



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA AGROINDUSTRIA DE
EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA**

RODRIGO ALBERTO ÁLVAREZ AGUDELO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Ingeniería Ambiental
Popayán, Colombia
2018**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA AGROINDUSTRIA DE
EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA**

RODRIGO ALBERTO ÁLVAREZ AGUDELO

Trabajo de grado modalidad pasantía, como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:

MSc. MAURICIO AGUIRRE GÓMEZ
Departamento de Ingeniería Ambiental

Codirector:

MSc. JOHAN DAVID ÑAÑEZ ZULETA
SENNOVA, Servicio nacional de aprendizaje SENA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Ingeniería Ambiental
Popayán, Colombia
2018

El medio ambiente es un sistema complejo, integrado e indivisible, el tratamiento aislado de sus unidades funcionales, dista del concepto ingenieril de eficiencia.

Agradecimientos

A la Universidad del Cauca por auspiciar espacios necesarios para mi formación profesional, política y ética.

A la FUNDACIÓN ODONATA, por gestionar los recursos económicos y brindar su apoyo incondicional al desarrollo del proyecto.

A mis a padres por contribuir con su INCONDICIONALIDAD a este propósito de vida, con sus reparos direccionales y sus libertades consientes.

A mis directores de tesis: Mauricio Aguirre y Johan David Ñañez, por su acompañamiento, apoyo y oportuna contribución en el desarrollo de la monografía.

A la PLANTA PRODUCTORA DE ALMIDÓN LA CABAÑA por permitir y contribuir con el desarrollo del proyecto.

A todas aquellas personas cercanas, que contribuyeron con este proceso de avance, formación y proyección de vida.

Resumen

La agroindustria de extracción de almidón de yuca es una industria que genera un alto impacto económico en el sector donde se establece, es una fuente de generación de empleo y dinamiza la economía regional. La producción de almidón de yuca hoy por hoy en el departamento del Cauca está anquilosada en los sistemas tradicionales, con baja tecnología y uso indiscriminado de agua. Adicionalmente, la industria genera aguas residuales con una alta carga orgánica que afecta de manera negativa a los cuerpos receptores. Por otra parte, Las condiciones laborales están sujetas al ritmo de producción y suministro de materia prima, lo que se convierte en arduas jornadas de trabajo físico que pueden superar las 14 horas diarias de trabajo.

En el marco de la pasantía evaluó un sistema de optimización del proceso productivo, haciendo hincapié en el uso eficiente de agua, disminución de la jornada laboral e incremento de la productividad, es necesario rescatar que este tipo de procesos de producción más limpia, logran reducir los costos de operación de la empresa, así como de implementación de plantas de tratamiento para los vertimientos que del proceso se derivan.

En este proyecto se construyó un sistema en serie a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la agroindustria del almidón de yuca, el sistema está configurado en dos etapas: la primera consta de un sedimentador de alta tasa y la segunda de un biofiltro con lombrices para el tratamiento de efluentes de este proceso. Con esta configuración se calculó el porcentaje de remoción de carga contaminante en cada etapa del sistema y la eficiencia total del sistema a partir de los análisis de parámetros fisicoquímicos como; pH, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), la construcción de este sistema y posterior análisis del agua tratada se llevó a cabo en las Instalaciones de Almidones La Cabaña, ubicada en el corregimiento de Puentecita, municipio de Piendamó, departamento del Cauca.

El sistema construido mejoró los factores de productividad, jornadas laborales y eficiencia en el uso del agua. Se obtuvo una reducción del 66% en el consumo de agua por kg de yuca procesada. Se redujo las jornadas laborales de 14 horas diarias a 8 horas, esto se debió a un incremento en la productividad unitaria del 312% a través de la actualización en la tecnología utilizada para la extracción del almidón, mediante sistemas de flujo continuo. Los resultados aquí obtenidos pueden tener implicaciones importantes en la

mitigación del impacto ambiental causado por los residuos contaminantes generados del proceso de producción del almidón de yuca.

Palabras clave: Aguas residuales, almidón de yuca, sedimentador de placas paralelas, biofiltro.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de Ilustraciones	XII
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
Objetivos	4
1. Capítulo 1: Descripción del proceso de producción de almidón agrario de yuca	5
1.1 Recepción, pesada y acopio de las raíces.	5
1.2 Lavado de las raíces.	6
1.3 Rallado de las raíces.	7
1.4 Colado o Tamizado.	7
1.5 Sedimentación.	8
1.6 Fermentación.	9
1.7 Secado del almidón.	9
2. Capítulo 2: Optimización del sistema productivo y uso eficiente de recursos	10
2.1 Ubicación.	10
2.2 Identificación de variables productivas e implementación de medidas correctivas.	10
3. Capítulo 3: Sedimentador de alta tasa	18
3.1 Sedimentador de alta tasa con placas paralelas.	18
3.2 Parámetros de diseño de placas paralelas	18
3.3 Eficiencia del proceso de tratamiento con sedimentador de alta tasa	26
3.4 Caracterización de las aguas residuales	26
4. Capítulo 4: El Bio-filtro con lombrices	30
4.1 Parámetros de diseño de un Biofiltro con lombrices.	30
4.2 Eficiencia del proceso de tratamiento del biofiltro	34
4.3 Caracterización hídrica	35
5. Capítulo 5: Sistema Sedimentador de alta tasa - biofiltro con lombrices	37
5.1 Eficiencia media del Sistema de Tratamiento	37
5.2 Valores esperados según Resolución 631 de 2015	38
6. Conclusiones	39
7. Recomendaciones	40
8. Referencias Bibliográficas	42

Lista de Ilustraciones

	Pág.
Figura 1. Diagrama proceso de producción de almidón de yuca.	5
Figura 2. Acopio de yuca.	6
Figura 3. Proceso de lavado de raíces.	6
Figura 4. Proceso de rallado de la yuca.	7
Figura 5. Coladoras- Proceso de Colado o Tamizado.	7
Figura 6. Canales de sedimentación.	8
Figura 7. Tanques de fermentación.	9
Figura 8. Mapa de Localización Almidones La Cabaña.	10
Figura 9. Imagen de mecanismo de irrigación de agua antiguo.	13
Figura 10. Montaje de la maquina extractora de almidón actual.	14
Figura 11. Montaje de la segunda maquina extractora de almidón con funcionamiento en paralelo.	14
Figura 12. Montaje de boquillas de alta presión en la maquina extractora de almidón.	15
Figura 13. Maquina Extractora de Almidón en funcionamiento, con boquillas de alta presión y membrana de separación.	16
Figura 14. Sistema a Escala de Placas Paralelas.	19
Figura 15. Sección transversal del sedimentador de placas paralelas de con flujo en contracorriente.	20
Figura 16. Diseño de sedimentador de alta tasa.	24
Figura 17. Proceso de construcción de sedimentador de placas paralelas.	24
Figura 18. Esquema ilustrativo del biofiltro con lombrices.	29
Figura 19. Cilindro para la evaluación de la porosidad del sistema.	30
Figura 20. Lechos.	32

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Sede y empleados.	11
Tabla 2. Consumo de Agua.	12
Tabla 3. Productividad Planta.	12
Tabla 4. Variación Productiva.	13
Tabla 5. Variación de Consumo.	15
Tabla 6. Variación proceso de lavado.	16
Tabla 7. Variación proceso productivo.	17
Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos a Evaluar.	25
Tabla 9. Reporte y tratamiento de resultados.	26
Tabla 10. Valores promedio eficiencia media Resultados.	27
Tabla 11. Reporte y tratamiento de resultados Caracterización.	32
Tabla 12. Valores promedio y eficiencia media Caracterización.	33
Tabla 13. Eficiencias medias	35
Tabla 14. Valores esperados vs Valores obtenidos	36

Introducción

El agua ha sido un elemento indispensable para los seres vivos, fuente y sustento de vida, base del desarrollo de las actividades más importantes para el ser humano. A medida que la población ha aumentado, la demanda y uso de este recurso se ha vuelto insostenible; aunque la cantidad de agua existente ha sido la misma desde su origen, el que sea destinada a múltiples actividades trae como consecuencia su contaminación, lo que provoca la pérdida de gran parte de sus propiedades; es por esto que la cantidad de agua disponible para consumo va en disminución (Osnaya, 2012).

El 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico, según se constata en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, Agua para todos, agua para la vida (marzo 2003). En 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1.170 km³/año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³/año. El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones menos desarrolladas un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles. (Rodríguez, et al., 2005)

En Colombia la extracción de almidón de yuca como actividad agroindustrial empezó en los años 50. La demanda de almidón aumento en los años siguientes y la extracción del producto se convirtió en una agroindustria netamente artesanal. Se introdujeron entonces innovaciones mecánicas en algunas etapas del proceso y se logró aumentar la capacidad productiva de estas pequeñas fábricas, que empezaron a llamarse “Rallanderías” o “Ralladeros”. Esta actividad permitió el desarrollo socioeconómico de las familias de escasos recursos que pueblan el norte del Departamento del Cauca (Montoya, 2007)

En Colombia, los vertimientos de la agroindustria de extracción de almidón agro de yuca, tienen un potencial de contaminación alto, debido en primer lugar al gran volumen de agua empleado, derivado de la tecnología utilizada y en segundo, al alto contenido de materia orgánica, que permite clasificarlas como de gran carga contaminante (Rojas, 1999, citado por Núñez, 2011)

La calidad y cantidad de los residuos generados en el proceso de extracción de almidón de yuca varían significativamente, debido a factores como edad del tubérculo, tiempo de almacenamiento, tipo de proceso utilizado, etc. Las aguas residuales generadas, presentan una elevada carga orgánica medida como DQO y DBO, además de una

elevada presencia de sólidos disueltos y compuestos cianurados de alta toxicidad. (Torres, et al., 2003).

Desde la década de los 80 se han realizado estudios en escala de laboratorio y piloto, con énfasis en la aplicación de la tecnología biológica anaerobia para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, han mostrado eficiencias de remoción de la DQO superiores al 70% (Rojas, 1999, citado por Pérez et al., 2006).

