

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL  
MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ  
TESIS DE GRADO

**DIEGO JOSUÉ ROBIN MACLONI MORÁN VILLELA**  
CARNET 11731-06

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, NOVIEMBRE DE 2014  
CAMPUS CENTRAL

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL  
MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ  
TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR  
**DIEGO JOSUÉ ROBIN MACLONI MORÁN VILLELA**

PREVIO A CONFERÍRSELE  
EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, NOVIEMBRE DE 2014  
CAMPUS CENTRAL

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.  
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO  
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: DR. CARLOS RAFAEL CABARRÚS PELLECCER, S. J.  
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.  
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS  
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**

DECANO: DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS  
VICEDECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ  
SECRETARIA: ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

MGTR. CARLOS ERNESTO ARCHILA CARDONA

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

MGTR. MARÍA DEL PILAR NEGREROS PRATDESABA  
LIC. MANUEL JOSÉ CASTILLO MAZARIEGOS  
LICDA. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ

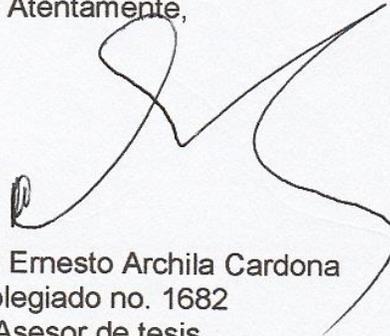
Cobán 17 de octubre del 2014

Consejo de Facultad  
Ciencias Ambientales y Agrícolas.  
Presente.

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Diego Josué Robin Macloni Morán Villela, carné 11731-06, titulada: "Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de san Juan Chamelco, Alta Verapaz".

La cual considero que cumple con los requisitos establecidos por facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



Ing, Carlos Ernesto Archila Cardona  
Colegiado no. 1682  
Asesor de tesis



**Universidad  
Rafael Landívar**  
Tradición Jesuita en Guatemala

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
No. 06239-2014**

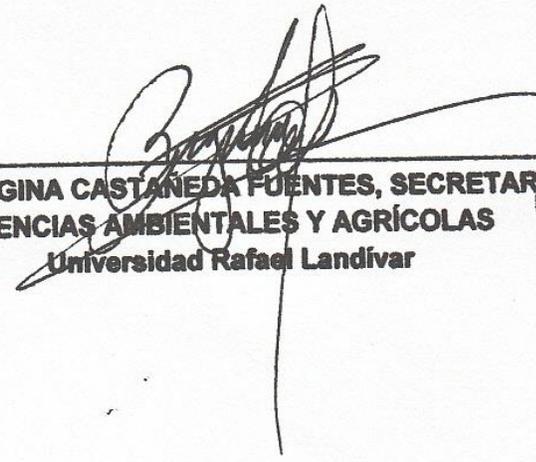
**Orden de Impresión**

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante DIEGO JOSUÉ ROBIN MACLONI MORÁN VILLELA, Carnet 11731-06 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 06126-2014 de fecha 14 de noviembre de 2014, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL  
MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ**

Previo a conferírsele el título de INGENIERO AMBIENTAL en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 27 días del mes de noviembre del año 2014.

  
**ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES, SECRETARIA  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
Universidad Rafael Landívar**



## **AGRADECIMIENTOS**

A:

Dios por darme la vida, la sabiduría y la bendición de poder estudiar

A mis padres por el apoyo, paciencia, la fortaleza para salir adelante y el ejemplo de superación como parte fundamental de mi vida.

A la Municipalidad de San Juan Chamelco, Alta Verapaz, por permitirme realizar mi investigación.

A mi asesor Ing. Carlos Archila por la asesoría en el desarrollo de la presente investigación.

La Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas por ser parte de mi formación.

A mis primos por la compañía, apoyo, consejos y experiencias que han contribuido a mi formación académica y a mi vida.

A mis tíos, tías y abuelo que de distintas maneras me han guiado e incentivado a esforzarme.

A mis amigos que me han acompañado a lo largo de este proceso tanto fuera como dentro de la universidad.

## DEDICATORIA

A:

Dios: por su fidelidad, protección y misericordia especial en mi vida.

Mi madre: Maclovia Villela por su inmenso amor, que ha sido mi soporte en las decisiones que he tomado, la paciencia y protección con la que me acompaña en mí caminar; siendo el mayor ejemplo para mi vida.

Mi padre: Robin Morán que me ha brindado su cariño, apoyo incondicional, confianza a lo largo de mi vida y motivarme a ser siempre alguien mejor.

Mi abuela: Otilia Flohr por sus enseñanzas, cuidados y amor.

Mis tíos: David Aldana y Gabriela de Aldana cuya casa y familia es mi segundo hogar por estar siempre al tanto de mi, que han estado y estarán conmigo en cada paso que doy.

Mis primos: David Aldana más que primo mi hermano que siempre está conmigo. Bernardo Córdova Villela por los momentos que la vida me permitió disfrutar, imaginar y compartir a tu lado.

Mi novia: Mellany Díaz por su amistad incondicional, apoyo y amor en todo momento. Por la motivación de seguir cumpliendo metas y sueños que nos hemos trazado.

## ÍNDICE

Contenido	Página
Resumen.....	i
Summary.....	ii
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>2</b>
2.1 AGUAS RESIDUALES ORDINARIAS O DOMÉSTICAS.....	2
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES ORDINARIAS.....	2
2.2.1 Características físicas.....	2
2.2.1.1 Sólidos .....	2
2.2.1.2 Turbiedad.....	3
2.2.1.3 Color .....	3
2.2.1.4 Olor .....	4
2.2.1.5 Temperatura .....	4
2.2.1.6 Conductividad .....	4
2.2.2 Características químicas.....	5
2.2.2.1 pH .....	5
2.2.2.2 Alcalinidad.....	5
2.2.2.3 Cloruros .....	5
2.2.2.4 Gases.....	6
2.2.2.5 Oxígeno disuelto .....	6
2.2.2.6 Metales .....	6
2.2.2.7 Nitrógeno .....	7
2.2.2.8 Fósforo.....	7
2.2.2.9 Azufre.....	7
2.2.2.10 Grasas y aceites .....	7
2.2.3 Características biológicas .....	8
2.2.3.1 Bacterias .....	8
2.2.3.2 Protozoos.....	8
2.2.3.3 Helmitos .....	8
2.2.3.4 Virus.....	9

2.3	TIPOS DE ANÁLISIS DE DISEÑO .....	9
2.3.1	Análisis físico .....	9
2.3.1.1	Sólidos totales.....	9
2.3.1.2	Sólidos fijos y volátiles .....	9
2.3.1.3	Sólidos suspendidos .....	10
2.3.1.4	Sólidos disueltos .....	10
2.3.2	Análisis químico .....	10
2.3.2.1	Demanda química de oxígeno (DQO).....	10
2.3.2.2	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) .....	11
2.4	TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	11
2.4.1	Pre-tratamiento .....	11
2.4.1.1	Cribado o canal de rejas .....	11
2.4.1.2	Desarenador .....	12
2.4.1.3	Remoción de grasas y aceites .....	12
2.4.2	Opciones de Tratamiento Primario .....	12
2.4.2.1	Fosa séptica.....	12
2.4.2.2	Tanques Imhoff .....	13
2.4.2.3	Sedimentador primario.....	13
2.4.2.4	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).....	13
2.4.3	Opciones de Tratamiento secundario .....	14
2.4.3.1	Filtro anaerobio .....	14
2.4.3.2	Lagunas de estabilización.....	14
2.4.3.3	Lagunas facultativas .....	14
2.4.3.4	Lagunas aerobias .....	15
2.4.3.5	Lagunas de maduración.....	15
2.4.3.6	Humedales.....	15
2.5	OPCIONES DE TRATAMIENTO Y REUSO DE LODOS Y AGUA TRATADA ....	15
2.5.1	Digestión anaerobia .....	16
2.5.2	Tratamiento con cal.....	16
2.5.3	Compostaje, particularmente co-compostaje con residuos organicos.....	16
2.5.4	Patio de secar .....	16

2.5.5	Reuso de subproductos .....	17
2.5.6	Reuso de agua tratada.....	17
2.5.7	Reuso de lodos .....	17
2.6	NORMA DE CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES.....	188
2.6.1	Límites máximos permisibles .....	18
2.7	ANTECEDENTES.....	20
<b>III.</b>	<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>23</b>
3.1	Definición del problema y justificación del trabajo .....	23
<b>IV.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>25</b>
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	25
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>V.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>26</b>
5.1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	26
5.2	UNIDADES DE ANÁLISIS.....	26
5.3	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	26
5.4	INSTRUMENTO .....	26
5.5	PROCEDIMIENTO .....	27
5.5.1	Recopilación de datos.....	27
5.5.2	Fase de muestreo .....	28
5.5.3	Análisis de datos .....	29
5.6	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	30
<b>VI.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>31</b>
6.1	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL DEL MUNICIPIO....	31
6.2	CÁLCULO POBLACIÓN FUTURA .....	33
6.3	CÁLCULO DE CAUDAL DE AGUA POTABLE Y CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES PROYECTADO .....	33
6.3.1	Cálculo caudal medio de agua potable .....	33
6.3.2	Cálculo caudal medio de aguas residuales .....	34
6.4	MEDICIÓN DEL CAUDAL DEL DRENAJE MUNICIPAL.....	34
6.5	PARÁMETROS DE DISEÑO Y SISTEMA PROPUESTO .....	35
6.6	DIMENSIONAMIENTO DEL PRE-TRATAMIENTO.....	37

