

**FORMULACIÓN DE UN MODELO PARA EL TRATAMIENTO DE
EFLUENTES PROCEDENTES DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA
PISCÍCOLA HVS UBICADA EN EL CORREGIMIENTO EL CHARCO –
PLANETA RICA, CÓRDOBA**

EVY GRISELDA TAPIA POLO



**GOBERNACIÓN DE CÓRDOBA
SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y AGROINDUSTRIAL**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2019

**FORMULACIÓN DE UN MODELO PARA EL TRATAMIENTO DE
EFLUENTES PROCEDENTES DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA
PISCÍCOLA HVS UBICADA EN EL CORREGIMIENTO EL CHARCO –
PLANETA RICA, CÓRDOBA**

EVY GRISELDA TAPIA POLO

**GOBERNACIÓN DE CÓRDOBA
SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y AGROINDUSTRIAL**

**Informe final para optar al Título de Ingeniera Ambiental
Modalidad Práctica Empresarial**

Tutor Docente

JOSÉ JOAQUÍN PINEDO

Magíster en Ciencias Ambientales

Tutor Empresa

DELIMIRO DURANGO LEÓN

Especialista en Gerencia del Ambiente

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA – CÓRDOBA**

2019

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. ASPECTOS GENERALES GOBERNACIÓN DE CÓRDOBA, CADENA ACUÍCOLA DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA	8
3. DIAGNÓSTICO	11
4. OBJETIVO GENERAL.....	13
4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5. ACTIVIDADES PROGRAMADAS.....	14
6. ACTIVIDADES DESARROLLADAS	16
6.1. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO EN LA PISCÍCOLA HVS.....	16
6.1.1. Recopilación de información secundaria	16
6.1.2. Caracterización de las actividades productivas	17
6.1.3. Caracterización de la calidad de efluentes	22
6.1.4. Circulación de agua en el sistema de estanques	26
6.2. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES	26
6.2.1. Planteamiento de las posibles alternativas	27
6.2.2. Selección de la alternativa más adecuada.....	32
6.3. FORMULACIÓN DEL MODELO PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES	32
7. APORTES A LA EMPRESA.....	40
8. CONCLUSIONES.....	41
9. RECOMENDACIONES.....	42
10. BIBLIOGRAFÍA	43
11. ANEXOS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama Gobernación de Córdoba.....	8
Figura 2. Uso potencial del suelo Municipio de Planeta Rica.....	15
Figura 3. Esquema de la Piscícola HVS. Corregimiento El Charco.....	18
Figura 4. Esquema de un filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente..	28
Figura 5. Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial horizontal-	30
Figura 6. Entrada acoplada a tubería de distribución enterrada.....	37
Figura 7. Vista en planta humedal artificial.....	39
Figura 8. Corte longitudinal humedal artificial.....	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones de estanques en el sistema productivo Piscícola HVS.....	18
Tabla 2. Medición de Parámetros fisico-químicos, método de colorimetría. Estanques 1 y 4, Piscícola HVS	23
Tabla 3. Medición Parámetros físico-químicos, método de colorimetría. Reservorio, Piscícola HVS.	23
Tabla 4. Medición de parámetros fisico-químicos, método analítico. Estanques 1 y 4, Piscícola HVS..	24
Tabla 5. Requerimientos del medio filtrante para filtros anaerobios	28
Tabla 6. Dimensiones del sistema de humedal artificial con flujo subsuperficial	35

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Estanque N° 1, Piscícola HVS .	47
Anexo 2. Estanque N° 4, Piscícola HVS.	47
Anexo 3. Reservorio, Piscícola HVS.	47
Anexo 4. Toma de muestras, estanques piscícolas.	48
Anexo 5. Freshwater Master Test - Kit empleado en método colorimétrico.	48
Anexo 6. Presupuesto.	49

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades acuícolas a nivel mundial, han experimentado un crecimiento a mayor ritmo que otros sectores importantes de la producción de alimentos. De acuerdo a las estadísticas realizadas por la FAO en 2018, su contribución a la producción mundial logró llegar al 46,8% en 2016, lo que supone un aumento con respecto al 25,7% del año 2000. Sin embargo, el crecimiento de este sector ha generado paralelamente, la preocupación por los impactos que cada una de las actividades llevadas a cabo dentro de este renglón productivo, genera en el ambiente.

Colombia cuenta con un importante potencial para el desarrollo de la acuicultura que se sustenta en una gran riqueza hídrica tanto continental como marina, un clima adecuado para el cultivo de especies tanto tropicales como subtropicales y una amplia gama de organismos acuáticos con aptitud para la domesticación. Según la AUNAP (2014), algunas de las debilidades de la acuicultura relacionadas con los recursos del ambiente, radica en la tendencia a la eutrofización de los cuerpos de agua de uso público cercano a los proyectos productivos acuícolas y el desconocimiento por parte de los productores de prácticas acuícolas que contribuyan a la reducción del impacto ambiental.

En el departamento de Córdoba se presenta una alta riqueza de recursos hídricos a nivel departamental, aptos para el cultivo de especies potenciales para el cultivo acuícola, esto, unido a la creciente demanda de los productos piscícolas a nivel local, nacional e internacional, permite que dentro de su Plan de Desarrollo, se plantee apoyar los sistemas de cultivo con la utilización de fertilizantes orgánicos o inorgánicos, con el suministro de alimentos concentrados comerciales y el uso de productos de la finca para la alimentación de los peces (Asamblea Departamental de Córdoba, 2016). Estos proyectos generalmente se desarrollan en ecosistemas artificiales y sus efluentes ricos en materia orgánica pueden contener una variedad de constituyentes como lo son: las altas concentraciones de compuestos nitrogenados, fósforo, altas demandas biológicas de oxígeno (DBO), alta carga de sólidos suspendidos (SST), entre otros, que, liberados al ambiente sin ningún tratamiento previo, pueden afectar los recursos hídricos (Díaz, 2012). Los impactos de esta actividad económica son diversos, abarcando desde los problemas estéticos y paisajísticos hasta graves episodios de contaminación; los excesos

de materia orgánica pueden causar importantes cambios en la química de los sedimentos y se puede presentar eutrofización, un factor que muestra sus inicios cuando el hombre contamina lagos y ríos con exceso de nutrientes que generan la aceleración del proceso y ocasiona el crecimiento acelerado de algas, la muerte de peces, la modificación de los micro ecosistemas acuáticos bentónicos y demás flora y fauna acuática, lo que conlleva a la generación de condiciones anaerobias. (González, 2017)

La gran discusión se centra entonces en la importancia del cuidado de los recursos ambientales del departamento, pero también, en la situación de aquellos productores dependientes de esta actividad que necesitan agua con la calidad necesaria para mantener su producción de forma saludable y, además, la problemática que muchos productores viven en épocas de sequía al no poseer el recurso agua en abundancia para sostener su producción. Se hace necesario entonces, plantear alternativas que permitan mejorar la calidad de agua que se obtiene al final de las etapas productivas, ya sea para hacer recirculación en el sistema y aprovechar un mayor porcentaje del volumen de agua usado o, para poder realizar vertimientos con una menor carga contaminante que cumpla con los límites máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental.

Esta investigación permite la formulación de un modelo que mejore la calidad de los efluentes obtenidos en el proceso productivo piscícola de la Piscícola HVS ubicada en el municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba, mediante la caracterización de efluentes piscícolas actuales, la identificación de posibles alternativas de tratamiento de efluentes y posteriormente, el establecimiento del modelo más adecuado con base en la capacidad de remoción de contaminantes que puedan afectar el desarrollo productivo de la actividad y el acceso a materia prima para su instalación.

2. ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA

1.1. Gobernación de Córdoba.

La gobernación de Córdoba es la principal autoridad ejecutiva del departamento de Córdoba. Es un compromiso de la Gobernación de Córdoba fortalecer las condiciones territoriales desde lo rural y lo urbano para alcanzar la Paz en la terminación del conflicto armado que permita el desarrollo del departamento mediante una planeación de visión a corto y largo plazo, para integrar una región competitiva (Gobernación de Córdoba, 2012).

Dentro de esta organización, existe un componente encargado de fortalecer grupos de productores agroindustriales con potencial comercial, vinculándolos a los procesos de agregación de valor para ser más competitivos en los mercados y tener capacidad para insertarse en las dinámicas económicas que exige el marco de la globalización; éste es función de la secretaria de Desarrollo Económico y Agroindustrial (Asamblea Departamental de Córdoba, 2016).

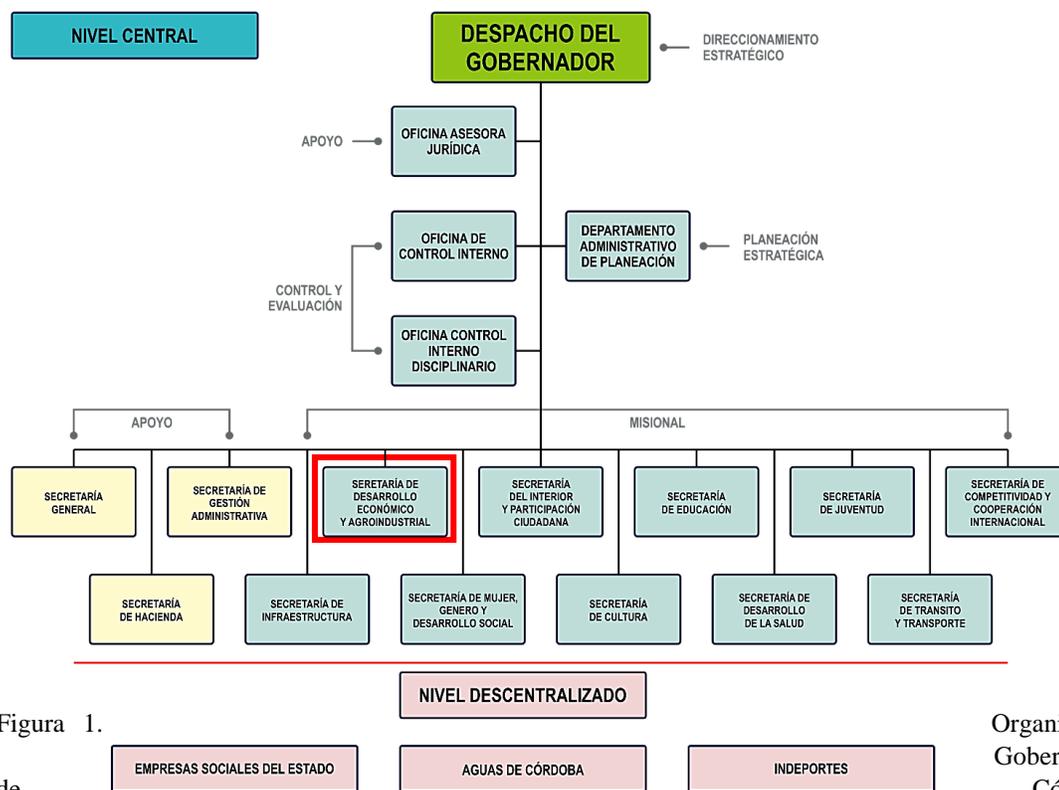


Figura 1.

de

Organigrama
Gobernación
Córdoba.

