

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES EN EL MUNICIPIO DE VILLANUEVA – SANTANDER,  
QUEBRADA LAS BURRAS.**

**LADY ALEXANDRA DÍAZ RODRÍGUEZ  
MAYRA ALEJANDRA GUALDRÓN GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

**SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES EN EL MUNICIPIO DE VILLANUEVA – SANTANDER,  
QUEBRADA LAS BURRAS.**

**LADY ALEXANDRA DÍAZ RODRÍGUEZ  
MAYRA ALEJANDRA GUALDRÓN GÓMEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director**

**Ing. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

*A Dios por ser mi compañía y darme la fuerza de luchar cada día para cumplir este sueño.*

*A mi madre Isabel Rodríguez por sus palabras de fortaleza, por apoyarme incondicional y por todas sus enseñanzas.*

*A mi padre Gerardo Díaz por toda la confianza brindada que fue el impulso para seguir adelante.*

*A mi hermano Wilmer Díaz por ser su alegría y darme todo el apoyo para seguir siempre adelante.*

*A Fabián Tapias por el apoyo brindado, por cada palabra de aliento para seguir adelante y por su amor que me da fuerzas para luchar por cada uno de mis sueños.*

*A mis abuelitos por creer siempre en mí y por todo su apoyo brindado.*

*A mi compañera Mayra por todo el apoyo brindado en todas las dificultades que se nos presentaron y ser un apoyo para cumplir esta meta.*

*A mis familiares por sus buenos deseos en cada etapa de mi vida.*

**Lady Díaz**

*A Dios por ser mi guía y darme las fuerzas para no desfallecer.*

*A mis padres Blanca Mireya Gómez y Carlos Alberto Gualdrón por ser mi ejemplo, mi apoyo incondicional y tenerme tanto amor y paciencia.*

*A mi hermano, familiares y amigos por acompañarme en cada paso que doy.*

*A mi compañera de proyecto Lady Díaz y a nuestro director Ricardo Oviedo por la dedicación, paciencia y esfuerzo puesto en este gran logro*

*Mayra Gualdrón*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen este trabajo a:

A Dios por guiarnos en el desarrollo de este proyecto.

A nuestras familias por ser nuestro apoyo constante e incondicional, ser nuestra inspiración y darnos las fuerzas para continuar.

Al Arquitecto Martin Fuentes por la información proporcionada y el apoyo brindado.

Al Ingeniero Ricardo Oviedo por su aporte de conocimiento, colaboración y dedicación hacia este proyecto.

Al municipio de Villanueva ya que sin la información disponible y la cooperación proporcionada no hubiese podido hacerse el proyecto.

A todos aquellos ingenieros que nos aportaron su experiencia y nos permitieron realizarles consultas.

A nuestros amigos por su apoyo.

## CONTENIDO

INTRODUCCION.....	16
1. ASPECTOS GENERALES DEL MUNICIPIO .....	16
2. METODOLOGÍA .....	17
2.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO .....	17
2.2 FORMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SELECCIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	18
2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS .....	18
2.2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	18
2.2.3 HERRAMIENTAS DE SELECCIÓN .....	18
2.3 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SELECCIÓN .....	18
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	18
3.1 ASPECTOS DEL MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO.....	18
3.2 FORMULACIÓN HERRAMIENTAS DE SELECCIÓN .....	20
3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS .....	20
3.2.1.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR: .....	20
3.2.1.2 TRATAMIENTO PRIMARIO: .....	20
3.2.1.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO: .....	21
3.2.1.4 TRATAMIENTO TERCIARIO: .....	22
3.2.2 COMBINACIONES TRENES DE SELECCIÓN: .....	22
3.2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	23
3.2.4 MODELO DE HERRAMIENTA DE SELECCIÓN.....	24
3.3 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SELECCIÓN .....	26
4. CONCLUSIONES Y ECOMENDACIONES.....	29
REFERENCIAS .....	29
BIBLIOGRAFIA .....	31
ANEXOS .....	33

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> <i>Subregión de Villanueva en el contexto Departamental.....</i>	17
<b>Figura 2:</b> <i>Municipio de Villanueva y sus límites.....</i>	17
<b>Figura 3:</b> <i>Quebrada las Burras .....</i>	17
<b>Figura 4:</b> <i>Descarga agua residual a la quebrada las burras. ....</i>	17
<b>Figura 5:</b> <i>Opciones tecnológicas en cada nivel con sus posibles combinaciones.....</i>	23

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 para el vertimiento de aguas residuales.....</i>	19
<b>Tabla 2.</b> <i>Resultados de Laboratorio Vertimiento Quebrada Las Burras .....</i>	19
<b>Tabla 3.</b> <i>Tecnologías a seleccionar .....</i>	20
<b>Tabla 4.</b> <i>Características tecnologías.....</i>	22
<b>Tabla 5.</b> <i>Tren de combinaciones .....</i>	23
<b>Tabla 6.</b> <i>Variable considerada por 19 autores diferentes.....</i>	23
<b>Tabla 7.</b> <i>Jerarquía para la selección de la tecnología .....</i>	24
<b>Tabla 8.</b> <i>Matriz de selección tecnologías.....</i>	25
<b>Tabla 9.</b> <i>Valores posibles para cada una de los dieciséis trenes mirando las variables con su respectivo indicador.....</i>	26
<b>Tabla 10.</b> <i>Calificación para cada una de las variables mirando los valores posibles obtenidos.....</i>	27
<b>Tabla 11.</b> <i>Matriz final usada para la selección de la tecnología más óptima....</i>	28

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> <i>Valores para cada una de las variables de las 16 tecnologías primarias secundarias y terciarias.</i> .....	33
<b>Anexo B.</b> <i>Agrupación de valores para cada una de las nueve variables evaluando los 16 trenes de tecnologías.</i> .....	42
<b>Anexo C.</b> <i>Valores posibles para cada una de las nueve variables evaluando los 16 trenes de tecnologías orientados por los indicadores.</i> .....	50
<b>Anexo D.</b> <i>Matriz final para selección de tren de tecnología más óptima.</i> .....	54

## RESUMEN

**TÍTULO:** SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNICIPIO DE VILLANUEVA – SANTANDER, QUEBRADA LAS BURRAS.

**AUTOR(ES):** LADY ALEXANDRA DÍAZ RODRÍGUEZ  
MAYRA ALEJANDRA GUALDRÓN GÓMEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Planta de tratamiento agua residual, Selección de tecnología, Matriz de selección.

### DESCRIPCIÓN:

Como una manera de minimizar la problemática del inadecuado vertimiento de aguas residuales a las fuentes hídricas, el presente estudio propone una guía para la selección del tratamiento de aguas residuales con mayor potencial de sostenibilidad en el sector urbano del municipio de Villanueva-Santander, que vierte sus aguas en la quebrada Las Burras. Para tal efecto, se investigaron las tecnologías con potencial de aplicación para las condiciones locales, considerando aspectos ambientales, socioeconómicos, tecnológicos, socioculturales y normativos relacionados con el manejo de las aguas residuales en el municipio y además, se construyó una herramienta que integra dichos aspectos y facilita el proceso de selección de la tecnología, de manera que cumpla con los requerimientos mínimos exigidos por la norma para el vertimiento de aguas residuales y considere su posible reutilización. La herramienta consiste de una matriz de selección que contiene nueve variables las cuales fueron asociadas a cinco aspectos (Ambientales, Socioeconómicos, Tecnológicos, Socioculturales y Normativos). La combinación de las opciones tecnológicas aplicables al contexto generó dieciséis trenes de tratamiento, considerando niveles de tratamiento primario, secundario y terciario. La opción tecnológica seleccionada para el tratamiento de las aguas residuales municipales de Villanueva, fue el tren compuesto por Rejilla – Desarenador –Tanque Séptico– Filtro Anaerobio – Humedales, debido a que presenta impacto visual medio, tiene bajos costos de inversión y requiere menos área en comparación con las demás, tiene buenas eficiencias de remoción y cumple con las normas de calidad Colombianas, por lo cual será la más óptima opción para el municipio de Villanueva Santander.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico -mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director M.sc. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

## ABSTRACT

**TÍTULO:** SELECTION OF TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT IN THE MUNICIPALITY OF VILLANUEVA - SANTANDER, THE BROKEN BURRAS.

**AUTOR(ES):** LADY ALEXANDRA DÍAZ RODRÍGUEZ.  
MAYRA ALEJANDRA GUALDRÓN GÓMEZ\*\*

**KEY WORDS:** Wastewater treatment plant, Selection of technology, Screening matrix.

### DESCRIPTION:

As a way to minimize the problem of the inappropriate discharge of untreated wastewater into the water sources, this document proposes a guide for selecting of sewage-treatment in order to offer a greater possibility of environmental sustainability the sector in the town of Villanueva-Santander, specifically for the sector which drains into the Las Burras stream. For this purpose, the technologies with potential application to local conditions were investigated, considering environmental, socio-economic, technological, cultural and regulatory issues related to the management of wastewater in the town and also a tool that integrates these aspects are built and facilitates the selection of technology, so that it meets the minimum requirements required by the standard for wastewater disposal and consider possible reuse. This tool consists of a screening Matrix, which contains nine (9) variables which were associated five (5) aspects (environmental, socio-economic, technological, socio-cultural and regulatory). The combination of the technological options that apply to the context, generated sixteen (16) treatment trains considering levels of primary, secondary and tertiary treatment. The technological option selected for the sewage-treatment of Villanueva was train composed by Grid - Desander - Septic tank - Anaerobic filter - wetland because it has no impact visual medium has low investment costs and requires less area as compared with others; has good removal efficiencies and meets quality standards Colombian then be the optimal choice for the town of Villanueva Santander.

---

\* Proyecto de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico -mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director M.sc. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña.

## INTRODUCCION

El agua es un recurso natural indispensable y de vital importancia para el desarrollo de toda sociedad y el adecuado crecimiento de cada individuo que la compone; por ende, al ser un recurso renovable finito se debe hacer un correcto uso y un adecuado tratamiento de las aguas usadas para minimizar la contaminación y potenciar su reutilización. El crecimiento poblacional y la falta de conciencia de la importancia del recurso han generado condiciones desfavorables a las fuentes hídricas, ya que están siendo contaminadas al recibir las aguas servidas de toda una población sin ningún tipo de tratamiento previo al vertimiento de estas, generando así impactos negativos en la salud pública, el medio ambiente y la disponibilidad del recurso.

Las tecnologías a implementar en una localidad, deben tener características de sostenibilidad, ajustadas a las condiciones locales en las que se implemente, al contexto político y normativo. Diferentes herramientas de selección de tecnología de aguas residuales se han propuesto tales como algoritmos, métodos descriptivos, matrices, modelos computacionales, principalmente (Galvis, 2004).

El municipio de Villanueva, Santander cuenta con un alcantarillado sanitario combinado y su cobertura es del 90% en el área urbana; éste recolecta las aguas residuales domésticas, comerciales e institucionales. El vertimiento de las aguas residuales del municipio se hace sin ningún tipo de tratamiento a los cuerpos de agua natural quebradas El Carrizal y quebrada Las Burras, lo que representa un foco de contaminación, que atenta contra la salud pública, el medio ambiente y el bienestar social de la localidad. Dentro del plan de desarrollo económico, social y ambiental del municipio de Villanueva, está contemplada la construcción de dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), por lo tanto, el proceso se realizó considerando el lote destinado para la planta de tratamiento de aguas residuales de la quebrada Las Burras que recibe un caudal de 53,25 l/s.

Las tecnologías objeto de estudio para su posible selección son: Tanque séptico, laguna

anaerobia, reactor anaerobio de flujo ascendente “UASB”, laguna facultativa, filtro anaerobio, laguna de maduración y humedales pues no tienen equipos electromecánicos que puedan representar un alto costo de inversión y de operación y mantenimiento para las condiciones económicas del municipio de Villanueva. La tecnología a la final seleccionada va a hacer la que tenga mayor potencial de sostenibilidad en el municipio de Villanueva-Santander.

El proyecto tiene como objetivo desarrollar y aplicar una metodología para la selección de las tecnologías en el tratamiento de las aguas residuales municipales que ayuden a la solución del problema de dichas aguas en el municipio de Villanueva contribuyendo a generar una mejor calidad de vida para sus habitantes y al cumplimiento de las condiciones mínimas exigidas por la ley para su vertimiento y posible reutilización.

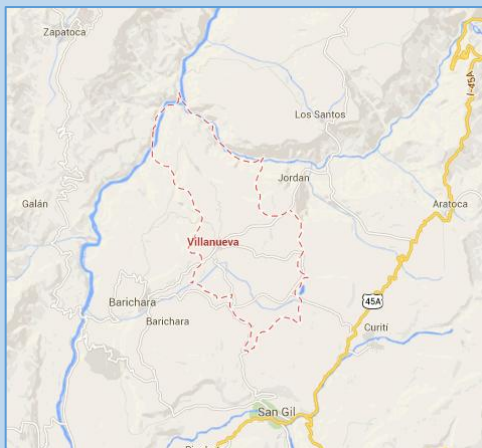
### 1. ASPECTOS GENERALES DEL MUNICIPIO

El municipio de Villanueva, fundado el 16 de Noviembre de 1966, se encuentra ubicado en la provincia Guanentá del departamento de Santander. Cuenta con una extensión territorial de 9978,17 hectáreas (99,78 Km<sup>2</sup>), de las cuales 225 hectáreas son del área urbana y 9753,17 hectáreas son del área rural. Se encuentra a una altitud de 1445 m.s.n.m. La región se caracteriza por tener dos tipos de climas: cálido y templado con una temperatura promedio de 23°C. Tiene una población total de 6978 Habitantes (DANE, 2005), de los cuales 3505 Habitantes (DANE, 2005) son de población urbana; el uso de su suelo es principalmente para agricultura y ganadería. Territorialmente limita al Norte con Zapatoca y La Mesa de los Santos, al Oriente con Jordán y Curití, al Sur con San Gil y al Occidente con Barichara. (Ver Figura 2) (Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva (2012-2015), 2012)



**Figura 1.** Subregión de Villanueva en el contexto Departamental.

Fuente: URL-1



**Figura 2.** Municipio de Villanueva y sus límites.

Fuente: URL-1

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se realizó una visita al Municipio de Villanueva-Santander, donde se recolectó la información de la localidad, se tomaron registros fotográficos y se visitó la Quebrada Las Burras donde son vertidas las aguas residuales; también se recurrió a la literatura para un mayor conocimiento de los adecuados tratamientos a las aguas residuales.