6.6.1 Dimensionamiento del canal de entrada .....	37
6.6.2 Dimensionamiento rejillas .....	37
6.6.3 Dimensionamiento desarenador .....	39
6.6.4 Dimensionamiento medidor de caudal tipo Parshall .....	43
6.6.5 Dimensionamiento trampa de grasas y aceites .....	44
6.7 DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO .....	48
6.7.1 Dimensionamiento sedimentador primario rectangular .....	48
6.8 DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO .....	52
6.8.1 Dimensionamiento filtro percolador .....	52
6.9 DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO DE LODOS.....	57
6.9.1 Dimensionamiento digestor de lodos .....	57
6.9.2 Dimensionamiento patio de secado .....	61
6.10 POPUESTA DE UBICACIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	65
<b>VII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>VIII.RECOMENDACIONES.....</b>	<b>68</b>
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>70</b>
<b>X. ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Plano de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) .....	36
<b>Figura 2.</b> Plano de planta y corte desarenador .....	42
<b>Figura 3.</b> Plano de planta trampa de grasas .....	46
<b>Figura 4.</b> Plano de corte trampa de grasas .....	47
<b>Figura 5.</b> Plano de planta sedimentador primario rectangular .....	50
<b>Figura 6.</b> Plano de corte sedimentador primario rectangular .....	51
<b>Figura 7.</b> Plano de planta filtro percolador .....	55
<b>Figura 8.</b> Plano de corte filtro percolador .....	56
<b>Figura 9.</b> Plano de planta digestor aerobio de lodos.....	59
<b>Figura 10.</b> Plano de corte digestor aerobio de lodos .....	60
<b>Figura 11.</b> Plano de planta patio de secado de lodos .....	63
<b>Figura 12.</b> Plano de corte patio de secado de lodos.....	64

<b>Figura 13.</b> Ubicación PTAR San Juan Chamelco .....	65
<b>Figura 14.</b> Muestra de aguas residuales refrigerada .....	73
<b>Figura 15.</b> Multiparámetro Hanna HI 255.....	73
<b>Figura 16.</b> Salida de drenaje municipal de aguas residuales.....	74
<b>Figura 17.</b> Salida de drenaje pluvial.....	74
<b>Figura 18.</b> Obtención de muestra de agua residual .....	75
<b>Figura 19.</b> Toma de muestra en zona de desfogue .....	75
<b>Figura 20.</b> Contaminación del cuerpo receptor .....	75
<b>Figura 21.</b> Salida directa del drenaje al cuerpo receptor .....	75
<b>Figura 22.</b> Área aledaña a zona de desfogue inundada .....	76
<b>Figura 23.</b> Salida de drenaje residual inundado.....	76
<b>Figura 24.</b> Medición de caudal zona de desfogue .....	76
<b>Figura 25.</b> Toma de mediciones zona de desfogue .....	76
<b>Figura 26.</b> Mapa de Alta Verapaz, ubicación de San Juan Chamelco .....	69
<b>Figura 27.</b> Mapa del municipio de San Juan Chamelco.....	69

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores. ....	18
<b>Cuadro 2.</b> Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para aguas residuales municipales .....	19
<b>Cuadro 3.</b> Comparación agua residual municipal con el Acuerdo Gubernativo 236-2006. ....	31
<b>Cuadro 4.</b> Medición de caudal diario .....	34
<b>Cuadro 5.</b> Dimensiones canal de entrada.....	37
<b>Cuadro 6.</b> Dimensiones rejillas .....	38
<b>Cuadro 7.</b> Dimensiones desarenador .....	39
<b>Cuadro 8.</b> Dimensiones de medidores Parshall.....	43
<b>Cuadro 9.</b> Dimensiones medidor de caudal Parshall .....	43
<b>Cuadro 10.</b> Dimensiones trampa de grasas.....	44
<b>Cuadro 11.</b> Dimensiones Sedimentador primario rectangular .....	48
<b>Cuadro 12.</b> Dimensiones filtro percolador.....	52
<b>Cuadro 13.</b> Dimensiones digestor de lodos .....	57
<b>Cuadro 14.</b> Dimensiones patio de secado .....	61
<b>Cuadro 15.</b> Parámetros de diseño para rejas de barras .....	77
<b>Cuadro 16.</b> Límites de aplicación medidores Parshall con descarga libre .....	77
<b>Cuadro 17.</b> Dimensiones típicas de medidores Parshall .....	78
<b>Cuadro 18.</b> Valores del Exponente N y el coeficiente K .....	79
<b>Cuadro 19.</b> Información típica para el diseño de tanques de sedimentación primaria ..	80
<b>Cuadro 20.</b> Información típica para el diseño de un Sedimentador primario rectangular .....	80
<b>Cuadro 21.</b> Valores de constantes empíricas a y b .....	80

<b>Cuadro 22.</b> Información usual de diseño para varios tipos de filtros percoladores no sumergidos.....	81
<b>Cuadro 23.</b> Peso específico del fango sin tratar .....	82
<b>Cuadro 24.</b> Calidad normal de fango producido por distintos procesos de tratamiento	82
<b>Cuadro 25.</b> Cuadro digestión discontinua de los lodos de sedimentación libre a diferentes temperaturas .....	83
<b>Cuadro 26.</b> Medición de caudal diario.....	83
<b>Cuadro 27.</b> Parámetros y límites máximos permisibles para reuso.....	83
<b>Cuadro 28.</b> Parámetros y límites máximos permisibles para lodos.....	84
<b>Cuadro 29.</b> Remoción teórica esperada.....	84

### INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Fotografías equipo y trabajo de campo .....	73
<b>Anexo 2.</b> Tablas valores de diseño .....	77
<b>Anexo 3.</b> Formulas de diseño .....	84
<b>Anexo 4.</b> Cálculos de diseño .....	92
<b>Anexo 5.</b> Mapas del municipio .....	102

# DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ

## RESUMEN

El objetivo de la investigación fue diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz. Se realizó un análisis fisicoquímico y microbiológico del agua residual, el muestreo fue hecho en el desfogue de la red de alcantarillado, el análisis de las muestras recolectadas se dividió en dos fases, una de ellas *in-situ* y la otra en laboratorio, para determinar la carga contaminante del agua residual, y poder diseñar con base en los resultados de los parámetros, cuál era la mejor alternativa de sistema de tratamiento del agua residual. Como resultado, el sistema de tratamiento que se seleccionó cuenta con las siguientes unidades: canal de entrada con rejillas con un bypass, un desarenador, medidor de caudal tipo Parshall, trampa de grasas, tanque sedimentador primario rectangular, filtro percolador, digestor de lodos y un patio de secado, asimismo se presentan los planos y dimensionamiento correspondiente a cada unidad de tratamiento. La remoción de contaminantes lograda por el sistema cumplirá con los límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para aguas residuales municipales propuesta por el Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Esta propuesta brinda una medida de mitigación a la problemática de la contaminación de los cuerpos de agua receptores, específicamente los ríos Chiché y Chió los cuales son utilizados para actividades cotidianas del municipio.

# DESIGN OF WASTEWATER TREATMENT PLANT TO THE TOWN OF SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ

## SUMMARY

The objective of the research was to design a wastewater treatment plant for the town of San Juan Chamelco, Alta Verapaz. Physical-chemical and microbiological analysis of wastewater was conducted, sampling was done at the discharge point of the sewage system. The analysis of the collected samples was divided into two phases, one *in-situ* and other in laboratory, this to determine the pollution load of wastewater, to designed the treatment system of wastewater based on the parameters results. As a result the treatment system selected has the following units: input channel gratings with bypass, a sand trap, flow meter type Parshall, grease trap, rectangular primary sedimentation tank, trickling filter, sludge digester and drying yard. The design and unit sizing for each treatment is presented. Pollutant removal achieved by the system complies with the maximum permissible discharge limits to receiving bodies for municipal wastewater regulation given by the Governmental Agreement 236-2006 regulation of discharges and reuse of wastewater and sludge disposal. This proposal provides a mitigation measure to the problem of pollution of the water specifically to the Chiché and Chió rivers which are used for daily activities of the town.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua se constituye en un líquido vital ya que es necesario e indispensable para la supervivencia de los seres humanos y es un factor clave para las actividades cotidianas, domésticas, industriales, ganaderas y agrícolas. Siendo el país de producción agrícola se determina que tanto el uso como degradación de este recurso ha ido en aumento y se le ha sumado, el bajo perfil en cuanto al interés por tratar las aguas residuales; que tienen un alto impacto nocivo en los cuerpos de agua del país y que han incidido en la calidad de vida de la población.

Esta problemática ha ido en aumento ya que los sectores doméstico, industrial e incluso agrícola realizan las descargas residuales sin tratamiento a los cuerpos de agua cercanos no importando las cargas de químicos, colorantes, materia orgánica u otro contaminante que estas tengan. Aún contando desde el año 2006 con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” que compete al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales donde se establecen los parámetros, para reducir la contaminación, en prácticas tradicionales para la disposición final del agua utilizada en el proceso.

De ahí la inquietud y preocupación para realizar el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para las aguas residuales del municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz en virtud de que la calidad de agua del río Cahabón, principal fuente hídrica para la región está cada vez más comprometido, explotado y alterado. Por lo que se propone mitigar la problemática, estableciendo un equilibrio entre el uso y manejo de este recurso natural y su protección.