Fuente: (Gobernación de Córdoba, 2012).

1.1.1. Secretaría de Desarrollo Económico y Agroindustrial del departamento de Córdoba.

Es misión de Secretaría de Desarrollo Económico y Agroindustrial, desarrollar la adecuación de la infraestructura básica para gestar el desarrollo, prestar los servicios administrativos, técnicos y asistenciales tanto al sector público como privado o en asocio y coordinación con estos, para satisfacer las expectativas de los diferentes sectores a fin de lograr el crecimiento y la competitividad en cada una de las diferentes alternativas, para contribuir al impulso sostenido y sostenible del desarrollo integral del Departamento, y así mejorar el bienestar económico y social de la población cordobesa.

La acción administrativa encomendada a la secretaría, se enmarca en el desarrollo del departamento, teniendo como fundamentos principales:

- Una elevada orientación y proyección social, la promoción de formas asociativas en la producción, comercialización y la sujeción a los principios del desarrollo sostenible y sustentable.
- Prever y aplicar la incorporación de tecnologías en cada uno de los procesos productivos, con sujeción a las normas ambientales, que garanticen los mayores niveles de productividad y rentabilidad.
- Crear y garantizar los espacios y condiciones para el desarrollo sostenible de la agroindustria, la industria, el medio ambiente, las telecomunicaciones y el turismo propiciando la inversión social nacional y/o extranjera en el Departamento (Gobernación de Córdoba, 2012).

1.1.1.1. Cadena Acuícola del departamento de Córdoba

La Secretaria de Desarrollo Económico, a través de un proceso de coordinación y articulación institucional, empleando una amplia convocatoria a productores independientes y agremiados, ha logrado la conformación y formalización del Comité Regional Acuícola del Departamento de Córdoba. En el marco de este escenario, se eligieron los miembros del Consejo Regional, representado por miembros de los diferentes eslabones de la actividad acuícola y delegados de cada una de las entidades

con competencias en el sector. Se logra con esto iniciar un proceso de ordenamiento y desarrollo de la actividad acuícola en el Departamento, la cual se presenta como una alternativa de producción y reconversión productiva, ante la crisis de otros sectores del agronegocio y por la insatisfacción de la demanda interna y regional de productos pesqueros y acuícolas (Asamblea Departamental de Córdoba, 2016). La Secretaría de desarrollo asumió la secretaría técnica de la cadena y con ello se logra y consolida la representación del Departamento ante el Consejo Nacional Piscícola, escenario asesor para la toma de decisiones y asignación de recursos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural para la promoción de la competitividad del sector acuícola y pesquero en el país.

La acuicultura en el departamento de Córdoba tiene unas grandes oportunidades de desarrollo que, canalizadas y aprovechadas adecuadamente, permitirían el crecimiento y competitividad del sector con beneficios socio-económicos para los miles de familias dedicadas a la actividad acuícola. Entre otros aspectos se identifican los siguientes:

- Existencia de lineamientos claros de política a nivel nacional y regional para el apalancamiento de planes, programas y proyectos en el tema de acuicultura y pesca.
- Formalización y reconocimiento del Comité Regional de Cadena Acuícola por parte del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, del cual hacen parte todas las entidades con competencia en el sector y los diferentes eslabones de la producción.
- Representación ante el Consejo Nacional Piscícola, que se realiza en el marco de las políticas de Cadena que dirige el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Crecimiento sostenido de la demanda de productos acuícolas y pesqueros en los mercados locales, regionales, Nacionales e Internacionales (Secretaría Técnica de Acuicultura y Pesca, 2018).

3. DIAGNÓSTICO

La Piscícola HVS se encuentra ubicada en el corregimiento El Charco, municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba a 36km de la ciudad de Montería, capital departamental. La Piscícola HVS se localiza entre las coordenadas 8°32'32.14" N y 75°40'35.79" O, y para el sistema productivo abarca aproximadamente 2,5 Ha.

La región comprendida por el corregimiento El Charco, pertenece a una zona con vocación agroforestal, ligeramente agrícola. Sus suelos se caracterizan por tener fertilidad que va de baja a alta; la mayor parte de esta área tiene suelos pobremente drenados con profundidad efectiva superficial (Gobernación de Córdoba, 2018). En el municipio de Planeta Rica, la actividad acuícola ha tenido un débil auge debido a la inexistencia de cuerpos de agua permanentes; sin embargo, se han establecido algunos estanques para la actividad y el uso de algunos jagüeyes. La piscícola HVS se dedica a la producción de cachama blanca a través de un sistema de cultivo intensivo, es decir, un sistema en el cual se manejan densidades de siembra mayores de 5 peces/m². Cuenta con siete estanques en tierra de forma irregular, por lo que las densidades se trabajan en base al área: dos estanques dedicados a la fase de precría, cuatro estanques dedicados a la fase de levante y engorde, y un reservorio que se surte con agua lluvia, del cual se capta agua para suministrar a los otros estanques y mantener el ciclo de producción. Las profundidades varían respecto a la función que cumple cada uno, es decir, para aquellos dedicados a la fase de precría se emplea una menor profundidad con el fin de facilitar el manejo y reproducción de los alevines y, para los estanques de levante y engorde se emplea mayor área y profundidad que pueda tolerar la capacidad de carga máxima, producida con la densidad actual del sistema de cultivo. Debido a las características del sistema de cultivo, se alimenta a los animales con raciones balanceadas, siendo este el tipo de alimentación en un 100% y además, emplean sistemas de aireación u oxigenación en cada uno de los estanques productivos, en este caso aireación tipo Splash.

La cachama blanca (*Piaractus brachyomus*) es considerada la especie de mayor potencial productivo y comercial en las actividades de acuicultura extensiva, semi-intensiva e intensiva de aguas cálidas continentales de América tropical, debido a que es

una especie resistente al cautiverio, presenta alta docilidad y rusticidad; tiene poca susceptibilidad a contraer enfermedades, es resistente a los parásitos y de fácil adaptación a condiciones limnológicas desfavorables por períodos no prolongados (Mesa & Botero, 2007). El ciclo productivo en la Piscícola HVS consta de cuatro etapas productivas: la etapa de siembra de alevines que comprende la compra, transporte e introducción de peces destinados a la producción con pesos de 15-18kg; la etapa de precría que para esta especie demora aproximadamente 30 días, se les suministra alimento de levante en presentación harina con 40% de proteína; la etapa de levante (45-50 días) en la cual los alevines son trasladados a un estanque de mayor tamaño donde se les proporciona alimento con un porcentaje de proteína de 34%, además, la alimentación se complementa con microalgas y fitoplancton producidos naturalmente por los estanques. La etapa de engorde (8-10 semanas), es la etapa final en la producción de carne y se proporciona alimento con un 30% de proteína durante unas 4 semanas, posteriormente se les suministra alimento con un porcentaje de 24% de proteína; de igual forma realizan biometrías cada 15 días para verificar el incremento en la biomasa y ganancia en gramos obtenida en la producción, el pez alcanza un peso entre 350 – 400gr. Finalmente realizan la etapa de comercialización.

En cuanto a la calidad del agua, realizan mediciones de temperatura, pH, nitrito, nitrato y amoníaco, generalmente en horas de la mañana, en un solo horario a fin de minimizar el consumo de reactivos; según resultados obtenidos mediante el método de colorimetría, la carga contaminante presente, no sobrepasa los niveles permitidos para los peces de esta especie, antes de poder causar afectaciones. Es necesario tener cuenta que para poder recircular el agua y reincorporarla al sistema de estanques productivos, Colombia no tiene una legislación específica para efluentes de piscicultura; no obstante, países como Brasil tienen normas para este tipo de efluentes y teniendo en cuenta los parámetros establecidos según la Resolução N° 357/2005, los niveles actuales de la piscícola HVS cumplen para el reuso en acuicultura (CONAMA, 2005). Actualmente la piscícola HVS realiza un proceso de recirculación en sus estanques generalmente dos veces por semana, siendo la fuente principal el reservorio que se surte con agua lluvia; sin embargo, la mayoría de las veces, la acción mas recurrente es la reposición del nivel

de agua ya sea por factores como: pérdidas por filtración o evaporación, bajas concentraciones de oxígeno o niveles altos de compuestos nitrogenados.

4. OBJETIVO GENERAL

Formular un modelo para el tratamiento de efluentes procedentes del proceso productivo de la Piscícola HVS ubicada en el corregimiento El Charco – Planeta Rica Córdoba.

4.1.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar las características fisicoquímicas de los efluentes provenientes del sistema de estanques productivos en la Piscícola HVS.
- Analizar algunas alternativas para el tratamiento de efluentes de la Piscícola HVS.
- Establecer el modelo más adecuado para el tratamiento de los efluentes de la Piscícola HVS teniendo en cuenta la capacidad de remoción de contaminantes que afecten la actividad productiva.

5. ACTIVIDADES PROGRAMADAS

5.1.Revisión bibliográfica y recopilación de información primaria.

Se llevó a cabo la recopilación de información general acerca de la Piscícola; con base en fuentes primarias, se hizo una breve descripción acerca de las características edafológicas del suelo, número de estanques, fuente principal de abastecimiento de agua y aspectos generales de la localización geográfica de la Piscícola HVS.

5.2.Caracterización de las actividades productivas.

Posterior a la determinación de aspectos generales del proyecto, se realizó una caracterización de cada una de las fases del proceso productivo piscícola llevado a cabo, teniendo en cuenta: capacidad de los estanques, densidad de siembra, generalidades acerca de la especie productiva, entre otros.

5.3.Caracterización de la calidad de los efluentes.

Se llevó a cabo una caracterización de los efluentes, teniendo en cuenta la información primaria recolectada e información secundaria, lo que permitió determinar la carga de contaminantes que pudieran contener.

5.4.Planteamiento de las posibles alternativas para el sistema de tratamiento.

A partir de la revisión bibliográfica de tratamientos de aguas procedentes de estas actividades, se plantearon algunas alternativas para el sistema de tratamiento de efluentes, procedentes del proceso productivo. Se tuvo en cuenta la información obtenida en la caracterización de los procesos productivos piscícolas, las características generales del terreno donde se encuentra ubicado el proyecto, entre otros.

En esta etapa del estudio, se describieron y evaluaron algunas alternativas de bajo coste que pudieran implementarse para el tratamiento de los efluentes en la Piscícola HVS.

5.5.Selección de la alternativa de tratamiento de efluentes más adecuada.

La selección de la alternativa más adecuada para implementar en la finca HVS se hizo teniendo en cuenta aquella que, además de solucionar el problema planteado referente a la carga de contaminantes presentes en los efluentes y su posterior vertimiento, corresponda también a la de menor costo tanto de inversión como de operación.

5.6. Formulación de un modelo para el tratamiento de los efluentes.

Se formuló un modelo para el tratamiento de efluentes procedentes de los procesos productivos de la Piscícola HVS, teniendo en cuenta la alternativa seleccionada previamente.

6. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

6.1. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO PRODUCTIVO.

