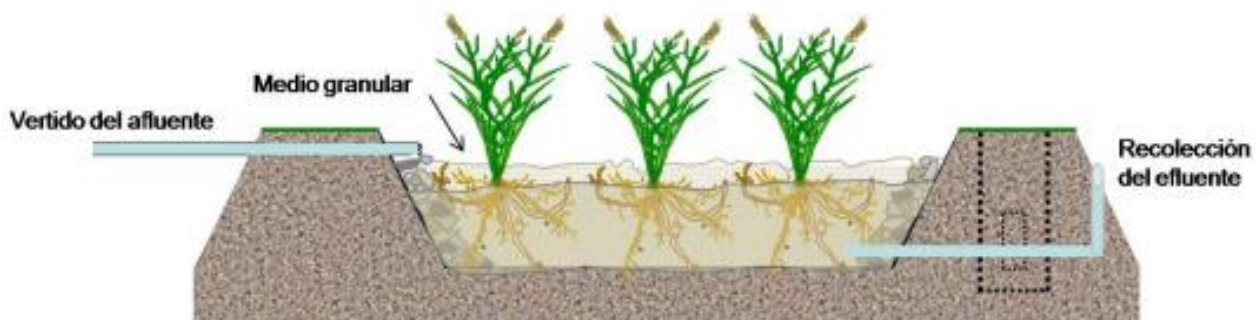


Figura 8. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Horizontal –HAFSSH-
Fuente: García & Corzo (2008).

• *HAFSS Vertical*: El suministro del agua residual en el sistema es por intervalos o por periodos de tiempo, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado.; facilitado el paso del aire por las unidades del sistema. Ver figura 9

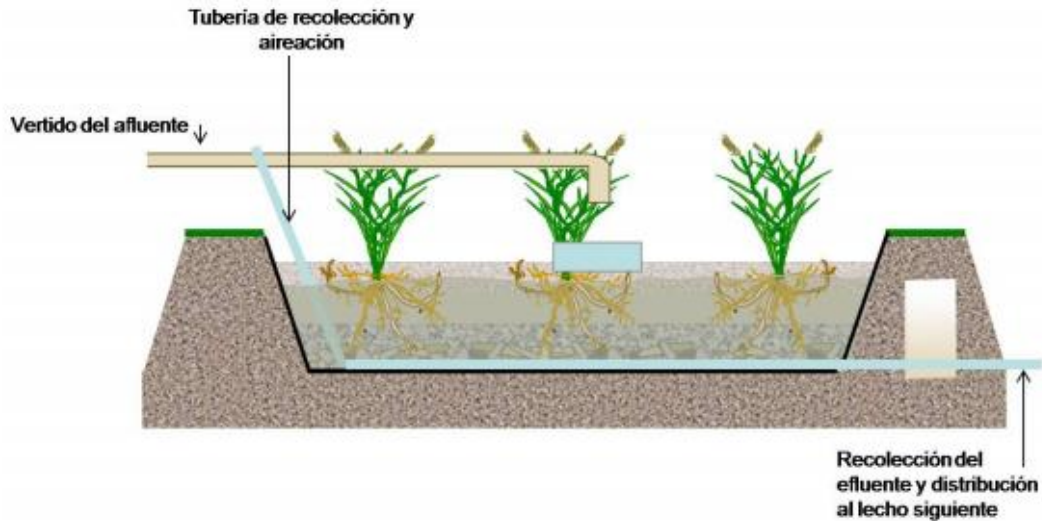


Figura 9. Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial Vertical –HAFSSV-
Fuente: García & Corzo (2008).

La profundidad del medio granular varía entre 0,50 y 0,80 m. Estos sistemas producen efluentes con mayor oxigenación debido a su flujo discontinuo y están libres de malos olores (García & Corzo, 2008). La alimentación o suministro del agua residual se debe realizar de forma uniforme en la superficie del humedal y la recolección se debe realizar al fondo del sistema. Aunque ocupan un área superficial menor que los horizontales, presentan inconvenientes, puesto que, su operación es más compleja, más costosa y no se han estudiados como los horizontales (Mena, Rodríguez, Núñez, & Villaseñor, 2000; Gallego, 2010).

2.5.2. Albercas Biológicas. Una alberca biológica es un sistema de tratamiento de aguas residuales, consistente en un tanque pequeño (generalmente construido en concreto), donde se siembran plantas flotantes (macrófitas) encargadas de optimizar la remoción de contaminantes. Este tanque está dividido en dos secciones o compartimientos, las plantas funcionan como medio de filtración y adsorción de sólidos suspendidos y contaminantes, el sistema radicular sobre el cual las bacterias crecen las cuales ayudan a realizar la limpieza a la planta; el sistema esta complementado con un filtro compuesto de piedra, grava y arena, en el cual se culmina el tratamiento del efluente proveniente de las albercas con macrófitas. (Medina, 2007). Ver figura 10.

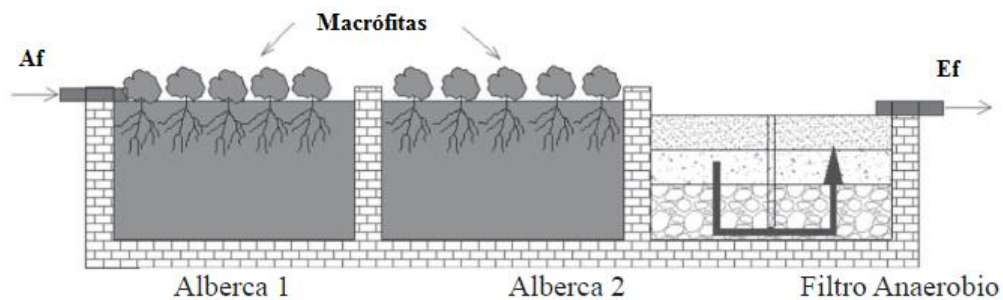


Figura 10. Corte longitudinal de una Alberca Biológica
Fuente: Adaptado de Valencia, Silva & Narvárez, (2010)

En la vereda Porvenir del Municipio de Pitalito, se construyó una Alberca Biológica para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en la finca la Chozza, en esta, se encontraron remociones de 28% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO_5 –, 47% para sólidos suspendidos, 39% para grasas y aceites (G y A) y del 90 % para Fósforo (Pinzón & Vélez, 2008). Asimismo, para una alberca biológica construida para el tratamiento de las aguas residuales porcinas de la Institución Educativa Agropecuaria El Tejar del municipio de Timaná–

Huila, se proyectaron remociones teóricas del 83% para DBO₅, 77% para SS, 68% para Nitrógeno, 67 % para Fósforo y 99,999% para Coliformes Fecales. (Medina, 2007).

2.5.3. Lagunas con Plantas Acuáticas. Son obras de ingeniería de tratamiento sencillos que se usan ampliamente en el país como una alternativa económica de tratamiento, consiste en una estructura simple para embalsar las aguas residuales domesticas con el objeto de mejorar sus características sanitarias (Manga et al, 2007), por medio de la interacción de la biomasa (principalmente bacterias, algas y macrófitas). La función real del proceso es estabilizar la materia orgánica y remover los patógenos de las aguas residuales realizando una descomposición biológica natural. (Manga et al., 2007) Describen en total cuatro (4) tipos de lagunas de estabilización: Anaerobias, Aerobias, Facultativas y de Maduración. A continuación, en figura 11 se muestran las interacciones y los tipos de Lagunas.

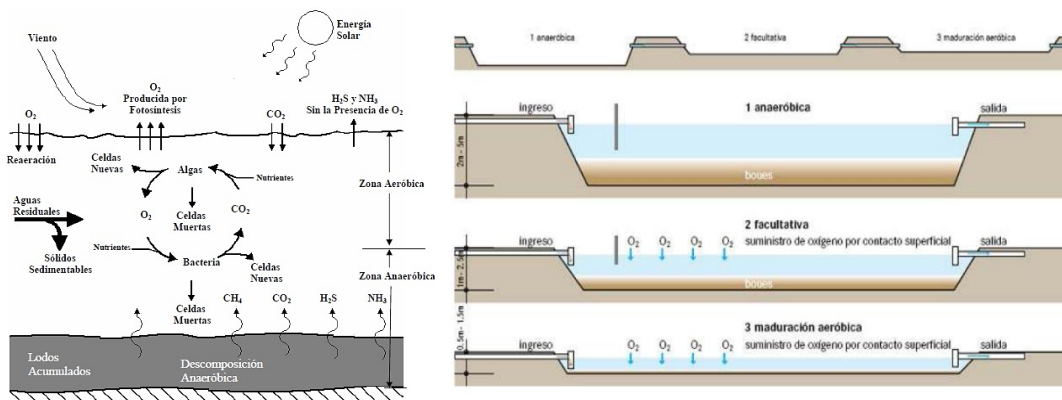


Figura 11. Interacciones y Tipos de Lagunas

Fuente: <https://www.iagua.es/sites/default/files/images/medium/lagunaje.png>

Chaux, Caicedo & Fernández, (2013). Evaluaron a escala piloto el desempeño de un sistema de lagunas en serie con *Azolla pinnata* (helecho de agua), para tratar las aguas residuales generadas en la cría de tilapia roja. Dicho sistema se construyó en Popayán-Caucay consistió en

dos líneas de cinco lagunas en serie; la primera con la macrófita a evaluar y la segunda sin la planta acuática; cada laguna se operó con un tiempo de detención de 24 horas. Ver figura 12.

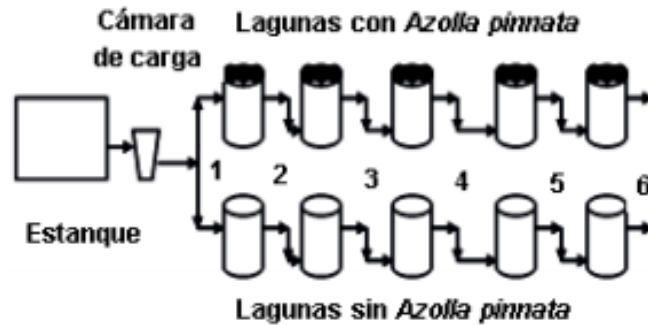


Figura 12. Sistema Piloto de Lagunas con Macrófitas

Fuente: Chaux, Caicedo & Fernández, (2013).

Las eficiencias de remoción obtenidas fueron: 56% y 46% DBO₅; 49% y 26% DQO; 56% y 33% SST; 28% y 36% N-NTK; -108% y 23% N-NH₄⁺; 64% y 34% fósforo total. Para las líneas (con Azolla, sin Azolla) respectivamente (Chaux, et al., 2013).

2.6. Antecedentes del Tratamiento de Aguas Residuales Porcinas

En la región de Murcia (España), Caballero-Lajarín (2013) Evaluó la remoción de contaminantes presente en un agua residual porcina en humedales con diferentes densidades de siembra del *phragmites australis* (10 plantas por m²; 5 plantas por m² y 0 plantas por m²). Se concluyó que los humedales de mayor densidad de plantación son los más eficientes para eliminar la mayor parte de los contaminantes de los purines, con remociones del 19% de la conductividad eléctrica, 89% de los sólidos totales en suspensión, 100% de los sólidos sedimentables, 90% de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, 91% de la demanda química de oxígeno, 97% del fósforo total, 96% del cobre, 92% del zinc, 89% del nitrógeno total, 87% del nitrógeno amoniacal, 91% del nitrógeno orgánico, 21% del nitrato, 37% del

bromuro, 4% del sulfato, 42% del calcio, 9% de las bacterias aerobias mesófilas, 78% de los coliformes totales, 70% de los coliformes fecales, 75% de los estreptococos fecales, y 100% de Salmonella, Shigella y Escherichia coli (Caballero-Lajarín, 2013)

Cabascango (2017) implementa un sistema de tratamiento de aguas residuales compuesto de un sistema que combina anaerobio (pozo séptico) y fitorremediación (utilizando microalgas) para el programa de porcicultura del IASA en Sangolquí Ecuador. Arrojó remociones del 90% para nitrógeno, 85% para fosforo, DQO y DBO₅. Y plantea ser esta, una alternativa muy efectiva para la aplicación de productores locales, debido a su favorable relación costo-beneficio.

Sifuentes (2018) en la localidad de Acopalca Perú, realiza la evaluación de dos humedales artificiales sembrados con Berro (*Nasturtium officinale*) a diferentes edades de establecimientos (2 y 4 meses). Los resultados obtenidos dentro de la experimentación fueron: para el Humedal 1 (2 meses) se obtuvo resultados con una eficiencia en los parámetros de pH=7.7%, Turbidez=89.7%, CE=61.8%, DBO₅=34.7%, DQO=65.8%, Ntotal=89.2% y del Ptotal=98.2%. Mientras que en el Humedal 2 (4 meses) la eficiencia en la remoción de los parámetros fisicoquímicos fue la siguiente: pH=9.6%, Turbidez=88.1%, CE=60.5%, DBO₅=32.3%, DQO=68.3%, Ntotal=88.9% y del Ptotal=98.6%.

Arias-López & Castillo (2006) utilizando un separador de sólidos y laguna de estabilización (facultativa), evaluaron la remoción de DBO₅, SST y coliformes fecales de un agua residual generada en actividades porcícola en el sector de Zamorano Honduras. Arrojando resultados en remociones del 76% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno -DBO₅-, 65% para sólidos suspendidos totales -SST- y 99% de los coliformes fecales. Asimismo, recomienda el

uso del agua ya tratada para el riego de pastos y frutales tomando en cuenta los análisis de nutrientes de nitrógeno, fósforo y potasio. (Arias-López & Castillo, 2006).

Como sistema de tratamiento de las aguas residuales de una pequeña explotación porcícola en el municipio de la Plata – Huila, conformada por 16 cerdos de aproximadamente 50 kg de peso, Botache et al., (2001) diseñaron, construyeron y evaluaron un biodigestor tipo Taiwan, en el cual obtuvieron resultados con remociones de DBO = 95%, DQO = 86%, SS = 87% y CF = 99.9%. (Botache et al., 2001)

En la Institución Educativa El Tejar del municipio de Timaná – Huila, diseñaron un sistema de tratamiento de aguas residuales de la explotación de 100 cerdos entre cría, levante y ceba, el sistema estaba conformado por una alberca biológica dividida en dos compartimentos sembrados con Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), este fue complementado con un filtro anaerobio y un canal que también fue sembrado con Jacinto de agua de 32 m² de área superficial. Las remociones teóricas fueron 83% para la DBO₅; 77% para los Sólidos Suspendidos, 68% para el Nitrógeno total, 67% para el Fosforo total y 99,999% para los Coliformes Fecales (CF). (Medina, P. 2007).

Arévalo-Peña & Zambrano-Malagón (2007). Estudiaron el comportamiento de remoción de un biodigestor anaerobio y un humedal artificial dispuestos en serie; con el fin de tratar las aguas residuales porcinas de la Granja Municipal de Cogua (Cundinamarca), La primera fase del proyecto tuvo como finalidad el aprovechamiento energético del biogás producido por la degradación de la materia orgánica, y la disminución en las concentraciones de DBO₅, DQO, SST, NTK y Fósforo; el material vegetal utilizado fue El junco (*Scirpus californicus*). Las

remociones obtenidas fueron (DBO₅= 91%; DQO= 93%; N Total= 80%; PTotal= 65% y SST=92%).

En el Municipio de Caldas (Antioquia) se realizó un ensayo a escala piloto, donde se evaluó la efectividad de los humedales artificiales para reducir carga contaminante proveniente de las granjas porcícolas. Se evaluaron humedales sembrados con Matandrea (*Zingiberaceae Hedychium montana*), Pasto pará (*Gramineae Brachiaria mutica*) y Pasto taner (*Gramineae Brachiaria arrecta*) ubicado en serie, como material de soporte se utilizó una mezcla de arena con vermiculita y las remociones fueron: 90% para Fósforo total, 59% para Nitrógeno total y superior al 80% para la DBO₅. (Arias et al., 2010).

Gesama & Calvache, (2017). Realizaron la implementación y evaluación de un humedal artificial como tratamiento secundario para un efluente porcícola proveniente de la granja San Carlos en el Municipio de Yacuanquer (Nariño); como material vegetal utilizaron carrizo (*sp. Phragmites australis*) y material de sustrato, una mezcla entre canto rodado y gravilla. Las remociones resultantes fueron: 93% para la DBO₅, 59% para Nitrógeno Total, 76% para Fosforo Total y 89% para sólidos suspendidos.

Viveros-Monje, (2017) evaluó el uso de humedales artificiales para el pos-tratamiento de las aguas residuales provenientes de las planta de beneficio de ganado bovino y porcino de CEAGRODEX DEL HUILA. Para ello, utilizó dos (2) plantas emergentes: *Limnocharis flava*, *Typha latifolia* y una planta flotante: *Heteranthera reniformis* y evaluó la remoción en los siguientes parámetros: Sólidos Suspendidos Totales (SST), DBO₅. Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales (CF). Los resultados obtenidos para *Limnocharis flava* (DBO₅= 54,04%; SST= 33,86%; CT= 79,10% y CF= 100,00%); *Typha latifolia* (DBO₅= 60,16%; SST= 52,99%;

CT= 74,63% y CF= 100,00%) y para *Heteranthera reniformis* (DBO₅= 51,43%; SST= 27,49%; CT= 62,69%).