Sin embargo, la bibliografía no reporta gran variedad de casos para el tratamiento de este tipo de agua residual por medio de sedimentador de alta tasa, la Universidad del valle de acuerdo con Torres et al., (2014) donde se reporta un estudio de modelación de la separación de partículas no retenidas en la etapa de sedimentación en canales en el proceso de extracción de almidón de yuca, basándose en el análisis de sedimentación de partículas discretas entre 2 y 8 μm y usando el principio de la Ley de Stockes. La modelación teórica mostró que la velocidad de sedimentación oscila entre 0,007 y 0,112 cm/min. Con este rango de velocidad y un caudal crítico de 1,5 L/s, para la remoción total de las partículas se requeriría una estructura con un área superficial de 1.288 m^2 , altura de 1 m y TRH de 10 días aproximadamente.

Según Chau C. y Vergara., (2005), encontraron que la construcción de placas paralelas como sedimentador de alta tasa hace efectivamente más compacto el diseño del sedimentador, además que en este estudio el parámetro común para alcanzar las máximas eficiencias de remoción esta alrededor de un tiempo mínimo de retención hidráulica de 400 minutos.

También Cabezas (2005) sugiere que la baja velocidad de sedimentación del efluente resta viabilidad en términos de volumen y costos para la implementación de un sedimentador convencional, por lo tanto, se sugiere la implementación de sedimentadores de alta taza o placas paralelas.

En esta monografía se asume el proceso productivo como un sistema complejo integrado e indivisible; la ingeniería ambiental es un área del conocimiento que debe abrazar los diferentes factores: sociales, culturales, hídricos, energéticos y productivos, entre otros, para emitir un concepto, evaluar un proceso y optimizar un sistema; la producción mas limpia juega un papel importante en la industria, busca satisfacer las necesidades productivas y optimizan el uso de recursos, así como el mejoramiento de la calidad de vida de los empleados y la eficiencia industrial, que a su vez se refleja en la utilidad del empresario. En tal medida, se realizaron intervenciones para buscar en el desarrollo del proyecto la disminución de uso de agua, energía eléctrica y el ajuste normativo a la jornada laboral (8 horas) incrementando la productividad y la producción al final del día.

Se determinaron las medidas necesarias para la prevención y el control de la contaminación del recurso hídrico, realizando un análisis de proceso donde se involucran

los factores determinantes para optimizar el uso de agua, energía y mano de obra, buscando con ello la aplicación de procesos de producción más limpia y buenas prácticas ambientales.

Se logró optimizar el proceso productivo, mejorando las condiciones laborales, disminuyendo la jornada en seis (6) horas y a su vez se incrementó la productividad con una diferencia de cinco (5) toneladas de yuca procesada en el día, en consecuencia, hubo una disminución en el uso de agua y energía logrando así favorecer las condiciones medioambientales y de producción.

Se diseñó, se puso en marcha y evaluó un sistema de tratamiento compuesto por un Sedimentador de Alta Tasa con Placas Paralelas y Biofiltro con Lombrices a escala de laboratorio, en las instalaciones de la Industria Productora de Almidón la Cabaña, cuyo objetivo fue determinar los porcentajes de remoción de parámetros fisicoquímicos como: pH, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST).

En el primer capítulo se encuentra una descripción detallada del proceso productivo, se describen cada una de las fases que involucra la extracción de almidón de yuca.

El segundo capítulo contiene una descripción de las tecnologías evaluadas para la descontaminación del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca, los parámetros de diseño, donde se incluyen las figuras ilustrativas y planos del sistema evaluado y las memorias de cálculo para el montaje del tanque de sedimentación de alta taza con placas paralelas.

En el tercer capítulo, se describen los hallazgos y las medidas correctivas para elevar la producción, la optimización en el uso de agua y energía, además se presentan y analizan los reportes de laboratorio del agua residual y del tratamiento aplicado, los cuales fueron realizados por el laboratorio de la corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC, decisión tomada por certificación que posee ante el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, buscando con ello, una mejor precisión en la obtención de los resultados muestreados.

Objetivos

Objetivo General.

- Evaluar un sistema de tratamiento para los efluentes derivados del proceso de extracción de almidón de yuca.

Objetivos Específicos.

- Evaluar los métodos de producción en la extracción de almidón de yuca y realizar sugerencias acordes a lineamientos ambientales y productivo.
- Diseñar y construir un sistema en serie compuesto por un sedimentador de placas paralelas seguido de un Biofiltro con lombrices.
- Evaluar en el Sistema de Tratamiento la eficiencia de remoción respecto de parámetros fisicoquímicos como; demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST).

Capítulo 1: Descripción del proceso de producción de almidón agrio de yuca.

El almidón agrio de yuca se obtiene por medio de una serie de operaciones, que por vía húmeda se logra la extracción del almidón que contienen las raíces de yuca, el cual es sometido posteriormente a un proceso de fermentación natural realizado por bacterias Hemolíticas en condiciones de anaerobiosis y luego es secado al sol. La fermentación anaeróbica confiere al almidón características especiales de sabor, textura, olor y poder de expansión de productos horneados. (Núñez, 2011).

El proceso de producción del almidón de yuca implementa 6 etapas fundamentales que son: lavado, rallado, colado, la sedimentación, fermentación y secado. (Figura 1).

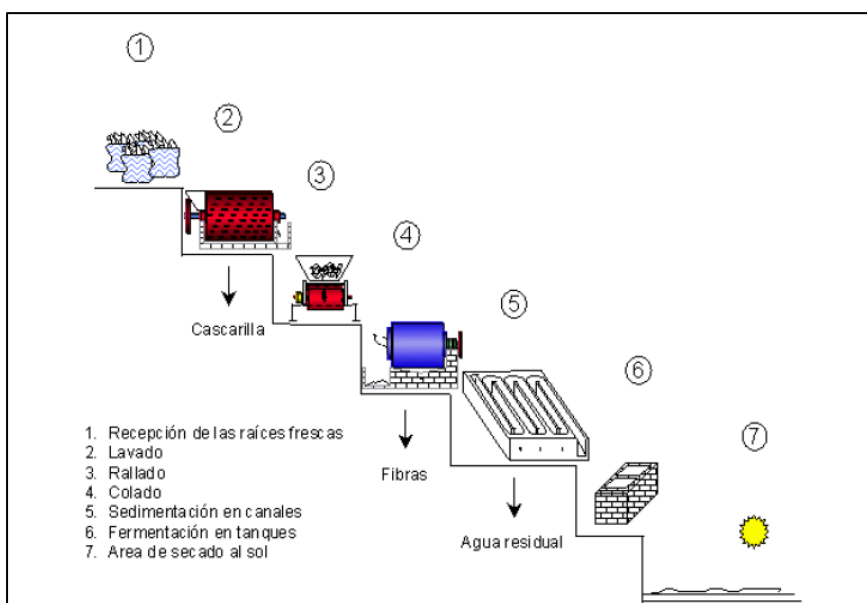


Figura 1. Diagrama proceso de producción de almidón de yuca.

Fuente: Implementación de la metodología sistemas agroalimentarios localizados (SIAL) en la cadena agroindustrial del almidón agrio de yuca en el norte del departamento del cauca. (Alarcon et Dufourt, 1999 citado por Sandoval, 2003).

1.1 Recepción, pesada y acopio de las raíces.

Se reciben los bultos que contienen la materia prima (yuca), por medio de una balanza se pesan estos sacos, una vez pesados proceden a ubicarse en el área de acopio. En estos procesos no se hace uso del recurso hídrico (Figura 2).



Figura 2. Acopio de yuca.
Fuente: Elaboración propia.

1.2 Lavado de las raíces.

Esta es la primera etapa del proceso, se realiza mediante un tambor rotatorio el cual por medio del golpe de las yucas entre ellas y con las varillas del tambor y el efecto del agua se elimina la tierra e impurezas como también la cascarilla (corteza externa de la yuca). En esta etapa se utiliza un caudal de agua de aproximadamente 1,98 litros por segundo (Figura 3).



Figura 3. Proceso de lavado de raíces.
Fuente: Elaboración propia.

1.3 Rallado de las raíces.

En el rallado se liberan los gránulos de almidón contenidos en la célula de la raíz, la eficiencia de esta operación determina en gran medida, el rendimiento total de almidón en el proceso de extracción (Figura 4).



Figura 4. Proceso de rallado de la yuca.
Fuente: Elaboración propia.

1.4 Colado o Tamizado.

El almidón disuelto en la lechada se separa del afrecho. Para tamizar la lechada se emplea un tabor giratorio denominado coladora, el afrecho se presenta como un subproducto de esta operación y a nivel comercial es utilizado en la fabricación de concentrado para animales (Figura 5).



Figura 5. Coladoras- Proceso de Colado o Tamizado.
Fuente: Elaboración propia.

1.5 Sedimentación.

Proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno en estado de suspensión, son removidas por acción de la gravedad. (Pérez, 2005). La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada (CEPIS/OPS, 2004).

En esta operación se separa el almidón de las partículas de fibra y otros materiales finos, que no fueron extraídos durante el tamizado componentes menos densos como fibra fina, mancha (otro subproducto también comercializado para la fabricación de concentrado para animales) y agua residual; esta última, es el resultado de una "lechada" que resulta posterior al proceso posterior al depósito en tanques o canales donde se lleva a cabo la sedimentación del almidón. Este proceso puede durar 3 horas en los canales, al final de esta etapa la mancha y el almidón se separan por diferencia de densidad quedando una capa de almidón compactado en el fondo del canal y en la superficie la mancha y agua residual.

En la etapa de sedimentación se genera el 80% del volumen de agua residual y la mayor carga contaminante, esta agua se caracteriza por ser fácilmente acidificables; el efluente de los canales de sedimentación presenta bajos niveles de pH y prácticamente ausencia de alcalinidad, además de elevada acidez. Las altas relaciones DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) así como el elevado nivel de SD (Sólidos Disueltos) indican la predominancia de la materia orgánica en forma soluble, característica que dificulta su separación física. (Pérez *et al.*, 2009) (Figura 6).