Para realizar el diagnóstico inicial de las actividades productivas en la Piscícola HVS, fue necesaria la recopilación de información secundaria, una caracterización de cada una de las etapas productivas, las características del sistema de circulación de agua en los estanques y una caracterización de la calidad de los efluentes.

6.1.1. Recopilación de información secundaria.

La Piscícola HVS se encuentra ubicada en el corregimiento El Charco, municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba y abarca aproximadamente 2,5 hectáreas para el sistema productivo. Teniendo en cuenta sus características edafológicas y geomorfológicas, este corregimiento pertenece a una zona con vocación agroforestal y ligeramente agrícola; está conformado por un terreno ondulado con tierras planas y ligeramente escarpadas con pendientes de hasta el 50%, se presentan grados de erosión que van de ligero a severo, drenaje pobre que disminuye considerablemente la fertilidad y profundidad efectiva superficial (figura 2) (Gobernación de Córdoba, 2018).

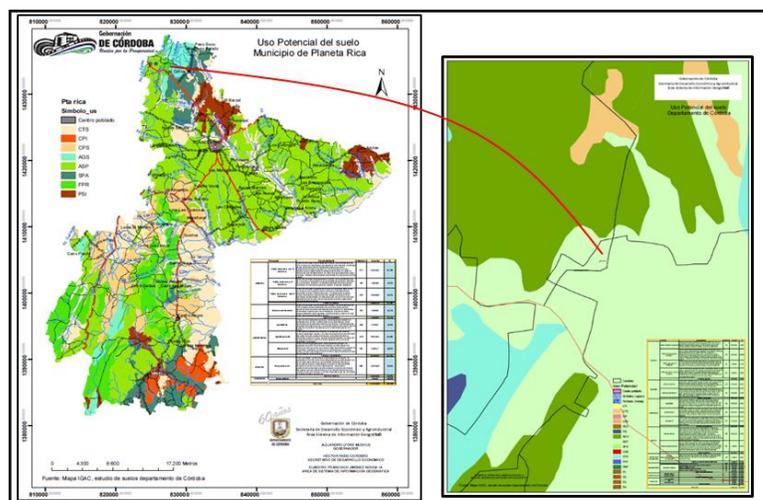


Figura 2. Uso Potencial del Suelo Municipio de Planeta Rica. Fuente: (Gobernación de Córdoba, 2012)

Varias son las razones que facilitan la presencia de factores que contribuyen a la disminución de la calidad del suelo, de acuerdo a la FAO (2019), a consecuencias de los altos grados de erosión, inicialmente se pierde la fertilidad y finalmente la capacidad de producción de los cultivos, lo que explica porque la baja vocación agrícola, aunque con enmiendas logran mantener algunos cultivos en pequeñas extensiones. Do Prado & da Veiga (2013), concluyen de sus estudios que las tierras se van volviendo gradualmente menos productivas debido a los diversos grados de erosión, iniciando por la degradación de la estructura del suelo, la disminución de la materia orgánica, la pérdida de nutrientes y finalmente la pérdida del suelo.

De acuerdo al estudio general de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) sobre el municipio de Planeta Rica, más del 90% de los suelos son clase VI y VII lo que permite plantear su limitada calidad y, por ende, la dificultad que se presenta para el establecimiento de cultivos agrícolas intensivos (PNUD, 2015); no obstante, el desconocimiento de las personas acerca de la vocación de los suelos, constantemente genera conflicto de uso de suelos e intensifica la problemática prevista. Se presentan temperaturas promedio de 28°C y humedades relativas que van desde 76% a 84%; presentándose las más altas en el mes de octubre (Alcaldía de Planeta Rica, 2016).

Dado que en este municipio hay poca existencia de cuerpos de agua permanentes, la actividad acuícola no ha tenido gran desarrollo como ocurre en otros municipios del departamento; para la economía municipal esta actividad tiene poco peso de importancia (Alcaldía Municipal de Planeta Rica Córdoba, 2012).

6.1.2. Caracterización de las actividades productivas.

La Piscícola HVS se dedica a la producción de cachama blanca. Actualmente cuenta con 7 estanques en tierra de forma irregular que conforman en total 11150,2 m² de espejo de agua (tabla 1); 2 estanques dedicados a la fase de precría, 4 estanques dedicados a la fase de levante y engorde y un reservorio que se surte con agua lluvia (Figura 3); siendo este, el mecanismo para captar y suministrar el agua necesaria para mantener el ciclo de producción en cada una de las etapas que se llevan a cabo. Se encuentra en funcionamiento desde el año 2016 y cuenta con una sala de procesos equipada para las

fases finales del ciclo de producción, es decir, la etapa de procesamiento y la etapa de comercialización.

Tabla 1. Dimensiones de estanques en el sistema productivo Piscícola HVS.

ESTANQUE	ÁREA ESPEJO DE AGUA (m ²)	PROFUNDIDAD (m)
Pecria 1	568,77	1,20
Pecria 2	319,09	1,20
E1	1675,10	1,70
E2	958,62	1,70
E3	1278,62	1,70
E4	1174,98	1,70
Reservorio	5175,02	1,70
Total	11150,02	

Fuente: propia.



Figura 3. Esquema de la piscícola HVS. Corregimiento El Charco. Fuente: (Google Earth, 2018)

La piscícola HVS maneja un sistema de cultivo intensivo en el cual se siembran densidades mayores de 5peces/m² en espejo de agua (Instituto Colombiano de Desarrollo Rural, 2006); este tipo de sistema de cultivo requiere mayor inversión tanto para el manejo de los peces como para el medio acuático, con el fin de obtener una mayor producción. Se incrementa la productividad del medio enriqueciendo la calidad

del agua a partir de la utilización de fertilizantes orgánicos o inorgánicos en algunos casos y se alimenta a los animales con raciones balanceadas dependiendo en un 100% del aporte externo. Se manejan y controlan permanentemente las variables ambientales, como son, oxígeno disuelto en el agua, temperatura, pH, entre otras. (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, 2010). En este tipo de sistemas de producción se emplean algunos sistemas de aireación u oxigenación, especialmente en las etapas finales del engorde; dichos equipos se encargan de incorporar el oxígeno atmosférico al agua de los estanques de cultivo y así mismo, aumentar la homogenización de las masas de agua.

Sistema de aireación.

Este proyecto productivo, implementa sistema de aireación tipo Splash. Según (Malpartida, 2015) el aireador tipo splash o fuente, incorpora el oxígeno atmosférico llevándolo del interfaz líquido a gas; es decir, impulsan el agua de los estanques hacia el aire transformando el agua en pequeñas gotas, colocándolas en contacto con el aire atmosférico. Estas gotas estarán menos oxigenadas y de esta manera se saturarán de oxígeno, de tal forma que al momento de ingresar al agua nuevamente, transferirán oxígeno en esta. El oxígeno en forma de gas posee una baja solubilidad en agua; además la cantidad de oxígeno contenido en el agua varía con la temperatura y la salinidad de manera predecible. Se necesita menos oxígeno en el agua de mar cálida que en el agua dulce fría. (Aquafeed, 2012).

Generalidades de la cachama blanca (*Piaractus brachypomus*).

La especie cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) es un pez de agua dulce, perteneciente a la familia Characidae, originario de sur América y su distribución va desde el Orinoco hasta la cuenca Amazónica. Respecto a su morfología, difiere de la cachama negra en que posee un menor tamaño rostrocaudal; tiene una coloración más clara, blanco plateado, a veces azuladas en el dorso y flancos. El abdomen es blanquecino, con ligeras manchas anaranjadas (Bello & González, 2018). De acuerdo al estudio económico realizado por Ardila (2016), la cachama blanca es una especie que posee una serie de condiciones que favorecen su cultivo como lo son: una alta tasa de

crecimiento, resistencia a las enfermedades y manipulación, buena aceptación por parte del consumidor, alimentación omnívora y alta fecundidad.

Calidad de agua óptima para la buena producción de cachama blanca.

De acuerdo a Casas (2008), la calidad del agua es uno de los factores determinantes del éxito de una producción piscícola. Los peces requieren condiciones mínimas para realizar sus funciones vitales, por tal razón se hace un control permanente de los parámetros físicos y químicos del agua.

- Esta especie tiene la capacidad de filtrar fitoplancton y zooplancton, además, se desarrolla muy bien en aguas con temperaturas entre 23 y 30°C. (Instituto Colombiano de Desarrollo Rural, 2006). Puede tolerar temporalmente temperaturas menores a 22°C o mayores a 34°C; sin embargo, si permanecen mucho tiempo bajo estas condiciones, los peces se estresan, reducen el consumo de alimento y se tornan susceptibles a enfermedades.

- El pH adecuado para ellas se encuentra entre 6.5 y 9. (Benavides & López, 2012). Un pH de 7 es el óptimo para su buen desarrollo.

- El oxígeno disuelto debe ser preferiblemente mayor a 4ppm para su desarrollo normal, resisten concentraciones menores, pero se pueden afectar los peces.

- Los compuestos nitrogenados (nitritos, nitratos y amonio) son productos de la excreción metabólica y tóxicos para los peces. Valores de 0.1 mg/l para nitritos y 0.01 mg/l de amoníaco indican perturbación del ciclo normal. Los nitratos son poco tóxicos, pero en condiciones anaerobias pueden transformarse en nitritos. (Bravo, 2001).

En Colombia, el auge económico de la cachama blanca radica en su clasificación de especie endémica y que, además, posee características favorables para su cultivo como el crecimiento rápido, hábitos alimenticios omnívoros, por lo que se adaptan fácilmente a recibir una gran variedad de alimentos naturales y alimento concentrado (Bello & González, 2018). Su importancia comercial reside en la excelente calidad y sabor de la

carne, además del alto valor productivo a causa de condición de especie omnívora, lo que le da la facultad de lograr altas tasas de conversión alimenticia (Mesa & Botero, 2007). En general, la parte de carne aprovechada en la cachama es del 43,2% de su peso, en comparación con la tilapia, cuyo aprovechamiento es del 40%. (Instituto Colombiano de Desarrollo Rural, 2006).

Etapas en el ciclo productivo.

- **Siembra de alevines.**

El proveedor de alevines es la COOPERATIVA VILLA MARÍA ubicada en el municipio de Lorica, departamento de Córdoba; esta empresa cuenta con su respectivo permiso de cultivo y registro sanitario. Al realizar la compra, los alevines son transportadas en bolsas plásticas especiales y al llegar a los estanques destinados a Precría, se sumergen las bolsas con los peces hasta que la temperatura de los dos medios esté en una temperatura homogénea y posteriormente se dejan salir los animales al estanque.

- **Precría.**

Esta fase para la especie cachama blanca demora aproximadamente 30 días. Se les suministra un alimento de levante con un porcentaje de proteína de 40% en presentación harina, durante las primeras 2 semanas; posteriormente, se pasa a un alimento con concentración de 34% de proteína en presentación extruder. Adicionalmente la alimentación se complementa con microalgas y zooplancton producido de forma natural por los estanques. En cada uno de los dos estanques destinados para precría, se siembran 9000 – 10000 alevines en cada inicio de ciclo, manejando densidades de hasta 16alevines/m².