García-Echavarría & Gómez-Ramírez, (2018) realizaron la construcción de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, en el predio “Mi Ranchito”, en la vereda Olarte, localidad Usme – Bogotá y utilizando (*Cyperus papyrus*) como material vegetal, se evaluó la remoción en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) para aguas residuales porcina. Dicha remoción fue del 77%.

3. Justificación

En Colombia, las pequeñas explotaciones porcinas, generalmente, vierten sus aguas residuales al suelo o a las corrientes de agua sin ningún tratamiento previo, generando contaminación de los recursos naturales y problemas en la salud pública.

Las Instituciones educativas agropecuarias, ubicados en zonas rurales del departamento del Huila, tienen entre sus programas de formación la porcicultura. Sus instalaciones, problemática y manejo de residuos y vertimientos, son similares a las explotaciones porcinas a pequeña escala. De ahí, la necesidad de contribuir a crear e implementar soluciones concretas para esta actividad pecuaria y así, corregir actividades que puedan alterar y contaminar las condiciones de los recursos naturales y la salud humana; buscando la integración de la educación ambiental en el ámbito escolar y el entorno y por ende, la calidad educativa de estos centro de formación agropecuaria.

En la búsqueda de contribuir con la remediación y/o minimización de la problemática ambiental ocasionada por esta actividad pecuaria, se propone la implementación de sistemas de tratamiento de las aguas residuales basados en la fitorremediación, como una alternativa viable y sostenible, de bajo costo, de fácil construcción, operación y mantenimiento e iguales de eficientes en la remoción de contaminantes que los tratamientos convencionales.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Determinar el potencial fitorremediador de las plantas acuáticas *Eichornia crassipes*, *Lemna Minory Pistia Stratiotes* como tratamiento secundario en la depuración de aguas residuales de pequeñas explotaciones porcinas y diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales porcinas de la Institución Educativa Agropecuaria el Guadual del Municipio de Rivera.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico de la problemática ambiental generada por las aguas residuales porcinas en los establecimientos educativos con modalidad agropecuaria del departamento del Huila.
- Diseñar y construir a escala piloto un sistema de tratamiento de aguas residuales con macrófitas (*Eichornia crassipe*, *Lemna Minory Pistia Stratiotes*) y evaluar la eficiencia de remoción de DBO₅, Nitrógeno Total, Fosforo Total y Sólidos Suspendidos.
- Proponer alternativas de sistemas de tratamiento para las aguas residuales porcinas de los colegios agropecuarios del departamento del Huila, bajo el concepto de biorremediación y sostenibilidad.
- Diseñar un sistema de tratamiento para las aguas residuales porcinas de la Institución Educativa Agropecuaria El Guadual, vereda el Guadual, Rivera – Huila

5. Metodología

5.1. Localización.

El proyecto se desarrolló en Rivera; municipio de Colombia ubicado en el departamento del Huila, con una población de 18.797 habitantes (censo DANE proyección 2015). El municipio se encuentra localizado en la parte nor-oriental del departamento del Huila, geográficamente, el casco urbano se encuentra situado en las coordenadas 2°47'00" de Latitud Norte y 75°16'00" de Longitud Oeste, una altura de 729 m.s.n.m. y temperatura media de 25°C. A una distancia de 22 km de la ciudad de Neiva (Capital del departamento del Huila) y 344 km de Bogotá D.C.

El sistema piloto de fitorremediación se instaló dentro de las instalaciones de la Institución Educativa El Guadual, Municipio de Rivera – Huila, localizado a 7,41 Km del casco urbano en las coordenadas planas con origen Bogotá X: 756231, Y: 798215 y una altitud de 944 m.s.n.m. Dicho sistema se encargaba de tratar las aguas residuales generadas de la actividad porcícola del centro educativo. En la figura 13, se muestra el sistema piloto de fitorremediación instalado.



Figura 13. Sistema Piloto de Fitorremediación

Con el propósito de evitar el ingreso de personas ajenas y de animales que pudiesen interferir con el estudio, se aisló el sistema con poli-sombra de color negro al 80%; el techo fue cubierto con láminas de zinc transparentes y con poli-sombra para así, limitar en gran parte la radiación solar y evitar al máximo el estrés hídrico en las plantas ocasionado por las altas temperaturas debido al efecto invernadero de la construcción.

5.2. Diagnóstico Ambiental de porcicultura en Colegios Agropecuarios del Huila.

Con el fin de compilar información relevante para el diagnóstico ambiental asociada a las aguas residuales porcinas generadas en las Instituciones Educativas Agropecuarias en el Departamento del Huila, se diseñó y diligenció un formato tipo encuesta que fue aplicada a 9 de los 19 colegios, pues estos, eran lo que contaban con actividad porcícola. Cabe mencionar que los restantes diez (10) colegios agropecuarios tenían como unidades productivas agropecuarias actividades diferentes a la porcicultura (ganadería, piscicultura, avicultura, actividades agrícolas, entre otras) o simplemente, para el momento de la identificación no se encontraban desarrollando actividades pecuarias. Ver figura 14.



Figura 14. Aplicación de encuesta a Instituciones Educativas

La información recopilada en campo se plasmó en una matriz resumen, y en ella, se registró la información relevante de la problemática ambiental generada por las aguas residuales porcinas en las Instituciones Educativas Agropecuarias del departamento del Huila. El formato de encuesta aplicado a las instituciones educativas objeto de estudio, se relaciona en el Anexo A.

5.2.1. Valoración de Impactos Ambientales. Se realizó la valoración de los impactos ambientales asociados e identificados en la actividad porcícola con el fin de priorizar y clasificar los de mayor relevancia y así, establecer posibles alternativas de solución; para ello, se utilizó la Matriz de Importancia de Impactos Ambientales y mediante la cuantificación de diez (10) atributos se valoró los impactos ambientales identificados. En tabla 7 se muestran los valores propuestos por Conesa (2009) a cada uno de los 10 Criterios para la valoración del impacto a evaluar dentro de la matriz.

Tabla 7. Criterios para la valoración del impacto

<i>Atributo</i>	<i>Escala</i>		<i>Atributo</i>	<i>Escala</i>	
Intensidad (I)	Baja	1	Recuperabilidad (Rc)	Inmediata	1
	Media	2		A Mediano Plazo	2
	Alta	4		Mitigable	4
	Muy Alta	8		Irrecuperable	8
Extensión (Ex)	Puntual	1	Sinergia (Si)	Sin sinergia	1
	Parcial	2		Sinérgico	2
	Extensa	4		Muy sinérgico	4
Momento (Mo)	Largo Plazo	1	Acumulación (Ac)	Simple	1
	Mediano Plazo	2		Acumulativo	4
	Inmediato	4			
Persistencia (Pe)	Fugaz	1	Efecto (Ef)	Indirecto	1
	Temporal	2		Directo	4
	Permanente	4			
Reversibilidad (Rv)	Corto Plazo	1	Periodicidad (Pr)	Irregular	1
	Mediano Plazo	2		Periódico	2
	Irreversible	4		Continuo	4

Fuente: Conesa, 2009.

Para Conesa, 2009. El valor de la importancia permite clasificar el impacto ambiental evaluado como:Compatible o Irrelevante ($0 \leq \text{Imp} < 25$); Moderado ($25 \leq \text{Imp} < 50$); Severo ($50 \leq \text{Imp} < 75$) oCrítico ($\text{Imp} \geq 75$).Y esta calificación y/o valoración se obtiene mediante la aplicación de la siguiente ecuación.

$$\text{Imp} = (\pm)(3I + 2Ex + Mo + Pe + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Rc)$$

5.3.Diseño y construcción del Sistema Piloto de Fitorremediación

El sistema piloto (canales de fitorremediación)construido en la Institución Educativa Núcleo El Guadual del Municipio de Rivera, contaba con las siguientes unidades y/o componentes:

5.3.1. Sedimentador primario. La función principal de este tratamiento primario es la remoción de sólidos sedimentables y de material flotante, por métodos físicos, para disminuir la concentración de material particulado en el agua residual. Los sólidos grandes se depositan en el fondo del recipiente y/o contenedor formando lodos; las grasas, aceites y espumas quedan en la parte superior del sedimentador formando natas. (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Estas unidades cuando se diseñan correctamente y con los respectivos mantenimientos (limpieza periódica y remoción de lodos y natas), logran remociones entre el 50% y el 70% de SST) y entre el 25% y 40% de la DBO₅.Por lo general, estas unidades son diseñadas con TRH cortos (entre 1,5 y 2,5 horas) (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Para el caso en específico y debido al alto contenido de sólidos sedimentables, de grasas y de aceites que posee este tipo de agua residual porcina, y de la ausencia de unidades de pretratamiento (cribado y trampa de grasas) en las porquerizas, se decidió la implementación de un sedimentador con un TRH = 24 horas. Para ello, se diseñó y construyó esta unidad a partir de

un tambor de 55 galones (220 Litros) de Polietileno. En figura 15 se muestran las especificaciones técnicas del sedimentador primario utilizado en el sistema piloto.



Figura 15. Especificaciones Sedimentador

El sedimentador se instaló dentro del invernadero y la alimentación del mismo, se realizaba de forma manual y se dejaba reposar por 24 horas, luego, el efluente (agua residual pre-tratada) se suministraba a razón de 10 L.día^{-1} para cada una de los tres canales. En figura 16 se muestra el sedimentador dentro del sistema piloto de fitorremediación y la toma del efluente de las porquerizas, para ser dispuesta en el tratamiento primario.



Figura 16 Sedimentador primario y recolección efluente de las porquerizas

5.3.2. Material vegetal, adaptación y siembra. Las especies vegetales utilizadas dentro de los canales de fitorremediación fueron: Buchón de agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de agua (*Lemna minor*) y Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*). Estas plantas acuáticas presentan un rápido crecimiento y una amplia distribución en zonas tropicales. (Arroyave, 2004). Además, son especies de fácil consecución en la zona de estudio y el área de influencia.

Luego de la recolección del material vegetal y por un periodo de treinta (30) días se realizó el proceso de adaptación del material vegetal tanto a las condiciones climáticas de la zona objeto de estudio (vereda El Guadual del Municipio de Rivera-Huila), como al tipo agua residual a tratar (porcina). Para ello se realizó la siembra de plantas a diferentes concentraciones de agua residual por periodos de 5 días. En tabla 8 se muestran los periodos (en días) y los porcentajes (agua blanca y de agua residual porcina) utilizadas durante el proceso de adaptación del material vegetal.

Tabla 8. Adaptación, tiempo y porcentaje de aguas para la adaptación del material vegetal

Porcentaje (%)		Tiempo (días)	Observación
Agua	Agua residual		
100	0	5	Condición inicial
80	20	5	
60	40	5	
40	60	5	
20	80	5	
0	100	5	Condición final

La figura 17 muestra el proceso de adaptación de las tres (3) especies vegetales trabajadas dentro del sistema piloto de fitorremediación.



Figura 17. Adaptación del material vegetal

Posterior al proceso de adaptación del material vegetal, se realizó la siembra del *Eichhornia Crassipes*, *Lemna minor* y *Pistia Stratiotes* en los canales del sistema piloto. En la figura 18 se muestran los sistemas ya plantados



Figura 18. Siembra del material vegetal en los canales del sistema piloto

5.3.3. Diseño de los Canales. Con el fin de aprovechar el potencial fitorremediador de las plantas utilizadas dentro del sistema piloto, en el diseño de los canales, se tuvo en cuenta para determinar su profundidad, la morfología (tamaño de las raíces) del material vegetal. Para *Lemna minor* (longitud de raíz= 0,2 - 0,4 cm) y *Pistia Stratiotes* (longitud de raíz= 1,0 - 3,0 cm) los canales quedaron con las misma profundidad y por lo tanto las mismas dimensiones; para *Eichhornia Crassipes* (longitud de raíz= 50,0 - 100,0 cm) el canal resultó más profundo y por lo tanto de menor longitud. El parámetro de diseño fue un TRH= 12 días.

5.3.4. Agua residual porcina, caracterización y dosificación. El agua residual utilizada dentro del sistema piloto fue la generada en el proceso de lavado y limpieza de los cubículos de levante y engorde de cerdos en la Institución Educativa el Guadual del Municipio de Rivera (Huila), para el momento de la experimentación, la institución contaba con un total de seis (6) cerdos. el lavado de las porquerizas se realizaba cada 12 horas; con el fin de evitar la proliferación de olores y de vectores en la zona de influencia. En tabla 9 se muestra caracterización de las aguas residuales porcinas, realizado por el laboratorio Diagnosticamos S.A.S de la ciudad de Neiva, acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM-, se analizaron las muestras de los meses de julio y septiembre de 2018.

Tabla 9 Caracterización del agua residual porcina en Institución Educativa El Guadual

<i>Muestra</i>	<i>Parámetros</i>						
	<i>DBO₅</i> <i>[mg.L⁻¹]</i>	<i>Fósforo</i> <i>Total</i> <i>[mg.L⁻¹]</i>	<i>Nitrógeno</i> <i>Total</i> <i>[mg.L⁻¹]</i>	<i>Sólidos</i> <i>Suspendidos</i> <i>[mg.L⁻¹]</i>	<i>Coliformes</i> <i>fecales</i> <i>[NMP/ml]</i>	<i>pH</i> <i>[Unidad]</i>	<i>Temperatura</i> <i>•C</i>
1	837,4	64	378	215	240x1000	6,7	23,0
2	909,3	51	356	290	1600x1000	7,1	24,1
3	1016,1	60,5	368	255	2400x1000	7,2	23,2

A los datos se aplicó estadística descriptiva con el fin de establecer las medias y desviaciones estándar de cada contaminante.

5.3.5. Alimentación del Sistema. En figura 19 se muestra la alimentación del agua residual porcina al sistema piloto de fitorremediación, luego que esta, reposara dentro del sedimentador primario por un periodo de 24 horas.



Figura 19. Alimentación de los canales de fitorremediación con el agua residual

Con el fin de suministrar caudales uniformes a cada canal, se colocaron como dosificadores, bidones de 30 Litros de capacidad; se les adaptó un sistema de goteo y así controlar el afluente. El caudal que se suministraba a cada canal era de 10L.día^{-1} ($Q \approx 0,42\text{L.hora}^{-1}$). Los dosificadores contaban con una lámina de 20cm de gravilla de 1 cm de espesor que cumplía la función de filtro, encargada de remover restos de sólidos suspendidos, grasas y aceites del agua residual no eliminados en el sedimentador primario. Cada canal de fitorremediación contaba con su respectivo dosificador y se garantizaba que el goteo fuese continuo.

En figura 20 se muestra el recipiente adaptado y utilizado como dosificador.



Figura 20. Dosificador de caudal

5.4. Parámetros Evaluados

Luego de la estabilización del sistema piloto (canales de fitorremediación) por un periodo de 3 meses (julio a septiembre de 2018); se realizó el monitoreo de las tres unidades experimentales (toma de muestras y parámetros a evaluar), correspondiente al seguimiento en la remoción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos objeto de estudio. Dicha caracterización y seguimiento se realizó en:

- Afluente del sedimentador (Af S)
- Efluente del sedimentador (Ef S)
- Efluente de los canales (Ef C)
 - T₁: Canal con *Pistia Stratiotes*
 - T₂: Canal con *Eichhornia Crassipes*
 - T₃: Canal con *Lemna minor*

5.4.1. Parámetros in situ.diariamente se registraba la temperatura (T) y el pH en los tres canales de fitorremediación. Para ello, se utilizaron los siguientes equipos: Termómetro y pHmetro digital HANNA HI 98103.

5.4.2. Parámetros ex situ.Se tomaron muestras de agua para los siguientes parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Nitrógeno Total (N), Fósforo Total (P), Coliformes fecales (CF), y Solidos suspendidos (SS). Las muestras se enviaban a la División Ambiental de DIAGNOSTICAMOS S.A.S. localizado en la ciudad de Neiva –Huila. La recolección de las muestras se realizó respetando los protocolos para la toma, conservación y transporte de las muestras y las recomendaciones establecidas por el laboratorio. En la figura 21, se muestra la toma de muestra de las aguas residuales



Figura 21. Recolección, transporte y conservación de las muestras

La recolección de las muestras y la medición de los parámetros in situ (pH y Temperatura) se realizaba en horas de la mañana (8:00 a.m.).

La figura 22 muestra cualitativamente el aspecto de las aguas residuales una vez atravesada cada unidad de tratamiento del sistema piloto de fitorremediación.