**Figura 3.** Quebrada las Burras



Fuente: Visita técnica.

**Figura 4.** Descarga agua residual a la quebrada las burras.



Fuente: Memoria Técnica la PAMPA

### 2.1 ASPECTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO

Con el fin de realizar la adecuada selección de la tecnología para el tratamiento de aguas residuales del Municipio de Villanueva, se hizo una investigación y recolección de información de los aspectos generales del municipio, manejo de las aguas residuales, y los datos de laboratorio de los parámetros demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y sólidos

suspendidos totales (SST) de la quebrada las burras en los sitios aguas arriba, en el lugar de la descarga y aguas debajo para lo cual se realizaron tres visitas al municipio y se establecieron lazos de cooperación con las entidades gubernamentales en dicho caso con el director de planeación de Villanueva Arquitecto Martin Fuentes. También se indagó acerca de la normativa que rige el Vertimiento de aguas a fuentes naturales, para garantizar que se cumplan con todos los requerimientos exigidos por la Ley Colombiana.

## **2.2 FORMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SELECCIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Para la formulación de la herramienta de selección se desarrollaron tres etapas las cuales son: Caracterización de las tecnologías, criterios de selección de tecnologías y herramientas de selección.

### **2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

La caracterización de las tecnologías se realizó haciendo una revisión de la información relacionada con las diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales disponibles y más comúnmente usadas en nuestro país, identificando características, funcionamiento, remoción, ventajas y desventajas de cada una de las posibles tecnologías a usar. Se revisó el documento selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales (Noyola et al, 2013).

### **2.2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN**

Para la selección de las variables se recurrió a indagar en el estado del arte las más usadas por diecinueve (19) autores tomando como referencia el documento reportado por Galvis (2004) sobre selección de una tecnología; de ellas fueron seleccionadas las nueve más importantes como lo fueron el impacto visual, generación de olores, generación de subproductos, costos de inversión, área requerida, eficiencia de remoción, reutilización del agua, personal capacitado para operación y mantenimiento, cumplimiento normas de calidad, analizando y discutiendo con el director y otros actores con experiencia en la temática y adicionalmente revisando otra literatura como

Noyola et al., 2013. Estas nueve variables fueron agrupadas en cinco aspectos (ambientales, socioeconómicos, tecnológicas, socio culturales y normativos) que fueron los usados en el estudio de las tecnologías.

### **2.2.3 HERRAMIENTAS DE SELECCIÓN**

Para el estudio de la herramienta de selección se realizó una matriz la cual contiene los aspectos y variables seleccionados para el estudio de cada tecnología, a estos se les asignó una ponderación teniendo en cuenta indicadores, valores posibles y valores deseados revisando los requerimientos de la localidad. Posteriormente se definieron criterios y se realizó una ponderación de variables e indicadores, esta ponderación se realizó mirando la influencia que tenía cada variable en los trenes de selección que se estaban estudiando.

## **2.3 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SELECCIÓN**

Una vez creada la matriz de selección y estudiados todos los trenes de posibles combinaciones de tecnologías, se aplicó la herramienta a usar realizando la selección del mejor tren de acuerdo con las variables tenidas en cuenta. Para indagar cada una de las variables que se requerían en la matriz se revisó el estado del arte y se realizó un pre dimensionamiento para estimar la respectiva área de cada una de las tecnologías. Se buscó la información necesaria para la aplicación de las variables e indicadores propuestos consignando esta información en tablas y en los anexos respectivos. Se hicieron pre dimensionamientos, estimación de costos, entre otros, revisando la literatura y realizando consultas a Ingenieros Sanitarios y Ambientales expertos en el tema.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1 ASPECTOS DEL MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO**

En relación con el manejo de las aguas potables del Municipio, la fuente de abastecimiento de agua para el acueducto es la represa El Común. El almacenamiento del agua se hace en un

tanque con capacidad de 298 m<sup>3</sup>, la planta de tratamiento para agua potable cuenta con floculación, sedimentación, filtración y cloración, la conducción es de 20 kilómetros y la red de distribución es de 6100 metros. Respecto al manejo de las aguas residuales en el área urbana el municipio cuenta con un alcantarillado combinado con una cobertura del 90%, es manejado por la Alcaldía Municipal y recolecta las aguas residuales domésticas, comerciales e institucionales. (Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva (2012-2015) ,2012. La disposición final de las aguas residuales es dirigida a la Quebrada Carrizal y a la Quebrada Las Burras la cual se hace sin ningún tipo de tratamiento previo al vertimiento de los cuerpos de agua natural, lo que representa un foco de contaminación, que atenta contra la salud pública, el medio ambiente y el bienestar social del municipio. (Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva (2012-2015) ,2012

Al analizar los registros pluviométricos de las últimas tres décadas, en la magnitud y frecuencia de lluvias se observa dos picos de máxima precipitación en los meses de abril - mayo, septiembre - octubre y dos períodos secos junio - agosto y noviembre – febrero. En la actualidad se presentan largos períodos secos con esporádicas lluvias torrenciales. Del 2001 al 2009 la variación pluviométrica promedio fue de 59 mm/año. (Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva (2012-2015) ,2012).

Respecto a las normas que rigen en Colombia el usos del agua y residuos líquidos, se encuentra el Decreto 1594 de 1.984, el cual especifica en su artículo 72 que todo vertimiento a un cuerpo

de agua deberá cumplir, por lo menos, con dicha norma (Ver Tabla 1):

**Tabla 1.** Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 para el vertimiento de aguas residuales

PARÁMETROS	USUARIO NUEVO
<b>pH</b>	5 a 9 unidades
<b>Temperatura</b>	< 40 °C
<b>Material flotante</b>	Ausente
<b>Grasas y aceites</b>	Remoción ≥ 80% en carga
<b>Sólidos suspendidos</b>	Remoción ≥ 80% en carga
<b>DBO<sub>5</sub>: desechos domésticos</b>	Remoción ≥ 80% en carga

Fuente: Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva, 2012.

Dentro del plan de desarrollo económico, social y ambiental del municipio de Villanueva está contemplado la construcción de dos PTAR, por lo tanto el proceso de selección se realizó considerando el lote destinado para PTAR de la quebrada Las Burras la cual recibe las aguas del alcantarillado combinado de una parte del Municipio de Villanueva cuyo caudal de diseño (Q<sub>d</sub>) es de 53,25 l/s. según valor proporcionado por el municipio. ((Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva (2012-2015), 2012).

Las muestras que le realizaron a la quebrada en el lugar de la descarga fueron realizadas los días 5 y 6 de Junio del 2010 y su resultado de laboratorio fue consignado en una tabla (Ver tabla 2).

**Tabla 2.** Resultados de Laboratorio Vertimiento Quebrada Las Burras

PARAMETROS (P)	MUESTRAS DE LA DESCARGA		
	1	2	3
<b>DBO<sub>5</sub> [mg O<sub>2</sub>/L]</b>	589	380	561
<b>Sólidos suspendidos totales (SST)</b>	540	148	620
<b>Coliformes totales [NMP/100mL]</b>	5,00E+06	1,70E+07	2,20E+06
<b>Temperatura</b>	24,25		
<b>pH</b>	10		

Fuente: Servicios integrados para la industria de alimentos y el medio ambiente SIAMA, 2010.

De los resultados obtenidos del laboratorio se decidió trabajar con las muestras del lugar de la descarga que serían  $DBO_5 = 589 \text{ mg O}_2/\text{L}$  y  $SST = 620 \text{ mg /L}$  con el fin de obtener mayor calidad y eficacia en el tratamiento de las aguas residuales, ya que es en este sitio donde están presentes los máximos valores de concentración de los parámetros en la quebrada Las Burras produciendo mayor contaminación. Con estos dos parámetros se estimó la carga calculada como  $\text{parámetro} \cdot \text{caudal de diseño (P} \cdot \text{Q}_d)$  obteniendo  $DBO_5: 2709,8712 \text{ [Kg/día]}$  y  $SST: 2852,496 \text{ [Kg /día]}$ .

### 3.2 FORMULACIÓN HERRAMIENTAS DE SELECCIÓN

#### 3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En la Tabla 3 se muestran las tecnologías a estudiar agrupadas en cada tratamiento ya sea primario, secundario o terciario.

*Tabla 3. Tecnologías a seleccionar*

TECNOLOGIA	
PRIMARIA	Tanque Séptico
	Laguna anaerobia
	Reactor UASB
SECUNDARIA	Filtro anaerobio
	Filtro percolador
	Laguna facultativa
	Reactor UASB
	Biodiscos
	Lodos activados
TERCIARIA	Humedales
	Laguna de maduración
	Biodiscos

Fuente: Elaboración propia

##### 3.2.1.1 TRATAMIENTO PRELIMINAR:

Eliminación de sólidos gruesos, arenas y flotantes.

- **REJILLA:** Una rejilla consta básicamente de un sistema de barras paralelas, inclinadas o verticales, igualmente espaciadas y colocadas en la sección transversal del canal que conduce las aguas residuales a la

planta de tratamiento. La rejilla debe estar antes de cualquier otra estructura del sistema de tratamiento, para evitar que trapos, alambres, cáscaras, troncos de madera y demás material arrojado sin control afecte el funcionamiento del sistema (RAS CAP E, 2000)

- **DESARENADOR:** El desarenador se localiza antes de la entrega al sistema de tratamiento y se diseña con el objeto de remover las arenas, guijarros, tierra, huesos, semillas, con tamaño  $> 0,05 \text{ mm}$  y demás partículas con gravedades específicas cercanas a  $2,65 \text{ t/m}^3$ . La remoción de estas partículas tiene como finalidad evitar obstrucciones o daños por abrasión en la tubería, en las bombas o en los tanques de digestión (RAS CAP E, 2000)

##### 3.2.1.2 TRATAMIENTO PRIMARIO:

Reducción de sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y materia orgánica.

- **TANQUE SÉPTICO:** Recipiente fabricado en fibra de vidrio, ladrillo, concreto o material plástico. Su principal objetivo es permitir la sedimentación por gravedad de partículas pesadas, retener espumas, grasas, natas, aceites y otros flotantes y almacenar y digerir de manera anaerobia los lodos; para esto debe ser hermético, se instala enterrado y tapado. Se debe hacer remoción de natas cada 6 meses y purga de lodos cada año (Osorio P, 2003).
- **REACTOR UASB:** El UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), consiste en un tanque dentro del cual se acumula por sedimentación biomasa anaerobia en forma de lodo. El agua residual a degradar se introduce por el fondo del tanque donde se pone en contacto con la biomasa. Esta biomasa estabiliza anaeróticamente el agua, produciendo biogás y más biomasa. Una estructura especial localizada en la parte superior del tanque separa el biogás, el agua y la biomasa. El biogás se capta en una campana especial, que sobresale de la superficie del líquido, para su posterior disposición o aprovechamiento. El lodo, por sedimentación, es confinado en la parte

inferior del tanque formando una especie de manto o de filtro y el agua residual tratada se recoge en canaletas especialmente dispuestas en la parte superior del mismo (URL-2)

- **LAGUNA ANAEROBIA:** Consisten en estanques, generalmente excavados parcialmente en el terreno, con un área superficial y volumen suficientes para proveer los extensos tiempos de tratamiento que requieren para degradar la materia orgánica mediante procesos de “autodepuración”. Los tiempos de tratamiento son del orden de 18 a 24 horas, constituyendo esto, una de sus principales desventajas, al tratarse de procesos de degradación totalmente naturales (URL-3).

Tiene profundidades entre 3 y 5 metros por lo general. Los lodos que se generan y se sedimentan en laguna deben ser evacuados en intervalos de tiempo de 1 a 5 años según la carga de sólidos que reciban (Noyola et al, 2013).

### 3.2.1.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO:

Reducción de materia orgánica Biodegradable y sólidos en suspensión.

- **FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE:** Tanque en concreto, ladrillo o en material plástico lleno de piedras u otro material inerte (Polipropileno), que sirva de soporte a los microorganismos, constituyendo un lecho con elevado grado de vacíos.

El flujo de agua es ascendente por tanto el líquido proveniente entra a través de un falso fondo perforado, fluye a través del material de soporte, donde crecen los microorganismos que degradan de manera anaerobia la materia orgánica, el agua es recogida por la parte superior por una tubería perforada o canaleta (Osorio P, 2003). Puede tener soportes plásticos o piedras de 3 a 5 cm de diámetro promedio (Noyola et al, 2013).