Es importante acotar que el sistema nacional, aún no ofrece datos sobre la calidad que el agua debe tener en los ecosistemas naturales, se estima que en el país sólo alrededor del 5% de las aguas residuales provenientes de los diversos usos reciben algún tratamiento por lo que se infiere, que en su mayoría las aguas superficiales están contaminadas (SEGEPLAN & BID, 2006).

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 AGUAS RESIDUALES ORDINARIAS O DOMÉSTICAS**

Las aguas residuales son todas aquellas que se han utilizado para cualquier proceso y se ha alterado su calidad. Pueden incluir todo tipo de aguas que vayan a parar al drenaje público (Sans Fonfría & Ribas, 1989).

Así que las aguas residuales de tipo ordinario o domésticas son las que provienen de los núcleos de la población, zonas comerciales, de lugares públicos y de lugares recreativos. Sin tomar en cuenta su procedencia, estas aguas normalmente tienen aproximadamente la misma composición. Estas aguas pueden ir acompañadas de aguas residuales industriales, si se tienen industrias que viertan sus aguas al drenaje público, entonces; ya cambia la composición de las mismas y ya no se incluyen dentro de la clasificación de aguas residuales ordinarias (Sans & Ribas, 1989).

Las aguas residuales ordinarias incluyen residuos que provienen de por ejemplo baños, cocinas, regaderas, lavanderías, que normalmente van al drenaje público y se envían a algún sitio de disposición final. Son una mezcla compleja con contaminantes orgánicos e inorgánicos tanto en material en suspensión como disueltos. La concentración que presentan es pequeña y se expresan en mg/L. La relación es de peso/volumen para poder indicar concentraciones de componente en aguas residuales, aunque se pueden considerar en relación peso/peso como mg/kg o ppm (Glynn & Heinke, 1999).

### **2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES ORDINARIAS**

#### **2.2.1 Características físicas**

##### **2.2.1.1 Sólidos**

El agua residual contiene distintos tipos de materiales sólidos que van desde hilachas hasta materiales coloidales, en la caracterización de las aguas, los materiales más gruesos son removidos usualmente antes de analizar los sólidos (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Sólidos totales (ST): Son los residuos remanentes después que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica (103 a 105 °C)

Sólidos suspendidos totales (SST): Son una fracción de los ST retenidos en un filtro con un tamaño específico de filtro medida después de que se ha secado a una temperatura específica.

Sólidos disueltos totales (SDT): son aquellos que pasan a través del filtro, que son evaporados y secados a una temperatura específica, la medida comprende coloides y SD.

Sólidos sedimentables: Son sólidos suspendidos que se expresan como milímetros por litros, los cuales se sedimentan fuera de la suspensión dentro de un rango de tiempo específico (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.1.2 Turbiedad**

Se toma como una medida de las propiedades de la dispersión de la luz en el agua, usualmente se utiliza para indicar la calidad de las aguas naturales y las aguas residuales tratadas haciendo relación al material en suspensión. La medición se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por suspensión de contraste en las mismas condiciones (Crites & Tchobanoglous, 2000).

El material suspendido impide el paso de luz, ya que esta la absorbe o dispersa, un factor clave es el tamaño de la partícula sobre la turbiedad, donde la mayor turbiedad está relacionada a partículas de tamaño inferior a 3  $\mu\text{m}$  y con partículas de tamaño entre 0.1 y 1.0  $\mu\text{m}$  (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.1.3 Color**

El color en las aguas residuales es causado por los sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por los sólidos suspendidos es llamado color aparente y el que es causado sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero, este último se obtiene al filtrar la muestra. El color se determina comparando el color de la muestra y el color que se produce por soluciones

de diferentes concentraciones de cloroplatinato de potasio ( $K_2PtCl_6$ ) (Crites & Tchobanoglous, 2000).

De forma cualitativa el color es usado para estimar la condición general en la que se encuentra el agua residual. Por ejemplo, si se tiene un color café claro aproximadamente son 6 horas después de haber una descarga, caso contrario de un color gris claro es cuando el agua residual ya ha sufrido un grado de descomposición o que tienen un tiempo corto en los sistemas de recolección (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.1.4 Olor**

El olor del agua residual se genera por una gran variedad de compuestos malolientes que son liberados cuando se produce degradación biológica bajo condiciones anaerobias de las aguas. El principal compuesto es el sulfuro de hidrógeno aunque se generan otros compuestos que producen olores más fuertes como indol, eskatol y mercaptanos (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.1.5 Temperatura**

Generalmente la temperatura del agua residual es mayor que a la del abastecimiento, esto como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente de las descargas domésticas. Esta medición es importante ya que en los sistemas de tratamiento de aguas residuales hay procesos biológicos que dependen de la temperatura. También afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y procesos biológicos de los sistemas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.1.6 Conductividad**

Es la medida de la capacidad de una solución para transmitir la corriente eléctrica. Actualmente la importancia de este parámetro es para determinar la posibilidad de uso de una para riego. Esta se expresa en microohms por centímetro (Crites & Tchobanoglous, 2000).

## **2.2.2 Características químicas**

Los constituyentes químicos dentro de las aguas residuales frecuentemente se clasifican en inorgánicos y orgánicos. Los compuestos inorgánicos incluyen elementos individuales y una variedad de nitratos y sulfatos. Los constituyentes inorgánicos de mayor interés comprenden nutrientes, compuestos no metálicos, metales y gases. En el caso de los compuestos orgánicos no pueden ser clasificados de forma separada; son de vital importancia en el tratamiento, vertido y reutilización de aguas residuales de la misma manera los compuesto orgánicos específicos (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.1 pH**

El intervalo adecuado de pH para que se desarrolle la vida tiene un margen estrecho, en un rango de pH 5 y 9, las aguas residuales con valores menores a 5 y superiores a 9 tienen un tratamiento más complicado mediante agentes biológicos. Si dicho pH del agua residual tratada no es ajustado antes de ser vertido nuevamente al cuerpo de agua, el pH de este cuerpo receptor será alterado; de allí la necesidad de que los efluentes de las plantas de tratamiento deben ser descargados dentro de los límites específicos para descargas a cuerpos receptores (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.2 Alcalinidad**

Esta se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos. En aguas residuales, la alcalinidad estará ligada a la presencia de hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio y del ion amonio, la alcalinidad en las aguas residuales ayuda a regular las variaciones en el pH causado por la adición de ácidos. Las aguas residuales comúnmente poseen cierta alcalinidad que se obtiene por el origen mismo de las aguas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.3 Cloruros**

Los cloruros en las aguas residuales son un parámetro importante relacionado con la reutilización de esta, estos en condiciones naturales provienen de los cloruros lixiviados de las rocas y los suelos con los que se tienen contacto. En las aguas residuales los

cloruros son añadidos como consecuencia del uso, las heces humanas tienen un aporte aproximado de 6g de cloruros por persona/ día (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.2.4 Gases**

Se determinan gases disueltos tales como amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno, esto con la finalidad de ayudar en la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las mediciones de oxígeno disuelto y amoníaco se realizan para monitorear y controlar los procesos que tengan un tratamiento biológico aerobio (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.2.5 Oxígeno disuelto**

Es uno de los parámetros clave de la medición de la calidad del agua, los valores de oxígeno varían de 7 a 9 mg/L. La principal fuente de oxígeno es el aire en difusión con el agua, por la turbulencia en los cuerpos de agua y por el viento. Por ejemplo, en los lagos la fotosíntesis es la fuente más importante y en los ríos el nivel de turbulencia que estos posean, determinará tanto la producción primaria como su grado de eutrofización (Roldán, 2003).

Así que la estimación de la contaminación orgánica del agua es compleja, ya que la oxidación de la materia orgánica conduce a un agotamiento del oxígeno disuelto disponible en el cuerpo de agua. Al medir la concentración de oxígeno disuelto, se puede obtener una estimación de cuál es la cantidad de sustancias orgánicas oxidables dentro de ésta (Llorca & Bautista, 2006).

#### **2.2.2.6 Metales**

Los metales tienen interés en la parte de tratamiento, reutilización y vertimiento de los lodos y efluentes ya tratados, ya que todos los organismos necesitan para su adecuado desarrollo elementos tales como hierro, cromo, cobre, zinc en diferentes cantidades. Aunque los metales estén en cantidades micro o macro y sean necesarios para el desarrollo biológico, estos pueden convertirse en tóxicos cuando se presentan en cantidades elevadas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.7 Nitrógeno**

La importancia del nitrógeno radica en que es esencial para la síntesis de proteínas, necesitan conocer sobre la presencia de este nutriente para evaluar el tratamiento del agua residual mediante procesos biológicos. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.8 Fósforo**

Este elemento tiene relevancia en el crecimiento y desarrollo de distintos organismos en un cuerpo de agua, pero ya en cantidades excesivas provoca una proliferación de algas y otros organismos biológicos perjudiciales. Las formas más comunes en las que se puede encontrar el fósforo son los ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. Los ortofosfatos más comunes de las aguas residuales están disponibles para el metabolismo biológico sin necesidad de que los organismos tengan que realizar una ruptura posterior del mismo (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.9 Azufre**

Este se puede encontrar de forma natural tanto en las aguas naturales como en las aguas residuales. Es un elemento indispensable para la síntesis de proteínas en los organismos, por este motivo se libera cuando existe degradación de las mismas, los sulfatos reducen biológicamente a sulfuros en condiciones anaerobias y forman sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) al combinarse con el hidrógeno (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.2.10 Grasas y aceites**