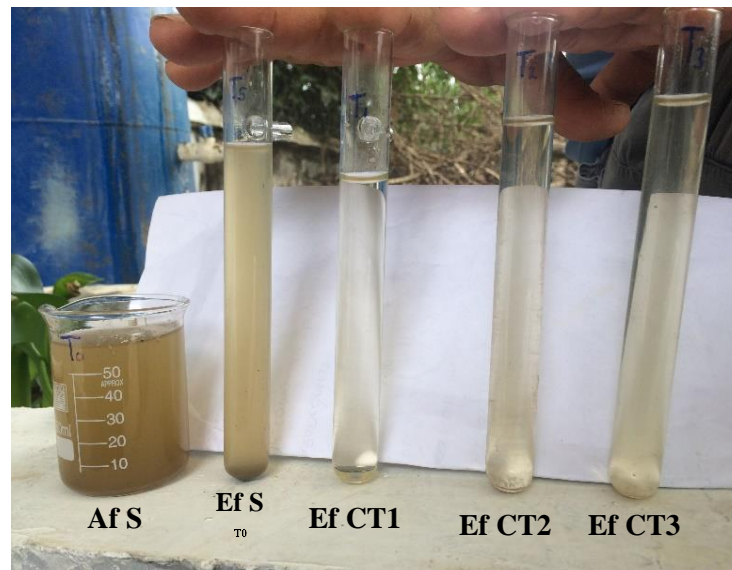


Figura 22. Aspecto de las aguas residuales en las Unidades del Sistema

5.4.3. Análisis de Laboratorio. En la Tabla 10 se presentan los métodos utilizados (*in situ* y *ex situ*) de los parámetros a analizar en los canales de fitorremediación objeto de estudio.

Tabla 10. Métodos utilizados para análisis de las muestras

<i>Parámetro</i>	<i>Método</i>
pH	SM 4500 – H ⁺ B
Temperatura	SM 2550 B
DBO ₅	SM 5210 D y ASTM D888
Nitrógeno Total	SM 4500 NORG C4550 NH ₃ BC
Fósforo Total	SM22 4500 PB, D
Sólidos Suspendedos	SM 2540 D
Coliformes Fecales	SM 9223 E

Fuente: Elaboración propia

5.4.4. Análisis de Resultados. El porcentaje de remoción de los diferentes parámetros fisicoquímicos estudiados se realizó con base a la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Remoción} = \left(1 - \frac{C_{Ef}}{C_{Af}} \right) * 100$$

Donde C = Concentración del parámetro, Ef = efluente y Af = afluente

Los información se procesó y analizó utilizando el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI, mediante ANOVA Unifactorial + test LSD y Es

6. Resultados

6.1. Diagnóstico Ambiental de la Porcicultura en las Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila.

6.1.1. Estado Actual. Para establecer los impactos ambientales ocasionados dentro de la actividad porcina, se realizó la identificación de las actividades y procesos llevados a cabo en esta actividad pecuaria. En la figura 23 se muestra el diagrama de las entradas, procesos y salidas identificadas en la actividad porcícola.

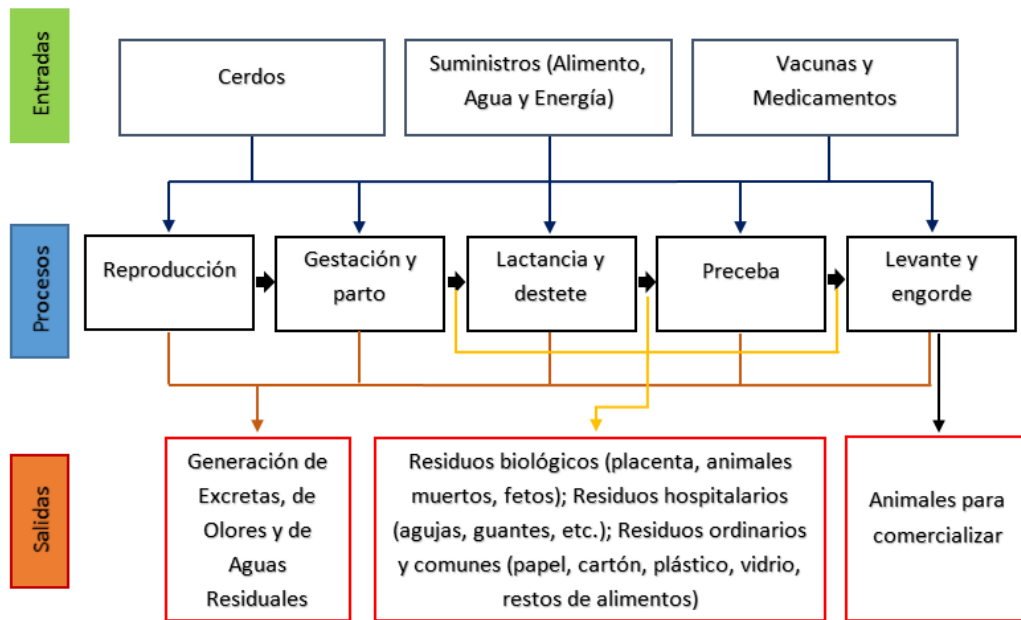


Figura 23. Diagrama de entradas, procesos y salidas de la actividad porcícola.

En el Departamento del Huila existen 19 Instituciones Educativas Agropecuarias. La tabla 11 presenta los nueve (9) centros educativos objeto de estudio, las diez (10) instituciones restantes desarrollan actividades diferentes a la porcicultura; entre las que se destacan (avicultura y agricultura= 4; ganadería y agricultura=1; piscicultura y agricultura=2; solo agricultura=3).

Tabla 11. Instituciones Educativas con porcicultura en el Departamento del Huila

<i>Instituciones Educativas</i>	<i>Municipio</i>
Técnico Agrícola –IETA-	La Plata
Núcleo Escolar el Guadual	Rivera
La Arcadia	Algeciras
Joaquín García Borrero	Baraya
Ramón Alvarado Sánchez	Garzón
Agropecuario del Huila	Garzón
José Miguel Montalvo	Gigante
Jorge Villamil Ortega	Gigante
Nicolás García Bahamón	Tello

A continuación, se presentan los resultados más relevantes del estado actual de la actividad porcina en las Instituciones Educativas Agropecuarias del departamento del Huila. En tabla 12, algunas características de las porquerizas de las Instituciones Educativas objeto de estudio

Tabla 12. Características de las porquerizas de las Instituciones Educativas

<i>Instituciones Educativas</i>	<i>No. de cerdos</i>	<i>Área cocheras</i>	<i>Tipo de alimento</i>	<i>Cuentan STAR</i>	<i>Manejo a porquinaza</i>	<i>Agua para el lavado (L/m²)</i>
Técnico Agrícola –IETA-	13	216 m ²	Purina	No	Compost	3,0
Núcleo Escolar el Guadual	6	74,1 m ²	Purina	No	Ninguno	4,7
La Arcadia	5	202,1 m ²	Purina	No	Ninguno	3,5
Joaquín García Borrero	12	49,5 m ²	Purina	No	Ninguno	7,9
Ramón Alvarado Sánchez	4	105 m ²	Purina	No	Compost	1,9
Agropecuario del Huila	2	228 m ²	Purina	No	Compost	12
José Miguel Montalvo	5	108 m ²	Purina	No	Ninguno	2,5
Jorge Villamil Ortega	22	168 m ²	Purina	No	Compost	3
Nicolás García Bahamón	2	72 m ²	Purina	No	Compost	3,5

De acuerdo al número de cerdos y al área de las instalaciones en donde se realiza el cultivo dentro de las instituciones educativas, se pueden caracterizar como pequeñas porquerizas.

El 100 % de las instituciones educativas agropecuarias objeto de estudio realizan el lavado de las porquerizas de forma manual, el gasto del recurso hídrico en esta actividad no es controlado y en ocasiones excesivo, en promedio 4,7 L / m² de agua. Los elementos de protección personal más utilizados en el lavado de las porquerizas son: Guantes y botas.

Ninguna de las Instituciones educativas cuenta con Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) y aunque el 44,4% de estas se encuentran conectadas a la red de alcantarillado municipal, estos centros poblados tampoco cuentan con sistemas de tratamiento para sus aguas residuales.

El 55,6% de las instituciones educativas realiza aprovechamiento de los residuos (porquinaza) a través del compostaje de las mismas, que es utilizado para los cultivos de los centros educativos.

Los principales puntos de vertimientos de las aguas residuales porcícola son: el suelo y fuentes hídricas cercanas. Afectando así, la calidad del recurso hídrico y del suelo aguas abajo de los vertimientos.

Las especies vegetales (macrófitas) que predominan dentro del área de influencia de las instituciones educativas y que podrían ser objeto de procesos de fitorremediación son: Buchón de Agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de Agua (*Lemna minor*), Papiro (*Cyperus Papyrus* y Lechuga de Agua (*Pistia Stratiotes*).

Según la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena –CAM-, en los municipios del área de influencia de los centros educativos objeto de estudio, se evidencia presencia de medianas y pequeñas explotaciones porcícolas. Sin embargo, solo el 12% de las mismas cuentan con su respectivo permiso de vertimientos y realiza un manejo adecuado de los residuos sólidos provenientes de esta actividad pecuaria. (CAM, 2019).

6.1.2. Valoración de Impactos. En tabla 13, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología propuesta por Conesa (2009) en la valoración de impactos ambientales ocasionados por la actividad porcina en el área de estudio.

Tabla 13. Matriz de Importancia Ambiental en Porcicultura

COMPONENTE	IMPACTO AMBIENTAL	VALORACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL										CLASIFICACIÓN		
		NATURALEZA	EXTENSIÓN	PERSISTENCIA	SINERGIA	EFECTO	RECUPERABILIDAD	INTENSIDAD	MOMENTO	REVERSIBILIDAD	ACUMULACIÓN		PERIODICIDAD	IMPORTANCIA
SUELO	1. Contaminación suelo	-1	1	2	2	4	2	4	4	1	4	2	-35	Moderado
	2. Erosión del suelo	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-13	Irrelevante
	3. Alteración del suelo por mal manejo de residuos no peligrosos	-1	1	2	2	4	2	2	2	1	1	2	-24	Irrelevante
	4. Alteración del suelo por mal manejo de residuos peligrosos	-1	1	2	2	4	2	4	4	1	4	2	-35	Moderado
AGUA	5. Contaminación de aguas superficiales	-1	2	2	4	4	2	2	6	2	4	4	-38	Moderado
	6. Contaminación de aguas subterráneas	-1	1	2	4	4	2	2	6	2	4	4	-36	Moderado
	7. Agotamiento del recurso hídrico	-1	1	2	4	4	2	2	6	2	4	4	-36	Moderado
AIRE	8. Olores ofensivos	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-13	Irrelevante
	9. Emisión de Gases de efecto Invernadero	-1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	-15	Irrelevante
FAUNA	10. Proliferación de Plagas (moscas, ratas, zancudos)	-1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	2	-17	Irrelevante
FLORA	11. Afectación de la flora	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-13	Irrelevante
SOCIAL	12. Exposición a riesgos laborales por inexistencia de bioseguridad	-1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	-15	Irrelevante
	13. Quejas provenientes de actividades de la granja	-1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	-15	Irrelevante

Uno de los recursos naturales más afectados por la inadecuada práctica llevada a cabo en la porcicultura es el Agua. Para mitigar el efecto sobre el recurso agua, se recomienda construir STAR dentro de las instituciones educativas agropecuarias que cuenten con porcicultura dentro de su componente formativo. Asimismo, realizar un uso eficiente y promover el ahorro del agua dentro del desarrollo de las actividades llevadas a cabo dentro de las porquerizas. Igualmente, se ve afectado el recurso Suelo por la disposición inadecuada de residuos sólidos y vertimiento de aguas residuales, para ello, se deberán implementar programas y planes de manejo ambiental tanto para los residuos sólidos (Aprovechamiento y/o tratamiento de residuos ordinarios y disposición adecuada para los residuos peligrosos).

Aunque la proliferación de vectores (moscas, zancudos, ratas y demás) está categorizado como irrelevante dentro de la matriz de importancia Ambiental, se deben crear mecanismos biológicos y físicos de control, con el fin de evitar enfermedades transmitidas por estos vectores, tales como: Zika, Dengue, Leishmaniasis, Esquistosomiasis, Chikungunya, entre otras.

6.2. La Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual de Rivera Huila.

Es un centro educativo de carácter oficial y con énfasis en formación agropecuaria, fue creada el 11 de julio de 1960 en respuesta a la política nacional de retorno al campo después de la crisis generada por la violencia. A partir del año 2003, el Ministerio de Educación Nacional imprime nuevas acciones de organización de las instituciones educativas y motiva a estructurarse con una sede principal en la cual se puedan ofrecer los ciclos desde preescolar a media. Adicionalmente, se debían anexar a la estructura administrativa unas sedes unitarias con formación en los ciclos desde preescolar y básica primaria. (PEI El Guadual, 2015).

La Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual cuenta con una sede principal ubicada en la vereda el Guadual del Municipio de Rivera (ofrece formación Preescolar, Básica Primaria, Básica Secundaria y Media Técnica) con trece (13) sedes (ubicadas en las veredas: Agua Caliente, Agua Fría, Alto guadua, Alto Rio Blanco, Arrayanal, El Salado, El Tambillo, Honda Alta, La Honda, Las Juntas, Loma Larga, Rio Negro y Mesitas) que ofrecen sólo formación en educación Preescolar y Básica Primaria. Actualmente, cuenta con 520 estudiantes, de ellos 45% (234 estudiantes) en preescolar y básica primaria y el restante 55% (286 estudiantes) en media técnica.

6.3. Explotación porcina de la Institución Educativa.

La Institución Educativa Núcleo El Guadal del Municipio de Rivera Huila, cuenta con una instalación o porqueriza de 74,1 m² de área superficial (Largo: 11,15 m y Ancho: 6,65 m). Esta, se subdivide en 10 cubículos, 8 de ellos con un área de 4,90 m² y utilizados para el proceso de levante y engorde y los restantes 2 con 7,55 m² encargados de los procesos de reproducción, gestación y parto, lactancia y destete, Preceba.

Actualmente, esta institución educativa ocupa 3 de sus 10 cubículos con 6 cerdos de levante y engorde (2 cerdos por cubículo), con un área de 2,45 m²/cerdo y un peso promedio de cerdo de 86 kg, debido a que se realiza el lavado de las porquerizas dos veces al día, el consumo de agua utilizado en esta actividad pecuaria en promedio es de 4,7 L/m²(58,04 L/cerdo.día). Cabe mencionar que en la actualidad se aprovecha sólo el 25% de la capacidad de las instalaciones de la Institución Educativa (capacidad máxima porqueriza: 24 cerdos).

6.4. Caracterización del Agua Residual Porcina.

En tabla 14 se muestran las Medias \pm Desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en la caracterización del agua residual objeto de estudio.

Tabla 14. Valores medios de parámetros evaluados en agua residual porcina

<i>Parámetro</i>	<i>Media \pm Desviación estándar</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Media \pm Desviación estándar</i>
DBO ₅ (mg/L)	920,9 \pm 63,4	CF (UFC/100 ml)	(1341 \pm 878) x1000
Fósforo (mg/L)	58,5 \pm 5,0	pH [Unidad]	7,0 \pm 0,2
Nitrógeno Total (mg/L)	367,3 \pm 7,5	Temperatura (°C)	23,4 \pm 0,4
Sólidos Suspendidos (mg/L)	253,3 \pm 25,5		

Debido al alto porcentaje de Sólidos Suspendidos presente en el agua residual porcina generada en La Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual (253,3 \pm 25,5 mg/L), se hace necesario la implementación de un sistema de tratamiento primario (sedimentador) encargado de disminuir la concentración de este parámetro fisicoquímico y así evitar la colmatación y pérdida de eficiencia de los canales de fitorremediación.

Asimismo, se evidencia alto contenido de Nitrógeno Total y Coliformes Fecales dichos parámetros se esperan controlar principalmente con los canales de fitorremediación, debido a que tanto las plantas como los microorganismos asentados en los canales ayudarían a la reducción de estos contaminantes y/o indicadores de contaminación.

6.5. Contaminación producida por la porqueriza.

En tabla 15 se muestra la carga contaminante (Kg/día) generada en La Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual para los parámetros fisicoquímicos de DBO₅ y SST. Cabe

resaltar que dicha carga depende y varía según el número de cerdos establecidos en las porquerizas.