- **FILTRO PERCOLADOR:** Tanque cilíndrico con un lecho de sostén (piedra)

permeable al que se le adhieren microorganismos y a través del cual percola el agua residual el agua ingresa por la parte superior por medio del brazo mecánico que la distribuya uniformemente, la materia orgánica se degrada aeróbicamente por la acción de los microorganismos. Los filtros incluyen un sistema de drenaje inferior para recoger el líquido tratado, dicho líquido pasa a un sedimentador en el que se separan los sólidos del agua residual, parte del efluente es recirculado para ponerlo de nuevo en contacto con la población biológica (URL-4)

- **LAGUNA FACULTATIVA:** Consisten en estanques, generalmente excavados parcialmente en el terreno, con un área superficial y volumen suficientes para proveer los extensos tiempos de tratamiento que requieren para degradar la materia orgánica mediante procesos de “autodepuración”. Operan en su estrato superior como laguna aerobia, en su parte inferior como laguna anaerobia y en su estrato intermedio con presencia de bacterias facultativas (URL-3).

Presenta una profundidad entre 1 y 2 m. Los lodos que se generan y se sedimentan en laguna deben ser evacuados en intervalos de tiempo de 10 a 20 años según la carga de sólidos que reciban (Noyola et al, 2013)

- **LODOS ACTIVADOS:** Sistema de tratamiento de agua residual en el que se mantiene un cultivo biológico formado por microorganismos y el agua residual, los microorganismos se alimentan del agua residual y generan nuevos microorganismos y en el proceso se forman partículas fácilmente decantables “Flóculos” y que en conjunto constituyen los fangos activados.

Su funcionamiento tiene lugar en el reactor biológico o cuba de aireación, donde el cultivo biológico o licor mezcla (microorganismos + materia orgánica + sustancias minerales) se mantiene en contacto con el agua residual. La población de microorganismos debe mantenerse a un

determinado nivel para tener equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos necesarios para que se elimine dicha carga. En la cuba de aireación es necesario un sistema de aireación y agitación que garantice el oxígeno necesario para la acción depuradora de las bacterias aerobias, una vez la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada, el licor mezcla pasa al decantador secundario o clarificador donde se separa el agua clarificada de los fangos, el agua clarificada se vierte en los cauces y parte de los fangos son recirculados al reactor para mantener la concentración suficiente de microorganismos, el excedente de fangos se extrae y se evacua al tratamiento de fangos (URL-5).

- **BIODISCOS:** Consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinilo, situados sobre un eje, a corta distancia unos de otros. Los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y giran lentamente en el seno de la misma. El cultivo bacteriano se desarrolla adherido a la superficie de los discos hasta formar una película biológica sobre la superficie mojada de los mismos. La rotación de los discos pone la biomasa en contacto de forma alternativa con la materia orgánica presente en el agua residual y la atmosfera para la absorción de oxígeno (Nodal E, 2000).

### 3.2.1.4 TRATAMIENTO TERCIARIO:

Reducción de Nutrientes y patógenos.

- **HUMEDALES:** Permiten el flujo de agua residual con una profundidad entre 55 a 85 cm, en donde las raíces de las plantas se forman películas de bacterias que filtran y absorben los contaminantes y a sus vez permiten la oxigenación del agua, existen dos tipos de humedales: de flujo libre y de flujo subsuperficial. (URL-6)
- **LAGUNAS DE MADURACIÓN:** Las lagunas de maduración tienen como objetivo principal la de reducir la concentración de bacterias patógenas. Estas

lagunas generalmente son el último paso del tratamiento antes de volcar las aguas tratadas en los receptores finales o de ser reutilizadas en la agricultura. La laguna de maduración tiene también otras funciones, además de la desinfección: La nitrificación del nitrógeno amoniacal, eliminación de nutrientes, clarificación del efluente (URL-7).

Al momento de estudiar las tecnologías fueron descartadas el filtro percolador, los lodos activados y los biodiscos, pues tienen equipos electromecánicos que pueden representar un alto costo de inversión y de operación y mantenimiento para las condiciones económicas del municipio de Villanueva; por lo tanto, se decidió no incluir estas tecnologías en los trenes de selección. En la Tabla 4 se encuentran los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> y SST de las tecnologías a estudiar, estos fueron encontrados en la revisión de literatura (Romero. J, 2004) (RAS 2000 Cap. E).

**Tabla 4. Características tecnologías**

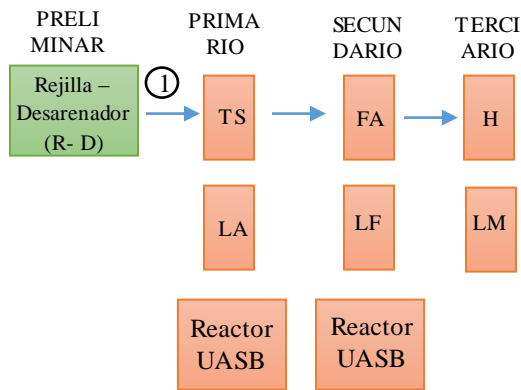
TECNOLOGIA		%Remoción DBO5	SST
PRIMARIA	Tanque Séptico (TS)	45	60-70
	Laguna de estabilización anaerobia (LA)	50-85	70-80
	Reactor UASB	70-80	70-80
SECUNDARIA	Filtro anaerobio (FA)	70-80	70-80
	Laguna de estabilización facultativa (LF)	80-95	40-60
	Reactor UASB	70-80	70-80
TERCIARIA	Humedales (H)	80-90	80-90
	Laguna de maduración (LM)	60-80	10-30

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.2 COMBINACIONES TRENES DE SELECCIÓN:

Para el modelo de la herramienta de selección, se crearon trenes de posibles opciones combinando las diferentes tecnologías primarias, secundarias, terciarias para el tratamiento de las aguas residuales (Ver figura 5).

**Figura 5:** Opciones tecnológicas en cada nivel con sus posibles combinaciones.



Fuente: Elaboración propia

Como resultado de las combinaciones que se hacen entre las tecnologías de los tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios se obtuvieron 16 trenes de tecnologías, las cuales con ayuda de la herramienta de selección se escogió la más óptima según las condiciones con las que cuenta el municipio de Villanueva (Ver Tabla 5):

**Tabla 5.** Tren de combinaciones

No. Trenes	TRATAMIENTOS			
	PRELIMINAR	PRIMARIO	SECUNDARIO	TERCIARIO
1	R - D	TS	FA	H
2	R - D	LA	FA	H
3	R - D	Reactor UASB	FA	H
4	R - D	TS	LF	H
5	R - D	LA	LF	H
6	R - D	Reactor UASB	LF	H
7	R - D	TS	Reactor UASB	H
8	R - D	LA	Reactor UASB	H
9	R - D	TS	FA	LM
10	R - D	LA	FA	LM
11	R - D	Reactor UASB	FA	LM
12	R - D	TS	LF	LM
13	R - D	LA	LF	LM
14	R - D	Reactor UASB	LF	LM
15	R - D	TS	Reactor UASB	LM
16	R - D	LA	Reactor UASB	LM

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para la selección de tecnología se consideraron las 30 variables generalmente usada por 19 autores diferentes y reportadas por Galvis (2004) (Ver Tabla 6).

**Tabla 6.** Variable considerada por 19 autores diferentes.

No	VARIABLE	% Autores
1	Costos de Inversión	68,4
2	Área disponible	57,9
3	Simplicidad operacional	57,9
4	Costos de operación y mantenimiento	57,9
5	Confiabilidad	52,6
6	Eficiencia de Remoción	52,6
7	Necesidad de personal	52,6
8	Energía requerida	52,6
9	Flexibilidad	47,4
10	Flujo aguas residuales	47,4
11	Calidad del agua residual cruda	47,4
12	Tamaño de la Población	47,4
13	Normas de calidad	42,1
14	Cumplimiento de las normas	42,1
15	Área requerida	42,1
16	Necesidad de recursos	42,1
17	Manejo y disposición de lodos	36,8
18	Disponibilidad de materiales de construcción y recursos	36,8
19	Personal capacitado para operación y mantenimiento	36,8
20	Topografía	36,8
21	Tipo de suelo	36,8
22	Reutilización del agua	31,6
23	Generación de subproductos	31,6
24	Retorno de la inversión mediante uso de sub-productos	31,6
25	Aceptación de la comunidad	31,6
26	Nivel freático	31,6
27	Generación de ruido	31,6
28	Generación de olores	31,6
29	Impacto visual	31,6
30	Nivel de tratamiento	26,3

Fuente: Galvis A; 2004

De acuerdo con los estudios realizados por otros autores, los aspectos a tener en cuenta para un análisis deben ser: aspectos medioambientales, aspectos socioculturales de la comunidad donde se implementará el proyecto, aspectos tecnológicos inherentes a cada tecnología y los aspectos socioeconómicos (Guerrero J; 2003).

Se seleccionaron las variables más importantes respecto a las características locales y las necesidades propias del municipio de Villanueva, esto se hizo mirando los porcentajes de las treinta variables que han usado diecinueve autores y el criterio propio (Tabla 7) y se agruparon a cada aspecto nombrado anteriormente como se ve en la Tabla 7.

**Tabla 7. Jerarquía para la selección de la tecnología**

ASPECTOS	VARIABLES	DESCRIPCION VARIABLES
<b>Ambientales</b>	Impacto Visual	Perturbación de todo aquello que afecte la visualización o cambie el aspecto del lugar donde se construirá la planta de tratamiento.
	Generación de olores	Originar un aroma al momento del tratamiento.
	Generación de Subproductos	Productos de descomposición del efluente como biogás y lodos.
<b>Socio económicos</b>	Costos de Inversión	Capital necesario en cada tecnología para su construcción.
<b>Tecnológicos</b>	Área requerida	Extensión de superficie necesaria en la construcción y adecuado funcionamiento de la tecnología.
	Eficiencia de remoción	Eliminación de agentes no deseados como DBO <sub>5</sub> y SST.
	Reutilización del agua	Capacidad de volver a usar el recurso.
<b>Socio Culturales</b>	Personal capacitado para operación y mantenimiento	Personal entrenado e idóneo para llevar a cabo la O&M de la tecnología.
<b>Normativos</b>	Cumplimiento normas de Calidad	Ejecutar de manera correcta y cumpliendo los estándares exigidos por la ley Colombiana.

Fuente: Elaboración propia

Escogidas las variables y enumeradas como se observa en la Tabla 7 se procedió a estimar el

valor para cada una de las tecnologías primarias, secundarias, terciarias. Para el cálculo del área de cada una de la tecnologías se realizó un pre dimensionamiento aproximado con el fin de tener una idea del área requerida, los valores de las variables impacto visual, generación de olores, generación de subproductos, personal capacitado para operación y mantenimiento pueden se estimaron consultando ingenieros expertos en el tema (Ver Anexo 1).

### 3.2.4 MODELO DE HERRAMIENTA DE SELECCIÓN

Como herramienta de selección se realizó una matriz para encontrar el tren de tecnología que fuera más óptima con las características de la localidad. Una vez agrupada cada variable a los cinco aspectos de estudio como se ve en la Tabla 7 se realizaron los siguientes pasos para la creación de la matriz: 1) Se le asignó un porcentaje por criterio propio a cada aspecto y a cada variable mirando cuales eran más importantes, este porcentaje debía sumar tanto para aspectos como para variables un 100%. 2) Se crearon unos indicadores, en los cuales para las variables cualitativas como impacto visual, generación de olores, generación de subproductos, reutilización del agua, personal capacitado para operación y mantenimiento y cumplimiento de calidad se creó como pregunta, y para las variables cuantitativas como costos de inversión, eficiencia de remoción y área requerida se asumió como una operación en la cual se tomó el valor de la variable estudiada para cada tren y se dividió en el máximo valor de la variable estudiada entre los dieciséis trenes. 3) Se asignaron unos valores posibles, estos valores eran los que podían tomar cada una de las nueve variables desde lo más favorable a lo menos favorable 4) Se estimaron los valores deseados para cada variable siendo este el más favorable que se podía presentar. 5) Por último se le dio una calificación a cada uno de los valores posibles que podía tomar cada variable de estudio, el valor más favorable tomaría la máxima calificación (5) y así iría disminuyendo hasta llegar al menos favorable (1) dándole la más baja calificación (Ver tabla 8).