El contenido de estas en aguas residuales se determina por una extracción de muestra de residuo con triclorotrifluoroetano, químicamente tanto las grasas y aceites de origen vegetal o animal son similares, ya que básicamente son ésteres compuestos de ácidos grasos, alcohol y glicerina. Aquellos que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente denominados aceites y los que se han convertido en sólido llamados grasas. La presencia de estos causan muchos problemas en tanque sépticos, en sistemas de recolección y en el tratamiento de aguas residuales (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.2.3 Características biológicas**

Las características biológicas tienen una alta importancia en el control de enfermedades que sean causadas por organismos patógenos de origen humano y por la proliferación o desarrollo de bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica tanto en el medio natural como en una planta de tratamiento de aguas residuales (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.3.1 Bacterias**

Muchas bacterias son inofensivas en el tracto intestinal pero al estar un individuo infectado al momento de excretar en las heces se encuentran una gran cantidad de bacterias patógenas, contaminando de esta manera las aguas residuales domésticas. Los grupos de bacterias más comunes que se pueden encontrar en las aguas residuales domésticas son del género *Salmonella*, del género *Shigella* y *Escherichia coli* (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.3.2 Protozoos**

Entre los organismos causantes de enfermedades los protozoarios *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora* y *Giardia lamblia* son de gran interés ya que tienen un alto impacto sobre la población especialmente las personas con deficiencias en el sistema inmunológico y de este tipo de microorganismos son los más comunes encontrarlos en las aguas residuales (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.3.3 Helmitos**

Los parásitos de esta categoría que pueden encontrarse en las aguas residuales son las lombrices intestinales, por ejemplo *Ascaris lumbricoides*, la tenia solitaria *Taenia saginata* y *Taenia solium*. La etapa infecciosa de estos varía, en algunos se presentan en el estado mayor adulto o de larva y en otros su etapa infecciosa se presenta en el estado de huevo, muchas especies resisten condiciones ambientales adversas y llegan a sobrevivir a distintos tipos de tratamientos convencionales (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.2.3.4 Virus**

En las aguas residuales se pueden presentar las condiciones adecuadas para la proliferación de estos, se han detectado más de 100 clases diferentes de virus entéricos que pueden ser capaces de transmitir algún tipo de infección o enfermedad que provienen de las excretas. La mayoría de estos se reproducen en el tracto intestinal de individuos infectados y luego de ser expulsado en las heces se produce su desarrollo masivo (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.3 TIPOS DE ANÁLISIS DE DISEÑO**

Dentro de las condiciones específicas para un diseño de aguas residuales normalmente, se deberían tener claro los parámetros básicos en relación la naturaleza, la solución óptima y tamaño de la planta de tratamiento con respecto a directrices importantes como la fuente y calidad del agua que se tratará, origen y composición de las aguas residuales que se producen, el orden y topografía del lugar de influencia y sus sectores aledaños, el número de población y el crecimiento estimado de esta (Fair, Geyer y Okun, 1971).

#### **2.3.1 Análisis físico**

##### **2.3.1.1 Sólidos totales**

Es la suma de los sólidos orgánicos e inorgánicos de las aguas residuales, por definición, son aquellos residuos que permanecen una vez que la parte líquida se ha evaporado y el resto se ha secado a peso constante aproximadamente a 103 °C. Se distinguen entre sólidos disueltos y no disueltos al evaporar muestras de aguas residuales filtradas y sin filtrar, con la finalidad de clasificar mejor los residuos se puede mantener a 550°C durante 15 minutos. Donde se puede considerar que las cenizas obtenidas representan los sólidos inorgánicos y que el material volátil es un medida del contenido orgánico (Glynn & Heinke, 1999).

##### **2.3.1.2 Sólidos fijos y volátiles**

En la mayoría de casos se tendrá mayor presencia de sólidos volátiles que de sólidos fijos, y esto sucede debido a la materia orgánica presente que a las sustancias inorgánicas (minerales), por lo que delimita la presencia de contaminación orgánica

derivada de animales, humanos y vegetal. Este parámetro muestra una alta sensibilidad a los efectos estacionales (CATIE, 1988).

### **2.3.1.3 Sólidos suspendidos**

Es una medida de los sólidos sedimentables que no se disuelven y que pueden ser retenidos en un filtro. La determinación de estos se puede realizar pesando el residuo que quede en el filtro después de secarlo, pueden tener un gran impacto donde las aguas sean utilizadas para un proceso con conducción, calderas, equipo (Rigola, 1990).

Los principales impactos que este tipo de material genera se puede mencionar que son poco estéticos son desagradables a la vista lo cual tiene un impacto paisajístico, proveen superficies de adsorción para agentes químicos y biológicos, al degradarse podrían causar productos secundarios perjudiciales y los elementos que se encuentren biológicamente activos pueden ser agentes tóxicos o causantes de enfermedades (Campos, 2003).

### **2.3.1.4 Sólidos disueltos**

También llamados salinidad total, la medida es la cantidad de materia disuelta en el agua, que se determina por la evaporación de un volumen de agua que previamente fue filtrada. Este tipo de material puede tener un origen múltiple, tanto de material orgánico como de inorgánico, se pueden encontrar en aguas subterráneas como superficiales. Los procesos de tratamiento son múltiples en función de la composición del material, donde se incluye la precipitación, intercambio iónico, destilación por mencionar algunos (Rigola, 1990).

## **2.3.2 Análisis químico**

### **2.3.2.1 Demanda química de oxígeno (DQO)**

Este parámetro corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra que sea susceptible de oxidación ante el dicromato o permanganato en un medio ácido (Ramalho, 1993).

Se puede considerar como una medida aproximada de la Demanda Teórica de Oxígeno, tomando en cuenta su función en los compuestos de la muestra tomada, con

dicha aproximación será mejor o peor. Por ejemplo los hidrocarburos aromáticos no se oxidan en su totalidad, caso contrario de algunas sustancias orgánicas que son muy volátiles que se pueden escapar por evaporación y se puede generar oxidación de sustancias inorgánicas como los cloruros y sulfuros (Mendoza, Montañés, & Palomares, 1998).

### **2.3.2.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

Este parámetro se usa como una medida de la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica biodegradable dentro de una muestra y como resultado de la oxidación bioquímica aerobia. En las aguas residuales es el resultado de tres tipos de materiales materia orgánica que es utilizado como fuente de alimentación, nitrógeno oxidable y de compuestos químicos reductores presentes de las reacciones dentro del cuerpo de agua (Ramalho, 1993).

Al haber una gran cantidad de desechos orgánicos en el agua, aumenta la probabilidad de tener más bacterias presentes trabajando en la descomposición, con lo que la demanda de oxígeno será más alta, esto aumenta el nivel de DBO. Cuando se tienen niveles altos de DBO el oxígeno disuelto disminuye porque el oxígeno que está disponible es consumido por las bacterias en los distintos procesos internos del cuerpo de agua, esto afecta a los demás organismos ya que tienen menos oxígeno disponible para sus procesos biológicos (IICA, 2000).

## **2.4 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES**

### **2.4.1 Pre-tratamiento**

#### **2.4.1.1 Cribado o canal de rejillas**

Se emplea para reducir los sólidos en suspensión de distintos diámetros. La distancia de las rejillas dependerá del objeto que tengan las mismas, y la limpieza puede darse de forma manual o mecánica. El material que se obtiene se clasifica en finos y gruesos (Ramalho, 1993).

Para el material fino se utilizan aberturas de 5mm o menos, generalmente son mallas metálicas de acero, placas de acero perforado y pueden llegar a eliminar entre un 5 a

un 25% de sólidos en suspensión. Para el material grueso se utilizan aberturas entre 4, 8 o 9 cm, para evitar que sólidos de grandes dimensiones dañen el equipo (Ramalho, 1993).

#### **2.4.1.2 Desarenador**

El sistema que más se utiliza para retirar la arena es el de tipo rectangular de flujo horizontal, donde los principales elementos son sólidos como arenas, cenizas y grava. Estas pueden causar problemas de operación ya que pueden llegar a acumularse alrededor de las tuberías de entrada provocando una obstrucción de la misma. Este sistema está conformado por una caja o canal, donde los sólidos o partículas se desprenden del líquido por gravedad (Salazar, 2003).

#### **2.4.1.3 Remoción de grasas y aceites**

Las aguas residuales domésticas vienen con una gran carga de estos, cuando se permite el ingreso a los tanques existe la posibilidad que sean descargados al efluente. Estos tienden a acumularse sobre la superficie de los sistemas de tratamiento (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Para la remoción se aplica un sistema de barrido superficial de espuma o natas, al momento de ingresar las aguas residuales pasa a una zona de remoción de grasas por medio de un vertedero control, donde estas se atrapan y se retiran (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **2.4.2 Opciones de Tratamiento Primario**

#### **2.4.2.1 Fosa séptica**

Este sistema se utiliza para recibir la descarga de agua residual proveniente de residencias individuales o de otras instalaciones sin tener una red de alcantarillado para las mismas. Son tanques que tienen como función sedimentar y desnatar, como un digestor anaerobio sin tener que mezclar ni calentar y se convierte en un tanque de almacenamiento de lodos. Si un sistema presenta un tanque séptico además una instalación para disposición del efluente por absorción sobre el suelo, se tendrá un sistema convencional para el manejo de las aguas residuales in situ (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.4.2.2 Tanques Imhoff**

Consiste en un tanque de dos pisos donde la sedimentación se da en el compartimiento superior y la digestión y acumulación de lodos en el compartimiento inferior, este sistema se utiliza para tratamiento para aguas provenientes de zonas residenciales. Las principales ventajas del sistema es que tiene una sencilla operación, no tiene unidades mecánicas que requieran mantenimiento continuo y solo requiere de la remoción de espuma de forma diaria y realizar una inversión del flujo dos veces por mes para lograr una distribución uniforme de los sólidos en ambos extremos del digestor (Crites & Tchobanoglous, 2000).