Figura 6. Canales de sedimentación.

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Fermentación.

El almidón sedimentado se lleva a los tanques de fermentación donde permanece entre 30 y 45 días hasta alcanzar la acidez deseada (Figura 7).



Figura 7. *Tanques de fermentación.*

Fuente: Elaboración propia.

1.7 Secado del almidón.

El proceso de secado es la etapa final del sistema productivo, en este no se utiliza agua.

Para ello se coloca el almidón en forma de una capa sobre un recipiente plano y se pone a la luz solar directa por al menos 8 horas, moviendo el producto para uniformar el secado.

Lo ideal es que el lecho de secado sea elevado del suelo, para evitar contacto con agentes externos, se recomienda que las camas tengan un ancho máximo de dos metros de ancho por el largo deseado, esto con el fin de facilitar el acceso a la totalidad de la superficie por ambos lados de la cama, y que esta esté recubierta de plástico, con el fin de poder facilitar la protección del producto en caso de lluvia y la recolección de la misma al finalizar el proceso.

El almidón secado al sol, muestra una fuerte tendencia a la retrogradación.

Capítulo 2: Optimización del sistema productivo y uso eficiente de recursos

2.1 Ubicación

El proyecto se desarrolló en las instalaciones de la Almidones La Cabaña, de propiedad del Señor Ariel Jiménez García, ubicada en la vereda la Puentequita, municipio de Piendamó, Departamento del Cauca (Figura 8).

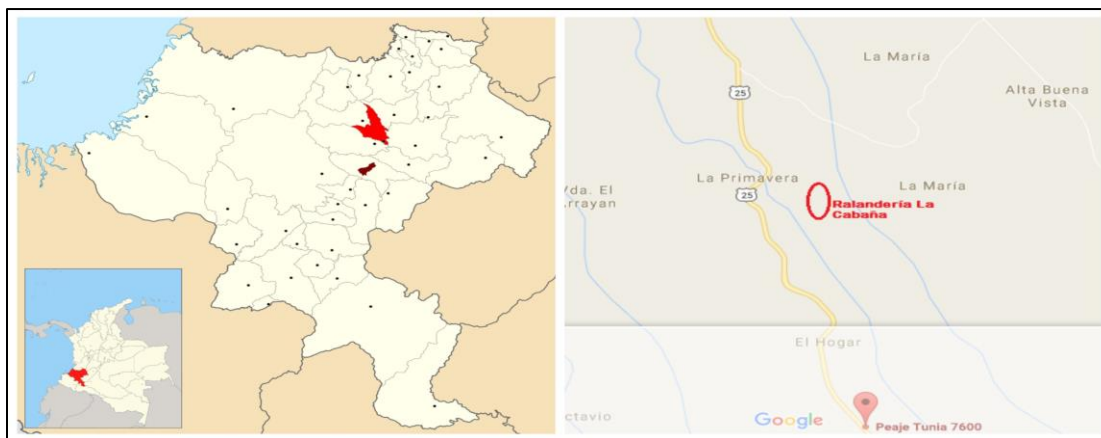


Figura 8. Mapa de Localización Almidones La Cabaña.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Identificación de variables productivas e implementación de medidas correctivas

La investigación que se adelantó fue desarrollada en la Planta Productora de Almidón la Cabaña, la cual cuenta con dos sedes, la primera está ubicada en el corregimiento de Tunía, donde se realiza el proceso de extracción del almidón dulce de yuca y la segunda en el municipio de Santander de Quilichao, vereda la Agustina donde se realiza el proceso de fermentación y secado del almidón, convirtiéndolo en almidón agrio de yuca tipo “extra”, distintivo utilizado para denotar la calidad del almidón, el almidón tipo extra es reconocido por su alto rendimiento y calidad.

La planta es una fuente de importante de empleo en la región, en total generan 13 empleos directos, entre personal profesional y operarios.

Tabla 1. Sede y empleados.

Sede	Número de empleados
La Puentecita	3
La Agustina	6
Administración general	4
Total, Empleados	13

En la Planta Productora de Almidón la Cabaña, se adelantó un trabajo integral para evaluar un sistema de tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta los parámetros que involucra el proceso productivo y ambiental, pretendiendo optimizar cada paso que involucra la extracción de almidón, teniendo en cuenta parámetros como ahorro de: agua, energía eléctrica y tiempo.

Esto como procedimiento previo al análisis del sistema de tratamiento planteado, dado alto el volumen utilizado de agua en estas plantas que pueden llegar a superar los 200.000 m³ en una jornada de trabajo, volumen que puede hacer inviable la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales, por razones económicas y espaciales.

En razón a lo mencionado se inició la investigación con un análisis sistemático de los procesos que involucran la producción de almidón de yuca, cuya finalidad fue identificar los puntos críticos en función del medio ambiente, y puntualizando el enfoque en la implementación de un sistema de tratamiento para las aguas residuales y de la productividad del proceso de extracción de almidón de yuca.

En tal sentido se encontró que una de las variables de control más relevantes en la implementación de cualquier tratamiento de aguas residuales es el volumen de agua a tratar.

El almidón de yuca es un producto que en su proceso de obtención, involucra una gran cantidad de variables que determinan su calidad, entre ellas y quizá una de las más determinantes, es el tiempo que transcurre entre la cosecha y el procesamiento de la yuca, los productores locales afirman que no debe transcurrir más de 24 horas dado que el tubérculo, disminuye la productividad, es decir la cantidad de almidón por tonelada de yuca procesada, así como la calidad del mismo y el incremento de la mancha de yuca, la mancha de yuca es el objeto de remoción para los sistemas de tratamiento de aguas residuales de la industria.

En tal sentido, la materia prima que se recepciona debe ser procesada en su totalidad en el mismo día, razón por la cual, se presentan jornadas laborales tan extensas.

La Industria Productora de Almidón la Cabaña consumía $184520 \frac{1}{\text{día}}$ representados en una jornada de 14 horas, con una capacidad de procesamiento de 7000 kg de yuca por jornada de trabajo, pudiendo procesar un máximo de 500 kg de yuca por hora.

Tabla 2. Consumo de Agua.

Consumo de Agua				
Proceso Industrial	Jornada (Horas)	Consumo Corriente ($\frac{L}{s}$)	Consumo Unitario ($\frac{\text{Litros de agua}}{\text{Kg Yuca}}$)	Consumo Jornada ($\frac{L}{\text{Dia}}$)
Lavado Yuca	14	1,3	9,36	65.520
Extracción de Almidón	14	2,36	17	118.944
Consumo Total Procesos	14	3,66	26,33	184.464

Tabla 3. Productividad Planta.

Productividad Planta		
Jornada (Horas)	Yuca procesada (Kg)	Productividad ($\frac{Kg}{\text{Hora}}$)
14	7000	500

Durante el acompañamiento integral que se realizó a la empresa con el objetivo de auspiciar las condiciones necesarias para brindar viabilidad a la aplicación del proceso investigativo, se identificaron los puntos críticos relacionados con la producción, consumo de agua y energía y se sugirieron posibles soluciones para la optimización de la industria, soluciones que fueron bien acogidas e implementadas.

Dicho esto, se procede a mencionar los hallazgos en cuestión y las medidas de optimización implementadas:

Se identificó en el proceso productivo que la tecnología utilizada podía ser reemplazada por sistemas lineales de producción, que posteriormente fueron instalados y se implementó un sistema de uso eficiente y ahorro de agua.

Se identificó una baja productividad en planta, los escasos recursos tecnológicos con que se contaba no permitían un eficiente desarrollo de la línea productiva:

En ese sentido se hace mención al proceso de la “Coladora” es una máquina que se utiliza para decantar el “lechado de yuca”, que es una mezcla de agua con yuca molida, que resulta del proceso de rayado.

En esta máquina se separa el agua con almidón, del afrecho, en este proceso era necesario cargar y descargar cada vez que el proceso estaba terminado, parando su funcionamiento a razón de un ciclo, consumiendo un alto volumen de agua (tabla 4), se utilizaba una flauta o una tubería de PVC perforada como mecanismo para la irrigación de agua al sistema de extracción de yuca (Figura 9).



Figura 9. Imagen de mecanismo de irrigación de agua antiguo.

- **Solución Implementada:**

Brindando solución a la baja productividad, el representante legal, el señor Ariel Jiménez desarrolló y posteriormente se implementó, una extractora de almidón de flujo continuo, mejorando así la productividad de la empresa de forma significativa, la cual estaba en $500 \frac{\text{Kg de yuca}}{\text{Hora}}$ (Tabla 6) y pasando a $1562.5 \frac{\text{Kg de yuca}}{\text{Hora}}$, lo que consecuentemente conllevó a la reducción de la jornada laboral del personal acogiéndose a lo consagrado en Código Sustantivo del Trabajo, jornadas de 8 horas diarias, de tal modo que la productividad también se ve reflejada en el ahorro de pago de horas extras.

Teniendo de este modo un incremento unitario productivo del 312%, pasando de procesar $700 \frac{\text{Kg de yuca}}{\text{Día}}$ a $12.500 \frac{\text{Kg de yuca}}{\text{Día}}$ lo que se representa en el día un incremento del 1785 %

Tabla 4 Variación Productiva.

Variación Productiva					
Etapa del proyecto	Jornada (Horas)	Yuca procesada (Kg)	Productividad ($\frac{\text{Kg}}{\text{Hora}}$)	Variación productiva unitaria (%)	Variación productiva diaria (%)
Inicial	14	7000	500	312%	1.785%
Final	8	12500	1562.5		



Figura 10. Montaje de la maquina extractora de almidón actual.



Figura 11. Montaje de la segunda maquina extractora de almidón con funcionamiento en paralelo.

En torno al recurso hídrico, se implementó en el sistema una aspersión con boquillas de alta presión, el cual fue calibrado, de tal forma que el licor de mezcla no permita que el almidón se pierda al mezclarse con el agua del “Afrecho”.