**Tabla 8. Matriz de selección tecnologías.**

ASPECTOS	%	VARIABLES		%	INDICADORES	VALORES POSIBLES	VALORES DESEADOS	CALIFICACION	
Ambientales	25	1. Impacto Visual		20	¿Presenta Impacto visual?	Bajo Medio Alto	Bajo	Bajo Medio Alto	5 3 1
		2. Generación de olores		60	¿Genera olores?	Bajo Medio Alto	Bajo	Bajo Medio Alto	5 3 1
		3. Generación de Subproductos (LODOS, BIOGAS)		20	¿Genera subproductos?	Alto Medio Bajo	Alto	Alto Medio Bajo	5 3 1
Socioeconómicos	30	4. Costos de Inversión		100	Ct= Costos tren que se está analizando/ Mayor costo entre todos los trenes.	$0 < Ct \leq 1$	$Ct \approx 0$	$0 < Ct < 0,2$ $0,2 \leq Ct < 0,4$ $0,4 \leq Ct < 0,6$ $0,6 \leq Ct < 0,8$ $0,8 \leq Ct \leq 1$	5 4 3 2 1
Tecnológicos	20	5. Área requerida		30	At= Área tren que se está analizando/ Mayor área entre todos los trenes.	$0 < At \leq 1$	$At \approx 0$	$0 < AR < 0,2$ $0,2 \leq AR < 0,4$ $0,4 \leq AR < 0,6$ $0,6 \leq AR < 0,8$ $0,8 \leq AR \leq 1$	5 4 3 2 1
		6. Eficiencia de remoción.	DBO	25	ER DBO = Eficiencia tren que se está analizando/ Mayor Eficiencia entre todos los trenes.	$0 < ER DBO \leq 1$	$ER DBO \approx 0$	$0 < ER DBO < 0,2$ $0,2 \leq ER DBO < 0,4$ $0,4 \leq ER DBO < 0,6$ $0,6 \leq ER DBO < 0,8$ $0,8 \leq ER DBO \leq 1$	5 4 3 2 1
			SST	25	ER SST = Eficiencia tren que se está analizando/ Mayor Eficiencia entre todos los trenes.	$0 < ER SST \leq 1$	$ER SST \approx 0$	$0 < ER SST < 0,2$ $0,2 \leq ER SST < 0,4$ $0,4 \leq ER SST < 0,6$ $0,6 \leq ER SST < 0,8$ $0,8 \leq ER SST \leq 1$	5 4 3 2 1
7. Reutilización del agua		20	¿Se puede reutilizar el agua?	Alto Medio Bajo	Alto	Alto Medio Bajo	5 3 1		
Socio Culturales	10	8. Personal capacitado para operación y mantenimiento		100	¿Requiere personal altamente capacitado para operación y mantenimiento?	Si No	No	No Si	5 1
Normativos	15	9. Cumplimiento normas de calidad	DBO	60	¿Cumple con la remoción de DBO según la norma?	Cumple No Cumple	Cumple	Cumple No cumple	5 1
			SST	40	¿Cumple con la remoción de SST según la norma?	Cumple No Cumple	Cumple	Cumple No Cumple	5 1

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SELECCIÓN

Creada la matriz que se usó como herramienta de selección y estimados los valores de las nueve variables para cada una de las tecnologías primarias, secundarias, terciarias (Ver anexo 1), se agrupó esta información a cada uno de los dieciséis trenes; para el cálculo del área requerida de cada tren se sumaron las áreas de los tres tipos de tratamiento y un 20% del área requerida para construcción de desarenador, rejillas y demás al igual que los costos de inversión (Ver anexo 2); luego se calcularon los

valores posibles para cada variable dependiendo del indicador asignado respectivamente (Ver anexo 3).

El valor posible calculado de cada una de las nueve variables para cada uno de los dieciséis trenes fue agrupado en la Tabla 9. En esta tabla los trenes de tecnologías fueron enumerados de 1 a 16 como se vio en la Tabla 8 y las variables se enumeraron de 1 a 9 como aparece en la matriz de selección.

**Tabla 9.** Valores posibles para cada una de los dieciséis trenes mirando las variables con su respectivo indicador.

No. Trenes	1	2	3	4	5	6		7	8	9	
						DBO	SST			DBO	SST
1	Medio	Alto	Alto	0,36	0,45	0,38	0,11	Medio	No	Cumple	Cumple
2	Medio	Alto	Alto	0,62	0,50	0,34	0,08	Alto	No	Cumple	Cumple
3	Medio	Alto	Alto	0,55	0,44	0,27	0,08	Alto	Si	Cumple	Cumple
4	Medio	Alto	Alto	0,54	0,87	0,25	0,22	Medio	No	Cumple	Cumple
5	Alto	Alto	Alto	0,80	0,92	0,23	0,17	Alto	No	Cumple	Cumple
6	Alto	Alto	Alto	0,73	0,85	0,18	0,17	Alto	Si	Cumple	Cumple
7	Medio	Alto	Alto	0,52	0,45	0,5	0,11	Medio	Si	Cumple	Cumple
8	Alto	Alto	Alto	0,78	0,50	0,45	0,08	Alto	Si	Cumple	Cumple
9	Bajo	Alto	Alto	0,44	0,53	0,75	0,11	Medio	No	Cumple	Cumple
10	Medio	Alto	Alto	0,70	0,58	0,68	0,38	Alto	No	Cumple	Cumple
11	Medio	Alto	Alto	0,63	0,52	0,55	0,38	Alto	Si	Cumple	Cumple
12	Medio	Alto	Alto	0,62	0,95	0,5	1	Medio	No	Cumple	No cumple
13	Alto	Alto	Alto	0,88	1,00	0,45	0,75	Alto	No	Cumple	Cumple
14	Alto	Alto	Alto	1,00	0,93	0,36	0,75	Alto	Si	Cumple	Cumple
15	Medio	Alto	Alto	0,60	0,53	1	0,5	Medio	No	Cumple	Cumple
16	Alto	Alto	Alto	0,86	0,58	0,91	0,38	Alto	No	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Con los valores posibles de cada uno de los dieciséis trenes de tecnologías que se encuentran en la Tabla 9 se dio la calificación correspondiente a cada uno de ellos basados en la matriz de selección donde están ponderadas

dichas calificaciones, para esta calificación se asumió como criterio mirar el valor más favorable para la selección asignándole el valor de 5 y el menos favorable como 1 (Ver tabla 10).

**Tabla 10.** Calificación para cada una de las variables mirando los valores posibles obtenidos.

No. Trenes	1	2	3	4	5	6		7	8	9	
						DBO <sub>5</sub>	SST			DBO <sub>5</sub>	SST
1	3	1	5	4	3	4	5	3	5	5	5
2	3	1	5	2	3	4	5	5	5	5	5
3	3	1	5	3	3	4	5	5	1	5	5
4	3	1	5	3	1	4	4	3	5	5	5
5	1	1	5	1	1	4	5	5	5	5	5
6	1	1	5	2	1	5	5	5	1	5	5
7	3	1	5	3	3	3	5	3	1	5	5
8	1	1	5	2	3	3	5	5	1	5	5
9	5	1	5	3	3	2	5	3	5	5	5
10	3	1	5	2	3	2	4	5	5	5	5
11	3	1	5	2	3	3	4	5	1	5	5
12	3	1	5	2	1	3	1	3	5	5	1
13	1	1	5	1	1	3	2	5	5	5	5
14	1	1	5	1	1	4	2	5	1	5	5
15	3	1	5	2	3	1	3	3	5	5	5
16	1	1	5	1	3	1	4	5	5	5	5

Fuente: Elaboración propia.

Luego se calculó un valor final correspondiente a cada una de las variable de los 16 trenes de tecnologías; este valor se dio multiplicando el % Aspectos (Tabla 8), por el % Variables (Tabla 8) y la calificación (Tabla 10) que se habían obtenido para una de las variables de los trenes de selección (Ver anexo 5).

Una vez calculados estos valores finales se procedió a realizar la respectiva suma de todas

las variables correspondientes a cada uno de los dieciséis trenes de selección, de estas sumas se seleccionó el tren con el valor más cercano a cinco (5.0) ya que es el óptimo según el criterio de la matriz de selección para el municipio de Villanueva-Santander en el tratamiento de sus aguas residuales pues (Ver tabla 11).

**Tabla 11.** Matriz final usada para la selección de la tecnología más óptima.

ASPECTOS	VARIABLES		Trenes de tecnologías															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ambientales	1. Impacto Visual		0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05	0,15	0,05	0,25	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05	0,15	0,05
	2. Generación de olores		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	3. Generación de Subproductos		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Socioeconómicos	4. Costos de Inversión		1,2	0,6	0,9	0,9	0,3	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,6	0,3
Tecnológicos	5. Área requerida		0,18	0,18	0,18	0,06	0,06	0,06	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,06	0,06	0,06	0,18	0,18
	6. Eficiencia de remoción	DBO <sub>5</sub>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,2	0,05	0,05
		SST	0,25	0,25	0,25	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2	0,2	0,05	0,1	0,1	0,15	0,2
	7. Reutilización del agua		0,12	0,2	0,2	0,12	0,2	0,2	0,12	0,2	0,12	0,2	0,2	0,12	0,2	0,2	0,12	0,2
Socio Culturales	8. Personal capacitado para operación y mantenimiento		0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5
Normativos	9. Normas de Calidad	DBO <sub>5</sub>	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
		SST	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,06	0,3	0,3	0,3
Σ			3,75	3,23	3,13	3,28	2,71	2,66	3	2,68	3,45	3,08	2,73	2,54	2,51	2,16	2,9	2,63

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la suma de los valores finales para cada uno de los dieciséis trenes de tecnologías se seleccionó el tren No. 1 que corresponde a Rejilla – Desarenador –Tanque Séptico– Filtro Anaeróbico – Humedal que obtuvo una sumatoria de 3,75; esta fue escogida ya que como criterio de selección se tenía el numero 5 como máximo valor y esta tecnología fue la que más se acercó a la calificación, esta opción estuvo por encima de las otras gracias a que tiene impacto visual medio, tiene bajos costos de inversión y requiere menos área en comparación con las demás; tiene buenas eficiencias de remoción y cumple con las normas de calidad Colombianas luego será la más óptima opción para el municipio de Villanueva Santander.

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Al momento de seleccionar las tecnologías más apropiadas para una localidad, es muy importante analizar las condiciones con las que se cuenta, para encontrar la solución más óptima cumpliendo con cada uno de los requerimientos. Para esto es muy importante tener características tanto de la localidad (caudal, habitantes, parámetros como lo son la DBO<sub>5</sub> y SST) como de cada una de las tecnologías a estudiar (área requerida, costos de inversión, porcentajes de remoción entre otros).

La mejor opción tecnológica para el tratamiento de aguas residuales a implementar en una localidad varía y depende de las características y necesidades propias del lugar.

La adecuada selección de tecnologías garantiza el óptimo funcionamiento de la planta de tratamiento, minimizando el daño ambiental y potencializando la reutilización del recurso.

El tren de tecnologías más óptimo para el municipio de Villanueva – Santander fue Rejilla – Desarenador – Tanque Séptico – Filtro Anaeróbico – Humedal ya que tiene un impacto visual medio, tiene bajos costos de inversión y requiere menos área en comparación con las

demás; tiene buenas eficiencias de remoción y cumple con las normas de calidad Colombianas. Se recomienda que al momento que construir la planta de tratamiento de aguas residuales con las tecnologías seleccionadas, se haga por fases (construir una parte de cada una de las tecnologías) ya que el estudio realizado fue con el caudal de diseño proporcionado por el municipio a 25 años.

#### **REFERENCIAS**

[1] Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva, 2012.

[2] Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 para el vertimiento de aguas residuales.

[3] Servicios integrados para la industria de alimentos y el medio ambiente SIAMA, 2010.

[4] RAS 2000 CAP 5: Tratamiento aguas residuales.

[5] Guerrero J; Modelo de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad del Valle/Cinara. 2003.

[6] Osorio P; Sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas empleados para la CVC en el sector rural del departamento del valle del cauca. Seminario Internacional sobre los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Valle/Cinara. 2003.

[7] Galvis A; Selección de Tecnología para el Mejoramiento de la calidad del agua. Seminario Taller Selección de Tecnología para el Mejoramiento de la Calidad del Agua. Universidad del Valle/Cinara. 2004

[8] Gómez A, Álvarez G; Evaluación de la eficiencia de un filtro anaerobio de grava a escala piloto, análisis comparativo con un filtro anaerobio de Guada- Planta de tratamiento de aguas residuales [tesis de pregrado]; Universidad pontificia Bolivariana – Bucaramanga, 2008

- [9] Cortes F, Luévanos A, Luévano R, Uranga ; “Diseño de lagunas de estabilización en serie con diferentes configuraciones (Caso Camarga laguna Estado de Durango, México)”, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 5, núm. 3, Diciembre 2011.
- [10] Noyola A, Morgan-Sagastume J. M, Güereca L. P. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Primera Edición, Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, 2013.
- [11] URL-1: Google map [Citado 2 de Abril de 2014].
- [12] URL-2: BIODIGESTORES UASB - (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): [https://mbasic.facebook.com/notes/laboratorio-bioagronort/biodigestores-uasb-upflow-anaerobic-sludge-blanket/372287609457423/?\\_rdr](https://mbasic.facebook.com/notes/laboratorio-bioagronort/biodigestores-uasb-upflow-anaerobic-sludge-blanket/372287609457423/?_rdr) [Citado 5 de Mayo de 2014].
- [13] URL-3: Calidad de agua – Lagunas de estabilización – Guía ambiental: <http://www.guiambiental.com.ar/conocimiento-calidad-de-agua-lagunas-estabilizacion.html>. [Citado 8 de Marzo de 2014].
- [14] URL-4: Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras: [http://www.h-gac.com/community/water/ossf/OSSF-Treatment-Systems\\_Trickling-Filter-S.pdf](http://www.h-gac.com/community/water/ossf/OSSF-Treatment-Systems_Trickling-Filter-S.pdf) [Citado 5 de Mayo de 2014].
- [15] URL5: Sistema de tratamiento de aguas residuales por lodos activados <http://aguasresiduales.wordpress.com/tag/lodos-activados/> [Citado 5 de Mayo de 2014].
- [16] URL-6: Tratar y usar las aguas residuales: [http://fmcn.org/wp-content/uploads/2012/02/Repensar\\_la\\_Cuenca\\_2.pdf](http://fmcn.org/wp-content/uploads/2012/02/Repensar_la_Cuenca_2.pdf). [Citado 8 de Marzo de 2014].
- [17] URL-7: Laguna de maduración: [http://es.wikipedia.org/wiki/Laguna\\_de\\_maduraci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Laguna_de_maduraci%C3%B3n). [Citado 8 de Marzo de 2014].
- [18] URL-8: Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales para Reusó. [http://www.aquaknow.net/en/system/files/3.Lagunas%20de%20estabilizaci%C3%B3n\\_0.pdf](http://www.aquaknow.net/en/system/files/3.Lagunas%20de%20estabilizaci%C3%B3n_0.pdf) [Citado 27 de Abril de 2014].
- [19] URL- 9: Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración. [http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP\\_reports/Diseno\\_Humedal\\_AguasGrises.pdf](http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP_reports/Diseno_Humedal_AguasGrises.pdf) [Citado 27 de Abril de 2014]
- [20] URL – 10: Diseño lagunas de estabilización. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf> [Citado 27 de Abril de 2014]
- [21] URL – 11: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, lección 39 Filtro anaerobio: [http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion\\_39\\_filtro\\_anaerobio.html](http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion_39_filtro_anaerobio.html)
- [22] URL – 12: Lagunas de estabilización: <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lagunas7.pdf> [Citado 8 de Marzo de 2014]
- [23] URL -13: Plan de Construcción y Sistema para Tratamiento de Aguas Negras. [http://www.cee.mtu.edu/projects/Projects\\_2005/espanol/Oscar\\_Romero\\_Report\\_Translation-1.pdf](http://www.cee.mtu.edu/projects/Projects_2005/espanol/Oscar_Romero_Report_Translation-1.pdf) [Citado 8 de Mayo de 2014]
- [24] Memoria Técnica la PAMPA.
- [25] Salas D, Zapata M, Guerrero J; Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la Región. Scientia et Technica Año XIII, No 37, Diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [26] Nodal E; Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual, Ingeniería hidráulica y ambiental, vol. 12, núm. 4, 2001
- [28] R. Jairo; Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño; tercera edición; Editorial escuela Colombiana de Ingeniería; Colombia 2004, Capítulo 24.