#### **2.4.2.3 Sedimentador primario**

Este sistema tiene como fin la eliminación de arenas, grasas, aceites, materia en suspensión o cualquier otro sólido suspendido presentes en el afluente de entrada. Las medidas que se establecen de eficiencia se basan en la remoción de los sólidos suspendidos, altura útil, tiempo de retención y tipo de sección transversal del tanque (Niño, Pérez, & Llobregat, 2004).

Un tratamiento de este tipo debería remover la mitad de los sólidos suspendidos del agua residual tratada, la bioxidación se considera despreciable. La ventaja que es de fácil operación y de bajo costo, aunque sus niveles de eficiencia normalmente no alcanzan para cumplir con las normas de calidad de agua (Campos, 2003).

#### **2.4.2.4 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)**

Como lo indica presenta un flujo ascendente y la parte superior cuenta con un sistema que separa gas-líquido-sólido, lo que evita la salida de los sólidos del efluente y ayuda a una mejor evacuación del gas. La debilidad de este proceso radica en la lentitud del proceso de arranque del reactor, es necesario darle uniformidad al caudal, corrección de pH continua y requiere un mayor cuidado versus otras alternativas (Salazar, 2003).

Otra limitante es que en climas templados y subtropicales no ha sido muy utilizado por limitaciones de temperatura, ya que esta afecta la tasa de hidrólisis del material

particulado, lo cual conlleva a una reducción de la eficiencia del tratamiento (Calvache, *et al*, 2002).

### **2.4.3 Opciones de Tratamiento secundario**

#### **2.4.3.1 Filtro anaerobio**

Son también conocidos como filtros sumergidos, este tipo de sistema está diseñado para que se lleve a cabo un tratamiento anaerobio por medio de un crecimiento de biomasa por adherencia. La principal diferencia ante un filtro percolador es que la alimentación del agua residual se da por el fondo del sistema y el producto final abandona por la parte superficial o superior. El material se encuentra completamente sumergido en el agua residual entrante y por ello no hay presencia de aire en absoluto, de esta manera crea las condiciones anaerobias necesarias para su funcionamiento. La única problemática significativa que presenta cuando se tienen elevadas concentraciones de sólidos en suspensión puede obstruir el filtro lo cual dañaría el sistema (Ramalho, 1993).

#### **2.4.3.2 Lagunas de estabilización**

Las lagunas son balsas con una profundidad entre 1 a 4 metros dependiendo del tipo de laguna, en la cual se realiza una oxigenación del agua residual mediante aireadores superficiales, turbinas o difusores (Ramalho, 1993).

Existen diferentes tipos de lagunas en base a sus características y sus niveles de depuración tanto para tratamiento primario, secundario e inclusive terciario, pueden ser:

#### **2.4.3.3 Lagunas facultativas**

Tiene una profundidad que varía de 1.5 a 2 metros y una carga de materia orgánica por unidad de volumen, que favorezca el crecimiento de microorganismos aeróbicos y facultativos (estos últimos pueden desarrollarse con o sin oxígeno). Es del tipo de laguna más utilizada porque requieren menos terreno que cualquiera de las otras y la producción de olores es menor (Salazar, 2003).

#### **2.4.3.4 Lagunas aerobias**

Tienen poca profundidad no más de 80 cm, con lo que se propicia el crecimiento y desarrollo de algas las cuales suministran gran cantidad de oxígeno necesario para el funcionamiento de la laguna. Sus principales desventajas son que se necesita una extensión grande de terreno y no puede utilizarse directamente con las aguas residuales crudas sino que necesitan un pre-tratamiento para luego pasar a la laguna (Salazar, 2003).

#### **2.4.3.5 Lagunas de maduración**

Tienen un tiempo de retención aproximado en 3 y 7 días ya que reciben el afluente de una laguna facultativa o de otro proceso biológico anterior. La principal función de este tipo de laguna es lograr una alta calidad microbiológica, es decir, eliminar patógenos hasta niveles deseados (Riquelme & Gómez, 2003).

#### **2.4.3.6 Humedales**

Su funcionamiento es parecido al de las lagunas, con la diferencia que se utilizan plantas acuáticas en vez de algas, las cuales brindan el oxígeno para el desarrollo de las bacterias. Hay que tomar en cuenta que se necesita una cosecha de las plantas periódicamente, con lo que el proceso requiere de más atención que en una laguna (Salazar, 2003).

Pero las ventajas que presentan son bajos costos de explotación, gran calidad en del afluente al final del proceso, y una parte importante en cuestión de paisaje ya que puede integrarse al entorno. También son más flexibles y con menor susceptibilidad a las fluctuaciones que pueden haber en relación con la carga contaminante (Ramos & Márquez, 2002).

### **2.5 Opciones de Tratamiento y reuso de lodos y agua tratada**

Los lodos que se extraen de las distintas fases de tratamiento consisten de 80-99% de agua por peso, en los cuales se concentran los patógenos con lo cual es necesario un tratamiento o estabilización para reducir los patógenos y eliminar olores que resulten ofensivos (Salazar, 2003).

El tratamiento para estabilizar los lodos consiste en aplicar ya sea químicos o una combinación entre tiempo y temperatura para la remoción o transformación de los patógenos y los componentes orgánicos que puedan producir los malos olores. Una vez tratados se dispone de un proceso para secar el agua en exceso para facilitar el reuso o disposición final (Salazar, 2003).

### **2.5.1 Digestión anaerobia**

Consta de un proceso de descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno, la metodología consiste en introducir el lodo en un tanque cerrado y en el cual liberará gas (principalmente metano). Este se calienta a través de un intercambio de calor externo (Salazar, 2003).

### **2.5.2 Tratamiento con cal**

Si el volumen de los lodos es poco y no se cuenta con suficiente espacio para secarlos o se encuentra cerca de una zona urbana, se toma la alternativa de esterilización con alteración de pH con cal, con la finalidad de elevar el pH a los lodos a 12 por 30 minutos (Salazar, 2003).

### **2.5.3 Compostaje, particularmente co-compostaje con residuos orgánicos**

Se mezcla los lodos como basura orgánica en un proceso de compostaje, con esto se genera una acción exotérmica (70°C) de las bacterias, liberando a los mismos de los agentes patógenos (Salazar, 2003).

### **2.5.4 Patio de secar**

Es la forma de tratamiento de lodos más sencillo, ya que el lodo tiene mucho contenido líquido; se coloca el lodo en una plataforma de ladrillo, la base está conformada por diferentes tipos de suelos con la función de filtrar el residuo líquido de los lodos. Utilizando la radiación solar se deshidratan los lodos hasta que se vuelvan sólidos, este sistema dependiendo de factores como la temperatura solar, intensidad de lluvias, humedad de los suelos y la ubicación tendrá un periodo de secado que varía de 3 a 6 meses (Salazar, 2003).

### **2.5.5 Reuso de subproductos.**

Cualquiera que sea el sistema de tratamiento implementado se considera como objetivo principal la reducción o eliminación de los agentes contaminantes provenientes de las aguas residuales. Al culminar los procesos de tratamiento se obtendrán aguas residuales tratadas y lodos, que pueden ser utilizados nuevamente en distintas actividades dependiendo del uso que se le quiera dar.

Con el tratamiento adecuado el reuso no ocasiona deterioro de los suelos, aguas subterráneas, ni acumulación de agentes patógenos ya que se obtienen productos de calidad. Tomando en cuenta los riesgos que ocasionarían para la salud, beneficios, aceptación de la población; basándose en la garantía de un tratamiento adecuado y apoyándose en la normativa vigente del país (Torres, 2000).

### **2.5.6 Reuso de agua tratada**

Las aguas residuales de tipo doméstico pueden ser utilizadas en muchas áreas tanto económicas como cotidianas, por ejemplo, para el riego agrícola, riego de árboles y plantas en corredores de transporte, procesos industriales, cría de peces, relleno de acuíferos, etc. (Salazar, 2003).

En la agricultura puede presentar ventajas al ser un recurso de agua estable y constante que brinde los nutrientes para las plantas. Sin embargo, la reutilización no ha sido muy promovida en Latinoamérica ya que aún se les considera responsables de la mayoría de los problemas sanitarios (Salazar, 2003).

### **2.5.7 Reuso de lodos**

El lodo ya tratado y estabilizado que se genera puede ser valioso como fuente de nutrientes y como acondicionador del suelo, puede tener aplicación en la agricultura como fertilizante. Las ventajas que brinda es que permite una mayor retención de la humedad, adiciona al suelo los nutrientes necesarios para las plantas y facilita retención al suelo, además de incrementar la actividad biológica del suelo y con su uso disminuir la aplicación de fertilizantes químicos (Salazar, 2003).