- **Levante.**

Los alevines son trasladados a los estanques de mayor tamaño, donde se les proporciona alimento con un porcentaje de proteína de 34%. En esta etapa los animales demoran 45-50 días; las raciones suministradas varían de acuerdo al avance que tenga el pez en cuanto al peso. Así mismo, la alimentación se complementa con microalgas y

fitoplancton producidos naturalmente por los estanques. Se tiene una densidad de aproximadamente 6-7 peces/m² y cada 15 días se realizan biometrías para realizar seguimiento al avance obtenido en peso de los animales y así mismo realizar los respectivos ajustes en el alimento suministrado.

- **Engorde.**

Es la última etapa para la producción de carne, tiene una duración de aproximadamente 8-10 semanas. En esta fase, se les proporciona alimento con un 30% de proteína durante unas 4 semanas; a partir de este momento se les suministra alimento con un porcentaje de proteína de 24%. Se realizan biometrías cada 15 días para verificar el incremento en la biomasa y ganancia en gramos obtenida en la producción. El pez alcanza un peso entre 350 – 400gr.

- **Cosecha y comercialización de peces.**

Finalmente se realiza la recolección de los animales, empleando para ello una red de pescar. En ocasiones se disminuye un poco el nivel de agua en los estanques de engorde para facilitar la recolección de los animales. Posterior a esto, se realizan los procesos de: sacrificio, eviscerado, lavado y congelación en la sala de procesos dispuesta en la Piscícola HVS para estas actividades; cada ciclo de producción para esta especie demora aproximadamente 5-6 meses.

Al finalizar cada ciclo, se realiza una limpieza antes de iniciar un nuevo ciclo, drenando por completo cada estanque y removiendo la capa superficial del fondo de los estanques con una retroexcavadora que permite eliminar la materia orgánica acumulada. Posterior a esto, el terreno drenado queda expuesto al sol generalmente por 1 semana. Los rayos ultravioletas del sol poseen un poderoso efecto esterilizante. Dependiendo de la temperatura del aire, se debe mantener el estanque completamente seco durante un período que va de las 24 horas (mínimo) a un mes. (FAO, 2011)

6.1.3. Caracterización de la calidad de los efluentes.

La calidad de agua es uno de los factores más importantes para determinar el éxito en la producción piscícola; EMBRAPA (2013) afirma que es el resultado de efectos externos (calidad de la fuente de agua usada, el clima, características del suelo etc.), como de efectos internos (densidad de peces, interacciones físico-química, biológicas). Los peces requieren de condiciones mínimas para realizar sus funciones vitales y por esta razón es necesario realizar un control permanente de los parámetros fisicoquímicos del agua, para poder realizar los ajustes necesarios requeridos por las especies. Las mediciones de pH,

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	RESULTADOS						UNIDADES
	Estanque 1			Estanque 4			
	08:00	09:00	10:00	08:00	09:00	10:00	
Temperatura	29,1	29,3	29,6	29,3	29,4	30,3	°C
Oxígeno disuelto	5,95	6,75	7,48	4,63	4,85	6,33	mg/l
pH	7,4	-	-	7,4	-	-	mg/l
Nitrato	0	-	-	0	-	-	mg/l
Nitrito	0	-	-	0	-	-	mg/l
Nitrógeno amoniacal	0,5	-	-	0,25	-	-	mg/l

NO₃, NO₂ y NH₄ en la piscícola HVS generalmente son tomadas en horas de la mañana en un solo horario con fines de reducir el consumo de reactivos.

Se realizó una toma de muestra a través del método colorimétrico; los resultados obtenidos en los estanques 1 y 4 (Anexos 1 y 2) se muestran en la tabla 2 y los resultados de la medición en el reservorio que surte el sistema de estanques productivos (anexo 3) se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Medición de Parámetros físico-químicos, método de colorimetría. Estanques 1 y 4, Piscícola HVS.

Fuente: Autor.

Tabla 3. Medición de Parámetros físico-químicos, método de colorimetría. Reservorio, Piscícola HVS.

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	RESULTADOS			UNIDADES
	08:00	09:00	12:00	
Temperatura	29,7	29,8	33,1	°C
Oxígeno disuelto	3,8	3,88	8,50	mg/l
pH	7,4	-	-	mg/l
Nitrato	0	-	-	mg/l
Nitrito	0	-	-	mg/l
Nitrógeno amoniacal	0,5	-	-	mg/l

Fuente: Autor.

Generalmente en la acuicultura las especies de cultivo son las que definen los umbrales o exigencias ambientales del agua (Secretaría General del mar, 2011). No obstante, en países como Brasil, cuentan con normas referentes al reuso de agua como lo es la Resolução nº 357/2005 que “Dispone sobre la clasificación de los cuerpos de agua y directrices ambientales para su reuso” (CONAMA, 2005).

Se realizó una toma de muestras para identificar los niveles de algunos parámetros que

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	RESULTADOS		UNIDADES
	Estanque 1	Estanque 4	
DBO ₅	3,72	2,64	mg/l
DQO	<11,30	<11,30	mg/l
Fosfatos	0,17	0,19	mg/l
Nitritos	0,03	0,02	mg/l
Oxígeno disuelto	7,68	8,16	mg/l
SST	<10,30	33,75	mg/l

no analizan en la piscícola (fosfatos, DQO, DBO y SST) y para corroborar los niveles obtenidos mediante el método colorimétrico de OD y NO₂. Los resultados obtenidos a través de la toma de muestras enviada al laboratorio (Tabla 4), corroboran que los niveles presentes de nitritos, oxígeno disuelto, fosfatos, DBO, DQO y SST son bajos y cumplen con los requisitos para la producción y adecuado desarrollo de la cachama.

Tabla 4. Medición de parámetros físico-químicos, método analítico. Estanques 1 y 4, Piscícola HVS.

Fuente: Autor.

La proteína del alimento es una de las principales fuentes de amoníaco en los estanques acuícolas. Como la proteína del alimento se descompone en el cuerpo del pez, parte del nitrógeno se utiliza para formar proteína (músculo) y energía, por lo que se excreta a través de las branquias en forma de amoníaco; los niveles de amoníaco son fuertemente afectados por los cambios en el pH y la temperatura. El amoníaco libre es la parte tóxica del Nitrógeno Amoniacal Total (NAT); este se vuelve tóxico por encima de un pH de 8,0; sin embargo, según los resultados obtenidos, el pH se encuentra en un nivel por debajo del límite para aumentar los niveles de toxicidad del amoniaco.

Respecto al oxígeno disuelto, este es el primer parámetro de calidad del agua que limita la producción de peces en estanques, esto debido a que niveles de oxígeno $< 4\text{mg/l}$ afectan el consumo de alimento por parte de las cachamas y se hacen más susceptibles a enfermedades; el nivel de oxígeno presente en los estanques se encuentra en el rango óptimo para la buena producción de plancton y disminución en la toxicidad de compuestos como el amoníaco y el amonio.

El fósforo es parte del desecho metabólico de los peces y uno de los principales nutrientes enriquecedores y contaminantes; el alimento que no es consumido termina formando sedimento y en parte solubilizándose, incrementando entonces la concentración de P (Guerrero, 2012). El fosfato también puede entrar a las fuentes de agua por escurrimiento del suelo, actividades ganaderas y aguas negras o residuales. Es un elemento muy necesario para la vida; sin embargo, los excesos de fosfatos causan desarrollo excesivo de las algas y la eutrofización de las aguas. Dentro de los predios pertenecientes al propietario de la Piscícola, se encuentra un corral de ganadería, en un nivel de cota más alta que el reservorio; no obstante, el nivel de fosfato presente en los estanques es $< 3\text{ mg/l}$ que es el límite máximo permisible para la producción de peces, además, muestran que actualmente la actividad ganadera no tiene incidencia sobre la calidad del agua de los estanques.

Los vertidos acuícolas se caracterizan por la alta presencia de sólidos en suspensión en el efluente de salida de las balsas de producción, causado por los residuos del metabolismo de los peces, los restos no consumidos del pienso o las bacterias y hongos que habitan en los estanques de forma natural. Estos sólidos en suspensión tienen características generales comunes, que son determinantes para el tratamiento posterior (Secretaría General del mar, 2011). Aunque para el caso de Colombia, en la norma de vertimientos (Resolución 631 de marzo de 2015), no se encuentran disposiciones específicas sobre los SST en efluentes de acuicultura, se ha reportado que efluentes con concentraciones de hasta 200mg/l disminuyen en un 50% la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos (Luna, et al., 2016). En este caso, el máximo nivel alcanzado fue de $33,75\text{mg/l}$, es decir, un nivel normal que no representa problemas que puedan afectar la producción.

La DBO de una muestra de agua resulta de la oxidación de materia orgánica soluble y particulada a dióxido de carbono y agua por las bacterias, oxidación de nitrógeno de amonio a nitrato mediante bacterias nitrificadoras y respiración por los organismos del plancton en las muestras (Boyd, 2001). La Alianza Global de Acuicultura (GAA) adoptó inicialmente un límite de DBO de 50 mg/l, con un límite objetivo de 30 mg/l (Secretaría General del mar, 2011), en los estanques analizados, se obtuvieron niveles de 3,72 y 2,64 mg/l, lo que muestra que en el transcurso del proceso de recirculación de agua, la carga contaminante respecto al nivel de DBO que llega al estanque 4, disminuye.

6.1.4. Identificación del proceso de circulación de agua en el sistema de estanques.

El proceso de recirculación de agua en la Piscícola HVS se realiza dos veces por semana generalmente, o cuando necesitan reponer el nivel de agua, debido a factores como: pérdidas por filtración o evaporación, bajas concentraciones de oxígeno y niveles altos de compuestos nitrogenados. El sistema de tuberías se controla mediante una llave de paso que permite captar o evacuar cualquier estanque directamente del reservorio, en caso que solo necesite reposición de agua. Cada uno de los estanques se conecta entre sí, con tubería PVC de 3 pulgadas y el agua circula con ayuda de una electrobomba de 1,5HP instalada en el reservorio principal que surte a los demás estanques y a la vez recibe sus afluentes. El tubo de desagüe está al nivel de la columna de agua de los estanques y cuenta con una malla que protege que algún animal sea succionado. Cada sistema de tuberías instalado en los estanques va unido a un codo que se encuentra a ras del fondo y que permite girarse para permitir el desagüe; de esta manera, el estanque 1 recibe agua del reservorio, este mismo pasa sus efluentes al estanque 2 por acción de gravedad, el estanque 2 pasa agua al estanque 4 y finalmente por tuberías distintas es posible aportar agua a los estanques de precría y al estanque 3.

6.2.ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES.

Con los resultados de la caracterización fisicoquímica de los efluentes procedentes del proyecto productivo en la Piscícola HVS, se evaluaron dos posibles alternativas de tratamiento teniendo en cuenta que esta actividad produce niveles considerables en compuestos nitrogenados (excrementos, orina y alimento no digerido), sólidos suspendidos y materia orgánica.