En este proceso se obtuvo una reducción del uso de agua unitario de un 44%, pasó de $17 \frac{L}{Kg \text{ de yuca}}$ A $7.5 \frac{L}{Kg \text{ de yuca}}$ y una reducción de consumo diario de un 21%, el porcentaje es menor debido al incremento de los kg de yuca procesados en el día, se pasó de 700 a $12500 \frac{Kg \text{ de yuca}}{Dia}$

Tabla 5. Variación de Consumo

Variación de consumo de agua en maquina extractora de almidón						
Etapa del proyecto	Jornada (Horas)	Yuca procesada (Kg)	Consumo unitario ($\frac{L}{Kg \text{ Yuca}}$)	Variación productiva unitaria (%)	Variación productiva diaria (%)	Ahorro agua día ($\frac{L}{Dia}$)
Inicial	14	700	17	44	21	25250
Final	8	12500	7.5			

A continuación imágenes del montaje de boquillas en la maquina extractora de almidón previo al funcionamiento y en funcionamiento (Figura 12 y Figura 13).



Figura 12. Montaje de boquillas de alta presión en la maquina extractora de almidón.



Figura 13. Maquina Extractora de Almidón en funcionamiento, con boquillas de alta presión y membrana de separación.

Continuando con la reducción en el consumo de agua se implementó un sistema de recirculación para el lavado de yuca, utilizando el agua del afrecho resultante de la Maquina Extractora de Almidón.

En el proceso de lavado de la yuca se utilizaba un total de $1.3\frac{1}{5}$ llegando a la fecha a un consumo de $0.65\frac{1}{5}$ Lo que reduce sustancialmente el uso total de agua por kg de yuca procesada, teniendo ahora como un total unitario de $1.5\frac{L}{Kg\ Yuca}$ y partiendo de $9.36\frac{L}{Kg\ Yuca}$ o que representa una reducción unitaria del 84% en el consumo de agua y un ahorro diario de 46800 litros de agua reflejado en un 71% de eficiencia en el uso del recurso hídrico.

Tabla 6. Variación proceso de lavado.

Variación de consumo de agua en el proceso de lavado y pelado						
Etapas del proyecto	Jornada (Horas)	Yuca procesada (Kg)	Consumo unitario ($\frac{L}{Kg\ Yuca}$)	Variación productiva unitaria (%)	Variación productiva diaria (%)	Ahorro agua día ($\frac{L}{Día}$)
Inicial	14	700	9.36	84	71	46800
Final	8	12500	1.5			

Se sugirió un sistema de lavado de yuca en seco, que consta de un tambor giratorio que permite la eliminación de cascarilla de yuca, sin el uso de agua, este tambor está separado por una compuerta que controla el paso de la carga de yuca al sistema actual que se convierte en una lavadora rápida, se calcula que el

ahorro de agua estaría en el orden del 80% adicional. En la actualidad está en proceso de implementación.

En total el sistema de ahorro y uso eficiente de agua, logro incrementar la eficiencia en el consumo en un total del 65% en el proceso productivo unitario.

Tabla 7. Variación proceso productivo.

Variación de consumo de agua en el proceso productivo						
Etapa	Consumo lavado y pelado de yuca $(\frac{L}{Kg Yuca})$	Consumo extracción almidón $(\frac{L}{Kg Yuca})$	Consumo unitario total $(\frac{L}{Kg Yuca})$	Variación productiva unitaria (%)	Variación productiva diaria (%)	Ahorro agua día $(\frac{L}{Dia})$
Inicial	9.36	17	26.36	66	39	72050
Final	1.5	7.5	9			

Como se puede observar, este enfoque con visión holística respecto de la empresa, dirigió la atención a factores determinantes como fueron:

- ❖ El ajuste de la jornada laboral.
- ❖ El incremento de la productividad.
- ❖ La gestión del recurso hídrico.

La reducción de la jornada laboral hace parte del proceso de dignificación de la clase obrera, es el reconocimiento a la fuerza de trabajo de quienes realizan las funciones que requieren mayor esfuerzo físico, esto se logró sin sacrificar la productividad, por el contrario, incrementándola.

El incremento de la productividad, es un factor que nunca se perdió de vista, es el eje central y objeto direccional de toda compañía, una vez la productividad se vea acrecentada sin menguar las condiciones laborales, ni entrar en detrimento con las apuestas ambientales, el trabajo se ha realizado a satisfacción, en este caso logramos encontrar el punto de equilibrio en los tres ejes abordados.

La gestión del recurso hídrico fue el factor que captó la atención, debido a la viabilidad el sistema de tratamiento de aguas residuales, teniendo como foco, reducir el área que ocuparía, así como la disminución de los costos ambientales y de tipo monetario.

Una vez implementadas estas medidas preliminares procedemos a evaluar las condiciones del sistema de tratamiento planteado:

Capítulo 3: Sedimentador de alta tasa

Se diseñó y construyó el sistema de tratamiento compuesto por sedimentador de alta tasa y Biofiltro con lombrices o Lombrifiltro, en este capítulo se desarrollará con el diseño y la evaluación del sedimentador de alta tasa.

El flujo de agua residual fue controlado por un dosificador automático y electrónico que cuenta con una electroválvula y una motobomba, con el fin de garantiza un flujo permanente y controlado.

El sistema a utilizar está compuesto por dos tratamientos en serie y diseñados a escala de laboratorio con caudal de $1 \frac{\text{mL}}{\text{minuto}}$ el primero de ellos, será el Sedimentador de alta tasa, con placas paralelas, para el cual se tuvo en cuenta las ecuaciones para flujo laminar.

3.1 Sedimentador de alta tasa con placas paralelas.

Mediante la colocación de placas paralelas o módulos de diferentes tipos en la zona de sedimentación, se obtiene en estas unidades una gran superficie de deposición para los lodos, con lo cual se logra disminuir apreciablemente el área superficial de los tanques. (CEPIS, 2004).

3.2 Parámetros de diseño de placas paralelas

Existen algunos parámetros de diseño que son conocidos debido a que su valor es el mismo en cualquier tipo de aplicación (lodo pesado ó lodo liviano). Estos parámetros son: el ángulo de inclinación de las placas (θ), que debe tener un valor de 45° en el caso de lodos pesados, y de 55° para los lodos livianos. La separación óptima que debe existir entre las placas (C_p) es de 5 cm, ya que esto garantiza el desplazamiento normal del fluido entre las placas, evitando perturbaciones en el proceso de sedimentación. El ancho adecuado de las placas

(dp) es de 90 cm, por razones de recorrido interno del fluido y del diseño y construcción de las mismas, de manera que no fluctúen. El caudal de operación o de diseño (Q), es también un parámetro de diseño conocido, pero varía con cada caso, ya que su valor depende de la cantidad de efluentes que arrojen las empresas. Su valor se mide directamente y es fundamental para el diseño, ya que de él depende el área de sedimentación y espesamiento. Algunos parámetros de diseño son propios de cada tipo de efluentes, por lo que deben determinarse por medio de pruebas de laboratorio y de ensayos a escala del mismo. Estos parámetros son Concentración de Sólidos Totales Suspendidos (C_o); Densidad del Lodo Sedimentado (d_l); Volumen de Lodo Sedimentable (VLS); Caudal Máximo de Fluido utilizado en el modelo (Q_m); Nivel Superior e Inferior de Lodo en el modelo (h_{sm} ; h_{im}). Los primeros tres parámetros mencionados se obtienen de un ensayo simple de sedimentación con columna, y los dos últimos se obtienen de ensayos en el modelo a escala. (Grau y Andarcia, 2002).

Para la sedimentación de la mancha de (Chaux, 2005), encontraron que el tiempo de retención hidráulica mínimo fue de 400 minutos, para una velocidad de sedimentación intermedia de 4.64 m/d en el sedimentador de flujo horizontal y concluyen afirmando que el sedimentador de placas paralelas es un sistema más compacto que el sedimentador de flujo horizontal, y cuya relación es de 4,3 :1, lo que nos garantiza que la aplicación del sistema de placas paralelas es el más

adecuado para este sistema (Figura 14).



Figura 14. Sistema a Escala de Placas Paralelas.
Fuente: Elaboración propia.

Ecuaciones de diseño.

- **Inclinación de las placas.**

De acuerdo a (Chaux, et al., 2005) para facilitar el deslizamiento del lodo depositado sobre las placas, el valor adoptado para el ángulo de inclinación de las placas en este diseño es de $\alpha = 60^\circ$

- **Velocidad de sedimentación.**

Según estudios realizados por (Chaux, et al., 2005) el agua de mancha tiene una velocidad de sedimentación de:

$$v_{sc} = 5,21 \text{ m/d}$$

- **Separación entre placas.**

Según lo recomendado por (Chaux, et al., 2005) el máximo recomendado entre placas es de:

$$e = 0.10 \text{ m}$$

- **Viscosidad cinemática.**

Para el agua a 20°C es de:

$$v = 0.087 \text{ m}^2/\text{d}$$

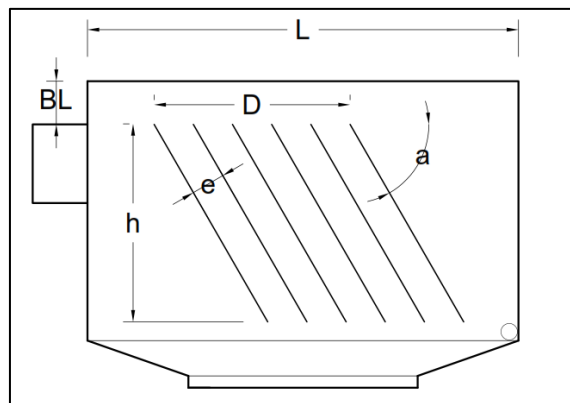


Figura 15. Sección transversal del sedimentador de placas paralelas de con flujo en contracorriente

Fuente: Elaboración propia.