Tabla 15. Valores de Carga contaminante (Kg/día) de la Institución Educativa El Guadual

<i>Carga Contaminante</i>	<i>Valor Calculado (kg/día)</i>	
	<i>Producción actual (6 cerdos)</i>	<i>Máxima producción(24 cerdos)</i>
DBO ₅	0,32	1,28
Sólidos Suspendidos	0,09	0,35
Heces generadas	2,76	11,04

6.6. Diseño, Construcción y Evaluación del Sistema Experimental Piloto

6.6.1. Diseño. De acuerdo a los resultados del análisis de Laboratorio del agua residual porcina generada en la Institución educativa Núcleo El Guadual de Rivera-Huila: en lo físico – químico DBO₅ = 920,9 ± 63,4mg/L, SS = 253,3 ± 25,5mg/L, N = 367,3 ± 7,5mg/L, P = 58,5 ± 5,0mg/L, y en lo microbiológico CF = (1341 ± 878) x1000UFC/100 ml; los cuales pueden considerarse apreciables y de riesgo para el ambiente y la salud pública, se requiere como mínimo la construcción de un Sistema de Tratamiento compuesto de una Unidad de Tratamiento Primario y una de Tratamiento Secundario, con el fin de disminuir la carga contaminante y así, las posibles afectaciones a los recursos naturales que están en contacto con estos vertimientos (suelo y agua).

Para el Sistema Experimental Piloto, se propone como Unidad para el Tratamiento Primario un Sedimentador (función principal remover SS) y para el Secundario un Canal con Plantas Acuáticas (función principal remover DBO₅, N, P, CF).

En la figura 24 se presenta un Esquema del Sistema a implementar.

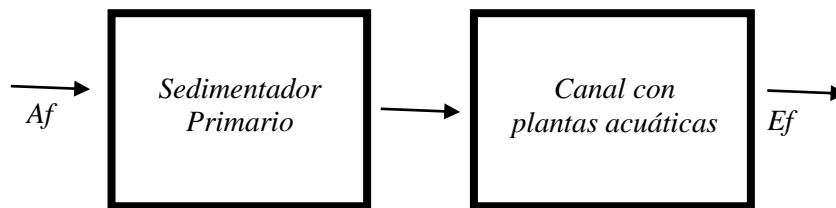


Figura 24. Esquema de sistema piloto

En las dos Unidades propuestas (Sedimentador primario y canal de fitorremediación), a pesar de que tienen una función principal (o proceso) en la remoción de contaminantes, también remueven, aunque en proporciones menores otros parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas residuales; lo cual se presenta en la Figura 25.

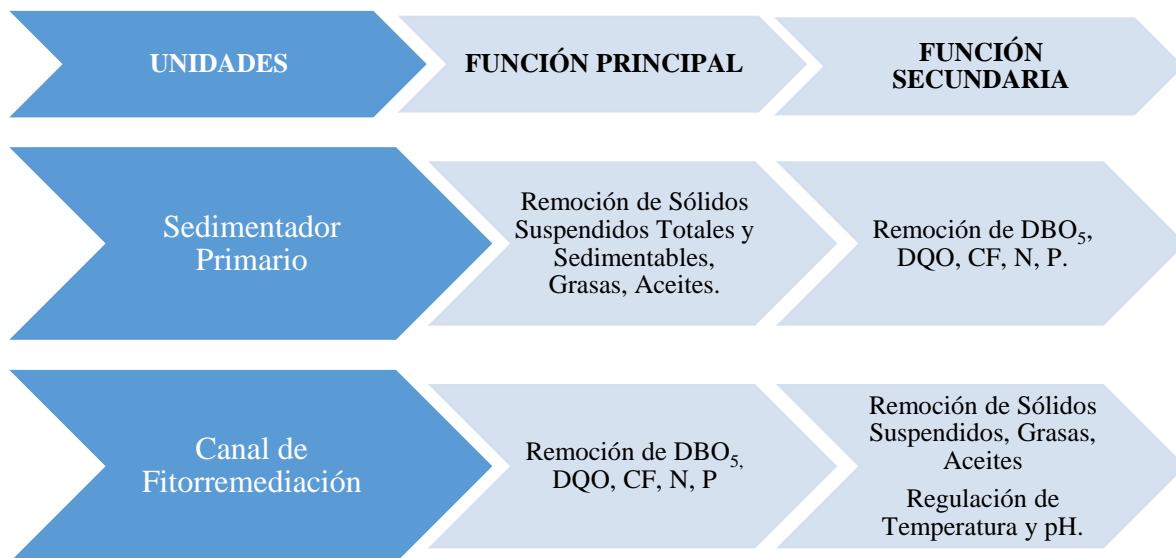


Figura 25. Procesos llevados a cabo por cada unidad de tratamiento.

Finalmente, la Tabla 16 Muestra los porcentajes teóricos de remoción de contaminantes que se espera en las diferentes Unidades del Sistema de Tratamiento y las remociones teóricas esperadas de todo el Sistema.

Tabla 16. Remociones Teóricas de las unidades de tratamiento.

PARÁMETRO	SEDIMENTADOR PRIMARIO	CANAL DE FITORREMEDIACIÓN	REMOCION TOTAL ESPERADAS
DBO ₅	25 – 40 %	65 – 85 %	74 – 90 %
DQO	30 – 40 %	40 – 55 %	48 – 83 %
SST	50 – 75 %	55 – 70 %	77 – 93 %
SSED	75 – 85 %	75 – 85 %	93 – 98 %
Grasas y Aceites	60 – 70 %	70 – 90 %	88 – 97 %
Coliformes Fecales	20 – 40 %	80 – 90 %	84 – 94 %
Nitrógeno Total	-	30 – 45 %	30 – 45 %
Fósforo Total	-	55 – 70 %	55 – 70 %

Fuente: *Crites & Tchobanoglous, 2000; Romero, 2005; Arévalo-Peña & Zambrano-Malagón, 2007; Duran-de-Bazua & Guido-Zarate, 2008; Vymazal, 2011; De la Peña, et al., 2015.*

El Sistema Experimental Piloto para el tratamiento de las aguas residuales de la explotación porcina del colegio agropecuario el Guadual, está conformado por un Sedimentador Convencional (Tratamiento primario) y tres Canales con Plantas Acuáticas que funcionan en paralelo (Tratamiento Secundario). Los Canales, donde ocurre el proceso de Fitorremediación, estarán sembrados: uno con *Lemna minor*, (T3), otro con *Eichhornia Crassipes* (T2) y el tercero con *Pistia Stratiotes* (T1). Para regular el flujo entre el Sedimentador y los Canales se colocaron unos Dosificadores.

La figura 26, muestra el esquema en planta del Sistema.

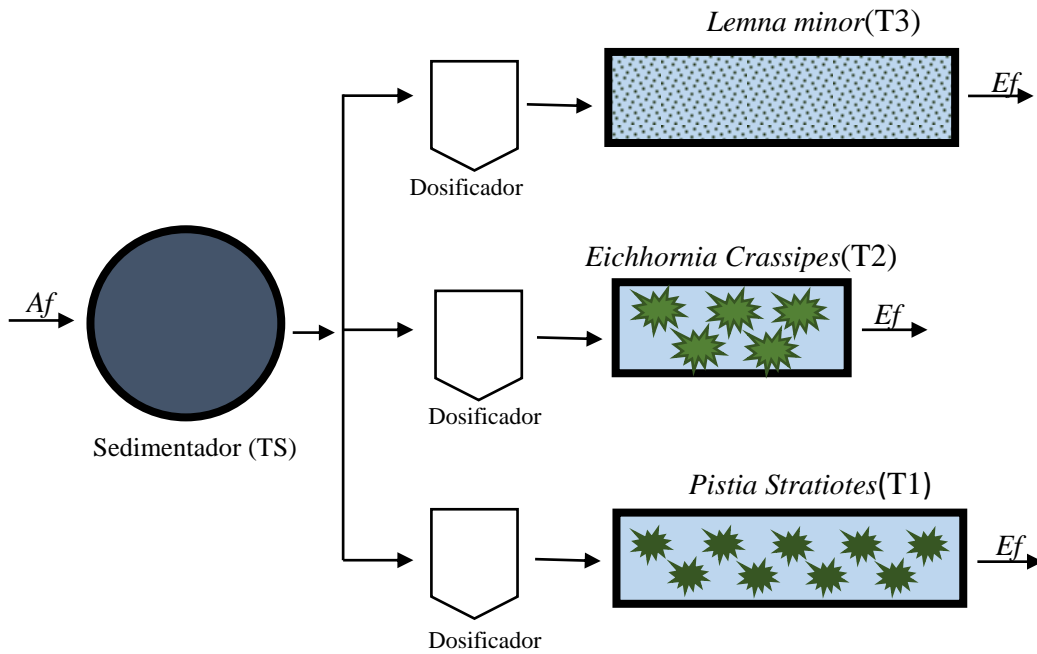


Figura 26. Esquema del Sistema Experimental Piloto de fitorremediación

Los parámetros de diseño contemplados fueron: Caudal (Q) en los canales y el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH). Para el Sistema el Sistema Experimental Piloto, se emplearon: $Q = 0,010 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ y $TRH = 12 \text{ días}$.

Con los valores anteriores, se calculó el volumen útil de cada canal ($V_{\text{útil}}$)

$$V_{\text{útil}} = (Q) * (TRH)$$

$$V_{\text{útil}} = (0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}) * (12 \text{ días}) \rightarrow V_{\text{útil}} = \mathbf{0,12 \text{ m}^3}$$

Para dimensionar el canal, se tuvo en cuenta: sección transversal rectangular que se conservaba en toda su longitud. Para determinar las dimensiones de la sección de cada canal: la morfología de la planta acuática a sembrar (longitud de la raíz). Para los canales T1 y T3, se

asumió como altura de la lámina de agua ($y = 0,20$ m) y como ancho del canal ($W = 0,30$ m); para el canal T2, $y = 0,50$ m y $W = 0,30$ m. Para los tres canales, se contempló un borde libre de 0,10 m. Una vez conocidos los valores de $V_{\text{útil}}$, y , W , se calcularon las longitudes de los canales. Para los canales T1 y T3:

$$V_{\text{útil}} = (L) * (y) * (W)$$

$$0,12 \text{ m}^3 = (L) * (0,20\text{m}) * (0,30\text{m}) \rightarrow L = 2,0 \text{ m}$$

Para el canal T2, la longitud calculada será $L = 0,80$ m. En tabla 17 se muestran las dimensiones internas de los canales de fitorremediación.

Tabla 17. Dimensiones de los canales de fitorremediación

CANAL	LONGITUD (L)	SECCIÓN	
		ALTURA (H)	ANCHO (W)
T1	2,0 m	0,3 m	0,3 m
T2	0,8 m	0,6 m	0,3 m
T3	2,0 m	0,3 m	0,3 m

La figura 27, muestra la sección transversal de los tres canales

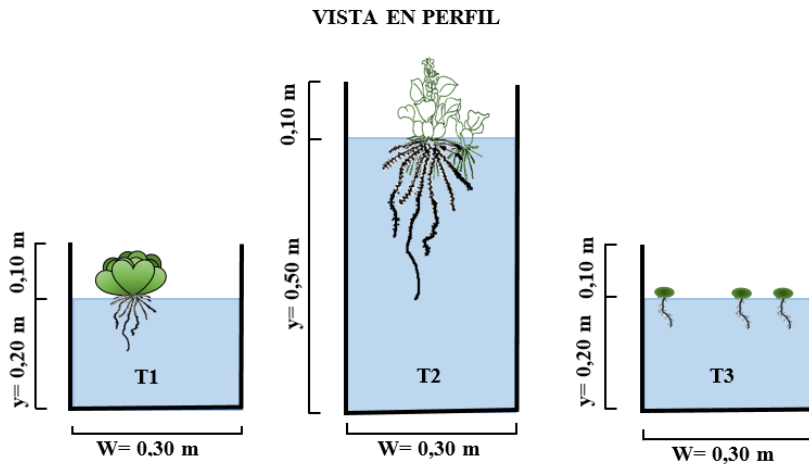


Figura 27. Sección transversal de los canales de fitorremediación

6.6.2. Construcción. El Sistema Experimental Piloto, se construyó en un lote aledaño a las porquerizas de la sede central de la Institución Educativa Núcleo del Guadual del Municipio de Rivera, ocupando un área de 12 m².

Como sedimentador se utilizó un tambor de 55 galones (220 Litros) de Polietileno de alta densidad, con capacidad de almacenar el agua residual producida en la porqueriza durante 24 horas. En figura 28 se muestra la elaboración del sedimentador



Figura 28. Construcción del Sedimentador Primario

Los canales se construyeron en ladrillo, revestidos en concreto. La figura 29 muestra la construcción de los canales de Fitorremediación.



Figura 29. Construcción de los Canales de Fitorremediación

La figura 30 muestra el Sistema Piloto conformado por: El Sedimentador, los tres Dosificadores y los tres Canales de Fitorremediación, después de la estabilización del material vegetal y en funcionamiento.



Figura 30. Sistema Piloto de Fitorremediación en Funcionamiento

Una vez generada el agua residual producto del lavado de las porquerizas de la Institución Educativa Núcleo del Guadual, esta era conducida a través de una canaleta encargada de conducir las hasta un predio contiguo al centro educativo. De ahí, se realizaba la recolección del agua residual en horas de la mañana (cabe mencionar que se realiza dos lavados en el día a las porquerizas) y con ayuda de un balde de 15 Litros y un tamiz de 0,02 m de espesor se eliminaban los restos de sólidos gruesos (heces, alimento y demás) que pudiesen estar presente.

Este líquido ya tamizado se conducía de forma manual hasta el sedimentador primario (reactor tipo batch) y allí permanecía por 24 horas. Posterior a ello, y diariamente se realizaba la alimentación de los dosificadores con $0,01 \text{ m}^3$ (10 L) de agua residual, para ello, se utilizaba una válvula ubicada en la parte media del sedimentador primario. Los dosificadores también

contaban con válvulas adaptadas para suministrar un caudal promedio de $Q \approx 0,42 \text{ L.hora}^{-1}$ hasta llegar a los canales. Finalmente, el agua ya tratada sale gracias a la pendiente hidráulica de estos sistemas secundarios ($\approx 1\%$) y mediante tubería de media pulgada ($1/2''$) ubicada en el extremo opuesto de la dosificación se conducía hasta un tanque de almacenamiento, de donde se realizaba la toma de muestras y transporte de las mismas, para su caracterización.

6.6.3. Evaluación de la Eficiencia del Sedimentador Primario. Para evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes evaluados, se compararon los valores del afluente y efluente del sedimentador, obtenidos en los análisis de laboratorio. Datos que fueron analizados mediante estadística descriptiva. En tabla 18 se presentan las remociones obtenidas para el muestreo en el sedimentador primario.

Tabla 18. Remociones obtenidas en el Sedimentador

<i>Muestra</i>	<i>REMOCIONES (%)</i>				
	<i>DBO₅</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>SST</i>	<i>CF</i>
1	48,60	12,17	37,50	81,40	82,86
2	41,22	14,89	38,24	77,59	85,00
3	44,58	15,49	33,06	79,22	66,67
VALOR	44,80±3,69*	14,18±1,77*	36,27±2,80*	79,40±1,91*	78,17±10,02*

* Medias \pm Desviación estándar

Discusión. La construcción y el diseño del sedimentador con capacidad de almacenar el agua residual producida en la porqueriza durante 24 horas, integrado como tratamiento primario dentro del sistema piloto de fitorremediación, cumplió con la finalidad propuesta, puesto que, se removieron porcentajes superiores a los plasmados por Crites & Tchobanoglous (2000) y Romero (2005), que establecían remociones entre el 50-70% para SST, del 25-40% para DBO₅ y 10-20%

para P_T . Para el caso de N_T se reportaron remociones similares a los encontrados por Crites & Tchobanoglous en el año 2000 (del 10-20%).

6.6.4. Evaluación de la Eficiencia de Remoción en los Canales de Fitorremediación.

A continuación, en tabla 19 se muestran el resultado de las remociones obtenidas de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los canales de fitorremediación. Luego de la estabilización del sistema piloto y por un periodo de tres meses se realizó la evaluación de las unidades objeto de estudio (T1: Canal con *Pistia Stratiotes*, T2: Canal con *Eichhornia Crassipes*, T3: Canal con *Lemna minor*), con un caudal de entrada ($Q=0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$). Adicionalmente, se realizó el registro de valores de pH y de Temperatura. Cabe mencionar que en esta tabla, se plasman las remociones obtenidas sólo en los tres canales estudiados (no se tiene en cuenta las remociones resultantes del sedimentador).

Tabla 19. Remociones de los canales de fitorremediación

<i>Tratamiento (T)</i>	<i>Remoción DBO₅ (%)</i>	<i>Remoción N_T (%)</i>	<i>Remoción P_T (%)</i>	<i>Remoción SST</i>	<i>Remoción C. F.</i>	<i>pH (Unidades)</i>	<i>Temp. °C</i>
T1	83,97	55,72	37,50	74,50	86,25	7,6	23
T1	89,78	64,36	34,92	82,05	90,00	8,2	24
T1	93,45	65,92	30,86	69,81	94,00	7,5	23
T2	71,56	27,41	35,00	62,50	90,00	7,6	23
T2	80,06	23,43	30,16	53,85	86,25	8,1	23
T2	76,66	32,80	28,40	66,98	94,50	8,1	23
T3	86,83	40,66	31,25	79,75	85,42	7,3	22
T3	92,72	30,69	25,40	84,62	90,00	7,5	23
T3	88,65	41,16	28,40	88,21	94,63	8,1	24

En la figura 31, se muestran las remociones obtenidas en los canales de fitorremediación sembrados con *Pistia Stratiotes* (T1), *Eichhornia crassipes* (T2) y *Lemna minor* (T3) para los parámetros fisicoquímicos objeto de estudio.