Aunque los resultados obtenidos mostraron niveles relativamente bajos de carga contaminante que no afectan el desarrollo normal del cultivo de cachamas, es necesaria la implementación de un sistema de tratamiento que permita disminuir lo mayor posible, los niveles contaminantes de una fuente de agua o que puedan afectar a futuro el desarrollo normal de las cachamas previendo un incremento en el sistema de cultivo actual. De igual forma es necesario cumplir con las normas ambientales establecidas en materia de calidad de agua y vertimientos; según la Resolución 631 de 2015, la actividad de la acuicultura no se encuentra en ningún sector de esta resolución por lo cual los límites permisibles de vertimiento de esta actividad se ubican en el capítulo 7, otras actividades, en este caso la carga de DBO no debe superar los 50mg /l O₂ para poder ser vertidas a una corriente de agua superficial.

6.2.1. Planteamiento de las posibles alternativas para el sistema de tratamiento.

- **FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)**

Un filtro anaeróbico es un reactor biológico de cama fija, está constituido por un tanque relleno con un medio sólido usado como soporte para el crecimiento biológico anaerobio. (Guamán, 2015). El agua residual es puesta en contacto con el crecimiento bacteriano anaerobio adherido al medio y como las bacterias son retenidas sobre el medio y no salen en el efluente, es posible obtener tiempos de retención celular del orden de cien días con tiempos de retención hidráulica cortos. (Chaux & Rojas, 2009).

El filtro anaeróbico consiste en un tanque o cámara cerrada, compuesta por un lecho de piedra en donde el efluente proveniente del tanque séptico pasa de manera ascendente (de abajo hacia arriba), a través de una capa filtrante plástica o de piedras y la película

biológica que se forma sobre la superficie de ellas (figura 4); esta tecnología de tratamiento realiza un trabajo de biodegradación anaerobia, es decir, sin presencia de oxígeno. (ASADAS, 2019). De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, 2018, aunque los filtros anaerobios pueden ser usados como la principal unidad de tratamiento, suelen utilizarse también como una unidad de postratamiento (pulimento).

Los materiales comúnmente usados para el filtro deben cumplir con unos requerimientos (tabla 6); estos incluyen grava, piedras quebradas, carboncillo, o piezas de plástico formadas especialmente. En general, los tamaños de material para el filtro reportados como los de mejores resultados varían entre 2.5 y 7.5 cm, con tamaño uniforme desde la parte superior hasta el fondo, o posiblemente con una capa de 15 cm de material más grueso, inmediatamente por encima de los drenes subterráneos. Un material más fino en el cuerpo del lecho puede ocasionar obstrucciones, y un material más grueso puede arrojar un efluente de peor calidad. Al proporcionar una gran superficie para la masa bacteriana, hay un mayor contacto entre la materia orgánica y la biomasa activa que la degrada efectivamente.

Tabla 5. Requerimientos del medio filtrante para filtros anaerobios.

REQUERIMIENTO	OBJETIVO
Ser estructuralmente resistente.	No presentar reacciones entre el medio filtrante y los microorganismos.
Ser suficientemente ligero.	Evitar estructuras pesadas, permitir la construcción de filtros relativamente altos, lo que implica una reducción de la superficie necesaria para la instalación del sistema.
Tener gran área específica.	Permitir que se adhieran altas cantidades de sólidos biológicos.
Tener una alta porosidad.	Permitir un área libre disponible para la acumulación de bacterias y reducir la posibilidad de atascamiento.
Deseable la rápida colonización de microorganismos.	Reducir la puesta en marcha del reactor.
Presentar una superficie rugosa, carente de formas planas.	Asegurar la buena adherencia y alta porosidad.
Tener un precio reducido.	Hacer el proceso técnica y económicamente factible.

Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2018).

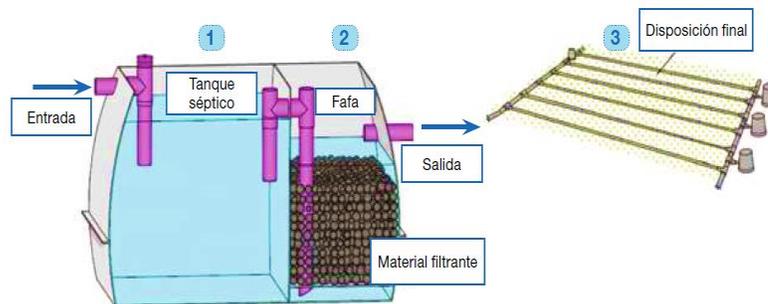


Figura 4. Esquema de un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente. Fuente: (Alianza por el agua, 2019)

Este tipo de filtros han sido empleados principalmente para la disminución de altos valores de carga orgánica que se ve reflejados en los parámetros DBO y DQO, sin contar que entre sus ventajas se encuentra los bajos costos para su implementación con respecto a otros sistemas más avanzados y con mayor tecnología. De acuerdo a (Alianza por el agua, 2019), se puede alcanzar hasta el 85-90% de eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos y DBO; no obstante, la eliminación de compuestos nitrogenados no supera el 40% de eficiencia. (Cisneros, 2018) afirma que este tipo de sistemas tiene alta reducción de DBO, pero baja remoción de patógenos y nutrientes. La digestión anaerobia es según (Rodríguez, s.f.) un proceso eficiente para la remoción de materia orgánica, pero tiene poco efecto sobre la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo), y sobre la remoción de patógenos es apenas parcial. Como sistema único de tratamiento de aguas residuales con alta carga de nutrientes, los porcentajes de remoción no superan el 30%.

- **HUMEDAL ARTIFICIAL**

Se refiere a un sistema de tratamiento basado en áreas anegadas, denominadas también “humedales construidos”, que pueden también ser naturales, de tipo pantanoso, charcos, que cuando tienen carácter artificial, son proyectados para utilizarse con plantas acuáticas (macrófitas) en sustratos con arena, grava, guijarros partidos u otro material inerte donde se produzca la proliferación de “biofilms” que agregan variadas poblaciones de microorganismos, los que por medio de procesos biológicos, químicos y

físicos tratan los efluentes (EMBRAPA , 2013). En estos sistemas los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural; entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana. (Rivera, 2015)

Humedales de flujo subsuperficial horizontal.

Aunque existen varios tipos de humedales construidos, los que más se adaptan a las condiciones del trópico son los de flujo subsuperficial (figura 5). En estos tipos de humedales el agua discurre de forma subterránea por los espacios intersticiales del lecho filtrante y en contacto con los rizomas y raíces de la vegetación del humedal; para este tipo de depuración actúa en mayor medida la acción del suelo. La profundidad del sustrato filtrante es del orden de 0,5-1,0 metros (Nuevo, 2016); además, estos cumplen con condiciones de luz todo el año, temperaturas constantes que inciden directamente sobre la actividad microbológica y además no padecen largas heladas ni estaciones que puedan afectar los flujos del agua y el ciclo de vida de las plantas acogidas en ellos. En estos sistemas la alimentación de caudal se efectúa de forma continua, estando permanentemente inundados, si bien hay algunas experiencias que muestran buenos resultados con funcionamiento intermitente. (Mateu, 2015)

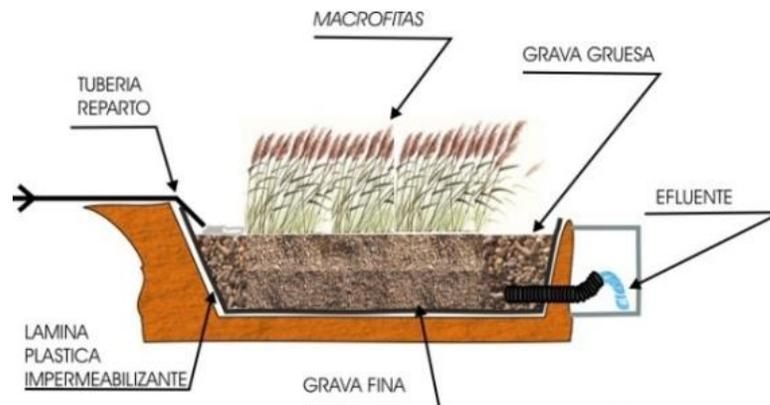


Figura 5. Corte longitudinal de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Fuente: (Pidre, 2010)

Estructura de un humedal artificial.

La formación de un humedal artificial requiere un conocimiento técnico y un personal altamente cualificado. De manera muy sencilla, podemos resumir que las tres partes fundamentales de un humedal son:

- El sustrato o material granular: tiene la función de soporte a la vegetación y posibilita la fijación de la biopelícula bacteriana que intercede en la gran mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales.
- Las plantas: en su mayor parte son plantas macrófitas emergentes que intervienen en a la oxigenación del sustrato radical y a la eliminación de contaminantes por absorción.
- El agua: el agua residual con alta carga de contaminación aporta el alimento a las plantas y después de atravesar el humedal pierde esa DBO₅, sólidos en suspensión, y retorna al cauce en unos parámetros de calidad superiores al inicio del tratamiento. (Nuevo, 2016).

Este tipo de sistemas son capaces de eliminar grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos. Los mecanismos por los que este tipo de ecosistemas son capaces de depurar aguas residuales, se basa en los siguientes principios:

- Eliminación de sólidos en suspensión gracias a fenómenos de filtración que tienen lugar entre el sustrato y las raíces.
- Eliminación de materia orgánica gracias a la acción de los microorganismos (principalmente bacterias). Los microorganismos que se desarrollan pueden ser aerobios (con O₂) o anaerobios (sin O₂).
- Eliminación de nitrógeno bien por acción directa de las plantas, bien por procesos de nitrificación-desnitrificación desarrollados por los microorganismos antes mencionados.
- Eliminación de fósforo principalmente debido a los fenómenos de adsorción sobre los componentes del sustrato.

- Eliminación de patógenos mediante la adsorción sobre partículas del sustrato, la toxicidad producida por las raíces de las plantas y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos. (Miguel, 2013).

Una de las ventajas que presentan los humedales artificiales como proceso de tratamiento, suponiendo que el agua llegue por gravedad, es que no requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, lo que representa una oportunidad para su uso en aquellas zonas en donde no se cuenta con este servicio. (Comisión Nacional del Agua, s.f.). Las plantas macrófitas empleadas en los Humedales artificiales, son resistentes a las condiciones ambientales adversas que predominan cuando se trata de aguas residuales, los rizomas de las plantas crean microambientes oxidativos que además de estimular la descomposición de la materia orgánica, favorecen el crecimiento de bacterias nitrificantes y por tanto de procesos de nitrificación, debido a la posibilidad de difusión de oxígeno a través de los espacios vacíos del medio filtrante (Arrubla, 2016). La investigación realizada por (Hernández, et al., 2009) permitió concluir que los humedales artificiales son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan adecuadamente; son especialmente eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como son: sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, hidrocarburos y metales.