- **Velocidad promedio del fluido**

Velocidad promedio del fluido en el elemento de sedimentación de alta tasa o carga superficial en el área de sedimentación de tasa alta.

$$V_o = \frac{v_{sc} \left(\operatorname{sen}\alpha + \frac{1}{e} \operatorname{cos}\alpha \right)}{1 + \frac{0,058 * e * v_{sc} * \operatorname{cos}\alpha}{v}}$$

Reemplazamos los valores anteriores en la formula

$$V_o = \frac{5.21 \text{ m/día} \left(\operatorname{sen}(60^\circ) + \frac{1}{0.10 \text{ m}} \operatorname{cos}(60^\circ) \right)}{1 + \frac{0,058 * 0.10 \text{ m} * 5.21 \text{ m/día} * \operatorname{cos}(60^\circ)}{0.087 \text{ m}^2/\text{día}}}$$

$$V_o = 26.04 \text{ m/día}$$

En los sedimentadores de tasa alta se debe garantizar el flujo laminar, entonces calculamos el número de Reynolds.

- **Número de Reynolds.**

$$R_e = \frac{v_o * e}{v}$$

Utilizamos los valores obtenidos

$$R_e = \frac{26.04 \text{ m/día} * 0.10 \text{ m}}{0.087 \text{ m}^2/\text{día}}$$

El número de Reynolds

$$R_e = 29.93$$

$29.93 < 250$ entonces el flujo es laminar

- **Cálculo de carga superficial.**

$$C_s = V_o * \operatorname{sen}\alpha$$

Reemplazando en la formula se obtuvo que

$$C_S = 26.04 \text{ m/día} * \text{sen}(60^\circ)$$

La carga superficial fue

$$C_S = 22.55 \text{ m/día}$$

- **Área total de placas.**

$A_T = \frac{Q}{C_S} * \left(1 + \frac{ep}{e}\right)$ Donde: ep = espesor de la lamina en este caso 0.007 m

$$A_T = \frac{1.44 \text{ m}^3/\text{día}}{22.55 \text{ m/día}} * \left(1 + \frac{0.007\text{m}}{0.010\text{m}}\right)$$

$$A_T = 0.109 \text{ m}^2$$

- **Número de placas.**

$$N = \frac{A_T * \text{sen } \alpha}{b * (e + ep)}$$

$$N = \frac{0.109\text{m}^2 * \text{sen}(60^\circ)}{0.22\text{m} * (0.10\text{m} + 0.009\text{m})}$$

$$N = 3.94 = 4$$

- **Tolva**

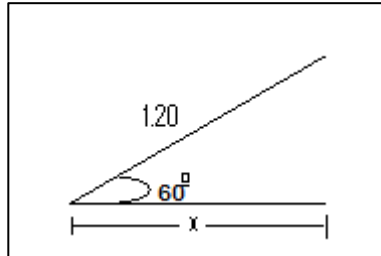
$\tan \alpha = \frac{Ht}{a}$ Donde: Ht = altura de la tolva

$$HT = \tan \alpha * a$$

$$HT = \tan 60^\circ * 0.069\text{m}$$

$$HT = 0.12\text{m}$$

- **Longitud del sedimentador.**



Se asume un largo de placa de $1.20m$ debido al tamaño de lámina del acrílico, entonces tenemos que:

$$\cos 60^\circ = \frac{x}{1.20m}$$

$$x = \cos 60^\circ * 1.20m$$

$$x = 0.6m$$

- **Tiempo de retención hidráulico TRH.**

Se puede obtener el tiempo de retención hidráulico (TRH) con la ecuación de caudal

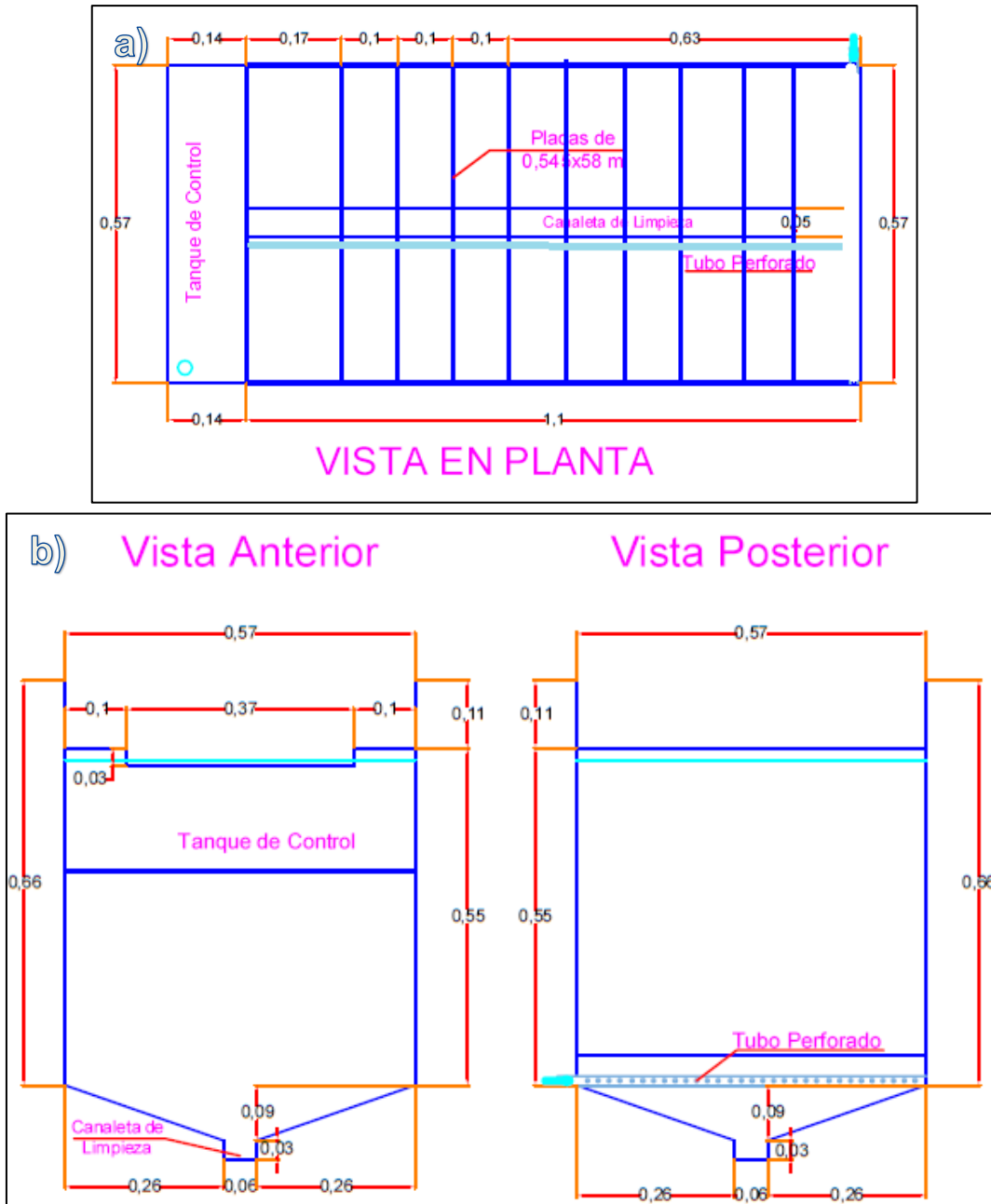
$$Q = \frac{V}{t}, \text{ donde } t = TRH \text{ y } V = L \times B \times H$$

$$TRH = \frac{L \times B \times H}{Q}$$

$$TRH = \frac{1.24 \times 0.57 \times 0.66}{1.44}$$

$$TRH = 0.32 \text{ día} = 7.68 \text{ horas}$$

Planos de prototipo a escala de sedimentador de placas paralelas (Figura 16)



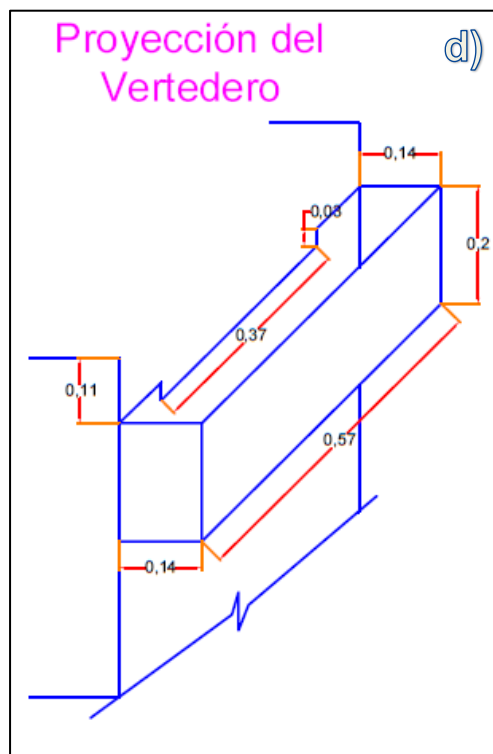
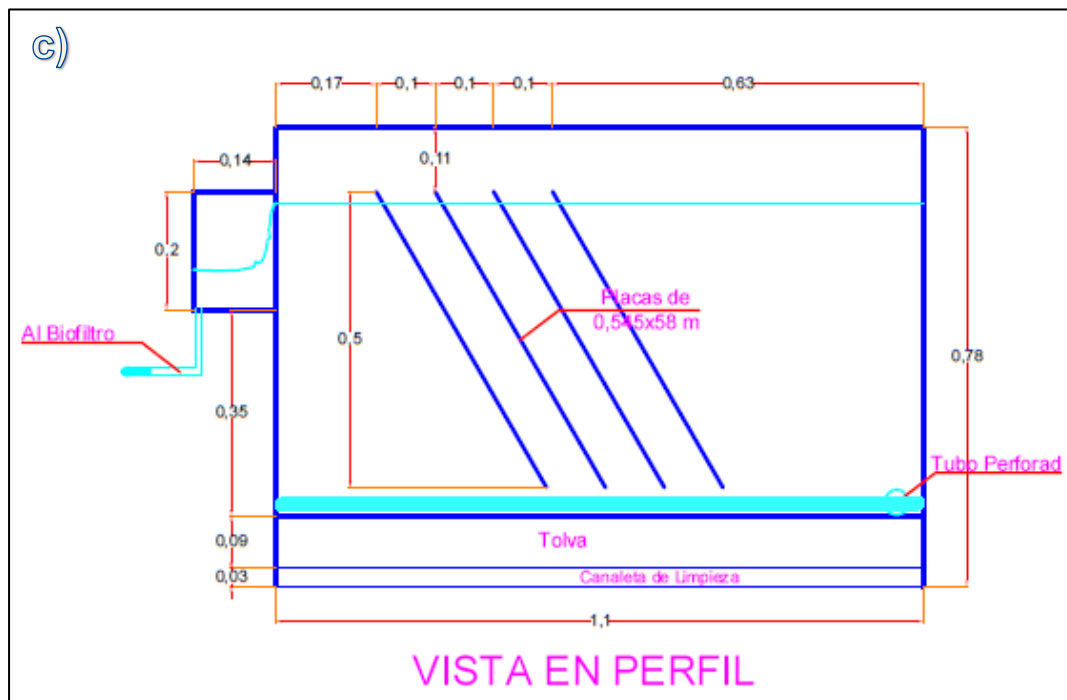