[27] Según Guerrero. J, Salas. D, Zapata. M; Modelo de costos para el tratamiento en las aguas residuales en la región. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Cortes F, Luévanos A, Luévano R, Uranga ; “Diseño de lagunas de estabilización en serie con diferentes configuraciones (Caso Camarga laguna Estado de Durango, México)”, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 5, núm. 3, Diciembre 2011.

[2] Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 para el vertimiento de aguas residuales.

[3] Galvis A; Selección de Tecnología para el Mejoramiento de la calidad del agua. Seminario Taller Selección de Tecnología para el Mejoramiento de la Calidad del Agua. Universidad del Valle/Cinara. 2004

[4] Gómez A, Álvarez G; Evaluación de la eficiencia de un filtro anaerobio de grava a escala piloto, análisis comparativo con un filtro anaerobio de Guada- Planta de tratamiento de aguas residuales [tesis de pregrado]; Universidad pontificia Bolivariana – Bucaramanga, 2008

[5] Guerrero J; Modelo de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Universidad del Valle/Cinara. 2003.

[6] Memoria Técnica la PAMPA.

[7] Nodal E; Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual, Ingeniería hidráulica y ambiental, vol. 12, núm. 4, 2001

[28] R. Jairo; Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño; tercera edición; Editorial escuela Colombiana de Ingeniería; Colombia 2004, Capitulo 24.

[8] Noyola A, Morgan-Sagastume J. M, Güereca L. P. Selección de tecnologías para el

tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Primera Edición, Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, 2013.

[9] Osorio P; Sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas empleados para la CVC en el sector rural del departamento del valle del cauca. Seminario Internacional sobre los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Valle/Cinara. 2003.

[10] Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva, 2012.

[11] RAS 2000 CAP 5: Tratamiento aguas residuales.

[12] Salas D, Zapata M, Guerrero J; Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la Región. Scientia et Technica Año XIII, No 37, Diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.

[13] Sergio Guerrero. J, Salas. D, Zapata. M; Modelo de costos para el tratamiento en las aguas residuales en la región. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

[14] Servicios integrados para la industria de alimentos y el medio ambiente SIAMA, 2010.

[15] URL-1: Google map [Citado 2 de Abril de 2014].

[16] URL-2: BIODIGESTORES UASB - (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): [https://mbasic.facebook.com/notes/laboratorio-bioagronort/biodigestores-uasb-upflow-anaerobic-sludge-blanket/372287609457423/?\\_rdr](https://mbasic.facebook.com/notes/laboratorio-bioagronort/biodigestores-uasb-upflow-anaerobic-sludge-blanket/372287609457423/?_rdr) [Citado 5 de Mayo de 2014].

[17] URL-3: Calidad de agua – Lagunas de estabilización – Guía ambiental: <http://www.guiaambiental.com.ar/conocimiento-calidad-de-agua-lagunas-estabilizacion.html>. [Citado 8 de Marzo de 2014].

[18] URL-4: Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras: <http://www.h-gac.com/community/water/ossf/OSSF->

Treatment-Systems\_Trickling-Filter-S.pdf  
[Citado 5 de Mayo de 2014].

[19] URL5: Sistema de tratamiento de aguas residuales por lodos activados  
<http://aguasresiduales.wordpress.com/tag/lodos-activados/> [Citado 5 de Mayo de 2014].

[20] URL-6: Tratar y usar las aguas residuales:  
[http://fmcn.org/wp-content/uploads/2012/02/Repensar\\_la\\_Cuenca\\_2.pdf](http://fmcn.org/wp-content/uploads/2012/02/Repensar_la_Cuenca_2.pdf). [Citado 8 de Marzo de 2014].

[21] URL-7: Laguna de maduración: [http://es.wikipedia.org/wiki/Laguna\\_de\\_maduraci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Laguna_de_maduraci%C3%B3n). [Citado 8 de Marzo de 2014].

[22] URL-8: Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales para Reusó.  
[http://www.aquaknow.net/en/system/files/3.Lagunas%20de%20estabilizaci%C3%B3n\\_0.pdf](http://www.aquaknow.net/en/system/files/3.Lagunas%20de%20estabilizaci%C3%B3n_0.pdf)  
[Citado 27 de Abril de 2014].

[23] URL- 9: Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración.  
[http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP\\_reports/Diseño\\_Humedal\\_AguasGrises.pdf](http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP_reports/Diseño_Humedal_AguasGrises.pdf)  
[Citado 27 de Abril de 2014]

[24] URL – 10: Diseño lagunas de estabilización.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf> [Citado 27 de Abril de 2014]

[25] URL – 11: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, lección 39 Filtro anaerobio:  
[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion\\_39\\_filtro\\_anaerobio.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion_39_filtro_anaerobio.html)

[26] URL – 12: Lagunas de estabilización:  
<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/lagunas7.pdf> [Citado 8 de Marzo de 2014]

[27] URL -13: Plan de Construcción y Sistema para Tratamiento de Aguas Negras.  
[http://www.cee.mtu.edu/projects/Projects\\_2005/espanol/Oscar\\_Romero\\_Report\\_Translation-1.pdf](http://www.cee.mtu.edu/projects/Projects_2005/espanol/Oscar_Romero_Report_Translation-1.pdf) [Citado 8 de Mayo de 2014]

[

## ANEXOS

### Anexo A. Valores para cada una de las variables de las 16 tecnologías primarias secundarias y terciarias.

#### VARIABLES

##### 1. Impacto visual

Para poder estimar si se generaba impacto visual en cada una de las tecnologías se hizo una consulta a varios expertos en el tema como lo fueron Ingenieros Civiles e Ingenieros Sanitarios que trabajan en el tema (Uno de ellos fue el Ingeniero Sergio Paredes encargado de la PTAR de Bucaramanga – EMPAS); Estas consultas se tomaron como experiencia y con la ayuda de registros fotográficos se decidió si se generaba o no impacto visual:

**TANQUE SEPTICO:** No genera impacto visual pues va enterrado en el terreno.



**LAGUNA ANAEROBIA:** Genera impacto visual pues no es agradable a la vista humana.



**REACTOR UASB:** Genera impacto visual pues varia como era y se veía el lugar.



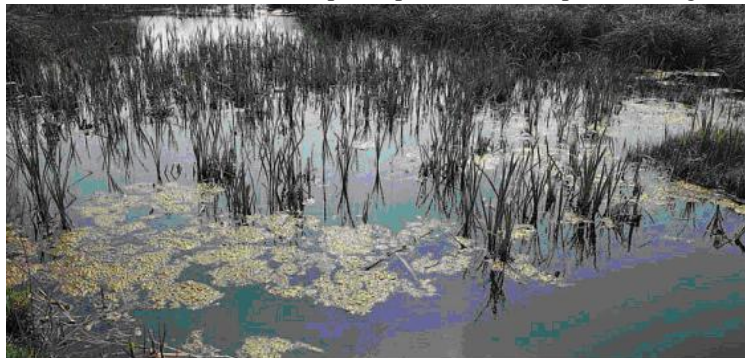
**FILTRO ANAEROBIO:** No genera impacto visual pues va enterrado en el terreno.



**LAGUNA FACULTATIVA:** Genera impacto pues varía el aspecto del lugar.



**HUMEDALES:** Genera impacto pues varía el aspecto del lugar.



**LAGUNA MADURACIÓN:** Genera impacto pues varía el aspecto del lugar.



## 2. Generación de olores

Para poder estimar si se generan olores en cada una de las tecnologías se hizo una consulta a varios expertos en el tema como lo fueron Ingenieros Civiles e Ingenieros Sanitarios que trabajan en el tema (Uno de ellos fue la Ingeniera Patricia Silva que labora en la Corporación Autónoma de Santander en Sn Gil – CAS). Con estas consultas se decidió tomar esta información como experiencia. Así que por pequeño que fuera el olor se asumió como que genera olor.

- **Tanque séptimo:** Genera olores
- **Laguna Anaerobia:** Genera olores
- **Reactor UASB:** Genera olores
- **Filtro anaerobio:** Genera olores
- **Humedales:** Genera olores
- **Laguna de maduración:** Genera olores

## 3. Generación de subproductos.

Para poder estimar si se generan subproductos en cada una de las tecnologías se hizo una consulta a varios expertos en el tema como lo fueron Ingenieros Civiles e Ingenieros Sanitarios que trabajan en el tema (Uno de ellos fue el Ingeniero Omar que labora en la Corporación Autónoma de Santander en Sn Gil – CAS). Con estas consultas se decidió tomar la información como experiencia. También se consultó el Diplomado Tratamiento de Aguas residuales Domesticas e Industriales – Acodal seccional Caribe, Barranquilla 2007.

- **Tanque séptimo:** Genera lodos.
- **Laguna Anaerobia:** Genera lodos, biogás
- **Reactor UASB:** Genera lodos, biogás.
- **Filtro anaerobio:** Genera lodos
- **Humedales:** Genera lodos.
- **Laguna de maduración:** Genera lodos.

## 4. Costos de inversión.

Cada uno de los costos estimados se realizó con un valor aproximado dado por ingenieros expertos en el tema mirando el pre dimensionamiento y el caudal a tratar.

- Tanque Séptico:

Miller M, Ridgeway J, RJ Plud, 2006 los costos para un tanque de 600 m<sup>2</sup> pueden estar por encima de 39.000 Bs

Para la estimación del costo se asumió un valor de 45.000 Bs sabiendo que el Bs esta en 274,73 \$

C: 45.000\*274,73

C: 12'362.850 \$

- Laguna Anaerobia

Según Romero A, 2004 los costos per cápita están entre 3,9 - 15,5 US\$

Para la estimación del costo se asumió un valor de 6, 7830 [habitantes] y el precio del dólar en 2000 \$ dando un valor de:

C:  $6 \cdot 7830 \cdot 2000$   
C: 93'960.000 \$

(R. Jairo; Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño; tercera edición; Editorial escuela Colombiana de Ingeniería; Colombia 2004, Capítulo 24; p.168)

- Reactor UASB

El precio del reactor UASB se estimó en 132'000.000 \$ según Plan de Desarrollo del Municipio de Villanueva 2012 según especificación encontrada allí.

- Filtro anaerobio

Según Torres. P, Rodríguez. J, Uribe. I, 2003 los costos aproximados para un filtro anaerobio de 1,15 m de profundidad es 82.163 \$ por cada  $m^3$ .  
Para la estimación del costo se asumió un volumen de 184,032  $m^3$ , un valor de 114.313 con profundidad de 1,6 m

C:  $1313.460 \cdot 184,032$   
C: 21'037.250 \$

- Laguna facultativa

Según Romero A, 2004 los costos per cápita están entre 3,9 – 27,1 US\$. Para la estimación del costo se asumió un valor de 5, 7830 [habitantes] y el precio del dólar en 2000 \$ dando un valor de:

C:  $5 \cdot 7830 \cdot 2000$   
C: 78'300.000 \$

(R. Jairo; Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño; tercera edición; Editorial escuela Colombiana de Ingeniería; Colombia 2004, Capítulo 24; p.168)

- Humedales

Según Guerrero. J, Salas. D, Zapata. M, 2007 los costos per cápita están entre 7.000 – 20.000\$  
Para la estimación del costo se asumió un valor de 8.000 \$ y 7830 [habitantes].