6.2.2. Selección de la alternativa de tratamiento más adecuada.

Teniendo en cuenta las características de las dos alternativas establecidas para el posible tratamiento de los efluentes piscícolas, la carga contaminante que se puede generar en este tipo de actividades en cultivos intensivos y super-intensivos, capacidad de remoción de compuestos nitrogenados, carga orgánica y sólidos suspendidos totales, tanto de un Filtro Anaeróbico de flujo Ascendente como de un Humedal Artificial de flujo Subsuperficial, se ha determinado que la alternativa más opcional como único tratamiento es el Humedal Artificial. Las alternativas de tratamiento naturales se consideran una opción tecnológica y sostenible para pequeños y medianos productores, además, los humedales artificiales subsuperficiales cumplen con los criterios necesarios para el terreno donde se encuentra ubicada la piscícola, entre ellos, características del sitio, edafológicas y material vegetal presente de macrófitas, la topografía, condiciones

ambientales, costos y acceso a materia prima, cumplimiento con los límites permisibles para la buena producción y buen desarrollo de la especie cachama blanca. La finalidad del sistema de tratamiento es que este tenga la capacidad de remover la carga contaminante que más se presenta en la actividad acuícola, en este caso compuestos nitrogenados, carga orgánica y sólidos suspendidos; que pueda funcionar cuando decidan incrementar la producción hasta llegar a sistema de cultivos super-intensivos; que sus costos de mantenimiento y operación sean bajos respecto a otros sistemas de tratamiento que pueden tener la misma capacidad de remoción, pero que emplean tecnologías más avanzadas y no tan asequibles a pequeños y medianos productores que decidan implementar algún sistema de tratamiento para la recircular en sus estanques productivos.

Dado que este sistema presenta tres componentes: sustrato, vegetación, y agua a tratar, el sustrato sirve para fijar la población bacteriana que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes y la vegetación contribuirá con la oxigenación del sustrato y la eliminación de nutrientes. Esto último a través de mecanismos de nitrificación, desnitrificación y precipitación.

6.3.FORMULACIÓN DEL MODELO PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES.

Para el diseño de un sistema de humedal artificial, es necesario tener en cuenta aspectos como el caudal del efluente diario, la calidad del efluente, el área disponible en la granja y el tipo de suelo presente en la zona donde se necesite implementar. En este caso se adaptará un modelo obtenido de investigaciones previamente realizadas por (Díaz, 2012), razón por la cual, no se tendrán en cuenta las mediciones para algunos parámetros del diseño ni tampoco la especie vegetal a utilizar y su distribución en el lecho del humedal. (Díaz, 2012) inicialmente empleó un tiempo de retención de 0,6 días para un caudal diario similar al del presente estudio, una porosidad efectiva de 0,40 y una profundidad de 1,3m.

No obstante, es importante tener en cuenta el caudal generado por el sistema de estanques piscícolas, ya que varía un poco en cuanto al flujo que podría recibir el humedal, y, por tanto, el volumen necesario. Para calcular el caudal diario aproximado

que se genera en el sistema de estanques de la piscícola HVS se tuvo en cuenta el método volumétrico, empleando para ello un cronómetro y un recipiente de volumen conocido. Luego de promediar distintas mediciones se determinó un caudal de 5,464l/s. Sin embargo, se necesita el caudal diario obtenido y el proceso de recirculación de agua demora aproximadamente 6 horas al día, por lo tanto:

$$V = 5,464 \frac{l}{s} * 6h * \frac{3600s}{1h} = 118022,4 l$$

$$Q = 118022,4 \frac{l}{dia} = 118,02 \frac{m^3}{dia}$$

El área de terreno requerida para el lecho del humedal según la metodología propuesta por (Crites & Tchobanoglous, 1998) es:

$$A_s = \frac{Q * t}{\eta * d_w}$$

Donde:

Q: flujo diario medio por el humedal (m³/día)

t: tiempo de retención (día)

d_w: es la profundidad del medio (m)

η : porosidad efectiva del sustrato

A_s: área del humedal (m²)

Se tiene entonces que:

$$A_s = \frac{118,02 \frac{m^3}{dia} * 0,6 dia}{0,40 * 1,3m} \rightarrow A_s = 136,18 m^2 \approx \mathbf{136,2m^2}$$

Siguiendo con la metodología de (Crites & Tchobanoglous, 1998), para el cálculo del ancho del humedal, se tiene:

$$W = \left(\frac{A_s}{R_A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

W: ancho (m)

A_s: área del humedal (m²)

R_A: proporción longitud/ancho.

$$W = \left(\frac{136,2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow W = 6,74m$$

De acuerdo a la (USEPA, 2000), se ha comprobado que relaciones entre 1:1 y 3:1, reducen el riesgo de generación de zonas en las que el agua se queda estancada, llamadas “zonas muertas”, debido a que la presencia de “zonas muertas” reduce el tiempo de retención hidráulico.

Para determinar la longitud del humedal se tiene:

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Donde:

A_s: área del humedal (m²)

W: ancho (m)

L: longitud (m)

$$L = \frac{136,2m^2}{6,74m} \rightarrow L = 20,21m$$

Tabla 6. Dimensiones del sistema de humedal artificial con flujo subsuperficial.

Dimensiones	
Largo	20,21m
Ancho	6,74m
Profundidad	1,3m
Área	136,2m ²
Volumen total	177,1 m ³

Fuente: Autor.

Se debe modelar el terreno escogido para el establecimiento del humedal, a fin de alcanzar una pendiente en el fondo de aproximadamente 2%, para garantizar la velocidad ideal para el flujo del agua. La construcción del bordo (terraplén construido sensiblemente perpendicular al eje del cauce y que bloquea el libre tránsito de un escurrimiento superficial (Peña & Vidrio, 1989)), puede realizarse en concreto o con una geomembrana anclada sobre una capa compactada de arcilla. Según la (Comisión Nacional del Agua, s.f.), es necesario controlar la inclinación definitiva de los taludes para asegurar su estabilidad; por eso es bastante habitual mantener una relación 1H/1V en los taludes definitivos de los humedales en el caso de flujo subsuperficial horizontal.

Impermeabilización del humedal.

Es importante impermeabilizar el terreno antes de la instalación del humedal, por esta razón, es ideal agregar una capa de arcilla o suelo con alto porcentaje de arcilla de forma compacta en el fondo del área establecida para el humedal, luego de hacer la respectiva excavación y adecuación de las medidas; posteriormente el suelo será recubierto con una geomembrana anclada para evitar la posible contaminación de agua subterráneas y a la vez la infiltración de la misma al sistema.

Sustrato para el medio filtrante

El sustrato filtrante a utilizar en el modelo de humedal artificial establecido para el tratamiento de los efluentes piscícolas, será grava. Teniendo en cuenta la profundidad del humedal y la experiencia de (Díaz, 2012) se empleará un estrato de grava de 90cm de altura, esto debido a que es conveniente tener una profundidad total, mayor a la del nivel del agua con la finalidad de asegurar una zona seca en la parte superior del lecho (Comisión Nacional del Agua, s.f.); será distribuida en capas de diferente grosor y grava de diferente diámetro que permita disminuir la velocidad del flujo del agua a través del material, para aumentar el tiempo de retención y, por ende, la remoción de carga contaminante, buscando evitar el taponamiento en la entrada o salida del humedal.

Para ello se colocará grava con diámetros de entre 4-5cm, en una longitud de 1m, alrededor de las tuberías colectoras del efluente en la entrada y salida del humedal para reducir el riesgo de obstrucción. Posterior a la grava de diámetro mayor, se irá

distribuyendo grava de diámetro menor (2-3cm) para disminuir la velocidad del flujo en el interior de humedal y así poder facilitar los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan para la remoción de contaminantes, finalmente grava con diámetro de 1-2 cm, previo a la salida. Es recomendable agregar una capa de arena, intercalada con las capas de grava gruesa, en el centro del humedal.

Red de tuberías.

Teniendo en cuenta el caudal determinado para el sistema, se empleará preferiblemente una tubería de 3" en PVC. Se instalará una tubería de forma subterránea a 45cm de altura desde el fondo del humedal, que conecte el estanque que aporta el efluente con la entrada del humedal, al menos de un 1m de longitud; esta tubería, se conectará con un tubo transversal de distribución de 4" que se ubicará de manera perpendicular con unos orificios de aproximadamente 3" para disminuir las deficiencias hidráulicas al interior del humedal particularmente en la zona de entrada. Esta misma tubería en forma de T, debería ubicarse en el otro extremo del humedal artificial para evitar la presencia de puntos muertos en su funcionamiento.

Partiendo de que la tubería está completamente llena de agua, es necesario tener en cuenta que la altura de los orificios debe permitir la correcta distribución del afluente en el área del humedal, evitando que el agua quede estancada dentro de la tubería transversal. Se parte de que la tubería debería estar ubicada a $\frac{3}{4}$ de altura en la tubería transversal de arriba hacia abajo, para este caso a 1", ya que la altura total de la tubería es de 4". Por cada uno de los orificios hechos en la tubería transversal (31), debe salir un caudal diferente, se conoce como orificio sumergido.

$$Q = CxAx\sqrt{(2xGxH)}$$

Q: caudal medio ($\frac{Q}{2}$) $\rightarrow Q = \frac{0,0014\frac{m^3}{s}}{2} = 0,0007\frac{m^3}{s} \rightarrow$ este caudal medio se reparte entre el número de orificios totales en la tubería, para este caso, 31 orificios: $Q = \frac{0,0007\frac{m^3}{s}}{31} = 0,000023\frac{m^3}{s}$

C: cte $\rightarrow 0,64$

A: área de la tubería $\rightarrow 0,0081m^2$

G: gravedad $\rightarrow 9,81\frac{m}{s^2}$

H: altura por encima del orificio $\rightarrow 3'' \rightarrow 0,0762m$

Para realizar una comparación acerca de la altura más adecuada para la ubicación de los orificios en el tubo transversal de 4 pulgadas, debe determinarse inicialmente el diámetro del orificio;

$$Q = CxAx\sqrt{(2xGxH)}$$

$$A = \frac{Q}{C x \sqrt{(2xGxH)}} \rightarrow \frac{0,000023}{0,64 x 1,22} = 0,000029m^2$$

$$A = \pi \cdot R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\left(\frac{0,000029m^2}{\pi}\right)} = 0,003m \rightarrow R = 0,12'' \rightarrow D = 0,24''$$

Ahora despejando la altura H de la ecuación y empleando una tubería con diámetro de 1'', se podrá comparar con la ubicación de los orificios a $\frac{3}{4}$ de altura de arriba hacia abajo.

$$1'' = 0,0254m$$

$$Q = CxAx\sqrt{(2xGxH)}$$

$$\frac{Q}{C x A} = \sqrt{(2xGxH)} \rightarrow \left(\frac{Q}{C x A}\right)^2 = 2 x G x H \rightarrow \frac{\left(\frac{Q}{C x A}\right)^2}{2 x G} = H$$

$$H = \frac{\left(\frac{Q}{C x A}\right)^2}{2 x G} \rightarrow \frac{0,0709^2}{19,62} = \frac{0,005}{19,62} = 0,00025m$$

En este caso H fue un valor mayor a cuando se empleó $\frac{3}{4}$ por encima de la tubería de 4'', por lo tanto, el orificio es grande respecto al caudal que se genera diariamente cada segundo

Los tubos perforados de las estructuras de entrada y salida se cubrirán con grava de mayor tamaño para proporcionar una distribución más uniforme o colección de flujos (Figura 6). La longitud de la tubería transversal debe ser aproximadamente igual a la anchura del humedal, con perforaciones uniformes a lo largo de la tubería (cada 20cm).