Figura 16. Diseño de sedimentador de alta tasa
 a) Vista en Planta. – b) Vista Anterior y Vista Posterior. – c) Vista en Perfil – d) Proyección del vertedero.

El sedimentador de placas paralelas se construyó en acrílico de 9 mm de espesor con las especificaciones técnicas plasmadas en los planos (Figura 17).



Figura 17. Proceso de construcción de sedimentador de placas paralelas.

a) Vista en planta – b) Vista Frontal – c) Vista posterior

3.3 Eficiencia del proceso de tratamiento con sedimentador de alta tasa

A continuación, se muestran las características fisicoquímicas estudiadas del Agua residual en la salida de los canales de sedimentación de almidón, del tanque de sedimentación de alta tasa con placas paralelas

3.4 Caracterización de las aguas residuales

Se realizaron tres muestreos de agua a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento, teniendo en cuenta la Resolución 0631 del 17 marzo de 2015 “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”. Los análisis de laboratorio fueron realizados por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, en adelante (CRC), los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron: pH, Demanda Biológica de Oxígeno- DBO (mg/L O₂), Demanda Química de Oxígeno- DQO (mg/L O₂), sólidos Suspendedos Totales SST (mg/l), se realizaron tres muestras del vertimiento sin tratar, tres muestras del agua al final de cada tratamiento, con el fin de evaluar remociones.

Las tomas de muestras para los dos tratamientos se distribuyeron así:

El primer mes se tomó la primera muestra del sistema se tomó en febrero de 2017, la segunda en abril de 2017 y la última en junio del mismo año, a las cuales se les aplicó la siguiente metodología:

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos a Evaluar.

Variable	Método/Equipo	Utilización
1. pH (Unidades de pH)	Método electrométrico. Methods for the Examination of Water and Wastewater.	Determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medidas potenciométricas.
2. Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	Método de reflujo cerrado, colorimétrico en ultravioleta visible JAMWAY./ Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.	Cuantificación de compuestos presentes en el medio
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (mg/L)	Método: Espectrofotómetro NOVA 60./ Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.	Determinación de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el cuerpo de agua
3. Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Método Gravimétrico/ Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.	Determinación Sólidos Suspendidos Totales

Se realizaron tres muestreos, los análisis fueron realizados en el laboratorio de la CRC con la finalidad que la muestra este certificada, este procedimiento reduce sustancialmente el margen de error en el proceso de análisis, el laboratorio de la CRC está certificado ante el IDEAM, por factores económicos no fue posible plantear un universo mayor de análisis fisicoquímicos, razón por la cual se utiliza el margen de error del laboratorio para el análisis de los resultados.

Este proyecto tomó como referencia la resolución 631 de 2015 por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.

Tabla 9. Reporte y tratamiento de resultados.

Parámetros		DBO		DQO		SST	
		Vertimiento	Sedimentador	Vertimiento	Sedimentador	Vertimiento	Sedimentador
Reporte de datos	Muestra						
	1	636	279	1016	522	7328	313
	2	4500	3972	7030	4636	4864	576
	3	4497	1084	5890	1187	8125	525
Tratamiento de datos	Promedio	3211	1778	4645	2115	6772	471
	Desviación Estándar	2230	1942	3194	2208	1700	139
	Máximo	4500	3972	7030	4636	8125	576
	Mínimo	636	279	1016	522	4864	313
	Numero de datos	3	3	3	3	3	3

Encontramos en la tabla 9 el reporte de los valores arrojados, reportando así los valores máximos, mínimos y el promedio de los mismos, se calculó la desviación estándar, la cual resulto elevada para los parámetros de DBO y DQO, dado que el valor arrojado supera los de referencia, una de las razones por las cuales esto sucede es por el bajo número de repeticiones que se presentan, tres (3) en este caso. El número de muestras estuvo limitado al presupuesto del proyecto; El análisis de los resultados se realizará a partir del promedio de los mismos.

Tabla 10. Valores promedios y eficiencias medias Resultados

Parámetro	DBO		DQO		SST	
	vertimiento	Sedimentador	Vertimiento	Sedimentador	vertimiento	Sedimentador
Valor promedio	3211	1778	4645	2115	6772	471
Eficiencia Media	45%		54%		93%	

Encontramos que el valor medio de remoción en DBO es del 45%, de DQO es del 54% y en solidos suspendidos totales es del 93%, teniendo este último, como era de esperarse, el porcentaje más alto de remoción, y llevando consigo una cantidad importante de materia orgánica e inorgánica, facilitando el trabajo para un sistema de tratamiento posterior.

A continuación, se presentan las condiciones para la operación de un sedimentador de alta tasa aplicado a la agro-industria del almidón de yuca.

3.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA.

La operación y el mantenimiento del sedimentador de placas paralelas es básico y no requiere de mano de obra calificada.

- Se requiere un vaciado de la tova diario.
- Se recomienda para el mantenimiento un lavado cada 3 días debido a la acumulación de mancha en la superficie de las placas paralelas.
- Se recomienda la aplicación de colorante al agente detergente que se utiliza para lavar las placas y los canales, con el fin de verificar la completa extracción del mismo al enjuagar.

Capítulo 4: El Bio-filtro con lombrices

Es un sistema que fue desarrollado por el Dr. José Tohá Castellá en el laboratorio de Biofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. El “Sistema Tohá” también conocido como Lombrifiltro o “Biofiltro Dinámico Aeróbico”, corresponde a un filtro percolador compuesto de diferentes estratos filtrantes y lombrices. El agua residual percola a través de los diferentes lechos filtrantes, quedando retenida la materia orgánica la que posteriormente es consumida por las lombrices. (Fundación para la Transferencia Tecnológica, 2016). Cabe mencionar acerca de la microbiología existente en las diferentes capas del filtro, las cuales transforman la materia orgánica en dióxido de carbono y agua. (Kusanovic, 2009)

La comunidad biológica presente en el Biofiltro se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aeróbicas y anaeróbicas, hongos, y protozoos. Las bacterias facultativas son microorganismos predominantes en el Biofiltro y, junto con las bacterias aeróbicas y anaeróbicas, descomponen la materia orgánica del agua a tratar. Entre las especies bacterianas normalmente asociadas con el Biofiltro están: *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* y *Alcaligenes*. Dentro de la capa de aserrín, donde prevalecen condiciones adversas al crecimiento, existen las formas filamentosas *Sp. Haerutilus natans* y *Beggiatao*. En las zonas más bajas del Biofiltro, se encuentran los distintos tipos de bacterias dependiendo de la cantidad de oxígeno que exista, si no existe buena aireación se encontrarán bacterias nitrificantes *Nitrosomas* y *Nitrobacter*. Los protozoos que se pueden encontrar en el filtro son predominantemente del grupo *Ciliata*, incluyendo la *Vorticella*, *Opercularia* y *Epistylis*. Su función no es estabilizar el agua residual sino controlar la población bacteriana. (Hernández, 2005).

4.1 Parámetros de diseño de un Biofiltro con lombrices.

El biofiltro con lombrices o Lombrifiltro cuenta con dos componentes importantes: El proceso microbiológico que coadyuvará con la degradación de materia orgánica a nivel de cada una de las capas que lo componen, el proceso físico, que se da mediante la filtración a partir de tamices orgánicos, como la cascarilla de yuca (residuo del proceso industrial del almidón), el aserrín fino y grueso y la cascara o estopa de coco y el proceso macrobiano, dado por las

lombrices que cumplen un papel fundamental en la transformación de la materia orgánica contenida en el agua residual mediante la digestión de los compuestos.

El biofiltro con lombrices consiste en un filtro de flujo descendente, el cual está compuesto por capas filtrantes, lombrices y microorganismos asociados, sistema de ventilación y doble fondo.

Este sistema funciona de la siguiente manera: el afluente es asperjado en la superficie del filtro, luego el agua percola a través de las diferentes capas del filtro, de ello reteniendo los sólidos del efluente en la superficie y aserrín para luego ser consumida por las lombrices, oxidándola y transformándola en anhídrido carbónico y agua, pasando una parte de menor de ella a construir masa corporal de las lombrices y otra mayor deyecciones de las mismas; estas últimas, constituyen el llamado humus de lombriz.

Se diseñó el Biofiltro con material orgánico de fácil acceso y con la capacidad de brindar una solución a los residuos sólidos generados en el proceso productivo de la rallandería de yuca, en tal sentido se utilizó en lecho filtrante cascara de coco, aserrín y cascarilla de yuca precompostada con la adición de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)

El volumen del Biofiltro es de un metro cúbico (1m³), en la parte inferior tienen un falso fondo que soporta la primera capa compuesta por grava material utilizado para la percolación, seguida por diez centímetros (10cm) de fibra de coco que soporta el aserrín fino que es donde se pretende generar el proceso microbiológicamente más activo, a continuación veinte centímetros (20cm) de aserrín grueso que permite la entrada de oxígeno al sistema y la baja acumulación de agua en la capa superior creando un hábitat propicio para las lombrices y el lecho vivo está en la capa superficial consta de treinta centímetros (30cm) de cascarilla de yuca precompostada e inoculada con lombrices (Figura 18).