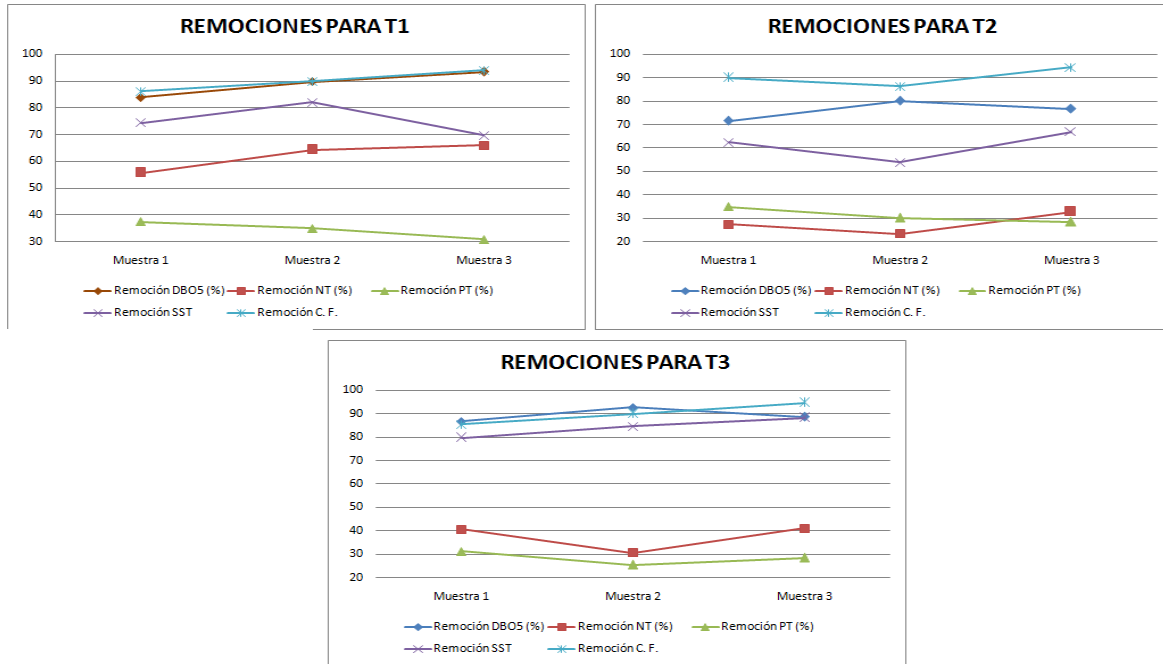


Figura 31. Remoción de contaminantes para T1, T2 Y T3.

Asimismo, se elaboró grafica de dispersión de datos, para cada parámetro fisicoquímico evaluado. En figura 32 se muestra.

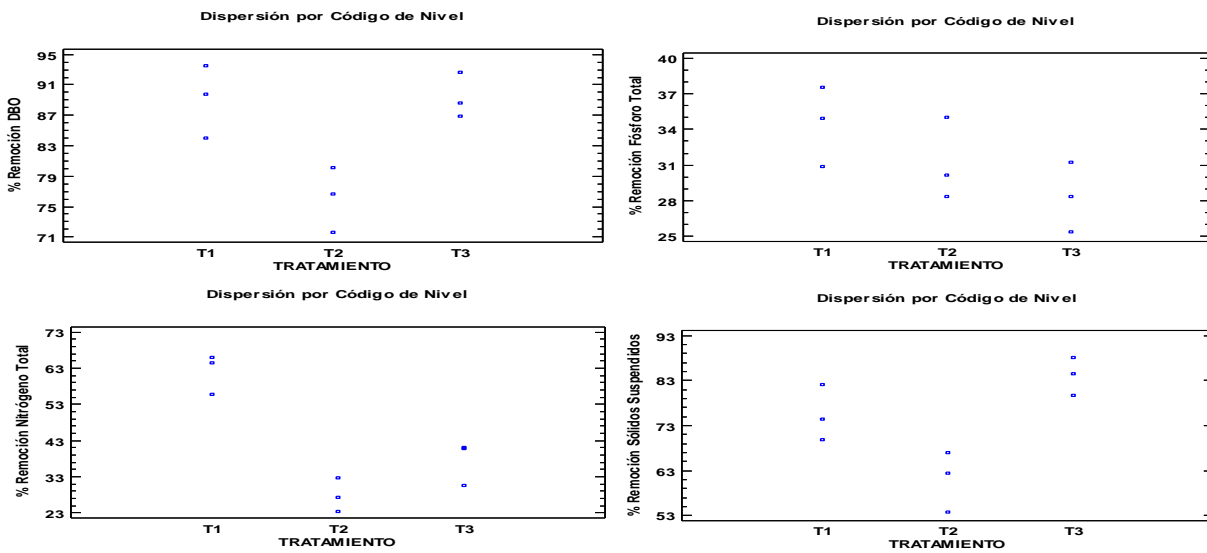


Figura 32. Dispersión de datos para DBO₅, N_T, P_T, CF y SST

Análisis Estadístico. Los resultados del análisis estadístico aplicado a los valores obtenidos en la remoción de los parámetros fisicoquímicos de DBO₅, N_T, P_T y SST, para los factores de Caudal (Q₁= 0,010 m³.día⁻¹) y Tratamientos evaluados (T1: Canal con *Pistia Stratiotes*, T2: Canal con *Eichhornia Crassipes*, T3: Canal con *Lemna minor*), fueron procesados con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión XVI.

Para la ANOVA Unifactorial + test LSD; se determinó qué factores son los que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre cada una de las variables estudiadas, en este caso, se evidencia que las variables “% Remoción P_T” y “% Remoción CF” no presentan diferencias significativas (p<0,05); sobre los Tratamientos estudiados, mientras que en las variables “% Remoción DBO₅”, “% Remoción N_T” y “% Remoción SST” evidencian diferencias estadísticamente significativas (p<0,05) sobre los tratamientos (T1, T2, T3). En tabla 20 se muestran los datos arrojados de la aplicación de ANOVA Unifactorial + test de LSD.

Tabla 20. Medias de LSD para remoción de los canales de fitorremediación

TRATAMIENTO	% Remoción DBO₅	% Remoción P_T	% Remoción N_T	% Remoción SST	% Remoción CF
T1	89,07 ^b ± 4,78	34,43 ^a ± 3,35	62,00 ^b ± 5,49	75,45 ^b ± 6,18	90,08 ^a ± 3,88
T2	76,09 ^a ± 4,28	31,19 ^a ± 3,42	27,88 ^a ± 4,70	61,11 ^a ± 6,67	90,25 ^a ± 4,13
T3	89,40 ^b ± 3,02	28,35 ^a ± 2,92	37,50 ^a ± 5,90	84,19 ^b ± 4,25	90,02 ^a ± 4,60

Medias ± Desviación estándar.

Columnas con letras distintas son significativamente diferentes, prueba de LSD (P < 0,05).

Discusión. Para la DBO_5 , las unidades que reportaron mayor porcentaje de remoción fueron los tratamientos (T1: Canal con *Pistia Stratiotes* y T3: Canal con *Lemna minor*) con remociones cercanas al 90% (T1=89,07% y T3=89,40%), en comparación con la remoción obtenida en el tratamiento plantado con *Eichhornia Crassipes*. (T2=76,09%). Se presentaron diferencias estadísticamente significativas en T2. Aun así, las remociones coinciden con investigaciones realizadas por Arias-López & Castillo (2006); Medina (2007); Duran-de-Bazua & Guido-Zarate (2008); Cabascango (2017); García-Echavarría & Gómez-Ramírez, (2018); quienes establecen porcentajes de remoción para este parámetro fisicoquímico entre 70 y 90 %.

Caso similar sucedió para las remociones de SST (T1= 75,45%; T2=61,11% y T3=84,19%), presentándose diferencia significativas en el tratamiento T2. Pudiendo favorecer que tanto el T1 y T3 eran los canales de fitorremediación que presentaban un lámina de agua menor ($y=0,20m$) en comparación con el T2 ($y=0,50m$). Aun así, estos resultados coinciden con investigaciones realizadas por Arias-López & Castillo (2006); Medina (2007) que reportan remociones entre 60 y el 80 %.

Respecto a las remociones de N_T , se presentaron elevadas remociones en el tratamiento sembrado con *Pistia Stratiotes* (T1=62,00%) en comparación con los otros dos sistemas evaluados (T2=27,88% y T3=37,50%), presentándose así, diferencias estadísticamente significativas. Aun así, los valores difieren de investigaciones realizadas por Medina (2007) y Sifuentes (2018) que reportan remociones del 68 % y 89,2 % respectivamente.

Las menores remociones se reportaron para- P_T - (T1= 34,43%; T2=31,19% y T3=28,35%), para este caso, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas respecto a las tres unidades estudiadas, aun así, difieren de investigaciones realizadas por Medina (2007);

Cabascango (2017) y Sifuentes (2018) que reportaron remociones del 67 %, 85 % y 98,2% respectivamente.

6.6.5. Evaluación de la Eficiencia de Remoción en los Sistemas Pilotos de

Fitorremediación. A continuación, en tabla 21 se muestran el resultado de las remociones obtenidas de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: DBO₅, N_T, P_T, SST y CF, para cada sistema de fitorremediación consistente en las siguientes unidades:

- S1= Sedimentador (TS) + Canal sembrado con *Pistia Stratiotes* (T1)
- S2= Sedimentador (TS) + Canal sembrado con *Eichhornia Crassipes* (T2)
- S3= Sedimentador (TS) + Canal sembrado con *Lemna minor* (T3)

Tabla 21. Remociones de los sistemas evaluados

<i>Sistemas (S)</i>	<i>Remoción DBO₅ (%)</i>	<i>Remoción N_T (%)</i>	<i>Remoción P_T (%)</i>	<i>Remoción SST</i>	<i>Remoción C. F.</i>
S1	91,76	61,11	60,94	95,26	97,64
S1	94,00	69,66	59,80	95,98	98,50
S1	96,37	71,20	53,72	93,73	98,00
S2	85,38	36,24	59,38	93,02	98,29
S2	88,28	34,83	56,86	89,66	97,94
S2	87,07	43,21	52,07	93,14	98,17
S3	93,23	47,88	57,03	96,23	97,50
S3	95,72	41,01	53,92	96,55	98,50
S3	93,71	50,27	52,07	97,55	98,21

A continuación, en la figura 33, se muestra el comportamiento de las remociones resultantes del sistema de fitorremediación -S1-, -S2- y -S3- para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos objeto de estudio.

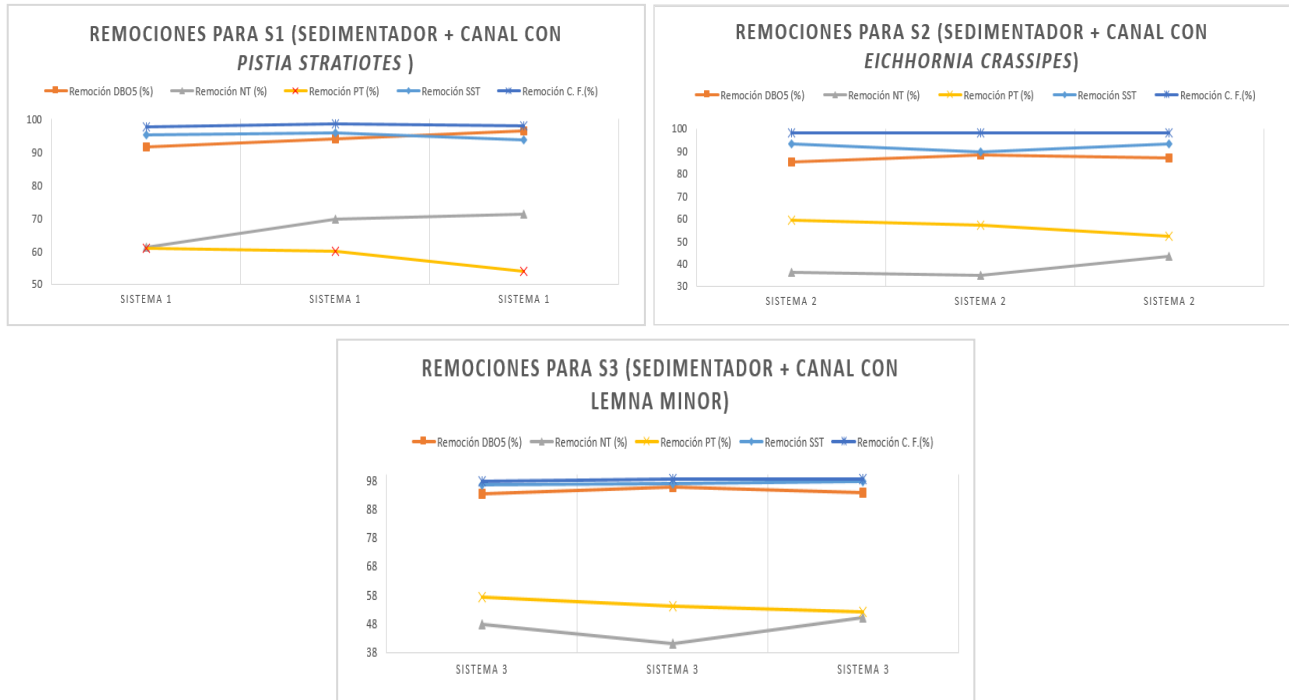


Figura 33. Remociones para los sistemas objeto de estudios

En tabla 22 se muestran los datos arrojados de ANOVA Unifactorial + test de LSD, para los valores obtenidos en la evaluación de los sistemas de fitorremediación objeto de estudio.

Tabla 22. Medias de LSD para DBO₅, NT, PT, SST y CF

TRATAMIENTO	% Remoción DBO₅	% Remoción P_T	% Remoción N_T	% Remoción SST	% Remoción C.F.
S1	94,04 ^b ± 2,30	58,15 ^a ± 3,88	67,32 ^b ± 5,44	94,99 ^b ± 1,15	98,05 ^a ± 0,43
S2	86,91 ^a ± 1,46	56,10 ^a ± 3,71	38,09 ^a ± 4,89	91,94 ^a ± 1,98	98,13 ^a ± 0,18
S3	94,72 ^b ± 1,32	54,34 ^a ± 2,51	46,39 ^a ± 4,81	96,78 ^b ± 0,69	98,07 ^a ± 0,51

Medias ± Desviación estándar.

Columnas con letras distintas son significativamente diferentes, prueba de LSD (P < 0,05).

Discusión. Según el procesamiento de los datos obtenidos dentro de las unidades piloto de fitorremediación se presentan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), para los factores “% Remoción DBO_5 ”, “% Remoción N_T ” y “% Remoción SST” en los sistemas evaluados (S1, S2 y S3).

Para el caso de la DBO_5 , los tres sistemas reportaron altas remociones (S3=94,04%; S2=86,91% y S3=94,72%) para este parámetro fisicoquímico, por ello, y aunque se reportaron diferencias estadísticamente significativas en el sistema S2 (Sedimentador (TS) + Canal sembrado con *Eichhornia Crassipes* (T2)), cualquiera de los tres sistemas evaluados cumplen con lo establecido dentro de la resolución 631 de 2015.

El sistema que mejor removió Nitrógeno total dentro del agua residual porcina fue el S1= Sedimentador (TS) + Canal sembrado con *Pistia Stratiotes* (T1) (S1=67,32%) en comparación a las otros dos especies vegetales (S2=38,09% y S3=46,39), lo que implica que la especie vegetal influye en el metabolismo del Nitrógeno.

Aunque las remociones de sólidos suspendidos totales se encuentran por encima del 90% en los tres sistemas evaluados (S1=94,99%; S2=91,94% y S3=96,78%) se corrobora la incidencia de la altura de la lámina de agua en el aumento de la eficiencia de remoción en este parámetro; pues los sistemas S1 y S3 contaban con altura de lámina de agua menor que S2.

Los factores que no reportaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) dentro del montaje piloto fueron: “% Remoción P_T ” con remociones cercanas al 60% (S1=58,15%, S2=56,10% y S3=54,34%) y “% Remoción CF” con remociones cercanas al 98% (S1=98,05%, S2=98,13% y S3=98,07%).

6.7. Proponer alternativas de sistemas de tratamiento para las aguas residuales porcinas de los colegios agropecuarios del departamento del Huila.