La tubería de salida del humedal, estará adaptada a una llave de paso que controlará el paso del agua directo al reservorio principal que surte el sistema de estanques.

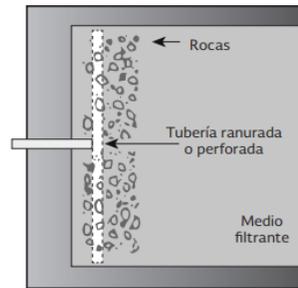


Figura 6. Entrada acoplada a tubería de distribución enterrada. Fuente: (Comisión Nacional del Agua, s.f.)

Siembra de especies.

Para la selección de la especie vegetal empleada dentro del humedal, se parte de los estudios realizados por (Díaz, 2012), quién pudo establecer que la especie *Typha latifolia* tiene altos picos de remoción de compuestos nitrogenados y (Viveros, 2016) quién concluyó que es una especie apropiada para el postratamiento de las aguas, considerando aspectos tales como: eliminación de contaminantes, tasas de crecimiento, resistencia a enfermedades y plagas. Es una planta acuática con sistema radicular arraigado en el fango o fondo del humedal, y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua; por esa razón también se denominan macrófitas emergentes. Es una planta erecta, de gran desarrollo, que pueden alcanzar más de 3 m de altura (Curt, 2007). Esta especie se ha identificado en la cuenca del Sinú, es nativa y autóctona; además se puede recolectar de los sitios donde normalmente se encuentran en la ciudad de Montería, en este caso, se deben seleccionar las plantas que puedan soportar un proceso de trasplante con tamaño no mayor a 14cm; no obstante, teniendo como referencia la investigación realizada por (Burgos, 2014), su propagación puede ser vegetativa, a través de brote en las raíces o sexual por medio de semillas. Para este caso, las plantas deben ser sometidas por lo menos, por un período de tiempo de un mes a un proceso de adaptación y ser trasplantadas al alcanzar un tamaño de 20-30cm de altura. La siembra se realizará con distancias entre 50 y 75 cm.

La lámina de agua suministrada en el humedal debe dejar al menos 10-15cm libre, entre el nivel del agua y la superficie.

En las figuras 7 y 8, se observa el diseño del humedal artificial para el tratamiento de los efluentes piscícolas de la finca HVS, con las dimensiones principales.

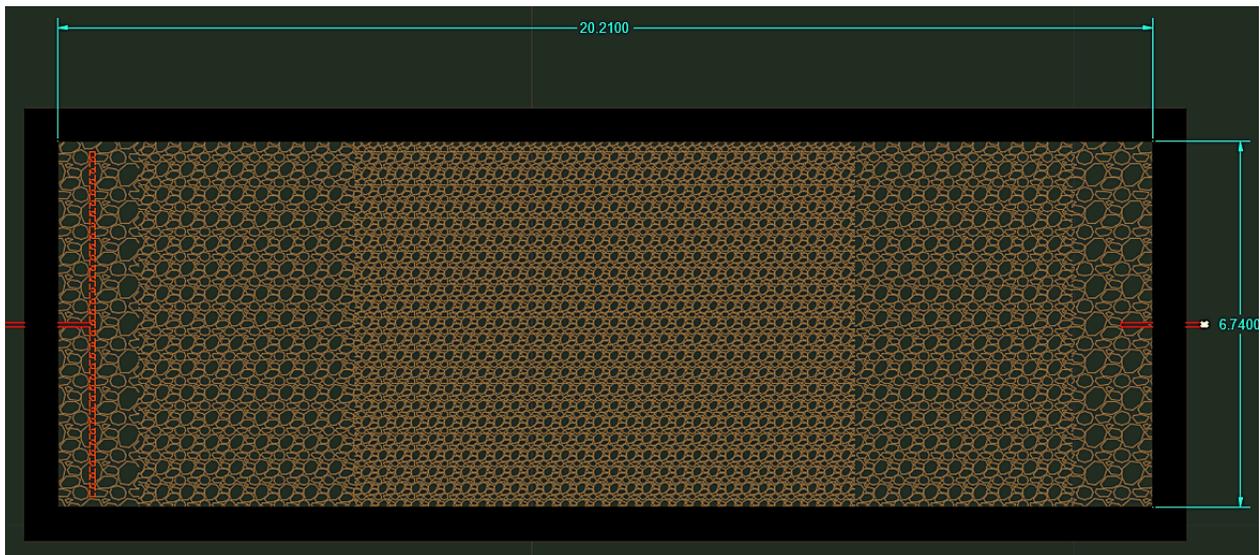


Figura 7. Vista en planta humedal artificial para tratamiento de efluentes piscícolas. Fuente: Autor.

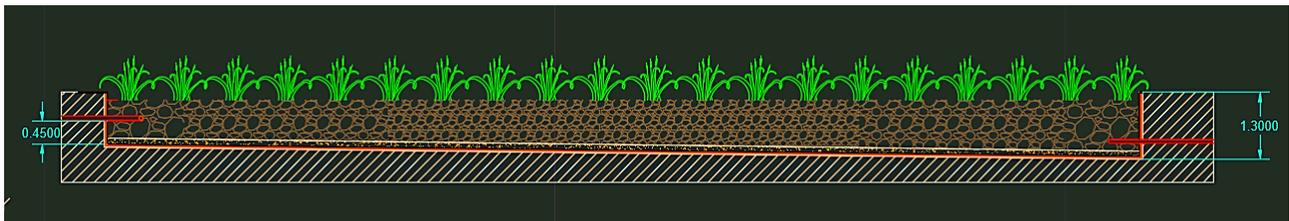


Figura 8. Corte longitudinal humedal artificial para tratamiento de efluentes piscícolas. Fuente: Autor.

7. APORTES A LA EMPRESA

Sistema de tratamiento para efluentes generados en la Piscícola HVS.

El diseño de un modelo para el tratamiento de los efluentes procedentes del proceso productivo en la Piscícola HVS que sirva como referencia y modelo para los diferentes proyectos productivos de medianos y pequeños productores del departamento, es de gran importancia para el Acuerdo de Competitividad de la Cadena Acuícola del departamento de Córdoba desarrollado en la secretaría de desarrollo económico y agroindustrial, puesto que, dentro de sus metas establecidas, se encuentra el manejo de los recursos naturales y medio ambiente y, dentro de las actividades propuestas para este objetivo, la

incorporación del componente de gestión ambiental en los procesos productivos acuícolas.

El sistema de tratamiento escogido para el modelo es un Humedal Artificial de flujo Subsuperficial Horizontal que tendrá la capacidad de disminuir la carga contaminante presente en los efluentes de los estanques piscícolas que se proyecten como sistemas de cultivo intensivos con altas densidades e incluso superintensivos, permitiendo así el proceso de recirculación. Aunque actualmente se recircula agua en el sistema, pero sin tratamiento previo, la carga contaminante logra diluirse en el proceso de llegada al reservorio principal, probablemente por el proceso de aireación intermitente que se realiza y la baja densidad de peces que actualmente se maneja.

Tomando como base investigaciones previas en piscícolas con densidades mayores de producción y, por ende, mayor carga contaminante tanto de orgánica como de compuestos nitrogenados, se pudo justificar el diseño de un modelo para el tratamiento de efluentes y por ende, sus dimensiones, tipo de sustrato, tipo de especie vegetal y diseño de red de tuberías para su posible fase de ejecución en campo, en la Piscícola HVS, perteneciente al gremio de productores piscícolas del departamento de Córdoba.

8. CONCLUSIONES

La calidad de agua presente en los efluentes del sistema de estanques productivos de la piscícola HVS, presenta bajos niveles de carga orgánica, compuestos nitrogenados y sólidos suspendidos; esto puede deberse al sistema de aireación que se lleva a cabo en horas de la noche y parte de la mañana, la reposición de agua que realizan dos veces por semana aproximadamente y la densidad de peces que manejan actualmente en estanques con grandes volúmenes.

La Piscícola HVS cumple actualmente con los niveles máximos permisibles establecidos por la normativa ambiental en cuanto a vertimiento. Para las actividades de recirculación deben tenerse en cuenta las características de la especie manejada en el sistema, en este caso cachama, y cuales son las condiciones que favorecen el desarrollo productivo de esta; la calidad del agua que reingresa al sistema de estanques, procedente del reservorio que recibe los efluentes, cumple con las condiciones aptas para el crecimiento de las cachamas; sin embargo, un sistema de tratamiento es necesario para contribuir con la reducción de agentes que puedan generar impactos negativos en el ambiente, ya sea en el presente o a futuro.

El sistema de tratamiento mediante Humedales artificiales, fue el más opcional para el diseño del modelo de tratamiento para los efluentes piscícolas de este proyecto, debido a los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan y que favorecen la remoción de compuestos nitrogenados, orgánicos y sólidos suspendidos; siendo estos, los principales parámetros a tener en cuenta en este tipo de actividad productiva. A diferencia del Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente que, aunque también puede remover la carga presente de nitrógeno amoniacal o nitritos, la eficiencia de remoción es mucho más baja que la presentada con el sistema de humedales.

9. RECOMENDACIONES

Una sola medición de la concentración de amoníaco brinda un resultado infalible; sin embargo, los procesos de producción, transformación y eliminación de los compuestos producidos en esta actividad pueden ser complejos y pueden cambiar a lo largo del año, por lo que se recomienda la toma de muestras periódicamente para armar un registro histórico que permita valorar y estimar la calidad del agua que pueda presentarse.

Se recomienda realizar toma de muestras en época de sequía y época lluviosa para poder comparar los niveles contaminantes presentes y comprender el porqué de situaciones adversas en el proceso productivo.

Para la instalación del sistema de tratamiento es recomendable establecer diversas especies vegetales que puedan aumentar la eficiencia de remoción de contaminantes y así mismo, evaluar la viabilidad de poder emplear otros materiales para el sustrato que quizá, puedan ser más efectivos.

Teniendo en cuenta el área disponible que hay en la piscícola para la instalación de un humedal artificial que supla las necesidades del sistema productivo, se recomienda escoger el estanque productivo más cercano al reservorio principal para la instalación del humedal y construir otro estanque productivo de menor tamaño, pero con mayor densidad de peces por metro cuadrado. En su defecto, escoger dicho estanque y convertirlo en un receptor de efluentes previo al tratamiento, para controlar la cantidad de agua que puede llegar al humedal y así, poder construir un humedal con menor área que cumpla con el tiempo de retención establecido.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Planeta Rica, 2016. *Plan de Desarrollo 2016 - 2019*, Planeta Rica: s.n.

Alcaldía Municipal de Planeta Rica Córdoba, 2012. *Plan Básico de Ordenamiento Territorial Planeta Rica Córdoba 2012 - 2015*, Planeta Rica: s.n.

Alianza por el agua, 2019. *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. [En línea]

Available at: <http://alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t2.html>

Ambielab LTDA, s.f. *Ambielab LTDA*. [En línea] Available at: <http://ambielab.com.co/> [Último acceso: 28 diciembre 2018].