Figura 18. Esquema ilustrativo del biofiltro con lombrices.

Fuente: Elaboración propia.

Para el Biofiltro con lombrices fue necesario calcular el tiempo de retención hidráulico, para lo cual se calculó mediante la réplica a escala controlada del experimento, utilizando un cilindro de dimensiones conocidas y compuesto por las mismas capas de lecho filtrante, de tal forma que al aplicarle agua en un volumen conocido, esta reemplazó los espacios vacíos de esta forma se pudo determinar la porosidad del sistema.



Figura 19. Cilindro para la evaluación de la porosidad del sistema.

- **Calculo de la porosidad:**

Se replicó el sistema capa por capa en un cilindro de vidrio con las siguientes dimensiones:

Alto (L): 110 cm

Radio (r): 7 cm

- **Hallamos el volumen del cilindro (VC):**

$$vc = \pi r^2 L$$

$$vc = \pi * 7cm^2 * 110 cm$$

$$vc = 16924.6cm^3$$

Al cilindro con el contenido del filtro se le aplicó agua hasta el rebose. Esta agua fue aforada previamente para determinar el volumen de espacios vacíos que contiene.

❖ Se encontró que posee 12000 cm³ o 12 litros.

- **Calculamos la porosidad del sistema (η)**

$$\eta = \frac{\text{volumen de vacios}}{\text{volumen del cilindro}}$$

$$\eta = \frac{12000 \text{ cm}^3}{16924.6 \text{ cm}^3}$$

$$\eta = 0.71$$

Calculamos el tiempo de retención:

Se proyectó tratar por cada m^3 de agua servida, un m^2 de filtro efectivo.

Entonces tenemos que:

$$TR = \frac{vf * \eta}{Q}$$

Dónde:

TR: Tiempo de Retención (Día)

vf : Volumen del Filtro (m^3)

η : Porosidad del Sistema

Q: caudal ($\text{m}^3/\text{Día}$)

Reemplazando obtenemos que:

$$TR = \frac{1.1\text{m}^3 * 0.71}{1\text{m}^3/\text{Día}}$$

Tenemos:

$$TR = 0.7 \text{ Dias} \quad \text{Ó} \quad TR = 16.8 \text{ Horas}$$

Se procedió a la construcción del Biofiltro, se lavó la grava y se agregó paso a paso cada componente del lecho filtrante, siendo cada uno remojado para evitar el aplastamiento posterior y una falsa medición de la altura.

Una vez instalado el sistema se conectó al tanque receptor del rebosadero de placas paralelas, mediante una manguera de 0.5 cm de diámetro y un aspersor de flujo rotatorio (Figura 20).



Figura 20. Lechos

- a) Grava. – b) Cascara de coco. – c) Aserrín fino. - d) Aserrín grueso.
e) Lombrices adaptadas al vertimiento. - f) Sistema instalado.

4.2 Eficiencia del proceso de tratamiento del biofiltro

A continuación, se muestran las características fisicoquímicas estudiadas del agua residual en la salida del sedimentador de placas paralelas (desarrollado en el capítulo anterior) y del biofiltro con lombrices.

4.3 Caracterización hídrica

Tabla 11 Reporte y tratamiento de resultados caracterización.

Parámetros		DBO		DQO		SST	
		Sedimentador	biofiltro	Sedimentador	biofiltro	Sedimentador	Biofiltro
Reporte de datos	Muestra						
	1	279	654	522	1015	313	147
	2	3972	2988	4636	4170	576	242
	3	1084	993	1187	1339	525	105
Tratamiento de datos	Promedio	1778	1545	2115	2175	471	165
	Desviación Estándar	1942	1261	2208	1736	139	70
	Máximo	3972	2988	4636	4170	576	242
	Mínimo	279	654	522	1015	313	105
	Numero de datos	3	3	3	3	3	3

Encontramos en la tabla 11 el reporte de los valores arrojados, antes y después del biofiltro, reportando así los valores máximos, mínimos y el promedio de los mismos, se calculó la desviación estándar, la cual resulto elevada para los parámetros de DBO y DQO, dado que el valor arrojado supera los de referencia, una de las razones por las cuales esto sucede, es por el bajo número de repeticiones que se presentan, tres (3) en este caso. El número de muestras estuvo limitado al presupuesto del proyecto.

Tabla 12. Valores promedios y eficiencias medias

	DBO		DQO		SST	
	Sedimentador	Biofiltro	Sedimentador	biofiltro	Sedimentador	Biofiltro
Eficiencia media	1778	1545	2115	2175	471	165
Eficiencia total sistema	13%		-3		65%	

La remoción que, alcanzada por el biofiltro, en términos de DBO es del 13%, en DQO es negativa, y en SST es del 65%, lo que indica que actúa más como un filtro físico, en la

retención de sólidos suspendidos, que como un reactor de microbiológico o biológico para la degradación del agente contaminante en cuestión.

Resulta importante para la investigación en cuestión, mencionar algunas hipótesis de la variación de los valores reportados:

- 1) La mortandad de las lombrices, después de las 10 horas de trabajo continuo:
 - 1.1 La mortandad de las lombrices puede deberse al encharcamiento o sobre acumulación de agua en el biofiltro, y su posterior muerte por asfixia.
 - 1.2 La mortandad también pudo tener como origen la sobre carga de compuestos cianurados, los cuales no fueron objeto de nuestro estudio y cuya concentración varía conforme a parámetros como: la variedad de yuca, el tiempo de exposición desde la cosecha hasta el proceso de extracción del almidón, el tiempo de y la eficiencia en el proceso de pelado; entre otros parámetros que no fueron objeto de estudio.
- 2) La concentración de materia orgánica del lecho filtrante:
 - 2.1 el tipo de madera, la variedad utilizada como parte del lecho filtrante en forma de aserrín, tiende a descomponerse y tiende a elevar los parámetros objeto de estudio; la madera utilizada fue de la variedad Pino y Eucalipto, de los cuales se desconoce la especie.
 - 2.2 El tiempo de maduración del sistema pudo ser un factor determinante, quizá las aguas cianuradas requieran de un tiempo mayor de maduración para la formación de colonias en los microorganismos específicos necesarios para el proceso del almidón de yuca, esta relación se hace por dado el posible efecto inhibitorio que ofrece el cianuro, lo que en yuxtaposición a la descomposición de la madera del lecho filtrante refirió con la eficiencia.

CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIOFILTRO CON LOMBRICES.

- Cuando se exceden las nueve (9) horas de funcionamiento continuos se presenta una mortandad en las lombrices.
- No debe excederse los 3 meses de funcionamiento, esto se debe a que el lecho filtrante ya está degradado.
- Las boquillas de aspersion deben ser limpiadas 2 veces por semana o según la necesidad del usuario.
- El área requerida para la implementación, depende del caudal, este estudio se realizó con una relación de 1 m² por cada 1.5 LPS.

Capítulo 5: Sistema Sedimentador de alta tasa - biofiltro con lombrices

En este capítulo revisaremos las remociones alcanzadas en conjunto por los dos tratamientos utilizados en serie, un sedimentador de placas paralelas, seguido del biofiltro con lombrices.

5.1 Eficiencia media del Sistema de Tratamiento

Tabla 13. Eficiencias medias.

	DBO		DQO		SST	
	Sedimentador	Biofiltro	Sedimentador	biofiltro	Sedimentador	Biofiltro
Eficiencia media	45%	13%	54%	-3%	93%	65%
Eficiencia total sistema	52%		53%		98%	

En la tabla 13, se reportan las remociones alcanzadas en cada fase y la remoción total del sistema de tratamiento, teniendo entonces como referencias en DBO una remoción media de 52%, en DQO de 53% y en SST de 98%.

Estos valores de referencia deben ser expresados como valores parciales y no concluyentes o determinantes para avalar o no el sistema de tratamiento para este tipo de vertimientos, esto, teniendo como fundamento el valor de la desviación estándar y el número de repeticiones realizadas.

En esta tabla resulta evidente que los valores reportados favorecen al sedimentador de placas paralelas, el tratamiento secundario resulta menos eficiente, una de las hipótesis

planteadas es que el sistema está removiendo sólidos suspendidos y con ellos la materia orgánica y química adjunta.

5.2 Valores esperados según Resolución 631 de 2015

Tabla 14. Valores Esperados Vs Valores obtenidos.

Comparación de valores			
Parámetro	Remoción	Resolución 631 de 2015 (mg/L)	Obtenido (mg/L)
DBO 5	52 %	50	1545
DQO	53%	150	2175
SST	98%	100	165

Los valores esperados son los valores a que hace referencia la resolución 631 de 2015, para vertimientos y los valores obtenidos del promedio aritmético de cada parámetro.

Encontramos que el valor obtenido de DBO con una remoción de 52% equivale a 1545 mg/L valor que aún dista al valor exigido por la norma.

En términos de DQO con remoción de 53% tenemos un valor de 2175 mg/L sin alcanzar la meta propuesta en la resolución 631 de 2015

Los sólidos suspendidos totales alcanzaron una remoción de 98% en promedio, llegando a una concentración de 165 mg/L, próxima a la norma, pero aún insuficiente para satisfacer las necesidades de la misma.