Para la proposición de alternativas de tratamiento para las aguas residuales porcinas de las instituciones educativas agropecuarias del departamento del Huila, es necesario conocer las especies vegetales comunes dentro del área de influencia, entre ellas se destacan: Buchón de Agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de Agua (*Lemna minor*), Papiro (*Cyperus Papyrus* y Lechuga de Agua (*Pistia Stratiotes*). Asimismo, conocer y definir las diferentes unidades de infraestructura hidráulica a implementar en cada STAR, pues e importantes incluir en estas:

6.7.1. Rejillas o Cribado. Una vez generadas las aguas residuales porcinas, estas, deberán pasar por un sistema de cribado (rejillas, hechas con varillas de hierro paralelas u otro material). El propósito fundamental de este pretratamiento es proteger las demás unidades de obstrucciones o colmatación a causa de residuos sólidos gruesos. Las rejas de limpieza deberán ser instaladas con una inclinación de 30 a 60° con respecto al plano horizontal de la canaleta y/o línea de conducción del agua residual. La separación entre las barras varían, pueden llegar a tener una separación grande de 5 a 10 cm, o pequeña, de 1 a 4 cm. (Valdez & Vázquez, 2003). Ver figura 34.

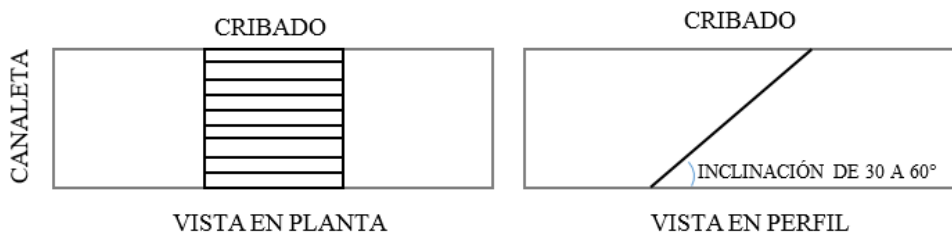


Figura 34. Especificación del Cribado

6.7.2. Tratamiento Primario. Su función es la remoción (a través de medios físicos o mecánicos) del material sedimentable o flotante del agua residual. Es decir, se remueven además de sólidos gruesos, grasas y aceites, también una fracción importante de la carga orgánica, entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos (Romero-Rojas, 1999). Entre los tratamientos primarios se destacan; Sedimentación simple: Sedimentador primario; Biodigestor; Filtros gruesos y Precipitación química: Oxidación química; Coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

Para el diseño y selección del tratamiento primario a implementar, es fundamental conocer el caudal (Q) generado dentro de la actividad y definir el tiempo de retención hidráulico (TRH), para el caso de los sistemas primarios, este puede variar de 2 a 5 horas (Crites & Tchobanoglous, 2000; NATSABAR, 2005). Todo depende de la disponibilidad de del tipo de tratamiento y el área superficial con que se cuente, para la instalación del mismo. Así, como su forma, pues estas unidades pueden ser circulares o rectangulares (De la Peña, *et al.*, 2015). Las remociones teóricas de los tratamientos primarios se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 23. Remociones Teóricas y Experimentales del Tratamiento Primario

PARÁMETRO	<i>Sedimentadores simples</i>		<i>Precipitación Química</i>
	Sedimentador primario	Biodigestor	Oxidación química; Coagulación, floculación, sedimentación y filtración
DBO ₅	25 - 40 %	40 - 60 %	50 - 85 %
DQO	20 - 35 %	-	40 - 70 %
Sólidos suspendidos	40 - 70 %	60 - 80 %	70 - 90 %

Fuente: Romero-Rojas, 1999; Crites & Tchobanoglous, 2000; De la Peña, *et al.*, 2015

Por su facilidad en construcción y operación, se recomienda la implementación de tratamientos o unidades que realicen el proceso de sedimentación simple (sedimentador primario). A continuación, en figura 35 se muestran las especificaciones generales para el diseño y la construcción de un sedimentador primario circular a instalar dentro de un sistema a escala real, para el tratamiento de las aguas residuales porcinas generadas dentro de las instituciones educativas agropecuarias del departamento del Huila.

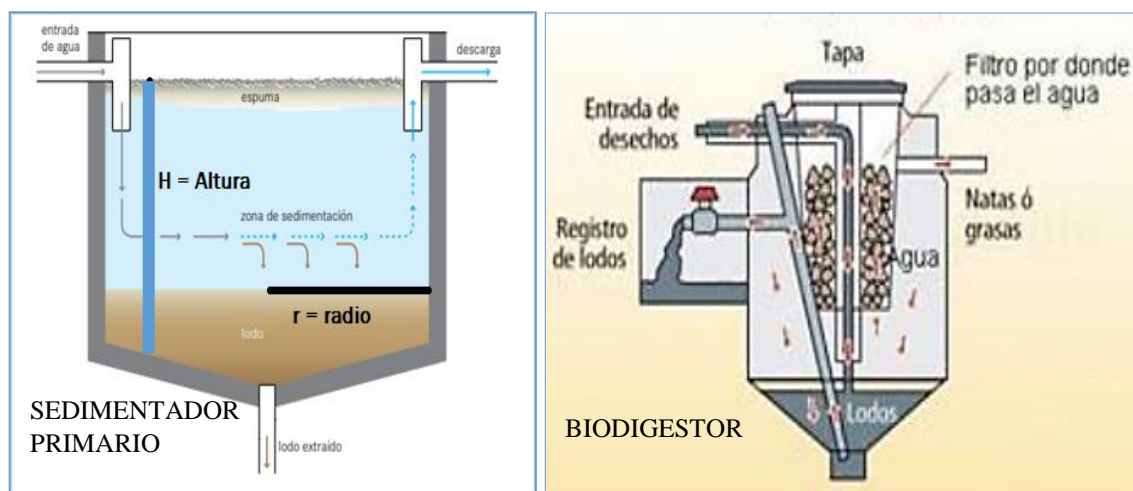


Figura 35. Especificaciones del Sedimentador primario y biodigestor
Fuente: Adaptado de Tilley, *et al.* (2005).

6.7.3. Tratamiento Secundario. Su función principal es la reducción de los compuestos orgánicos del agua residual, dicha remoción se realiza exclusivamente por procesos biológicos. De los procesos biológicos más utilizados son los lodos activados y filtros percoladores. Dentro de este grupo, se incluyen las lagunas de estabilización y aireadas, filtros biológicos (humedales artificiales), Lodos activados, otros (Anaerobios), así, como sistemas híbridos y/o modificaciones (Romero-Rojas, 1999).

Dentro de los tratamientos secundarios se dio prioridad en implementación a los sistemas de fitorremediación, utilizando material vegetal del área de influencia de los centros educativos agropecuarios del departamento del Huila entre los que se destacan: (Buchón de Agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de Agua (*Lemna Minor*), Papiro (*Cyperus Papyrus*) y Lechuga de Agua (*Pistia Stratiotes*)). Estas unidades (canales de fitorremediación, humedales artificiales y/o lagunas con plantas acuáticas) fueron escogidas por sobre los sistemas convencionales debido a su facilidad en construcción, operación, mantenimiento y las altas remociones conseguidas, entre el 80% al 95% para la DBO (De la Peña, *et al.*, 2015).

Así las cosas, se proponen tres (3) sistemas, con sus respectivas unidades, para el tratamiento de las aguas residuales porcinas generadas en las instituciones educativas agropecuarias del departamento de Huila:

- *Alternativa 1*: Pretratamiento (Rejillas) + Tratamiento Primario (Biodigestor) + Tratamiento secundario (Laguna con macrófitas).

- *Alternativa 2*: Pretratamiento (Rejillas) + Tratamiento Primario (Sedimentador Primario) + Tratamiento secundario (Humedal Artificial).

- *Alternativa 3*: Pretratamiento (Rejillas) + Tratamiento Primario (Sedimentador Primario) + Tratamiento secundario (Canal de fitorremediación).

A continuación, en la figura 36 se muestran las alternativas (esquemas vista en planta) de las unidades propuestas por los autores, para el tratamiento del agua residual porcícola generado en la Institución Educativa Núcleo El Guadal del Municipio de Rivera. Cabe mencionar que la eficiencia de las unidades objeto de estudio, depende del mantenimiento que se le haga

(remoción de sólidos y de lodos de los sistemas) así, como del tipo de especie vegetal utilizada dentro de los canales de fitorremediación.

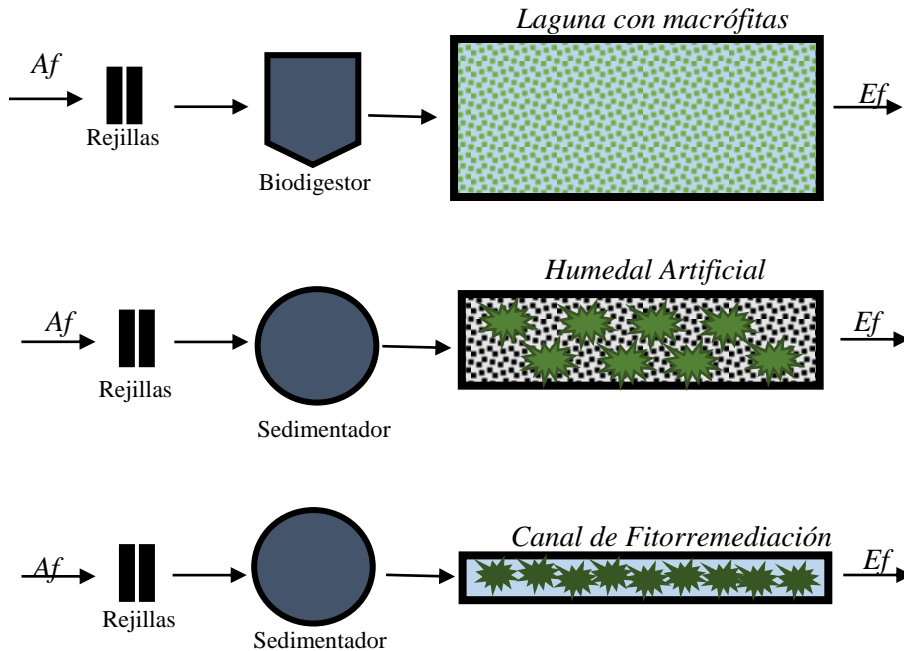


Figura 36. Esquemas de Alternativas de tratamiento

Para el caso de La Institución Educativa Núcleo El Guadual del Municipio de Rivera Huila y debido a las condiciones topográficas y disposición del terreno, se decidió optar por la alternativa 3 (Pretratamiento (Rejillas) + Tratamiento Primario (Sedimentador Primario) + Tratamiento secundario (Canal de fitorremediación)). Asimismo, para el diseño de estas unidades se definieron los siguientes parámetros:

- Conocer el valor del caudal del agua residual (Q) generado en metros cúbicos por día ($m^3/día$).
- Definir el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) del tratamiento (> 5 días). Para el caso del sistema piloto, el TRH fue de 12 días.

- La Altura de la lámina de agua puede variar de $y = 0,50 - 1,00$ metros, y esta depende de la longitud de las raíces del material vegetal a utilizar dentro de los canales.

- Un ancho del canal de mínimo 0,50 metros, con el fin de facilitar tanto el mantenimiento del sistema, como el buen desarrollo de la vegetación.

- Los canales de fitorremediación deben contar con una capa de geo-membrana, plástico o cualquier otro tipo de material que garantice la impermeabilidad del sistema y se evite la contaminación de napas de aguas.

- Los canales deben contar con una pendiente mínima del 1%.

- La ubicación de la PTAR no deberá estar muy cerca de las aulas escolares u otras edificaciones, por olores y posibles insectos.

6.8. Diseño del Sistema de Tratamiento de las Aguas Residuales Porcinas de la Institución Educativa Núcleo Escolar El Guadual.

Una vez definido la alternativa a implementar, se procedió a calcular los caudales (promedio y máximo) del agua residual porcina generada en el centro educativo (capacidad máxima de la porqueriza (24 cerdos)), y así, el dimensionamiento de las unidades de infraestructura hidráulica. Cabe mencionar que la generación del agua residual no es continuo y se presenta en el momento de los lavados de las porquerizas, que se realizan dos (2) veces al día, presentando caudales máximos ($Q_{\text{máximo}} = 0,08 \text{ L}\cdot\text{seg}^{-1}$) se realiza el dimensionamiento de las unidades a instalar.

A continuación, en la figura 37 se presenta los valores calculados de caudal y con los que se pretende realizar el diseño de un sistema de tratamiento.

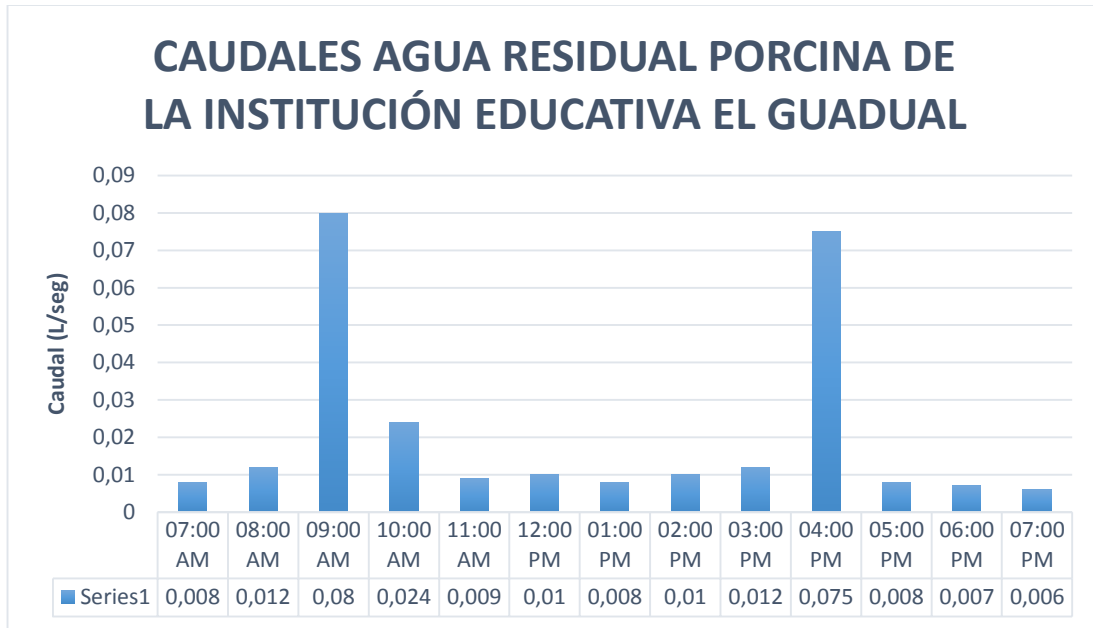


Figura 37. Caudales agua residual porcina de Institución Educativa El Guadual

6.8.1. Dimensionamiento de Rejilla. Puesto que dentro de las porquerizas ya existe una canaleta construida en concreto y encargada de la recolección y conducción del agua residual porcina de dimensiones Ancho=0,30m; Alto=0,12m; Largo total=32m y con una altura de la lámina de agua $y=0,03$ m cuando se presenta caudal máximo, solo se hace necesario el diseño e instalación de las unidades de cribado dentro de la canaleta ya existente.

Debido al tipo de residuos presente dentro del agua residual a tratar (restos de heces, alimento, cascarilla de arroz) se hace necesario implementar dos rejillas con diferentes espesores cada una ($a_1=0,05$ m y $a_2=0,01$ m), con el fin de evitar el taponamiento por presencia de residuos sólidos gruesos.

En figura 38 se muestra las especificaciones de las rejillas a instalar dentro de las canaletas.