Aquafeed, 2012. *Los efectos del oxígeno disuelto en el crecimiento de los peces en la acuicultura*. [En línea] Available at: <http://www.aquafeed.co/los-efectos-del-oxigeno-disuelto-en-el-crecimiento-de-los-peces-en-la-acuicultura/>

Ardila, A. C., 2016. *Producción y comercialización de cachama blanca en la empresa comunitaria Palermo, municipio de San Luis de Sincé - Departamento de Sucre*, Sincelejo: s.n.

Arrubla, J. P., 2016. *Remoción de productos farmaceuticos y de cuidado personal (PFCPs), mediante humedales contruidos a gran escala*, Pereria: s.n.

Asamblea Departamental de Córdoba, 2016. *Plan de Desarrollo Departamental 2016 - 2019 "Unidos por Córdoba"*, Montería: s.n.

Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales - ASADAS. (2019). *Plan nacional capacitación continua de ASADAS*. Costa Rica.

Bello Sanchez, N. J. & Gonzalez Arias, G. J., 2018. *Importancia del estudio de cerebro de cachama blanca, Piaractus brachypomus, para la familia Characidae*, Bogotá: s.n.

Benavides, L. A. & López, W., 2012. *Evaluación del efecto del biofloc en la producción de alevinos de cachama blanca (Piaractus brachypomus) en condiciones de laboratorio*, Pasto: s.n.

Boyd, C., 2001. Estandares de la calidad del agua: Demanda Bioquímica de oxígeno. *Boletín Nicovita*, Volumen 6, p. 2.

Bravo, J., 2001. *Piscicultura. Cría de peces*. [En línea] Available at: <http://www.angelfire.com/ia2/ingenieriaagricola/pisicultura.htm#CACHAMA> [Último acceso: 28 diciembre 2018].

Burgos, P., 2014. *Tratamiento de efluentes de baño de ganado contaminados con Cipermetrina , en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto*, Montería: s.n.

Casas, D., 2008. *Sistemas de recirculación de agua para la cría intensiva de Cachama blanca (Piaractus Brachypomus)*, Cadubare: s.n.

Chaux, G., Caicedo, J. & Fernandez, J., 2013. *Tratamiento de efluentes piscícolas (Tilapia Roja) en lagunas con Azolla pinnata*, Popayan: s.n.

Chaux, G. & Rojas, G. B. L., 2009. *Producción más limpia, y viabilidad de tratamiento biológico para efluentes de mataderos en pequeñas localidades. Caso: Municipio El Tambo, Colombia*, Popayan: s.n.

Cisneros, P. E., 2018. *Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente*. [En línea] Available at: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/filtro-anaerobio-de-flujo-ascendente> [Último acceso: 08 febrero 2019].

Comisión Nacional del Agua, 2018. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente*. Tlalpan: s.n.

Comisión Nacional del Agua, s.f. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento- Diseño de Plantas de Tratamiento Diseño de Plantas de Tratamiento Humedales Artificiales*, Tlalpan: s.n.

Comisión Nacional del Medio Ambiente - CONAMA, 2005. *Resolução nº 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem*. [En línea].

Crites, R. & Tchobanoglous, G., 1998. *Small & Decentralized Wastewater Management Systems*, s.l.: McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

Curt, M. D., 2007. *Macrofitas de interés en fitodepuración.*, s.l.: s.n.

Díaz, A. J., 2012. *Evaluación de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes piscícolas*, Montería: s.n.

do Prado, L. & da Veiga, M., 2013. *Relación entre erosión y pérdida de fertilidad del suelo*, s.l.: s.n.

EMBRAPA , 2013. *Aquicultura: manejo e aproveitamento de efluentes*. 1ra edición ed. Jaguariúna: s.n.

FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019. *Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo*, s.l.: s.n.

Gobernación de Córdoba, 2012. *Cultura Organizacional*. [En línea] Available at: <http://www.cordoba.gov.co/gobernacion/cultura-organizacional.html> [Último acceso: 8 Septiembre 2018].

Gobernación de Córdoba, 2012. *Secretaría de Desarrollo Económico y Agroindustrial*. [En línea] Available at: http://www.cordoba.gov.co/v1/sec_desarrollo.html [Último acceso: 8 Septiembre 2018].

González, E. A., 2017. *Impacto ambiental de la acuicultura intensiva en los componentes agua y sedimento en el lago Guamuez, Nariño, Palmira*: s.n.

Guamán, V., 2015. *Evaluación de las plantas de depuración de agua residual de las comunidades de Macas y San Pedro, Cantón Cuenca, Azuay*, Cuenca: s.n.

Guerrero, J., 2012. *Capacidad de Carga vs Calidad de Agua en Acuicultura*, Bogotá: s.n.

Hernández, L., Romero, M., Sánchez, E. & Colin, A., 2009. *Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica*, Cuernavaca: s.n.

Instituto Colombiano de Desarrollo Rural, 2006. *Guía Práctica de Piscicultura en Colombia*, Bogotá, D.C: s.n.

Luna, M., Campo, F. & Medina, O., 2016. *Evaluación de las aguas residuales del lavado de estanques multipropósito con cultivo de trucha arcoíris (Oncorhynchus mykiss)*, Popayán: s.n.

Malpartida, J., 2015. *Curso: Piscicultura y Aireación*, Florianópolis: s.n.

Mateu, B., 2015. *Estudio y dimensionado experimental de humedales artificiales para la mejora de la calidad de aguas de cursos fluviales eutrofizados*, Alacant: s.n.

Mesa, M. & Botero, M., 2007. La cachama blanca (*Piaractus brachypomus*), una especie potencial para el mejoramiento genético. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, pp. 79-80.

Miguel, C., 2013. *Los humedales artificiales. Componentes y tipos*. [En línea] Available at: <https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos> [Último acceso: 15 febrero 2019].

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, 2010. *Manual Básico de Piscicultura en Estanques*, Montevideo: s.n.

Nuevo, D., 2016. *Humedales artificiales en depuración de agua residual*. [En línea] Available at: <https://www.tecpa.es/humedales-artificiales-en-depuracion-de-agua-residual/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO, 2011. *Protección de las instalaciones de la granja y de poblaciones de peces*. [En línea] Available at: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6709s/x6709s04.htm#126a [Último acceso: 18 Diciembre 2018].

Peña, G. & Vidrio, G., 1989. *Estudio y diseño de construcción de un bordo de arcilla, compactada para abrevadero y riego*, Las Agujas: s.n.

Pidre, J. R., 2010. *Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal*, Madrid: s.n.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo- PNUD, 2015. *Estudio del perfil productivo urbano y rural para el municipio de Planeta Rica, Córdoba*, Bogotá D.C.: s.n.

Rivera, A., 2015. Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia.. *uaderno Activa* .

Rodríguez, J., s.f. *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*, Cali: s.n.

Secretaría General del mar, 2011. *Acuicultura en aguas continentales*, Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Secretaría Técnica de Acuicultura y Pesca, 2018. *Acuerdo de Competitividad de departamento de Córdoba*, Montería: s.n.

USEPA - United States Environmental Protection Agency, 2000. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010*, Cincinnati: s.n.

Viveros, D., 2016. *Postratamiento de aguas residuales en plantas de beneficio de ganado porcino y bovino utilizando humedales artificiales*, Manizales: s.n.

11. ANEXOS



Anexo 1. Estanque N° 1, Piscícola HVS. Fuente: Autor.



Anexo 2. Estanque N° 4, Piscícola HVS. Fuente: Autor.



Anexo 3. Reservorio, Piscícola HVS. Fuente: Autor.



Anexo 4. Toma de muestras, estanques piscícolas. Fuente: Autor.



Anexo 5. Freshwater Master Test - Kit empleado en método colorimétrico. Fuente: Autor.

ANEXO 6. PRESUPUESTO

Tabla 1. PRESUPUESTO GLOBAL DE LA PROPUESTA (EN MILES PESOS).	
Rubros	Total
Personal	4.475.000
Salidas de campo	400.000
Materiales e insumos	7.058.500
Viajes	4.190.000
Equipos	980.000
TOTAL	17.103.500

Tabla 2. PERSONAL				
Personal	Formación académica	Función dentro del proyecto	Dedicación (días)	Total
Ingeniero Ambiental o experto en sistemas de tratamiento de aguas residuales.	Profesional	Acompañamiento en el proceso de implementación del humedal artificial.	30	1.500.000
Técnico ambiental	Técnico	Seguimiento y monitoreo del humedal en el proceso de adaptación de las plantas.	60	2.000.000
Policías	Profesional	Acompañamiento para el transporte de retroexcavadora pajarita hasta el punto de implementación del humedal artificial.	1	100.000
Albañil	Técnico	Instalación de tuberías en el humedal artificial.	3	75.000
Obreros (2)	Independiente	Apoyo en instalación de	5	800.000

		geomembranas y siembra de especies		
Total				4.475.000

Tabla 3. SALIDAS DE CAMPO (EN MILES DE PESOS)					
Recorrido	Número	Transporte	Viáticos	Combustible u otros	Total
Planeta Rica - Montería	6	Reconocimiento en campo para recolección de macrófitas	25.000	0	150.000
Planeta Rica - Montería	4	Recolección de macrófitas para el humedal artificial	25.000	150.000	250.000
Total					400.000

Tabla 4. MATERIALES E INSUMOS					
Materiales e insumos	Justificación	Presentación	cantidad	Valor unitario	Valor total
Geomembrana	Impermeabilización del terreno y evitar infiltraciones	m ² instalado	90	7000	630.000
Tubo de PVC 4”	Tubería mayor para entrada y salida de afluentes al humedal artificial	6 m	1 (Sujeto a modificaciones)	33.000	33.000
Cuadros de madera	Determinación de plantas por m ² en el área de recolección, para posteriormente siembra en el humedal artificial	Unidad	3	6.000	18.000
Llave de paso	Control de efluentes del humedal artificial	unidad	1	40.000	40.000
Arcilla	Material para impermeabilizar el terreno antes de ubicación de geomembrana	m ³	20	40.000	800.000

Arena gruesa	Material de menor tamaño que actuará como sustrato filtrante	m ³	13.5	25.000	337.500
Grava 4-5"	Sustrato para el humedal artificial	m ³	15	60.000	900.000
Grava 3"	Sustrato para el humedal artificial	m ³	40	50.000	2.000.000
Grava 2-1"	Sustrato para el humedal artificial	m ³	46	50.000	2.300.000
Total					7.058.500

Tabla 5. VIAJES (EN MILES DE PESOS)				
Recorrido	Número	Actividad	Pasajes	Total
Montería – Finca HVS	2	Transporte de arena gruesa (viajes de 6 m ³)	225.000	450.000
Montería – Finca HVS	17	Transporte de grava (viajes de 6 m ³)	220.000	3.740.000
Total				4.190.000

Tabla 5. EQUIPOS QUE SE PLANEAN ADQUIRIR (EN MILES DE PESOS)		
Equipo	Justificación	Total
Retroexcavadora pajarita (operador incluido)	Excavación del terreno para el humedal artificial	810.000
Rana vibro compactadora (operador incluido)	Nivelación y compactación del terreno para el humedal artificial	170.000
Total		980.000