## 2.6 NORMA DE CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES

### 2.6.1 Límites máximos permisibles

Acuerdo Gubernativo 236-2006, Artículo 24. Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales y de urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público. Las municipalidades o empresas encargadas del tratamiento de aguas residuales del alcantarillado público y las urbanizaciones existentes no conectadas al alcantarillado público, cumplirán con los límites máximos permisibles para descargar a cuerpos receptores de cualquiera de las siguientes formas:

**Cuadro 1.** Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores.

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Fuente: (Acuerdo gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”)

**Cuadro 2.** Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para aguas residuales municipales

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro	Dos de mayo de dos mil veintinueve
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	100	50	10	10	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	700	250	100	100	100
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	300	275	200	100	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	150	70	20	20
Fósforo total	Miligramos por litro	50	40	20	10	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^7$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	1	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	3	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.02	0.02	0.01	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	2	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	0.4	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1000	750	500	500

Fuente: (Acuerdo gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”)

## 2.7 ANTECEDENTES

En la región de Alta Verapaz hay varios municipios preocupados en la actualidad por la calidad del agua debido a la gran presión que se está generando sobre el recurso hídrico. Es por ello que se han realizado esfuerzos en el tratamiento de aguas residuales. La municipalidad de Cobán, actualmente se encuentra ejecutando un sistema de tratamiento para aguas residuales que tiene como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango convenientes para su disposición o rehúso (Municipalidad de Cobán, 2010).

Este sistema de tratamiento se compone de un reactor anaerobio, dos filtros percoladores, dos cajas de bombeo y un patio de secado de lodos. La construcción de este sistema incluye tubería para la red principal, conexión domiciliar (para cada vivienda), pozos de visita y planta de tratamiento; beneficiando con este proyecto a más de 800 familias (Municipalidad de Cobán, 2010).

También está el caso de la construcción del sistema de tratamiento de aguas residuales del área urbana en Santa Cruz, Alta Verapaz, cuyo proyecto comprende de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con una vida útil de 35 años cuya ubicación es en la zona urbana de la cabecera municipal con una superficie estimada del proyecto de 400 metros cuadrados. El estado actual de este proyecto se encuentra en la fase de ejecución (SINIP, 2012).

En otros municipios a pesar de contar con medidas de mitigación estas no se utilizan, por ejemplo en Santa Cruz, Alta Verapaz, el cual posee los sistemas de drenajes establecidos para el área urbana, plantas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo no están en funcionamiento; así también en la comunidad Peña del Gallo existe una planta de tratamiento pero no se le brinda el mantenimiento adecuado para evitar la degradación del recurso hídrico. La tala inmoderada de árboles, el mal uso del

suelo y el manejo inadecuado de la cuenca de los ríos del municipio, contribuyen al deterioro ambiental que aumenta las amenazas para la población (SEGEPLAN & Consejo Municipal de Desarrollo de Santa Cruz, 2010).

En relación con el municipio de San Juan Chamelco, éste no posee ningún tipo de tratamiento para las aguas residuales. Tomando en cuenta las principales características relacionadas a las condiciones que presenta el municipio para elaborar la propuesta de una planta de aguas residuales se detallan las siguientes:

La cabecera municipal está localizada a 15° 25' 20" de latitud norte, 90° 19' 20" de longitud este, una altura sobre el nivel del mar de 1393 metros y posee una extensión territorial de 80 km<sup>2</sup>. Cuenta con una población en la que el 25% del total de sus habitantes pertenecen al área urbana y el 75% al área rural, el total de habitantes para el año 2007 era de 49,741 de los cuales el 90% son indígenas (Pacay, 2009).

En las condiciones climáticas, es predominante el clima templado lluvioso, muy húmedo y con una estación seca, aproximadamente son ocho meses de lluvia al año y una precipitación anual de 2,181 mm. La temperatura oscila entre los 18.7 a 23 °C con una altura máxima promedio de 1900 metros sobre el nivel del mar. Se marcan dos estaciones verano e invierno, la humedad del suelo y el ambiente se caracterizan notablemente debido a la precipitación pluvial que oscila entre 200 días anuales. Se presenta un promedio de humedad del 81% anual; un promedio de 161 horas de insolación y un promedio anual de viento de 4.2 kilómetros por hora (Pacay, 2009).

Con respecto a las corrientes hidrográficas del municipio, unas se dirigen hacia el río Polochic y otras hacia el río Cahabón. El área urbana cuenta con dos secciones de abastecimiento: Sacampana y Xucaneb, un alto porcentaje de las aguas son alcalinas. Además se encuentran varias quebradas que son de uso colectivo y permiten el abastecimiento de agua en la zona rural. El sistema hidrográfico muestra 4 zonas importantes la sub-cuenca Río Chicoy, sub-cuenca Río Tzunutz, sub-cuenca Río Cucanjá y área de captación Río Polochic (Pacay, 2009).

Se encuentran tres series de suelos principales; series de suelos de Carchá que son profundos, bien drenados, desarrollados sobre ceniza volcánica blanca de grano fino en climas húmedos y ocupan relieves de ondulados; serie de suelos de Tamahú, que son suelos poco profundos excesivamente drenados, desarrollados sobre caliza en un clima húmedo a húmedo seco y ocupan relieves inclinados; y series de suelos de Telemán, que son moderadamente profundo, bien drenados, en un clima cálido, húmedo o húmedo seco (Pacay, 2009).

Para el abastecimiento del área urbana, se cuenta con nacimientos de captación, el fluido es conducido a un tanque de recaudación de caudales donde recibe el proceso de cloración y luego para a un tanque de distribución, la población del área rural se abastece de agua de ríos o nacimientos. El 57% de los hogares cuentan con servicio de agua en chorro y el 43% restante utiliza agua de pozo, camión o río (SEGEPLAN, 2004).

De los sistemas de drenaje las descargas van directamente a desembocar en los cuerpos de agua que es una de las principales razones por la cual se ha contaminado los ríos de la región. Solo el área urbana cuenta con el sistema de drenajes y alcantarillado, el área rural carece de drenajes con lo cual las aguas residuales y pluviales corren directamente sobre los suelos (SEGEPLAN, 2004).

Dentro del municipio se llevan a cabo 4 diferentes actividades productivas: actividad agrícola, donde los principales cultivos son el maíz, frijol, repollo, café, té, cardamomo y aguacate; actividad pecuaria, que está dedicada básicamente al ganado vacuno y porcino; actividad artesanal, enfocados en la fabricación de hamacas, lazos, petates, elaboración de textiles y actividad comercial, donde los habitantes del área rural en su mayoría se dedican a comercializar productos agrícolas y forestales (SEGEPLAN, 2004).

### **III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Actualmente existe poco o ningún interés en la mayoría de las municipalidades del país en implementar acciones tendientes al tratamiento y manejo de desechos sólidos y líquidos, que en muchos casos son vertidos a suelo abierto o en los cuerpos de agua, ocasionando problemas ambientales que derivan en contaminación de suelos, fuentes de agua, reservorios y ríos. Este manejo inadecuado genera un impacto negativo en el ser humano especialmente en la salud, de igual manera en su actividad económica y social, además de afectar los ecosistemas naturales circundantes.

El municipio de San Juan Chamelco no es la excepción, en torno a esta problemática ya que no cuenta con tratamiento para aguas residuales dentro del perímetro urbano, las cuales son vertidas directamente a los ríos Chío y Chiché cuyos cuerpos de agua se encuentran contaminados, de los cuales se obtiene el recurso hídrico utilizado por los habitantes del área rural para los servicios básicos, incidiendo de manera nociva en una calidad de vida saludable.

Es importante indicar que, la distribución de agua potable únicamente se da para el área urbana, situación adversa para el área rural donde se obtiene agua del río, como se acotó anteriormente o también de pozos o agua entubada, resignificando aún más la importancia de contar con una planta de tratamiento de aguas residuales a nivel del municipio e influir positivamente para evitar, enfermedades gastrointestinales, dermatológicas, contaminación de alimentos y aumento de vectores peligrosos lo que conlleva a un aumento en la mortalidad infantil porque no cuentan con medidas preventivas, aunado a las condiciones de pobreza o extrema pobreza en el área rural.

En relación con el impacto ambiental que esta situación genera sobre los cuerpos de agua receptores, se cita también las alteraciones sobre los ecosistemas acuáticos, provocando así su eutrofización. Asimismo las aguas residuales aportan cantidades

excesivas de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y otros contaminantes reduciendo el oxígeno del cuerpo de agua provocando la modificación de sus condiciones físicas, químicas y biológicas.

Con el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se propone mitigar los impactos negativos que se plantearon anteriormente. Con la implementación de ésta, se logrará el adecuado manejo de las aguas residuales, contribuyendo a la mejora del ambiente y a la calidad de vida de los habitantes del municipio.

El establecimiento de la metodología debe ser acorde al tipo de tratamiento así como a las necesidades de la planta, debiendo satisfacer las demandas y requisitos de los efluentes. Ya que el sistema utiliza un proceso físico, biológico y químico en sus fases, desde un tratamiento primario, tratamiento secundario; para reducir los contaminantes y mejorar la calidad del afluente por lo tanto pueden ser retornados al cauce del río o aprovecharlos en sistemas de riego.

Cabe destacar que este proyecto además de ser una herramienta valiosa para el municipio, cuenta con un componente importante como lo es la fundamentación contenida en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”, por lo que se sustenta en una normativa que esgrime la base para establecer los estándares de calidad necesarios de posibles usos de las aguas y lodos, en actividades productivas o económicas.