C:  $10.000 \cdot 7830$   
C: 78'300.000 \$

- Laguna de Maduración

Según Guerrero. J, Salas. D, Zapata. M, 2007 los costos per cápita están entre 12.000 – 66.000\$  
Para la estimación del costo se asumió un valor de 14.000 \$ y 7830 [habitantes]

C:  $14.000 \cdot 7830$   
C: 103'620.000 \$

## 5. Área requerida

- TANQUE SEPTICO:

Condiciones de diseño:

- Altura mínima: 1,2 m
- Altura máxima: 1,7 m
- Borde libre entre 0,25 y 0,3 m
- TRH entre 1 a 3 días

Sabiendo que la población es de 7830 [habitantes] y que el Caudal que entra al tanque es de 4600,8 [m<sup>3</sup>/día] y suponiendo una profundidad de 2m, tenemos:

$$Volumen = 0,18 * Población + 2$$

$$Volumen = 0,18 * 7830 + 2 = 1411,4 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$Area = \frac{Volumen \text{ [m}^3\text{]}}{Profundidad \text{ [m]}} = \frac{1411,4}{2} = 705,7 \text{ [m}^2\text{]}$$

(R. Jairo; Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño; tercera edición; Editorial escuela Colombiana de Ingeniería; Colombia 2004, Capítulo 24; p.688)

- LAGUNA ANAEROBIA:

Condiciones de diseño:

- Carga Volumétrica de DBO entre 100 y 400 [gDBO/m<sup>3</sup>-día]
- Profundidad entre 3 y 5 [m]

$$Volumen = \frac{DBO \left[ \frac{mg}{l} \right] * Q \left[ \frac{m^3}{día} \right]}{CV \left[ \frac{gDBO}{m^3} - día \right]} = \frac{589 * 4600,8}{300} = 9032,904 \text{ [m}^3\text{]}$$

(Ecuación Arthur, 1983; Mara et al, 1992)

$$Area = \frac{Volumen \text{ [m}^3\text{]}}{Profundidad \text{ [m]}} = \frac{9032,904}{4} = 2258,226 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$TRH = \frac{Volumen \text{ [m}^3\text{]}}{Caudal \text{ [m}^3\text{/día]}} = \frac{9032,904}{4600,8} = 1,963 \text{ [días]}$$

(URL-8)

- REACTOR UASB:

Condiciones de diseño:

- Altura mínima 4,5 m
- CV entre 1 y 2 [KgDBO/m<sup>3</sup>-día]
- TRH entre 2 a 6 horas

Sabiendo que el Caudal que entra al reactor UASB es de 4600,8 [m<sup>3</sup>/día], la DBO de 589 [mg/l] y suponiendo la altura del reactor de 6 m y una CV de 2 [KgDBO/m<sup>3</sup>-día], tenemos:

$$CO = \frac{DBO \left[ \frac{mg}{l} \right] * Q \left[ \frac{m^3}{día} \right]}{1000} = \frac{589 * 4600,8}{1000} = 2709,87 [KgDBO_5/día]$$

$$Volumen = \frac{CO [KgDBO_5/día]}{CV [KgDBO/m^3 - día]} = \frac{2709,87}{2} = 1354,9356 [m^3]$$

$$TRH = \frac{Volumen [m^3]}{\frac{Q \left[ \frac{m^3}{día} \right]}{24 [hr]}} = \frac{1354,9356}{\frac{4600,8}{24}} = 7,08 [hr]$$

$$Area = \frac{Volumen [m^3]}{Altura reactor [m]} = \frac{1354,9356}{5} = 270,987 [m^2]$$

- **FILTRO ANAEROBIO:**

Condiciones de diseño:

- Volumen: 0,02 a 0,04 [m<sup>3</sup>] por cada 0,1 [m<sup>3</sup>/día] de aguas residuales a tratar.
- 0,6 ≤ H ≤ 1,8 [m]

Sabiendo que el caudal es de Q=4600,8 [m<sup>3</sup>/día], suponiendo una profundidad de 1,6[m] y tomando un volumen de 0,04[m<sup>3</sup>] por cada 0,1[m<sup>3</sup>/día] de aguas residuales a tratar, tenemos:

$$Volumen = 0,04 * 4600,8 = 184,032 [m^3]$$

$$Area = \frac{Volumen [m^3]}{Profundidad [m]} = \frac{184,032}{1,6} = 115,02 [m^2]$$

(URL – 11)

- **LAGUNA FACULTATIVA:**

Condiciones de diseño:

- Profundidad entre 1 y 2,5m
- TRH entre 5 a 30 días

Sabiendo que el Caudal que entra es de 4600,8 [m<sup>3</sup>/día], y suponiendo una profundidad 2,5 [m] y un TRH de 7 [días], tenemos: CV de 2 [KgDBO/m<sup>3</sup>-día], tenemos:

$$Area = \frac{Q [m^3/día] * TRH [día]}{Profundidad [m]} = \frac{4600,8 * 7}{2,5} = 12882,24 [m^2]$$

(URL – 10)

- **REACTOR UASB:**

Condiciones de diseño:

- Altura mínima 4,5 m
- CV entre 1 y 2 [KgDBO/m<sup>3</sup>-día]
- TRH entre 2 a 6 horas

Sabiendo que el Caudal que entra al reactor UASB es de 4600,8 [m<sup>3</sup>/día], la DBO de 103,664 [mg/l] y suponiendo la altura del reactor de 6 [m] y una CV de 2 [KgDBO/m<sup>3</sup>-día], tenemos:

$$CO = \frac{DBO \left[ \frac{mg}{l} \right] * Q \left[ \frac{m^3}{día} \right]}{1000} = \frac{323,950 * 4600,8}{1000} = 1490,429 [KgDBO_5/día]$$

$$Volumen = \frac{CO [KgDBO_5/día]}{CV [KgDBO/m^3 - día]} = \frac{1490,429}{2} = 745,215 [m^3]$$

$$TRH = \frac{Volumen [m^3]}{\frac{Q \left[ \frac{m^3}{día} \right]}{24 [hr]}} = \frac{745,2157}{\frac{4600,8}{24}} = 3,887 [hr]$$

$$Area = \frac{Volumen [m^3]}{Altura reactor [m]} = \frac{238,47}{5} = 149,043 [m^2]$$

- HUMEDALES:

Suponiendo una profundidad de 80[cm], conociendo el caudal, la DBO del afluente y el efluente, la temperatura, la porosidad y la permeabilidad, tenemos:

$$Kd = 1.35(1.1)^{T-20}$$

$$Tr = \frac{-Ln \left( \frac{DBO_{sale}}{DBO_{entra}} \right)}{Kd}$$

$$A = \frac{Q * Tr}{f * Profundidad}$$

Relación L: W = 4:1

$$W = \sqrt{A/4} \quad L = 4 * W$$

Tipo de material	Tamaño efectivo D <sub>10</sub> (mm)	Porosidad, f (%)	Conductividad hidráulica, k <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

Profundidad:	0,8	
DBO entra:	4704,6375	
Eficiencia:	0,8	
DBO sale:	940,9275	
Porosidad f:	0,4	
Permeabilidad K:	50000	[m³/m²/día]
Caudal Q:	4600,8	[m³/día]
Temperatura:	23	[°C]
cte degradación Kd:	1,35	[día <sup>-1</sup> ]
Kd corregido:	1,79685	[día <sup>-1</sup> ]
Tiempo retención Tr:	0,89569965	[días]
Área transversal:	9,2016	[m²]
Área:	12877,9217	[m²]
Ancho:	56,7404655	[m]
Longitud:	226,961862	[m]

(URL – 9)

- LAGUNA DE MADURACIÓN:

Condiciones de diseño:

- Profundidad entre 0,9 y 1,5 m
- TRH de 5 a 20 días

Conociendo el Caudal (Q=4600,8 [m³/día]) y suponiendo un Tiempo de retención hidráulica de 10 días y una profundidad de 1,5 m, tenemos:

$$Volumen = Q \left[ \frac{m^3}{día} \right] * TRH[días] = 4600,8 * 10 = 23.004 [m^3]$$

$$Area = \frac{Volumen [m^3]}{Profundidad [m]} = \frac{23.004}{1,5} = 15.336 [m^2]$$

(Cortes F, Luévanos A, Luévano R, Uranga ; “Diseño de lagunas de estabilización en serie con diferentes configuraciones (Caso Camarga laguna Estado de Durango, México)”, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 5, núm. 3, Diciembre 2011.)

## 6. Eficiencia de remoción

TECNOLOGIA	%Remoción DBO5	SST
Tanque Séptico (TS)	45	60-70
Laguna de estabilización anaerobia (LA)	50-85	70-80
Reactor UASB	70-80	70-80
Filtro anaerobio (FA)	70-80	70-80
Laguna de estabilización facultativa (LF)	80-95	40-60
Humedales (H)	80-90	80-90
Laguna de maduración (LM)	60-80	10-30

## 7. Reutilización del agua

Para estimar si la tecnología permitía la reutilización del agua, se hizo una consulta a varios expertos en el tema como lo fueron Ingenieros Civiles e Ingenieros Sanitarios que trabajan en el tema. Como criterio se asumió que el agua iba a ser reutilizada para agricultura y ganadería; según consulta se estimó que todas las permitían la reutilización del agua ya que es un caudal no muy grande de contiene valores DBO<sub>5</sub> y SST no muy altos y con las tecnologías excepto el tanque séptico se pudo reducir este valor.

## 8. Personal altamente capacitado para O&M.

Para estimar si la tecnología requería de personal altamente capacitado para operación y mantenimiento, se asumió como criterio propio ya que todas las tecnologías requieren de un mantenimiento para su buen funcionamiento. También es bueno aclarar que según consulta realizada se sabe que el reactor UASB necesita de operación especial a diferencia de las demás tecnologías ya que su operación es más sencilla.

Tabla 1. Valores de cada variable para las diferentes tecnologías de estudio.

		VARIABLES								
		1	2	3	4	5	6		7	8
							DBO <sub>5</sub>	SST		
TECNOLOGIAS	Tanque séptico (TS)	No	Si	Si	12'362.850	705,7	45	60-70	No	Si
	Laguna anaerobia (LA)	Si	Si	Si	93'960.000	2.258,23	50-85	70-80	Si	Si
	Reactor UASB	Si	Si	Si	132'000.000	270,987	70-80	70-80	Si	Si
	Filtro anaerobio (FA)	No	Si	Si	21'037.250	115,02	70-80	70-80	Si	Si
	Laguna facultativa (LF)	Si	Si	Si	78'300.000	12.882,24	80-95	40-60	Si	Si
	Reactor UASB	Si	Si	Si	72'600.000	149,043	70-80	70-80	Si	Si
	Humedales (H)	Si	Si	Si	78'300.000	12.877,92	80-90	80-90	Si	Si
	Laguna de maduración (LM)	Si	Si	Si	103'620.000	15.336	60-80	10-30	Si	Si

**Anexo B. Agrupación de valores para cada una de las nueve variables evaluando los 16 trenes de tecnologías.**

**VARIABLES**

1. Impacto Visual

Tabla 1

No. Trenes	¿PRESENTA IMPACTO VISUAL?						No. Tecnologías que generan impacto visual
	PRIMARIO		SECUNDARIO		TERCIARIO		
1	TS	No	FA	No	H	Si	2
2	LA	Si	FA	No	H	Si	2
3	Reactor UASB	Si	FA	No	H	Si	2
4	TS	No	LF	Si	H	Si	2
5	LA	Si	LF	Si	H	Si	3
6	Reactor UASB	Si	LF	Si	H	Si	3
7	TS	No	Reactor UASB	Si	H	Si	2
8	LA	Si	Reactor UASB	Si	H	Si	3
9	TS	No	FA	No	LM	Si	1
10	LA	Si	FA	No	LM	Si	2
11	Reactor UASB	Si	FA	No	LM	Si	2
12	TS	No	LF	Si	LM	Si	2
13	LA	Si	LF	Si	LM	Si	3
14	Reactor UASB	Si	LF	Si	LM	Si	3
15	TS	No	Reactor UASB	Si	LM	Si	2
16	LA	Si	Reactor UASB	Si	LM	Si	3

2. Generación de olores

Tabla 2

No. Trenes	¿GENERA OLORES?						No. Tecnologías que generan olores
	PRIMARIO		No. Tecnologías que generan impacto visual		TERCIARIO		
1	TS	Si	FA	Si	H	Si	3
2	LA	Si	FA	Si	H	Si	3
3	Reactor UASB	Si	FA	Si	H	Si	3
4	TS	Si	LF	Si	H	Si	3
5	LA	Si	LF	Si	H	Si	3
6	Reactor UASB	Si	LF	Si	H	Si	3
7	TS	Si	Reactor UASB	Si	H	Si	3
8	LA	Si	Reactor UASB	Si	H	Si	3
9	TS	Si	FA	Si	LM	Si	3
10	LA	Si	FA	Si	LM	Si	3
11	Reactor UASB	Si	FA	Si	LM	Si	3
12	TS	Si	LF	Si	LM	Si	3
13	LA	Si	LF	Si	LM	Si	3
14	Reactor UASB	Si	LF	Si	LM	Si	3
15	TS	Si	Reactor UASB	Si	LM	Si	3
16	LA	Si	Reactor UASB	Si	LM	Si	3