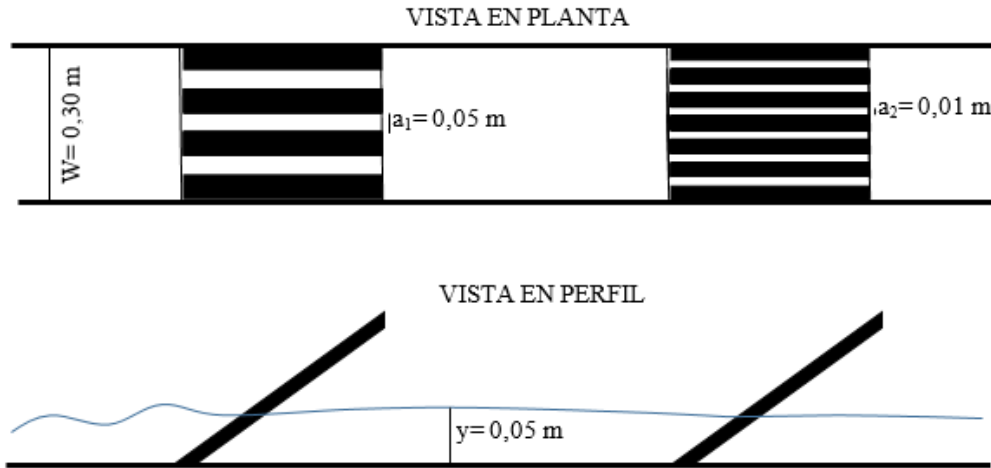


Figura 38. Especificaciones de Rejillas en I.E. El Guadual

6.8.2. Dimensionamiento del Sedimentador Primario. Luego de establecer el caudal del agua residual en m^3/h ($Q= 0,288\text{ m}^3/\text{h}$), definiendo un TRH= 24 horas para este tratamiento primario, estableciendo la profundidad del sedimentador (entre 1,5 – 2,5 m) y en tanques circulares la pendiente en el fondo es del 8% regularmente (De la Peña, *et al.*, 2015). Se calcula el volumen del sedimentador mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen}_{\text{sedimentador}} = Q(\text{m}^3/\text{h}) * \text{TRH}(\text{h})$$

En donde, **Q**: Caudal del agua residual generada, en metros cúbicos por hora (m^3/h) y **TRH**: Tiempo de Retención Hidráulico del sistema en horas (h).

$$\text{Volumen}_{\text{sedimentador}} = 0,288 (\text{m}^3/\text{h}) * 24 (\text{h}) = \mathbf{6,91\text{ m}^3}$$

Una vez calculado el volumen del sedimentador, y definidos la altura de la misma unidad (H: 2,0 m), se calcula el valor del radio, a través de la siguiente ecuación.

$$r = \sqrt{\frac{\text{Volumen}_{\text{sedimentador}}}{\pi * H}}$$

En donde, **r**: Radio del Sedimentador y **H**: Altura del Sedimentador

$$r = \sqrt{\frac{6,91 \text{ m}^3}{(3.1416) * (2 \text{ m})}} \rightarrow r = 1,05 \text{ m}$$

$$\rightarrow r = 1,10 \text{ m}$$

Para facilidad en construcción, se tomará $r = 1,10 \text{ m}$. A continuación, en figura 39 se muestran las dimensiones calculadas para el sedimentador primario propuesto para el tratamiento de las aguas residuales porcinas de la Institución educativa Núcleo El Guadual del Municipio de Rivera Huila.

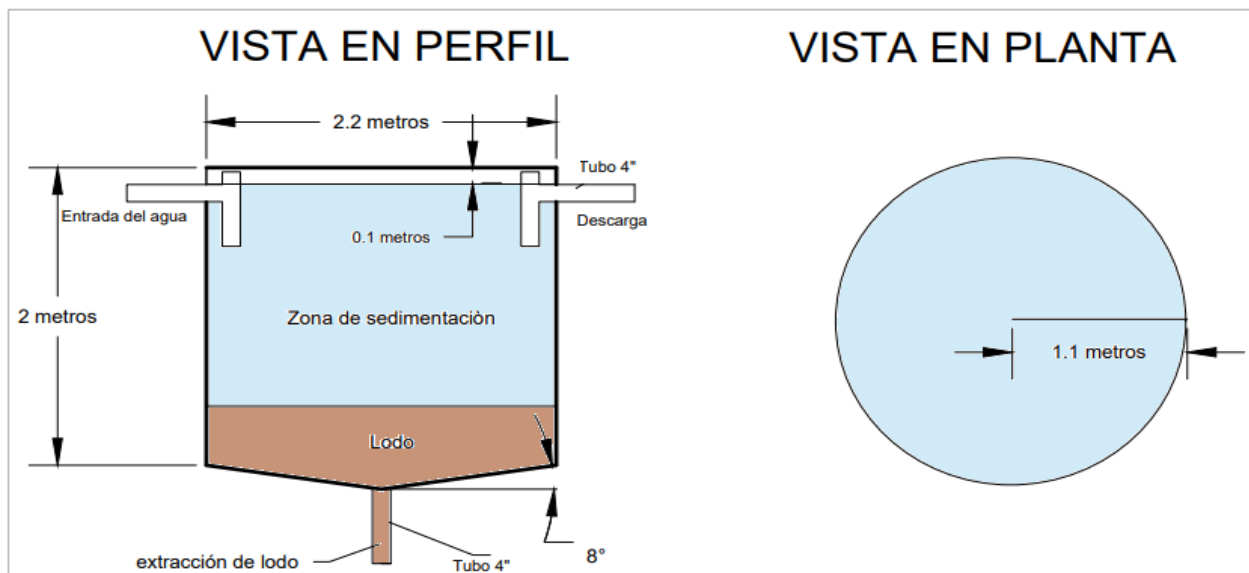


Figura 39. Dimensiones Sedimentador Primario
Fuente: Adaptado de Tilley, et al. (2005).

6.8.3. Dimensionamiento del Canal de Fitorremediación. Para el dimensionamiento del STAR de la institución educativa objeto de estudio, se definió una altura de la lámina de agua ($y=0,90$ m), un ancho ($W=0,50$ m) y TRH= 10 días. Una vez definido los anteriores parámetros, se calculó las dimensiones del canal de fitorremediación a partir de las siguientes ecuaciones.

$$Volumen_{canal} = Q(m^3/día) * TRH(día)$$

$$Volumen_{canal} = 6,91 (m^3/día) * 10 (días)$$

$$Volumen_{canal} = 69,1 m^3$$

Luego de definir el volumen del canal y ya preestableciendo los valores de Altura de la lámina de agua en el canal ($y=0,90$ m) y Ancho del mismo ($A=0,50$ m), se calcula la longitud del sistema de fitorremediación.

$$Longitud_{canal} = \frac{Volumen_{canal}}{(y) * (W)}$$

$$Longitud_{canal} = \frac{69,1}{(0,90m)(0,50m)} \rightarrow Longitud_{canal} = 153,5 m$$

$$\rightarrow Longitud_{canal} = 154 m$$

Cabe recordar que dentro del dimensionamiento de las unidades (sedimentador y canal de fitorremediación), se deberá establecer un borde libre (BL) con el fin de evitar el desbordamiento del agua residual en los sistemas. Para el caso, el BL=0,10 m. En figura 40 se muestra las dimensiones del canal de fitorremediación.



Figura 40. Dimensiones del Canal de Fitorremediación

Debido a la falta de disponibilidad de terreno y/o dificultades de la topografía del mismo, La Institución Educativa Núcleo El Guadual del Municipio de Rivera Huila podría construir dichos canales de fitorremediación, en zig-zag. En figura 41 se muestra una propuesta de construcción en zig-zag en un área superficial en poco más de 78 m².

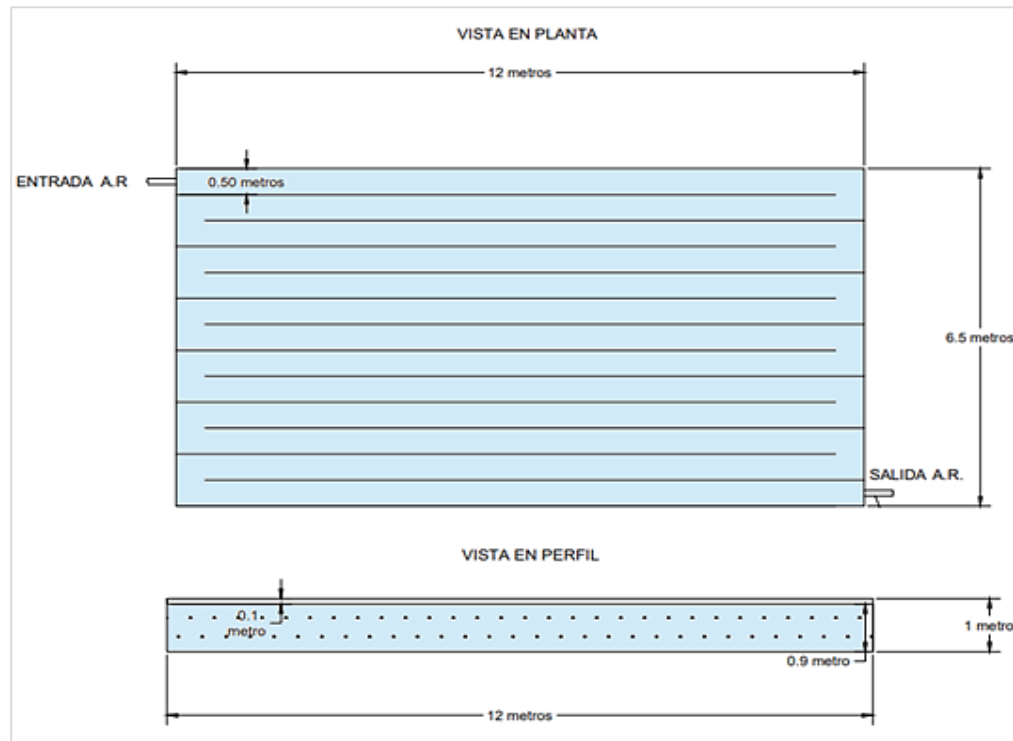


Figura 41. Propuesta en zig-zag del Canal de Fitorremediación

Dentro del material vegetal a utilizar dentro de este sistema secundario, se podría optar por *Lemna minor* (Lenteja de Agua) o *Pistia Stratiotes* (Lechuga de Agua) que fueron las especies que mayor porcentaje de remoción reportaron en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos estudiados dentro del sistema piloto de fitorremediación.

7. Conclusiones y Recomendaciones

Las Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila no cuentan con Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) para el tratamiento de las aguas residuales producto de la actividad porcina. El 55,6% realiza aprovechamiento de la porquinaza a través del compostaje, que es utilizado para los cultivos de los centros educativos; los restantes, hacen el lavado de las porquerizas sin realizar la previa recolección de las heces, lo que aumenta el riesgo de contaminación de recursos naturales (agua, suelo, aire) de las zonas aledañas a los vertimientos; así como la proliferación de vectores y olores desagradables.

En el Sistema de Tratamiento Experimental, se lograron remociones altas en todos los contaminantes estudiados, con valores similares para los tres Tratamientos Secundarios: S1= Canal sembrado con Pistia Stratiotes; S2= Canal sembrado con Eichhornia Crassipes y S3= Canal sembrado con Lemna Minor. Para DBO₅: S1=94,04%, S2= 86,91% y S3= 94,72%; para SST: S1=94,99%, S2=91,94% y S3=96,78%; para P_T: S1=58,15%, S2=56,10% y S3=54,34% y para N_T: S1=67,32%; S2=38,09% y S3=46,39. Lo que nos indica que Sistemas de Tratamiento que contemplen como Tratamiento Secundario canales sembrados con macrófitas es una buena alternativa para el tratamiento de las aguas residuales porcinas.

Debido a las características del agua residual porcina, topografía, disposición de terreno y los resultados del Sistema Experimental, para la Institución Educativa Núcleo El Guadal del Municipio de Rivera, se propone un sistema de tratamiento compuesto por una Unidad Preliminar (Cribado), un Primario (Sedimentador) y un Secundario (canal de fitorremediación sembrado con Pistia Stratiotes).

Es fundamental la implementación de buenas prácticas ambientales dentro de las actividad porcícola (Tratamiento de sus aguas residuales, Gestión integral de residuos sólidos, Uso eficiente y ahorro del agua, entre otras). Con el fin de minimizar los riesgos a la salud y las afectaciones al ambiente.

Es importante realizar estudios complementarios a los de este proyecto, que permitan ampliar el conocimiento sobre el tema, como un inventario sobre las plantas acuáticas en el Huila, su potencial fitorremediador y las posibilidades del reúso de los subproductos del tratamiento. Así mismo la construcción de un Sistema Experimental Piloto en la Universidad Surcolombiana.

Otras Instituciones Educativas Agropecuarias del Departamento del Huila, podrían construir Sistemas de Tratamiento similares, por tratarse de Sistemas fáciles de construir, de fácil operación y mantenimiento y acordes con el entorno.

Se recomienda realizar frecuentemente la cosecha o recolección del material vegetal dentro de los sistemas de fitorremediación, con el fin de promover el crecimiento de nuevo material y así, no disminuir la eficiencia del sistema por saturación de contaminantes en las plantas.

8. Bibliografía

- Antezana, J.W.O.; Blas, C.D.; García R.P.; Rodríguez, C.; Beccaccia, A.; Ferrer, R.P.; Cerisuelo, A. 2016. Composition, potential emissions and agricultural value of pig slurry from Spanish commercial farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 104(2):159-173.
Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-016-9764-3>
- Arévalo-Peña, J. J., & Zambrano-Malagón, L. G. (2007). Implementación de un sistema autosostenible en la granja agropecuaria del municipio de Cogua para el tratamiento de los vertimientos líquidos porcícolas. Recuperado de:
<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/13963/T41.07%20A34i.pdf?sequence=1>
- Arias Lopez, J. A., & Castillo, R. (2006). Manejo de aguas residuales y excretas en la producción de cerdos en Zamorano, Honduras (No. T2202). ESCUELA AGRICOLA PANAMERICANA. Recuperado de:
<https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5289/1/CPA-2006-T006.pdf>
- Arias S. A., Betancur, F. M. B., Gómez, G., Salazar, J. P., & Hernández, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador técnico*, 74. Recuperado de:
http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5
- Arroyave M. P. (2004). La lenteja de agua: una planta acuática promisoría. *Revista EIA*, (1), 33-38. Recuperado de:http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100004
- Beccaccia, A., Riera, P. F., Ibáñez, M. Á., Estellés, F., Rodríguez, C., Moset, V., ... & Rebollar, P. G. (2015). Relationships among slurry characteristics and gaseous emissions at different types of commercial Spanish pig farms. In *Spanish Journal of Agricultural Research* (Vol.

- 13, No. 1, pp. 1-15). Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/65110>
- Bernal López, O. J. (2014). Diseño de unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales domesticas en el Campus UMNG-Cajicá con fines de reusó (Tesis de Maestría, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano). Recuperado de: <http://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitream/handle/20.500.12010/1749/T060.pdf?sequence=1>
- Botache, Carmen Alicia; Botache, Leoncio & Barragan, Napoleón. (2001) Diseño, construcción y evaluación de un biodigestor piloto en el municipio de la Plata Huila, como sistema de tratamiento de aguas residuales en pequeñas explotaciones agropecuarias. (Trabajo de Grado en la Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Surcolombiana, Neiva.)
- Bosco, T. C., Cosmann, N. J., Sbizzaro, M., Junior, I. T., & dos Santos Silva, J. (2015). Caracterizaçõ de águas residuárias de suinocultura provenientes de dois sistemas de tratamento. Revista Agrogeoambiental, 8(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v8n32016864>
- Burton, FL, CAJIGAS, A., Tchobanoglous, G., TRILLO FOX, IAN, MONTSORIU, T., y DE DIOS, JUAN (1995). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. Metcalf y Eddy. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UCC.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf n=052015>
- Caballero-Lajarín, A. M. (2013). Sistema de depuración de aguas residuales de origen ganadero. Humedales artificiales. DOI: [10.31428/10317/3891](https://doi.org/10.31428/10317/3891)
- Cabascango, C.L. (2017). Planta de tratamiento de aguas residuales mediante un sistema combinado aerobio, anaerobio, y fitorremediación para el programa porcino del IASA

(Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Civil.). Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12818/1/T-ESPE-053795.pdf>

Celis Hidalgo, J., Junod Montano, J., & Sandoval Estrada, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. Recuperado de: <http://biblioteca.cehum.org/handle/123456789/405>

Cervantes, F. J., Saldívar-Cabrales, J., & Yescas, J. F. (2007). Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1), 3-12. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Cervantes/publication/228790955_Estrategias_para_el_aprovechamiento_de_desechos_porcinos_en_la_agricultura/links/0a85e52f8e422c6f03000000.pdf

Chaux, G., Caicedo, J. R., & Fernández, J. E. (2013). Tratamiento de efluentes piscícolas (tilapia roja) en lagunas con *Azolla pinnata*. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 11(2), 46-56. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117696>

Commission, W. R. (2000). *Constructed wetlands: The answer to small scale wastewater treatment in South Africa*. South Africa.

Conesa, F. V. (2009). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Mundi-Prensa Libros.

Cook, C. D., Gut, B. J., Rix, E. M., & Schneller, J. (1974). *Water plants of the world: a manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes*. Springer Science & Business Media.