Partiendo del anterior análisis se visualiza, que se reducirán las cargas contaminantes a los cuerpos de agua, propiciando la generación de mejores condiciones a la calidad del agua, evitando la continuidad en el deterioro ambiental, logrando de manera colateral un beneficio socio-económico para la comuna, por lo que se constituye en una ventaja comparativa al crearse otros derivados que pueden obtenerse dentro de la gestión municipal.

## **IV. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas actuales del agua residual del municipio.

Proponer un diseño de planta de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo a las necesidades del municipio.

Proponer la reutilización del agua tratada y de los lodos para las actividades económicas agrícolas, pecuarias y forestales dentro del municipio.

## **V. METODOLOGÍA**

### **5.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales se realizó en el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz. El cual se encuentra a 8 kilómetros de la cabecera departamental Cobán y a 219 kilómetros de la capital de Guatemala. Posee una extensión territorial de 80 km<sup>2</sup> a 15° 25' 20" de latitud norte, 90° 19' 20" de longitud este y una altura sobre el nivel del mar de 1900 metros (PROMUDEL, 2011).

### **5.2 UNIDADES DE ANÁLISIS**

Para llevar a cabo el proceso investigativo se tomó en cuenta al 25% de la población del área urbana del municipio, en virtud de que esta cuenta con el sistema de drenajes. La unidad de análisis sujeta a estudio fue el agua residual recolectada en el área de desfogue del drenaje municipal, ya que las mismas son vertidas sin tratamiento hacia los cuerpos de agua, por lo que la medida de mitigación que se plantea, conlleva la mejora y el aprovechamiento del recurso hídrico.

### **5.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación es de tipo descriptivo, ya que inicialmente se conocieron aspectos relacionados a la calidad del agua residual, información de servicios básicos y generales del municipio. Con los parámetros analizados se logró determinar que existe un nivel de contaminación de los cuerpos de agua y con base a los resultados se desarrolló la propuesta, para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, acorde a las necesidades poblacionales.

### **5.4 INSTRUMENTO**

Para llevar a cabo la recolección de datos sobre población, servicio de agua y de la disposición final de la misma, se realizó para ello un acercamiento a las Oficina de

Planificación Municipal, de Agua y Saneamiento ambas de la Municipalidad de San Juan Chamelco y del Instituto Nacional de Estadística (INE).

En línea con lo anterior, la investigación requirió de equipos específicos para la medición de parámetros a evaluar, como el medidor multiparámetros Hanna HI 255, papel de pH, termómetro ambiental, recipientes plásticos estériles (800 ml), una hielera (1 galón), guantes de látex, un recipiente de 5 galones y un GPS Garmin Etrex Venture.

De igual forma se tomaron muestras del agua residual en el área de desfogue municipal para ser analizadas en el laboratorio, donde se evaluaron parámetros fisicoquímicos como fósforo, nitrógeno, turbiedad, DQO, DBO, níquel, cadmio, plomo, color, cianuro, cromo hexavalente, coliformes fecales, materia flotante, sólidos sedimentables y sólidos en suspensión mediante un espectrofotómetro y un nefelómetro tomando como referencia el método de “Standard methods for the examination of water and wastewater”.

El software ArcGIS fue utilizado para la elaboración de mapas del municipio de San Juan Chamelco asimismo el software Google Sketchup 8 para la elaboración de los planos de las distintas unidades del sistema de la planta de tratamiento de aguas residuales.

La información recabada, permitió con datos concretos la aplicación de fórmulas matemáticas para establecer las medidas de diseño en las distintas fases (véase anexo 3, fórmulas de diseño)

## **5.5 PROCEDIMIENTO**

### **5.5.1 Recopilación de datos**

La primera fase permitió el análisis de las características fisicoquímicas, servicio de agua potable, zonas de captación, condiciones climáticas y zona de desfogue del agua residual del municipio, realizando visitas de inspección a la localidad para la búsqueda de datos básicos, bibliografía e información pertinente para la elaboración del diseño.

La información requerida fue la red de drenajes del municipio, la cantidad de población con acceso a agua potable, la dotación diaria, donde se encontraba ubicada el área de disposición final de las aguas residuales y las variaciones de servicios básicos en distintas estaciones del año. Se investigaron las principales deficiencias del sistema de agua y se realizó la caracterización de las aguas residuales domésticas, con la finalidad de recabar la información necesaria para realizar un diagnóstico preliminar.

### **5.5.2 Fase de muestreo**

Otra fase importante fue realizar la actividad de campo la cual consistió en ubicar las zonas de recarga hídrica, zona de captación de agua y en la zona donde se efectúan las descargas del agua residual municipal las que se georeferenciaron. Se procedió a la toma de muestras en la zona de descargas del municipio y el segundo punto antes del desfogue de las aguas residuales al cuerpo de agua, para analizar los parámetros fisicoquímicos del agua residual. Se tomaron parámetros iniciales de caudal ( $m^3/s$ ), temperatura ( $^{\circ}C$ ), pH (unidades), sólidos disueltos (ppm), oxígeno disuelto, conductividad ( $\mu S/cm$ ) con un medidor multiparámetros Hanna HI 255 y un termómetro, además de tomar las coordenadas y altitud de la zona por medio de un GPS Garmin Etrex Venture.

Se tomaron muestras en la zona de descarga para el análisis de laboratorio, estas fueron recolectadas en recipientes de plástico transparentes esterilizados de 800 milímetros para sólidos sedimentables, sólidos en suspensión, DBO, DQO, nutrientes y compuestos inorgánicos y envases de vidrio de 500 milímetros para compuestos orgánicos, grasas y aceites, que fueron refrigeradas en una hielera a una temperatura de  $0^{\circ}C$  a  $4^{\circ}C$  y en oscuridad, tiempo suficiente para conservar la muestra en un período de tiempo de 24 horas para su posterior traslado al laboratorio.

La toma de la muestra compuesta que se colectó es una porción representativa de un período de muestreo de 24 horas y se dividió en 5 ciclos de 2 horas, es decir, se colectaron muestras simples en un tiempo definido, realizando el primer muestro a las 8:00 a.m. y finalizando el proceso de muestreo a las 4:00 p.m., por último se mezclaron al término del periodo establecido de tiempo en un recipiente estéril de un galón para

obtener una muestra representativa, para que la muestra fuera homogénea y tuviera las mismas características del cuerpo de agua.

En el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos y Microbiológicos (LAFYM) se utilizó un espectrofotómetro y un nefelómetro en el cual se determinaron los parámetros de fósforo (mg/L), nitrógeno (mg/L), DQO (mg/L O<sub>2</sub>), DBO, grasas y aceites (mg/l), sólidos suspendidos (ml/l), sólidos sedimentables, cadmio (ml/l), cobre (ml/l), cromo hexavalente (ml/l), cianuro total (ml/l), níquel (ml/l), plomo (ml/l), zinc (ml/l), color (unidades platino cobalto), coliformes fecales (número más probable en cien mililitros), materia flotante (ausente/presencia) y turbiedad (Unidades Nefelométricas de Turbiedad).

### **5.5.3 Análisis de datos**

Con los datos obtenidos se llevó a cabo una segunda fase para determinar desde la base de los parámetros obtenidos la alternativa adecuada para tratar las aguas residuales, realizando para ello el ordenamiento y análisis de la información comparando con los límites máximos permisibles del Acuerdo Gubernativo 236-006 en su primera fase de cumplimiento. Esta información determinó la base del diseño, el grado de tratamiento necesario y se procedió a la selección del proceso para las aguas residuales del municipio. Identificando las unidades a ser construidos y susceptibles de ser operadas con eficiencia y eficacia.

En la tercera fase se evaluaron las opciones de reutilización del agua tratada y de los lodos para actividades económicas de la población, para lo cual se tomaron en cuenta los valores obtenidos de los muestreos y la comparación con el Acuerdo Gubernativo 236-2006 para establecer qué sistema era aplicable. Desde la fase del pre-tratamiento, la capacidad de entrada y las rejillas, tratamiento primario, el tipo de sedimentadores y tamaño de los mismos, tratamiento secundario y dimensiones de los tanques, la disposición final y extensión de los campos de secado de lodos. Finalmente se hizo la planimetría general de la obra, la ubicación de las unidades de tratamiento.

De igual manera se define un aporte sobre la reutilización del agua y lodos después de tratados para las actividades productivas o básicas del municipio como riego o la capacidad de utilizar los lodos en mejora del suelo para cultivos, tomando como base el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” para logro de un mejor rendimiento.

Una fase final valiosa de contribución para el municipio de San Juan Chamelco lo constituye la elaboración de mapas utilizando el software ArcGIS, al culminar con la fase de análisis y con los valores obtenidos se diseñaron los planos correspondientes para las unidades de la planta, por medio del software de diseño Google SketchUp 8.

## **5.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

Para llevar a cabo el análisis de la información se utilizó como guía el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” este ejercicio consistió en comparar los datos obtenidos de los muestreos y si la calidad del agua se encontraba dentro de los límites máximos permisibles o si estos excedían los límites.

Dentro de la perspectiva anterior, se tomaron los resultados de las muestras obtenidas y en qué rangos se encontraban para seleccionar la metodología en cada una de sus fases, ya que se contó con la información para determinar con qué tecnología se lograría reducir la contaminación y con ello cumplir con los parámetros establecidos. Esto fue realizado haciendo una comparación de los niveles de reducción de contaminantes de las distintas fases y valores obtenidos en la fase de muestreo del agua residual.