3. Generación de Subproductos

Tabla 3

No. Trenes	¿GENERA SUBPRODUCTOS?						No. Tecnologías que generan subproductos
	PRIMARIO		SECUNDARIO		TERCIARIO		
1	TS	Si	FA	Si	H	Si	3
2	LA	Si	FA	Si	H	Si	3
3	Reactor UASB	Si	FA	Si	H	Si	3
4	TS	Si	LF	Si	H	Si	3
5	LA	Si	LF	Si	H	Si	3
6	Reactor UASB	Si	LF	Si	H	Si	3
7	TS	Si	Reactor UASB	Si	H	Si	3
8	LA	Si	Reactor UASB	Si	H	Si	3
9	TS	Si	FA	Si	LM	Si	3
10	LA	Si	FA	Si	LM	Si	3
11	Reactor UASB	Si	FA	Si	LM	Si	3
12	TS	Si	LF	Si	LM	Si	3
13	LA	Si	LF	Si	LM	Si	3
14	Reactor UASB	Si	LF	Si	LM	Si	3
15	TS	Si	Reactor UASB	Si	LM	Si	3
16	LA	Si	Reactor UASB	Si	LM	Si	3

4. Costos de inversión

Tabla 4

No. Trens	T. PRIMARIO	COSTOS PRIMARIO	T. SECUNDARIO	COSTOS T. SECUNDARIO	T. TERCIARIO	COSTOS T. TERCIARIO	COSTOS TOTALES TREN [m <sup>2</sup> ]	COSTOS TOTALES CON UN 20% ADICIONAL
1	TS	12'362.850	FA	21'037.250	H	78'300.000	111'700.100	134'040.120
2	LA	93'960.000	FA	21'037.250	H	78'300.000	193'297.250	231'956.700
3	Reactor UASB	132'000.000	FA	21'037.250	H	78'300.000	171'937.250	206'324.700
4	TS	12'362.850	LF	78'300.000	H	78'300.000	168'962.850	202'755.420
5	LA	93'960.000	LF	78'300.000	H	78'300.000	250'560.000	300'672.000
6	Reactor UASB	132'000.000	LF	78'300.000	H	78'300.000	229'200.000	275'040.000
7	TS	12'362.850	Reactor UASB	72'600.000	H	78'300.000	163'262.850	195'915.420
8	LA	93'960.000	Reactor UASB	72'600.000	H	78'300.000	244'860.000	293'832.000
9	TS	12'362.850	FA	21'037.250	LM	103'620.000	137'020.100	164'424.120
10	LA	93'960.000	FA	21'037.250	LM	103'620.000	218'617.250	262'340.700
11	Reactor UASB	132'000.000	FA	21'037.250	LM	103'620.000	197'257.250	236'708.700
12	TS	12'362.850	LF	78'300.000	LM	103'620.000	194'282.850	233'139.420
13	LA	93'960.000	LF	78'300.000	LM	103'620.000	275'880.000	331'056.000
14	Reactor UASB	132'000.000	LF	78'300.000	LM	103'620.000	313'920.000	376'704.000
15	TS	12'362.850	Reactor UASB	72'600.000	LM	103'620.000	188'582.850	226'299.420
16	LA	93'960.000	Reactor UASB	72'600.000	LM	103'620.000	270'180.000	324'216.000

5. Área requerida

Tabla 5

No. Trenes	T. PRIMARIO	AREA PRIMARIO	T. SECUNDARIO	AREA SECUNDARIO	T. TERCARIO	AREA TERCARIO	AREA TOTALES TREN [m <sup>2</sup> ]	AREA TOTALES CON UN 20% ADICIONAL
1	TS	705,7	FA	115,02	H	12.877,92	13.698,64	16.438,37
2	LA	2.258,23	FA	115,02	H	12.877,92	15.251,17	18.301,40
3	Reactor UASB	270,987	FA	115,02	H	12.877,92	13.263,93	15.916,71
4	TS	705,7	LF	12.882,24	H	12.877,92	26.465,86	31.759,03
5	LA	2.258,23	LF	12.882,24	H	12.877,92	28.018,39	33.622,07
6	Reactor UASB	270,987	LF	12.882,24	H	12.877,92	26.031,15	31.237,38
7	TS	705,7	Reactor UASB	149,043	H	12.877,92	13.732,66	16.479,20
8	LA	2.258,23	Reactor UASB	149,043	H	12.877,92	15.285,19	18.342,23
9	TS	705,7	FA	115,02	LM	15.336	16.156,72	19.388,06
10	LA	2.258,23	FA	115,02	LM	15.336	17.709,25	21.251,10
11	Reactor UASB	270,987	FA	115,02	LM	15.336	15.722,01	18.866,41
12	TS	705,7	LF	12.882,24	LM	15.336	28.923,94	34.708,73
13	LA	2.258,23	LF	12.882,24	LM	15.336	30.476,47	36.571,76
14	Reactor UASB	270,987	LF	12.882,24	LM	15.336	28.489,23	34.187,07
15	TS	705,7	Reactor UASB	149,043	LM	15.336	16.190,74	19.428,89
16	LA	2.258,23	Reactor UASB	149,043	LM	15.336	17.743,27	21.291,93

## 6. Eficiencia de remoción

DBO<sub>5</sub> → Para el cálculo de remoción que presenta cada una de las tecnologías se tuvieron en cuenta los valores de %remoción de DBO<sub>5</sub> de la tabla 7.

Ejemplo: Calculo eficiencia de remoción DBO<sub>5</sub> para el Tren No. 1 TS – FA – H

- Carga DBO<sub>5</sub>: 2709,8712 [Kg/día]
- %Remoción Tanque Séptico: 45
- %Remoción Filtro Anaerobio: 70
- %Remoción Humedales: 80

### **PRIMARIO (Tanque séptico)**

- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> entra: 2709,872 [Kg/día]
- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> remueve:  $2709,872 * 0,45$   
Carga DBO<sub>5</sub> remueve: 1219,442 [Kg/día]
- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> sale:  $2709,872 - 1219,442$   
Carga DBO<sub>5</sub> sale: 1490,429 [Kg/día]

### **SECUNDARIO (Filtro anaerobio)**

- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> entra: 1490,429 [Kg/día]
- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> remueve:  $1490,429 * 0,7$   
Carga DBO<sub>5</sub> remueve: 1043,300 [Kg/día]
- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> sale:  $1490,429 - 1043,300$   
Carga DBO<sub>5</sub> sale: 447,129 [Kg/día]

### **TERCIARIO (Humedales)**

- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> entra: 447,129 [Kg/día]
- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> remueve:  $447,129 * 0,8$   
Carga DBO<sub>5</sub> remueve: 357,703 [Kg/día]
- ✓ Carga DBO<sub>5</sub> sale:  $447,129 - 357,703$   
Carga DBO<sub>5</sub> sale: 89,426 [Kg/día]

No. Tren	TRATAMIENTO								
	Primario			Secundario			Terciario		
	Entra	Remueve	Sale	Entra	Remueve	Sale	Entra	Remueve	Sale
1	2709,871	1219,442	1490,429	1490,429	1043,300	447,129	447,129	357,703	89,426
2	2709,871	1354,936	1354,936	1354,936	948,455	406,481	406,481	325,185	81,296
3	2709,871	1625,923	1083,948	1083,948	758,764	325,185	325,185	260,148	65,037
4	2709,871	1219,442	1490,429	1490,429	1192,343	298,086	298,086	238,469	59,617
5	2709,871	1354,936	1354,936	1354,936	1083,948	270,987	270,987	216,790	54,197
6	2709,871	1625,923	1083,948	1083,948	867,159	216,790	216,790	173,432	43,358
7	2709,871	1219,442	1490,429	1490,429	894,257	596,172	596,172	476,937	119,234
8	2709,871	1354,936	1354,936	1354,936	812,961	541,974	541,974	433,579	108,395
9	2709,871	1219,442	1490,429	1490,429	1043,300	447,129	447,129	268,277	178,851
10	2709,871	1354,936	1354,936	1354,936	948,455	406,481	406,481	243,888	162,592
11	2709,871	1625,923	1083,948	1083,948	758,764	325,185	325,185	195,111	130,074
12	2709,871	1219,442	1490,429	1490,429	1192,343	298,086	298,086	178,851	119,234
13	2709,871	1354,936	1354,936	1354,936	1083,948	270,987	270,987	162,592	108,395
14	2709,871	1625,923	1083,948	1083,948	867,159	216,790	216,790	130,074	86,716
15	2709,871	1219,442	1490,429	1490,429	894,257	596,172	596,172	357,703	238,469
16	2709,871	1354,936	1354,936	1354,936	812,961	541,974	541,974	325,185	216,790

Tabla 6

SST → Para el cálculo de remoción que presenta cada una de las tecnologías se tuvieron en cuenta los valores de %remoción de SST de la tabla 7.

Ejemplo: Calculo eficiencia de remoción SST para el Tren No. 1 TS – FA – H

- Carga SST: 2852,496 [Kg/día]
- %Remoción Tanque Séptico: 50
- %Remoción Filtro Anaerobio: 70
- %Remoción Humedales: 80

**PRIMARIO (Tanque séptico)**

- ✓ Carga SST entra: 2852,496 [Kg/día]
- ✓ Carga SST remueve: 2852,496 \* 0,6  
Carga SST remueve: 1711,498 [Kg/día]
- ✓ Carga SST sale: 2852,496 - 1711,498  
Carga SST sale: 1140,998 [Kg/día]

**SECUNDARIO (Filtro anaerobio)**

- ✓ Carga SST entra: 1140,998 [Kg/día]
- ✓ Carga SST remueve: 1140,998 \* 0,7  
Carga SST remueve: 798,699 [Kg/día]
- ✓ Carga SST sale: 1140,998 - 798,699  
Carga SST sale: 342,300 [Kg/día]

**TERCIARIO (Humedales)**

- ✓ Carga SST entra: 342,300 [Kg/día]
- ✓ Carga SST remueve: 342,300 \* 0,8  
Carga SST remueve: 273,840 [Kg/día]

- ✓ Carga SST sale: 342,300 – 273,840  
Carga SST sale: 68,460 [Kg/día]

No. Tren	TRATAMIENTO								
	Primario			Secundario			Terciario		
	Entra	Remueve	Sale	Entra	Remueve	Sale	Entra	Remueve	Sale
1	2852,496	1711,498	1140,998	1140,998	798,699	342,300	342,300	273,840	68,460
2	2852,496	1996,747	855,749	855,749	599,024	256,725	256,725	205,380	51,345
3	2852,496	1996,747	855,749	855,749	599,024	256,725	256,725	205,380	51,345
4	2852,496	1711,498	1140,998	1140,998	456,399	684,599	684,599	547,679	136,920
5	2852,496	1996,747	855,749	855,749	342,300	513,449	513,449	410,759	102,690
6	2852,496	1996,747	855,749	855,749	342,300	513,449	513,449	410,759	102,690
7	2852,496	1711,498	1140,998	1140,998	798,699	342,300	342,300	273,840	68,460
8	2852,496	1996,747	855,749	855,749	599,024	256,725	256,725	205,380	51,345
9	2852,496	1711,498	1140,998	1140,998	798,699	342,300	342,300	273,840	68,460
10	2852,496	1996,747	855,749	855,749	599,024	256,725	256,725	25,672	231,052
11	2852,496	1996,747	855,749	855,749	599,024	256,725	256,725	25,672	231,052
12	2852,496	1711,498	1140,998	1140,998	456,399	684,599	684,599	68,460	616,139
13	2852,496	1996,747	855,749	855,749	342,300	513,449	513,449	51,345	462,104
14	2852,496	1996,747	855,749	855,749	342,300	513,449	513,449	51,345	462,104
15	2852,496	1711,498	1140,998	1140,998	798,699	342,300	342,300	34,230	308,070
16	2852,496	1996,747	855,749	855,749	599,024	256,725	256,725	25,672	231,052

Tabla 7

7. Reutilización del agua.

Tabla 8

No. Trenes	¿SE PUEDE REUTILIZAR EL AGUA?						No. Tecnologías que permiten reutilizar el agua
	PRIMARIO		SECUNDARIO		TERCIARIO		
1	TS	No	FA	Si	H	Si	2
2	LA	Si	FA	Si	H	Si	3
3	Reactor UASB	Si	FA	Si	H	Si	3
4	TS	No	LF	Si	H	Si	2
5	LA	Si	LF	Si	H	Si	3
6	Reactor UASB	Si	LF	Si	H	Si	3
7	TS	No	Reactor UASB	Si	H	Si	2
8	LA	Si	Reactor UASB	Si	H	Si	3
9	TS	No	FA	Si	LM	Si	2
10	LA	Si	FA	Si	LM	Si	3
11	Reactor UASB	Si	FA	Si	LM	Si	3
12	TS	No	LF	Si	LM	Si	2
13	LA	Si	LF	Si	LM	Si	3
14	Reactor UASB	Si	LF	Si	LM	Si	3
15	TS	No	Reactor UASB	Si	LM	Si	2
16	LA	Si	Reactor UASB	Si	LM	Si	3

8. Personal altamente capacitado operación y mantenimiento (O&M)

Tabla 9

No. Trens	¿REQUIERE PERSONAL ALTAMENTE CAPACITADO PARA O&M?						No. Tecnologías que requieren personal para O&M
	PRIMARIO		SECUNDARIO		TERCIARIO		
1	TS	No	FA	No	H	No	0
2	LA	No	FA	No	H	No	0
3	Reactor UASB	Si	FA	No	H	No	1
4	TS	No	LF	No	H	No	0
5	LA	No	LF	No	H	No	0
6	Reactor UASB	Si	LF	No	H	No	1
7	TS	No	Reactor UASB	Si	H	No	1
8	LA	No	Reactor UASB	Si	H	No	1
9	TS	No	FA	No	LM	No	0
10	LA	No	FA	No	LM	No	0
11	Reactor UASB	Si	FA	No	LM	No	1
12	TS	No	LF	No	LM	No	0
13	LA	No	LF	No	LM	No	0
14	Reactor UASB	Si	LF	No	LM	No	1
15	TS	No	Reactor UASB	Si	LM	No	0
16	LA	No	Reactor UASB	Si	LM	No	0

9. Cumplimiento de la norma

Para establecer si los valores de carga final de DBO<sub>5</sub> y SST cumplían con la norma, se estimó mirando la Tabla 1 (Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984 para el vertimiento de aguas residuales) en la cual se establece que cada tren debe remover un 80% de cada parametro.