Cooper, P. (2005). The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. *Water Science and Technology*, 51(9), 81-90. Recuperado de: <http://wst.iwaponline.com/content/51/9/81>

Crites, R., Tchobanoglous, G., y Camargo, M. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones* (No. 628.3 C7T7). Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=librosslp.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=003161>

De la Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora Plascencia, V. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Inter-American Development Bank. Recuperado de: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15374/tratamiento-de-aguas-residuales-en-mexico>

Delgadillo, O. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera. Recuperado de: http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf

Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext

Departamento de Agricultura y Protección del Consumidor de la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Perspectivas alimentarias*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/CA0910ES/ca0910es.pdf>

- Duque, A. M., & Ardila, J. G. P. (2014). Evaluación de la eficiencia de un sistema piloto de humedales híbridos como post-tratamiento de aguas residuales de una porcícola (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química). Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/71398036.pdf>
- Durán-de-Bazúa, C., Guido-Zárate, A., Huanosta, T., Padrón-López, R. M., & Rodríguez-Monroy, J. (2008). Artificial wetlands performance: Nitrogen removal. *Water Science and Technology*, 58(7), 1357-1360. Recuperado de: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/58/7/1357/15423>
- Escalante Estrada, V. E. (2002). Tratamiento de efluentes de una granja porcícola en el estado de Campeche. In *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 28 (pp. 1-6). FEMISCA. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-034.pdf>
- Favas, P. J., Pratas, J., Varun, M., D'Souza, R., & Paul, M. S. (2014). Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora. In *Environmental risk assessment of soil contamination*. InTech. pp. 486. Recuperado de: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/46355.pdf>
- Federación Colombiana de Ganaderos –FEDEGAN- (2018). Estadísticas. Consumo. Recuperado de: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/consumo-0>
- Fondo Nacional de la Porcicultura –PorkColombia- (2018). Análisis de coyuntura del sector porcicultor del año 2017 y perspectivas 2018. Recuperado de: https://asociados.porkcolombia.co/porcicultores/images/porcicultores/informes/Bol_Inf_2017.pdf
- Gallego, E.I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales (Tesis de Pregrado, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira). Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1833>

- Gamboa Salazar, J. P., Mejía Valderrama, M. C., Arias, D., & Emilsen, C. (2016). Identificación de alternativas para el manejo, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los residuos sólidos generados en las granjas porcícolas de la Región Valles de San Nicolás del Oriente Antioqueño (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Lasallista). Recuperado de: <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/2040>
- García, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/33422601/download>
- García-Echavarría, J. G., & Gómez-Ramírez, L. C. (2018). Construcción de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, en el predio “Mi Ranchito”, en la vereda Olarte, localidad Usme–Bogotá. Recuperado de: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/16848>
- García J., Morató J., Bayona J., (2004). “Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos”. Ed. Ediciones CPET. p. 100.
- Garzón-Zúñiga, M. A., & Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 65-79. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n1/v30n1a6.pdf>
- Gesama, T. E., & Calvache, L. T. (2017). Implementación de un humedal para tratamiento del efluente de la granja San Carlos. Libros Editorial UNIMAR. Recuperado de: <http://www.ojseditorialumariana.com/index.php/libroseditorialunimar/article/view/1326/1285>
- Hammel, B. E., Grayum, M. H., Herrera, C., & Zamora, N. (2003). Manual of Plants of Costa Rica, Volume II: Gymnosperms and Monocotyledons (Agavaceae-Musaceae). Missouri Botanical Garden Press. Recuperado de: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20073070354>

- Lara, J., (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales (Tesis Doctoral, Instituto Catalán de Tecnología Universidad Politécnica de Cataluña).
- Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/humedales/humedales.pdf>
- López Lafuente, A. (2009). Bioremediación y fitorremediación en suelos contaminados. Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia.
- Machado, E. M., Robayo, Y., Ayala, H., & Chávez Porras, A. Plan de Manejo Ambiental para un proyecto porcícola. Estudio de Caso: Proyecto la Zambera, Otanche, Boyacá. Recuperado de: http://www.umng.edu.co/documents/10162/745279/V2N2_10.pdf
- Malik, A. (2007). Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth. *Environment international*, 33(1), 122-138. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412006001309>
- Manga, J. G., Molinares, N. R., Soto, E. O., Arrieta, J., Escaf, G. J., & Hernández, A. G. (2004). Influence of inlet-outlet structures on the flow pattern of a waste stabilization pond. In 6th International Conference of Waste Stabilization Ponds, Avignon, France.
- Martínez, M., Murcia, D. y Suarez, Y., (2015). Evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcícolas en la finca El Porvenir, vereda Suncunchoque, sector la laja, Ubaté–Cundinamarca, y su reutilización con fines agroambientales (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios). Recuperado de: https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/3339/TIAG_MartinezRomeroMacol_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, S. A. A., Toro, F. M. B., Rojas, G. G., Giraldo, J. P. S., & Ángel, M. L. H. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales

porcinas. *Informador técnico*, 74. Recuperado de:

http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5/5

Masache Granda, C. E. (2016). Evaluación del potencial fitorremediador de dos especies vegetales (*pistia stratiotes* L) y (*hydrocotyle ranunculoides* Lf) en el tratamiento de las aguas contaminadas por la porcicultura en la granja “el guayabal” del barrio nambija bajo, cantón Zamora (Bachelor's thesis). Recuperado

de:<http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/17761/1/Carmen%20Elizabeth%20Masache%20Granda.pdf>

Medina, P. A., 2007. Manejo de los Residuos de la Explotación Porcina en la Institución Educativa El Tejar Municipio de Timaná Huila. Diseño de una alberca biológica (Tesis. Universidad Surcolombiana. Neiva).

Mena, J., Rodríguez, L., Núñez, J., & Villaseñor, J. (2000). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Castilla, España: CONAMA. Recuperado de: http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf

Ministerio del Medio Ambiente, SAC., & de Porcicultores, A. C. (2002). Guía Ambiental para el subsector Porcícola. Asociación Colombiana de Porcicultores. Recuperado de: <https://asociados.porkcolombia.co/porcicultores/images/porcicultores/publicaciones/GUIA-AMBIENTAL-PORCICOLA.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17, Marzo de 2015) Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. [Resolución 631 de 2015].

- Montoya-Castaño, D., Moreno-Sarmiento, N., Espinosa-Hernández, A., Buitrago-Hurtado, G., Aristizábal-Gutiérrez, F., Bernal-Morales, M., & García-Romero, I. A. (2017). GRUPO DE BIOPROCESOS Y BIOPROSPECCIÓN. Del laboratorio a la industria. Revista Colombiana de Biotecnología. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/html/776/77653191003/>
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., & Olgún, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia, julio-setiembre*, 69-82. Recuperado de:
http://suel.wikispaces.com/file/view/Fitorremediacion_Fundam_Aplic.pdf
- Organización de la Naciones Unidas. Centro de Noticias ONU. (2017) Las aguas residuales también pueden ser herramientas para el desarrollo sostenible 11-07-17. Recuperado de:
<https://news.un.org/es/story/2017/03/1375771>
- Oquendo J. R. (2016). Evaluación de *thypa latifolia* en la absorción de plomo y propuesta de fitorremediación de aguas residuales con metales pesados en la laguna de Yahuarcocha (Doctoral dissertation, Universidad Internacional SEK).
- Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Alonso, R. A., & Zermeño-González, A. (2007). Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. México, Departamento de Riego y Drenaje, UAAAN.
- Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M., & Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 469-481. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>
- Pertuz Lafaurie, K. M., & Brochero Pertuz, O. I. (2008). Evaluación de la depuración de aguas residuales domesticas utilizando humedales artificiales de flujo superficial con las especies

Eichhornia Crassipes (buchón de agua). *Pistia Stratiotes* (lechuga de agua) (Tesis Doctoral, Universidad del Magdalena). Recuperado de:

<http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/handle/123456789/262>

Pérez Espejo, R. (1998). Porcicultura intensiva y medio ambiente en México, situación actual y perspectivas.

Pérez, R. (2001). Porcicultura y contaminación del agua en la Piedad, Michoacán, México.

Revista internacional de contaminación ambiental, 17(1), 5-13. Reccuperado de:

<https://www.redalyc.org/pdf/370/37017101.pdf>

Pérez Salazar, R., Alfaro Chinchilla, C., Sasa Marín, J., & Agüero Pérez, J. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Uniciencia, 27(1). Recuperado de:

<https://www.redalyc.org/html/4759/475947762019/>

Pietra, A., & Drucker, A. G. (2000). Sistema de depuración de aguas residuales porcícolas para granjas de 20-80 vientres. In Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 12 (pp. 1-7). FEMISCA.

Prasad, M. N. V. (2004). Fitorremediación. Aplicaciones, ventajas e inconvenientes. La Ecofisiología Vegetal. Thomson Editores. España. 1197p. Recuperado de:

https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-07743-6_14

Romero Rojas, J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. JA Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño, 17-23.

Romero Rojas, J. A. (2005). Lagunas de estabilización de aguas residuales. Bogotá: Colombia, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Recuperado

de: <http://dspace.ucbscz.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/22841/1/12019.pdf>

- Rook, E. (2002). Flora, fauna, earth and sky. The natural history of the northwoods. Recuperado de: <http://www.rook.org/earl/bwca/nature/aquatics/lemna.html>
- Sanchez, E., Borja, R., Travieso, L., Martín, A., & Colmenarejo, M. F. (2005). Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. *Bioresource Technology*, 96(3), 335-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.04.003>
- Sifuentes, R. L. (2018). Eficiencia del berro (*Nasturtium officinale*) de diferentes edades en humedales artificiales para la depuración de los purines de la porcícola comunal de Acopac-Huari-Ancash-2018. Recuperado de: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/18314>
- Suero Sánchez, D. E. (2016). Evaluación de opciones tecnológicas para el tratamiento de efluentes de la unidad experimental de cerdos de la UNALM. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2860>
- Torres, Z. S. I., & Vásquez, V. R. A. (2010). Estudio de la potencialidad de crecimiento de once especies vegetales nativas tropicales regadas con lixiviados de rellenos sanitarios (Tesis de grado (ingeniería sanitaria), facultad de ingeniería, universidad del Valle. Cali, Colombia).
- Tilley, E., Lüthi, C., Morel, A., Zurbrügg, C., & Schertenleib, R. (2008). Compendio de Sistemas y Tecnología de Saneamiento. Dübendorf, Suiza: EAWAG. Recuperado de: <https://www.eawag.ch/en/departament/sandec/publikationen/compendium/>
- Valdez, E., & Vázquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA, AC México DF México.
- Valencia Granada, E., Artunduaga M., W., & Gordillo P., L. (1). Recuperación parcial del concentrado de la Porquinaza, una alternativa ambiental y económica. *Ingeniería Y Región*, 6(1), 53-60. DOI: <https://doi.org/10.25054/22161325.811>

- Valencia G., E., Silva G., I., & Narváez R., C. (2010). Sistemas descentralizados integrados y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingeniería Y Región*, 7, 65-72. DOI: <https://doi.org/10.25054/22161325.801>
- Valera, M. (2001). Tasas de descomposición de las macrófitas *Schoenoplectus californicus*, *Egeria densa* y *Eichhornia crassipes* en la laguna de Fúquene. Tesis para optar el título ecóloga. Pontificia Universidad Javeriana. Citado por: Mora Ortiz, L. (2009). Crecimiento sobre buchón y elodea de *pleurotus ostreatus* y efecto de esta especie fúngica sobre la digestibilidad del sustrato lignocelulósico como potencial alimento para rumiantes (Tesis para optar el título ecóloga. Pontificia Universidad Javeriana).
- Viancelli, A., Kunz, A., Steinmetz, R. L. R., Kich, J. D., Souza, C. K., Canal, C. W., & Barardi, C. R. M. (2013). Performance of two swine manure treatment systems on chemical composition and on the reduction of pathogens. *Chemosphere*, 90(4), 1539-1544. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565351201106X>
- Vicari, M. P. (2012). Efluentes en producción porcina en Argentina: generación, impacto ambiental y posibles tratamientos. Trabajo final de ingeniería en producción agropecuaria, 38-40. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/greenstone/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=tesis&d=efluentes-produccion-porcina-argentina>
- Viveros-Monje, D. C. (2017). Postratamiento de aguas residuales en plantas de beneficio de ganado porcino y bovino utilizando humedales artificiales. (Tesis de Maestría). Recuperado de: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/3132>
- Vymazal, J. (2006). Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Ten case studies from the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 37(1), 54-63. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857409003310>

Anexo A. Formato de encuesta aplicado a las instituciones educativas objeto de estudio.



**MANEJO AMBIENTAL PRODUCCION PORCINA EN COLEGIOS
AGROPECUARIOS DEL HUILA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
NEIVA- HUILA**

NOMBRE INSTITUCIÓN: _____

UBICACIÓN. MUNICIPIO: _____ VEREDA: _____

NOMBRE DEL DIRECTOR O RECTOR: _____

PROFESOR ENCARGADO DE LA SECCIÓN DE PORCINOS: _____

AUXILIAR ENCARGADO DE LAS PORQUERIZAS: _____

- ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR: _____
- CLIMA. CÁLIDO: _____ TEMPLADO: _____ FRÍO: _____
- TEMPERATURA PROMEDIO: _____
- TOPOGRAFÍA. PLANO: _____ ONDULADA: _____ QUEBRADA: _____

1. DE LAS INSTALACIONES PORCINAS:

• AÑO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS PORQUERIZAS: _____

• MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. PISO: _____

MUROS: _____ TECHOS: _____

• N° DE INSTALACIONES (O PORQUERIZAS): _____

• **DIMENSIONES DE CADA INSTALACIÓN.**

- PORQUERIZA 1. _____
- PORQUERIZA 2. _____
- PORQUERIZA 3. _____
- PORQUERIZA 4. _____
- PORQUERIZA 5. _____

• **ESQUEMA EN PLANTA DE CADA PORQUERIZA. (ANEXO)**

2. TAMAÑO DE LA EXPLOTACION

- TIPO DE PRODUCCIÓN. CRÍA: _____ LEVANTE: _____ CEBA: _____
 - NÚMERO DE ANIMALES. CRÍA: _____ LEVANTE: _____ CEBA: _____
- CAPACIDAD DE LAS INSTALACIONES (NÚMERO DE CERDOS): _____
- OCUPACIÓN ACTUAL DE LAS INSTALACIONES (NÚMERO DE CERDOS): _____
 - EL TAMAÑO DE LA EXPLOTACIÓN ES. GRANDE: _____ MEDIANA: _____ PEQUEÑA: _____

3. TIPO DE EXPLOTACIÓN

- ES TECNIFICADA: _____ ES SEMITECNIFICADA: _____ ES TRADICIONAL: _____
- FORMA DE DISTRIBUIR EL ALIMENTO. MANUAL: _____ MECANIZADO: _____
- FORMA DE DISTRIBUIR EL AGUA. MANUAL: _____ DISPENSADORES: _____ BEBEDERO TRADICIONAL _____

4. LAVADO DE LAS PORQUERIZAS

- EL LAVADO LO HACEN. CON MANGUERAS: _____ DE OTRA FORMA _____ (CUAL): _____
- NÚMERO DE LAVADAS AL DÍA: _____
- CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA (Litro/ m² de piso – lavada): _____
- QUE ELEMENTOS UTILIZAN PARA EL LAVADO. JABONES _____ DESINFECTANTES _____ OTROS _____ CUALES _____
- QUE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN UTILIZAN PARA EL LAVADO. _____

5. MANEJO DE LOS RESIDUOS

- MANEJO DEL ESTIÉRCOL. HACEN COMPOSTA: _____ SE DISUELVE EN AGUAS DE LAVADO: _____
- MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES. PLANTA DE TRATAMIENTO: _____ OTRO _____ (CUAL): _____
- SI TIENEN PLANTA DE TRATAMIENTO. SISTEMA: _____ UNIDADES: _____
- SI TIENEN PTAR. MANEJO DEL EFLUENTE. REÚSO: _____ OTRO (CUAL): _____

- SI REÚSAN. EN QUÉ ACTIVIDAD:

- SI NO TIENE PTAR. PLANEAN CONSTRUIRLA: _____
SISTEMA: _____

- VERTIDOS A UN SISTEMA PÚBLICO DE AGUAY/O ALCANTARILLADO

- ZONAS CERCANAS A LOS PUNTOS DE VERTIMIENTO. LAGOS _____ AULAS
DECLASE _____ RESTAURANTE _____ OTRO _____ CUAL

6. IMPACTOS DE LAS PORQUERIZAS SOBRE EL AMBIENTE Y LA COMUNIDAD

- POR OLORES: _____
- POR LOS ESTIÉRCOLES: _____
- POR LAS AGUAS RESIDUALES: _____
- OTROS (CUALES): _____

7. EDUCACIÓN Y PROGRAMAS DE EXTENSIÓN

- LOS ESTUDIANTES RECIBEN FORMACIÓN EN PORCICULTURA: _____
- LOS ESTUDIANTES REALIZAN PRÁCTICAS EN LAS PORQUERIZAS: _____

- TÍTULO QUE RECIBEN LOS ESTUDIANTES:

- LA INSTITUCIÓN TIENE PROGRAMAS CON LA COMUNIDAD EN PORCICULTURA: _____ CUALES: _____

- PROBLEMAS MÁS RELEVANTES DEL TRABAJO CON LA COMUNIDAD:

8. DE LA COMUNIDAD

- EN LA REGIÓN, HAY EXPLOTACIONES PORCINAS: _____ GRANDES: _____
MEDIANAS: _____ PEQUEÑAS _____

- TAMAÑO PROMEDIO DE LAS EXPLOTACIONES PEQUEÑAS (NÚMERO DE CERDOS): _____