Conclusiones

- La implementación de sistemas de sistemas continuos de producción, optimizan el proceso productivo, reducen los costos de operación, incrementan la productividad, economizan el uso de agua y reducen sustancialmente las jornadas de trabajo. Todo esto salvaguardando la calidad del producto final.
- Se diseñó e implementó un sistema de tratamiento compuesto por un sedimentador de placas paralelas y un biofiltro con lombrices, este último presentó múltiples inconvenientes en la fase de operación, puesto que es un sistema vivo que pretende ser controlado bajo condiciones ideales para la crianza de las lombrices; y el sedimentador de placas paralelas, no presento mayor resistencia en la fase de operación y mantenimiento.
- El uso del sedimentador de alta tasa con placas paralelas, arrojó una remoción media en DBO_5 de 45%, en SST de 93% y en DQO del 54%; El Biofiltro con lombrices arrojó una remoción media en DBO_5 de 13%, en SST de 65% y en DQO el resultado fue negativo de este modo encontramos que el sistema en su conjunto, obtuvo una remoción media en DBO_5 de 52%, en SST de 98% y en DQO del 53% y arrojando una corrección de pH, hasta 6 unidades, que en el mejor de los resultados, cumplió con la resolución 651 de 2015, sin adición de correctivos.

Recomendaciones

A partir de la investigación adelantada se sugiere como una opción a investigaciones futuras, explorar métodos fisicoquímicos para la coagular la mancha de yuca, estos aditivos deben ser de origen orgánico o en su defecto deben tener en cuenta que los lodos producidos sean aptos para el consumo animal, como es tradicional actualmente con la mancha de yuca, que es considerada un subproducto de la industria que genera un considerable ingreso para quienes cuentan con canales de precipitación de mancha.

Es necesario hacer reducción en la fuente de agua, para que cualquier tecnología que se pretenda implementar, tenga una mayor viabilidad económica, puesto que los volúmenes con que se trabajan en las industrias de almidón convencionales, son bastante elevados y por consiguiente la inversión en términos de espacio y dinero resultarían exorbitantes para un pequeño productor, teniendo en cuenta la complejidad del vertimiento.

El proceso con el Biofiltro con lombrices puede ser convertido en un proceso productivo independiente y complementario, en la empresa para la producción de humus de lombriz, dando solución a la problemática de residuos sólidos y coadyuvando a la descontaminación de las aguas residuales.

Para futuras investigaciones se recomienda relacionar la mortandad de las lombrices con la sobre producción de cianuro.

Se sugiere investigar si la descomposición de la materia orgánica está relacionada con la baja de la eficiencia en el Biofiltro con lombrices.

La aplicación de placas paralelas en “canales de sedimentación de mancha” resulta viable, el diseño que ese utilizó para el montaje experimental, estuvo sujeto a las dimensiones (profundidad y ancho) de una sección convencional de los canales utilizados en la industria extractora de almidón de yuca.

Es posible que la disminución de la eficiencia de remoción en DBO y DQO para el Biofiltro con Lombrices con relación al sedimentador de placas paralelas puede deberse a la descomposición del lecho filtrante o la falta de maduración del sistema de tratamiento.

La mortandad de las lombrices se dio posterior a las 10 horas de aspersión continuada, de tal manera se recomienda tener un flujo intermitente o continuo por un máximo de 10 horas.

El lecho filtrante se humificó hasta la capa de aserrín a los 3 meses de uso, provocando una baja importante en la infiltración del vertimiento y una sobre acumulación en la superficie, en tal medida se sugiere un recambio del lecho filtrante superior, compuesto por las capas de aserrín y de cascarilla de yuca.

Las conclusiones de este estudio no pueden ser tomadas de forma determinante, si no como un guía para futuras investigaciones, debido a los valores de la desviación estándar y el bajo número de repeticiones que se proporcionaron.

Referencias Bibliográficas

- BioFiltro. (2016). Innovación medioambiental Sistema BIDA®. Disponible en www.biofiltro.cl. [Recuperado: 10 de septiembre de 2016].
- Cabezas, C., Chau, C. (2005). Estudio y recomendaciones sobre el tratamiento de efluentes en el proceso de extracción de almidón agro de yuca. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Programa de Ingeniería Ambiental. Grupo de Investigación de Ingeniería Ambiental. Popayán Colombia.
- Caicedo, M., Gómez, A. (2004). Evaluación del Arranque y Operación de un Filtro Anaerobio de Flujo Horizontal usando estopa de Coco como Medio de Soporte.
- CEPIS/OPS, (2004). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Manual I: Teoría Tomo I.Tratamiento de Agua para consumo Humano. Plantas de filtración Rápida. Lima- Perú Capítulo 7. P-3.
- CEPIS, (2004). Manual II: diseño de plantas de tecnología apropiada Plantas de Filtración Rápida, Capítulo 4, Decantadores laminares. Lima-Perú. P-135
- Cipasla. (2006). La yuca. Asociación del consorcio interinstitucional por una agricultura sostenible en ladera. Disponible en: www.cipasla.org/material_divulgativo/agroindustria/yuca.pdf. [Recuperado: 12 de Julio de 2016].
- Colin, X., Farinet, J.L., Rojas, O. y Alazard, D. (2007). Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support, J. Bioresource Technology, 98(8), 1602- 1607.
- Corporación Regional Del Cauca -CRC. (2005). Rallandero Limpio. Corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC. Popayán.
- Chau, C., Vergara U., Optimización De La Sedimentación Del Subproducto “Mancha” En El Proceso De Extracción De Almidón Agro De Yuca. (Implementación de producción más limpia). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Programa de Ingeniería Ambiental. Grupo de Investigación de Ingeniería Ambiental. Popayán Colombia.
- Fundación para la Transferencia Tecnológica. (2016). Sistema Tohá, Tratamientos de Aguas Servidas. Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Disponible en: www.sistematoha.cl. [15 de marzo de 2016].

-
- Grau, J. y Andarcia, E. (2002) Diseño De Sedimentadores De Placas Paralelas. Universidad de carabobo - toro y asociados consultores, c.a. Rectorado. Av. Bolívar Valencia –Venezuela.
 - Hernandez, p. (2005). Anteproyecto de Construcción Para Aplicación de Lombricultura al Tratamiento de Planta Llau-Llao de Salmonera Invertec S.A.. Universidad Austral de Chile. Valdivia- Chile.
 - Kusanovic, M. (2009) Planta de Tratamiento de Riles. Universidad de Magallanes. Punta Arenas- Chile.
 - Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2015) Resolución 631 de 2015.
 - Montoya, S. 2007. Industrialización de la yuca obtención de almidón nativo y sus aplicaciones. Trabajo de tesis. Tecnología de alimentos. Universidad del valle.
 - Núñez, H. (2011). Contaminación y toxicidad de las aguas residuales de las rallanderías del Norte del Cauca, Colombia. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Ecología. Madrid.
 - OSORIO, A. (2009) Diseño de un Dosificador de Cloro Líquido. Universidad Católica Popular del Risaralda – Pereira.
 - Osnaya Ruiz, M. (2012). Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra de Juárez. Ixtlan de Juarez. Trabajo de grado (Licenciado en Ciencias Ambientales). Universidad de la Sierra de Juárez.
 - Pérez, L., 2005. Catedra de hidráulica aplicada a la ingeniería sanitaria. Teoría de sedimentación. Área de hidráulica. Instituto de Ingeniería sanitaria y Ambiental.
 - Pérez, A., Torres, P., Pizarro, C. 2006. Arranque de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca: influencia del inóculo. Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente-EIDENAR, Universidad del Valle. Cali Colombia. Ingeniería y Competitividad, Volumen 8, No. 1, p. 47 – 54.
 - Pérez, A., Torres, P., Silva, J. 2009. Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Optimización de variables ambientales y operacionales. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental. Universidad del Valle.
 - PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. (2006). Informe sobre Desarrollo Humano. Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua.

-
- Rodríguez, A., Fernández, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., Sanz, J. 2005. Tratamientos avanzados de aguas residuales Industriales. Fundación por el conocimiento Madrid – CEIM. Universidad de Alcála del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME). P.6.
 - Sandoval, N. (2002). Sistema Agroalimentario Localizado de producción de almidón agro de yuca en el departamento del Cauca Colombia.
 - Sandoval, N. (2003). Implementación de la metodología sistemas agroalimentarios localizados (SIAL) en la cadena agroindustrial del almidón agro de yuca en el norte del departamento del cauca. Trabajo de grado. Ingeniería Agroindustrial. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional. Sede Palmira.
 - Torres, P., Rodríguez, J., Uribe, I. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. Universidad del Valle. Scientia et Technica Año IX, No 23, Diciembre. UTP. ISSN 0122-1701.p-75.
 - Torres, P., Rodríguez, J., Rojas, O. (2005) Extracción de almidón de yuca. Manejo integral y control de la contaminación hídrica. Livestock Research for Rural Development. Volume 17, Article #74. Retrieved April 12, 2016, from Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd17/7/torr17074.htm>. [Recuperado: 30 de Agosto de 2016].
 - Torres, P., Cruz, c., Marmolejo, I., Cajigas, a. Y Pérez, a. (2006) Producción Más Limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca. Informe técnico final. Colciencias, Universidad del Valle, Cali.
 - Torres, P., Pérez A., Cajigas, A., Jurado, C., Ortiz, N. 2007 Selección De Inóculos Para El Tratamiento Anaerobio De Aguas Residuales Del Proceso De Extracción De Almidón De Yuca Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, núm. 6, pp. 105-111 Universidad del Valle Cali, Colombia.
 - Torres, P., Pérez, A., Marmolejo, L., Ordoñez, J., García, R. (2010) Una Mirada a la Agroindustria de Extracción de Almidón de Yuca, Desde la Estandarización de Procesos. Escuela de Ingeniería de Antioquia Envigado, Colombia Revista EIA, núm. 14, diciembre. P 23-38.
 - Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 18. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). Diciembre 2012. p. 115-129.
 - Torres, P., Valencia, Y., Canchala, T. (2014). Modelación De La Separación De Partículas No Retenidas En La Etapa De Sedimentación En Canales: Proceso De Extracción De Almidón De Yuca. Biotecnología en el Sector Agropecuario y

Agroindustrial Vol 12 No. 2 (81-89) Julio – Diciembre. Universidad del Valle. Cali
Colombia.