- Carga DBO<sub>5</sub> entra al tren: 2709,8712: [Kg/día]  
Aplicando la norma quedan establecidos los valores de la siguiente manera:

$$2709,8712 - 2709,8712 * 0,8 = 541,974 \text{ [Kg/día]}$$

Carga DBO<sub>5</sub> sale Tren ≤ 541,974 Cumple  
Carga DBO<sub>5</sub> sale Tren > 541,974: No Cumple

- Carga SST sale: 2852,496 [mg /L]  
Aplicando la norma quedan establecidos los valores de la siguiente manera:

$$2852,496 - 2852,496 * 0,8 = 570,499 \text{ [Kg/día]}$$

Carga SST sale Tren ≤ 570,499: Cumple  
Carga SST sale Tren > 570,499: No Cumple

## **Anexo C. Valores posibles para cada una de las nueve variables evaluando los 16 trenes de tecnologías orientados por los indicadores .**

### **VARIABLES**

#### **1. Impacto Visual**

El cálculo de los valores posibles bajo, medio y alto se estimó mirando cuantas tecnologías presentaban impacto visual (Ver Tabla 1 - Anexo 2) para cada tren que se estaba analizando, por medio de la cual se tomaron como criterios: si un tratamiento presenta impacto visual: bajo, si dos tratamientos presentan impacto visual: medio; si tres tratamientos presentan impacto visual: alto. Mirando estos criterios se llenó la Tabla 1 – Anexo 3.

Ejemplo: Estimación impacto visual para el Tren No. 1 TS – FA – H

¿Presenta impacto visual?

- TS → Si
- FA → No
- H → Si

Como dos tecnologías presentan impacto visual el valor posible asignado fue medio.

#### **2. Generación de olores**

El cálculo de los valores posibles bajo, medio y alto se estimó mirando cuantas tecnologías presentaban generación de olores (Ver Tabla 2 - Anexo 2) para cada tren que se estaba analizando, por medio de la cual se tomaron como criterios: si un tratamiento genera olores: bajo, si dos tratamientos generan olores: medio; si tres tratamientos generan olores: alto. Mirando estos criterios se llenó la Tabla 1– Anexo 3.

Ejemplo: Estimación generación de olores para el Tren No. 1 TS – FA – H

¿Genera olores?

- TS → Si
- FA → Si
- H → Si

Como tres tecnologías generan olores el valor posible asignado fue Alto

#### **3. Generación de Subproductos**

El cálculo de los valores posibles bajo, medio y alto se estimó mirando cuantas tecnologías presentaban generación de subproductos (Ver Tabla 3 - Anexo 2) para cada tren que se estaba analizando, por medio de la cual se tomaron como criterios: si un tratamiento genera subproductos: bajo, si dos tratamientos generan subproductos: medio; si tres tratamientos generan subproductos: alto. Mirando estos criterios se llenó la Tabla 1 – Anexo 3.

Ejemplo: Estimación generación de subproductos para el Tren No. 1 TS – FA – H

¿Genera subproductos?

- TS → Si
- FA → Si
- H → Si

Como tres tecnologías generan subproductos el valor posible asignado fue alto

#### 4. Costos de inversión

Para calcular el valor posible de los costos, se escogió el mayor costo presente en los dieciséis trenes de tecnologías y este valor dividió cada uno de los costos de los demás trenes (Ver Tabla 4 - Anexo 2).

Ejemplo: Valores posibles costos para el Tren No. 1 TS – FA – H

Costo máximo entre los 16 trenes: 376'704.000

Costo tren de estudio: 134'040.120

Ct:  $376'704.000 / 134'040.120$

Ct: 0,36

#### 5. Área requerida

Para calcular el valor posible de las áreas, se escogió la mayor área presente en los dieciséis trenes de tecnologías y este valor dividió cada una de las áreas de los demás trenes (Ver Tabla 5 - Anexo 2).

Ejemplo: Valores posibles área para el Tren No. 1 TS – FA – H

Área máxima entre los 16 trenes: 36571,76 [m<sup>2</sup>]

Área tren de estudio: 705,7 [m<sup>2</sup>]

At:  $36.571,76 / 16.438,37$

At: 0,45

#### 6. Eficiencia de remoción

DBO<sub>5</sub> → Para calcular el valor posible de la remoción de DBO<sub>5</sub>, se escogió la mayor remoción de DBO<sub>5</sub> presente en los dieciséis trenes de tecnologías y este valor dividió cada una de las remociones de DBO<sub>5</sub> de los demás trenes (Ver Tabla 6 - Anexo 2).

Ejemplo: Valores posibles remoción de DBO<sub>5</sub> para el Tren No. 1 TS – FA – H

Remoción de DBO<sub>5</sub> máxima entre los 16 trenes: 238,469 [Kg/día]

Remoción de DBO<sub>5</sub> tren de estudio: 89,426 [Kg/día]

ER DBO<sub>5</sub>:  $238,469 / 89,426$  [Kg/día]

ER DBO<sub>5</sub>: 0,38

SST→ Para calcular el valor posible de la remoción de SST, se escogió la mayor remoción de SST presente en los dieciséis trenes de tecnologías y este valor dividió cada una de las remociones de SST de los demás trenes (Ver Tabla 7 - Anexo 2).

Ejemplo: Valores posibles remoción de SST para el Tren No. 1 TS – FA – H

Remoción de SST máxima entre los 16 trenes: 616,139 [Kg/día]

Remoción de SST tren de estudio: 68,460 [Kg/día]

ER SST:  $68,460 / 616,139$  [Kg/día]

ER SST: 0,11

#### 7. Reutilización del agua.

El cálculo de los valores posibles bajo, medio y alto se estimó mirando cuantas tecnologías después de su tratamiento es posible reutilizar el agua (Ver Tabla 8 - Anexo 2) para cada tren que se estaba analizando, por medio del cual se tomaron como criterios: si un tratamiento reutiliza el agua: bajo, si dos tratamientos reutilizan el agua: medio; si tres tratamientos reutilizan el agua: alto. Mirando estos criterios se llenó la Tabla 1 – Anexo 3.

Ejemplo: Reutilización del agua para el Tren No. 1 TS – FA – H

¿Puede reutilizar el agua?

- TS → No
- FA → Si
- H → Si

Como dos tecnologías pueden reutilizar el agua el valor posible asignado fue medio.

#### 8. Personal capacitado para operación y mantenimiento (O&M)

El cálculo de los valores posibles sí o no se estimó mirando cuantas tecnologías requieren personal capacitado para operación y mantenimiento (Ver Tabla 8 - Anexo 2) para cada tren que se estaba analizando, por medio del cual se tomaron como criterios: si ningún tratamiento requiere personal capacitado para operación y mantenimiento: no, si un tratamiento requiere personal capacitado para operación y mantenimiento: si, si dos tratamientos requieren personal capacitado para operación y mantenimiento: si; si tres tratamientos requieren personal capacitado para operación y mantenimiento: sí. Mirando estos criterios se llenó la Tabla 1 – Anexo 3.

#### 9. ¿Requiere personal altamente capacitado para operación y mantenimiento (O&M)?

- TS → No
- FA → No
- H → No

Como tres tecnologías no requieren personal altamente capacitado para operación y mantenimiento el valor posible asignado fue a No.

#### 10. Cumplimiento normas de calidad

El cálculo de los valores posibles cumple o no cumple se estimó mirando los valores ya ponderados en el Numeral 9 –Anexo 2. Aquí se analizó la carga que salía de cada tren (carga de DBO<sub>5</sub> y SST) para mirar su cumplimiento.

Ejemplo: Cumplimiento norma para el Tren No. 1 TS – FA – H

- Carga DBO<sub>5</sub> sale: 89,426 [Kg/día]
- Valores Norma → Carga DBO<sub>5</sub> sale Tren ≤ 541,974 : Cumple  
Carga DBO<sub>5</sub> sale Tren > 541,974: No Cumple
- Carga SST sale Tren ≤ 570,499: Cumple
- Carga SST sale Tren > 570,499: No Cumple

¿Cumple la norma?

DBO<sub>5</sub> → 89,426 [Kg/día] < 541,974: Cumple

SST → 68,460 < 541,974: Cumple

Tabla 1. Valores posibles para cada una de los dieciséis trenes mirando las variables con su respectivo indicador.

No. Trenes	1	2	3	4	5	6		7	8	9	
						DBO	SST			DBO	SST
1	Medio	Alto	Alto	0,36	0,45	0,38	0,11	Medio	No	Cumple	Cumple
2	Medio	Alto	Alto	0,62	0,50	0,34	0,08	Alto	No	Cumple	Cumple
3	Medio	Alto	Alto	0,55	0,44	0,27	0,08	Alto	Si	Cumple	Cumple
4	Medio	Alto	Alto	0,54	0,87	0,25	0,22	Medio	No	Cumple	Cumple
5	Alto	Alto	Alto	0,80	0,92	0,23	0,17	Alto	No	Cumple	Cumple
6	Alto	Alto	Alto	0,73	0,85	0,18	0,17	Alto	Si	Cumple	Cumple
7	Medio	Alto	Alto	0,52	0,45	0,5	0,11	Medio	Si	Cumple	Cumple
8	Alto	Alto	Alto	0,78	0,50	0,45	0,08	Alto	Si	Cumple	Cumple
9	Bajo	Alto	Alto	0,44	0,53	0,75	0,11	Medio	No	Cumple	Cumple
10	Medio	Alto	Alto	0,70	0,58	0,68	0,38	Alto	No	Cumple	Cumple
11	Medio	Alto	Alto	0,63	0,52	0,55	0,38	Alto	Si	Cumple	Cumple
12	Medio	Alto	Alto	0,62	0,95	0,5	1	Medio	No	Cumple	No cumple
13	Alto	Alto	Alto	0,88	1,00	0,45	0,75	Alto	No	Cumple	Cumple
14	Alto	Alto	Alto	1,00	0,93	0,36	0,75	Alto	Si	Cumple	Cumple
15	Medio	Alto	Alto	0,60	0,53	1	0,5	Medio	No	Cumple	Cumple
16	Alto	Alto	Alto	0,86	0,58	0,91	0,38	Alto	No	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

## Anexo D. Matriz final para selección de tren de tecnología más óptima.

Ejemplo: Valor final para el Tren No. 1 TS – FA – H

### VARIABLES

#### 1. Impacto visual.

- % Aspecto → Ambiental : 25
- % Variable → 20
- Calificación: 3  
Valor final:  $0,25 * 0,20 * 3$   
Valor final: 0,15

#### 2. Generación de olores

- % Aspecto → Ambiental : 25
- % Variable → 60
- Calificación: 1  
Valor final:  $0,25 * 0,60 * 1$   
Valor final: 0,15

#### 3. Generación de subproductos

- % Aspecto → Ambiental : 25
- % Variable → 20
- Calificación: 5  
Valor final:  $0,25 * 0,20 * 5$   
Valor final: 0,25

#### 4. Costos de inversión

- % Aspecto → Socioeconómico : 30
- % Variable → 100
- Calificación: 4  
Valor final:  $0,30 * 1 * 4$   
Valor final: 1,2

#### 5. Área requerida

- % Aspecto → Tecnológicos : 20
- % Variable → 30
- Calificación: 3  
Valor final:  $0,20 * 0,30 * 3$   
Valor final: 0,18

#### 6. Eficiencia de remoción

DBO<sub>5</sub>

- % Aspecto → Tecnológicos : 20
- % Variable → 25
- Calificación: 4  
Valor final:  $0,20 * 0,25 * 4$   
Valor final: 0,2

#### SST

- % Aspecto → Tecnológicos : 20
- % Variable → 25
- Calificación: 5  
Valor final:  $0,20 * 0,25 * 5$   
Valor final: 0,12

#### 7. Reutilización del agua

- % Aspecto → Tecnológicos : 20
- % Variable → 20
- Calificación: 5  
Valor final:  $0,20 * 0,20 * 3$   
Valor final: 0,12

#### 8. Personal capacitado para O&M

- % Aspecto → Socio culturales: 10
- % Variable → 100
- Calificación: 1  
Valor final:  $0,10 * 1 * 5$   
Valor final: 0,5

#### 9. Cumplimiento de la norma

##### DBO<sub>5</sub>

- % Aspecto → Normativos: 15
- % Variable → 60
- Calificación: 5  
Valor final:  $0,15 * 0,60 * 5$   
Valor final: 0,45

##### SST

- % Aspecto → Normativos: 15
- % Variable → 40
- Calificación: 5  
Valor final:  $0,15 * 0,40 * 5$   
Valor final: 0,30

Sumatoria valor final de las nueve variables

$$\Sigma = 0,55 + 0,15 + 0,25 + 1,2 + 0,18 + 0,2 + 0,25 + 1,2 + 0,1 + 0,45 + 0,3$$

$$\Sigma = 3,75$$