Tomando esta referencia, se elaboró un cuadro comparativo en el que se establecieron los valores obtenidos del análisis fisicoquímico y microbiológico del agua residual, el límite máximo permisible para cada parámetro en la primera fase de cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006. Con ello se estableció el nivel de remoción de contaminantes de cada tecnología, con la finalidad de demostrar que la alternativa propuesta tiene las ventajas necesarias para lograr la mayor eficiencia del sistema.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente investigación se analizó la calidad de las aguas residuales del municipio de San Juan Chamelco tomando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las mismas para la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales acorde a las condiciones presentadas por las aguas residuales a tratar. Los resultados obtenidos y su discusión se presentan a continuación.

### 6.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA RESIDUAL DEL MUNICIPIO

**Cuadro 3.** Comparación agua residual municipal con el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Parámetro	Resultado agua residual San Juan Chamelco	Valor Acuerdo Gubernativo 236-2006, Etapa Uno*	Valores esperados de PTAR
Temperatura	10 °C / 4 °C (T cuerpo receptor)	TCR +/- 7	5 °C
Color	217.0 u Pt/Co	1000 Pt/Co	217.0 u Pt/Co
pH potencial de hidrogeno	6.98 mg/l	6 a 9 mg/l	6.98 mg/l
Cadmio	0.029 mg/l	0.1 mg/l	0.029 mg/l
Níquel	0.33 mg/l	2 mg/l	0.33 mg/l
DQO	270.0 mg/l	-	-
DBO <sub>5</sub>	216.0 mg/l	250 mg/l	24.58 mg/l
Plomo	0.00 mg/l	0.4 mg/l	0.00 mg/l
Nitrógeno total	0.5 mg/l	150 mg/l	0.5 mg/l
Grasas y aceites	22.3 mg/l	50 mg/l	0 mg/l
Sólidos suspendidos	31.0 mg/l	275 mg/l	0 mg/l
Fósforo Total	3.9 mg/l	40 mg/l	3.9 mg/l
Cobre	0.49 mg/l	3 mg/l	0.49 mg/l
Cianuro	0.003 mg/l	1 mg/l	0.003 mg/l
Zinc	0.06 mg/l	10 mg/l	0.06 mg/l
Cromo hexavalente	0.54 mg/l	0.1 mg/l	No aplica
Materia flotante	Presente	Ausente	Ausente
Coliformes fecales	5.0 x 10 <sup>7</sup> NMP/100 ml	< 1x10 <sup>7</sup> NMP/100 ml	2.5 x 10 <sup>6</sup> NMP/100 ml

Fuente: elaboración propia.

\*Etapa Uno de acuerdo al artículo 24 del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

En el cuadro anterior se compararon los valores de contaminación en relación con el valor de la primera fase del Acuerdo Gubernativo 236-2006 de descargas para aguas municipales y los valores obtenidos de la muestra compuesta realizada, donde se comprueba que la mayoría de los parámetros se encuentran por debajo del límite permisible, estos valores son un indicativo de que existe una contaminación al cuerpo de agua.

Los valores significativos que se encuentran por arriba del límite permisible fueron el cromo hexavalente, coliformes fecales, temperatura y la materia flotante. También el valor de DBO<sub>5</sub> se encuentra cerca del valor del reglamento, este parámetro es uno de los más importantes a tomar en cuenta al momento del diseño final del sistema de tratamiento y de los cuales se desean que exista una mayor remoción.

Los parámetros de materia flotante, temperatura (4°C, T° cuerpo de agua) y coliformes fecales también se encuentran por arriba del límite permisible, debido a que la mayoría de materia que se descarga en las aguas residuales tipo ordinarias es materia orgánica, por lo que es común que este tipo de parámetros se hagan presentes.

Uno de los parámetros más representativo al cual hay que darle importancia por las características peculiares que tiene es el cromo hexavalente, ya que éste es peligroso a nivel ambiental, de flora y fauna así mismo a nivel humano, a concentraciones altas puede ser mortal. Si se toma en cuenta que el agua del cuerpo receptor es utilizada para múltiples actividades en el municipio por no contar con un tratamiento adecuado, puede tener repercusiones adversas en la población.

En relación a este parámetro genera inquietud, según lo indicado por la Municipalidad en este sector se vierten únicamente aguas residuales ordinarias y no debería hacer presente, más aún con la condicionante que se encuentra por arriba del límite permisible. El cromo hexavalente aparece generalmente en aguas residuales industriales, lo cual genera una incertidumbre porque no está reportado que exista

actividad industrial dentro del área urbana del municipio. Por lo anterior se hace necesario indagar la procedencia de este contaminante, para su correcto manejo.

## **6.2 CÁLCULO POBLACIÓN FUTURA**

Para este tipo de iniciativas socio/ambientales se debe realizar una proyección comúnmente a 25 años tiempo de vida útil de una planta de tratamiento, tomando como base la población actual del área urbana que es de 11,977 habitantes a un periodo de 25 años y a una tasa de crecimiento poblacional urbana del municipio de San Juan Chamelco del 3% (Osorio, 2013).

$$N_t = (1+r)^{25}$$

$$N_t = 11,977 (1 + 0.03)^{25}$$

$$N_t = 11,977 (2.0937)$$

$$N_t = 25,077$$

La población final al periodo de diseño a 25 años será de 25,077 habitantes en el área urbana lo que valida con propiedad llevar a cabo este proceso.

## **6.3 CÁLCULO DE CAUDAL DE AGUA POTABLE Y CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES PROYECTADO**

La proyección del caudal del agua potable y del caudal de aguas residuales para los 25 años que se prevee para la planta de tratamiento y con estos caudales serán con los que se opere y se tratarán en las unidades del sistema. Este es un parámetro clave para la implementación de esta tecnología ya que se manejará acorde a los niveles de caudal, que se alcancen en el tiempo estipulado.

### **6.3.1 Cálculo caudal medio de agua potable**

$$Q_m = P_f \times \text{dotación agua potable}$$

$$Q_m = 25,077 \text{ hab} \times 150 \text{ L/día}$$

$$Q_m = 3,761,550 \text{ L/día}$$

### 6.3.2 Cálculo caudal medio de aguas residuales

$$Q_{mar} = Q_m \times 0.75$$

$$Q_{mar} = 3,761,550 \times 0.75$$

$$Q_{mar} = 2,821,162.5 \text{ L/día}$$

## 6.4 MEDICIÓN DEL CAUDAL DEL DRENAJE MUNICIPAL

Al conocer el caudal proyectado, también fue necesario ubicar el caudal actual de las aguas residuales para establecer el comportamiento del mismo durante un día. Lo cual permitió identificar cuáles eran los momentos pico de descarga y los momentos de menor descarga. Esto con la finalidad de contar con un dato real del alcance que tiene el desfogue de las aguas residuales, al cuerpo receptor.

**Cuadro 4.** Medición de caudal diario

Hora	Volumen	Tiempo	Caudal
8:00 a.m.	18.9 litros	3.17 segundos	5.96 l/seg
10:00 a.m.	18.9 litros	4.21 segundos	4.48 l/seg
12:00 p.m.	18.9 litros	5.32 segundos	5.32 l/seg
2:00 p.m.	18.9 litros	4.39 segundos	4.30 l/seg
4:00 p.m.	18.9 litros	3.22 segundos	5.86 l/seg

Fuente: elaboración propia. (06 de febrero del 2014)

Los cálculos anteriores de caudal del drenaje municipal, fueron realizados durante un día en cinco horarios distintos con lo cual se conocería el comportamiento normal diario de las descargas de aguas residuales del municipio, con ello se observó la variación significativa del comportamiento del flujo del agua residual diario, para poder realizar un análisis de los horarios en los que más descargas pueden haber.

Con base a este proceso se logró determinar la existencia de tres horas pico 8:00 a.m, 12:00 p.m. y 4:00 p.m, a estas horas se presentó un mayor caudal en relación con las otras dos horas calculadas. Debido a que en estos horarios la población tiene un mayor uso de agua potable y concuerda con que las actividades que las personas realizan como los es, el uso de sanitarios, regaderas, lavatrastos entre otros.

## **6.5 PARÁMETROS DE DISEÑO Y SISTEMA PROPUESTO**

Para el diseño de fases y unidades de tratamiento de las aguas residuales ordinarias del municipio de San Juan Chamelco, se utilizaron datos anteriormente mencionados como, el análisis de laboratorio de la caracterización de las aguas residuales realizando una comparativa con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, la población proyectada a un periodo de vida útil del proyecto de 25 años de igual forma las mediciones del caudal en el punto de desfogue al cuerpo receptor y las condiciones climáticas prevaecientes.

Se propone una planta de tratamiento compuesta por un pre-tratamiento que incluye un canal de entrada y bypass, rejillas, un desarenador, un medidor de caudal Parshall, una trampa de grasas, un tratamiento primario que consta de un sedimentador primario rectangular, un tratamiento secundario con un filtro percolador y tratamiento para lodos que contiene un digestor de lodos y un patio de secado.

Las etapas del sistema fueron seleccionadas desde el punto de vista operativo, ya que tienen menor complejidad mecánica en cada una de sus unidades, lo que facilita la integración del personal que operará la planta, asimismo que estos generen menores inconvenientes a todo nivel social, económico y ambiental, pero conservando el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006 y de esa manera mitigar la problemática que ha ido en aumento.

Vista final de la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta, que cumple con las especificaciones necesarias, se observan en el siguiente plano:

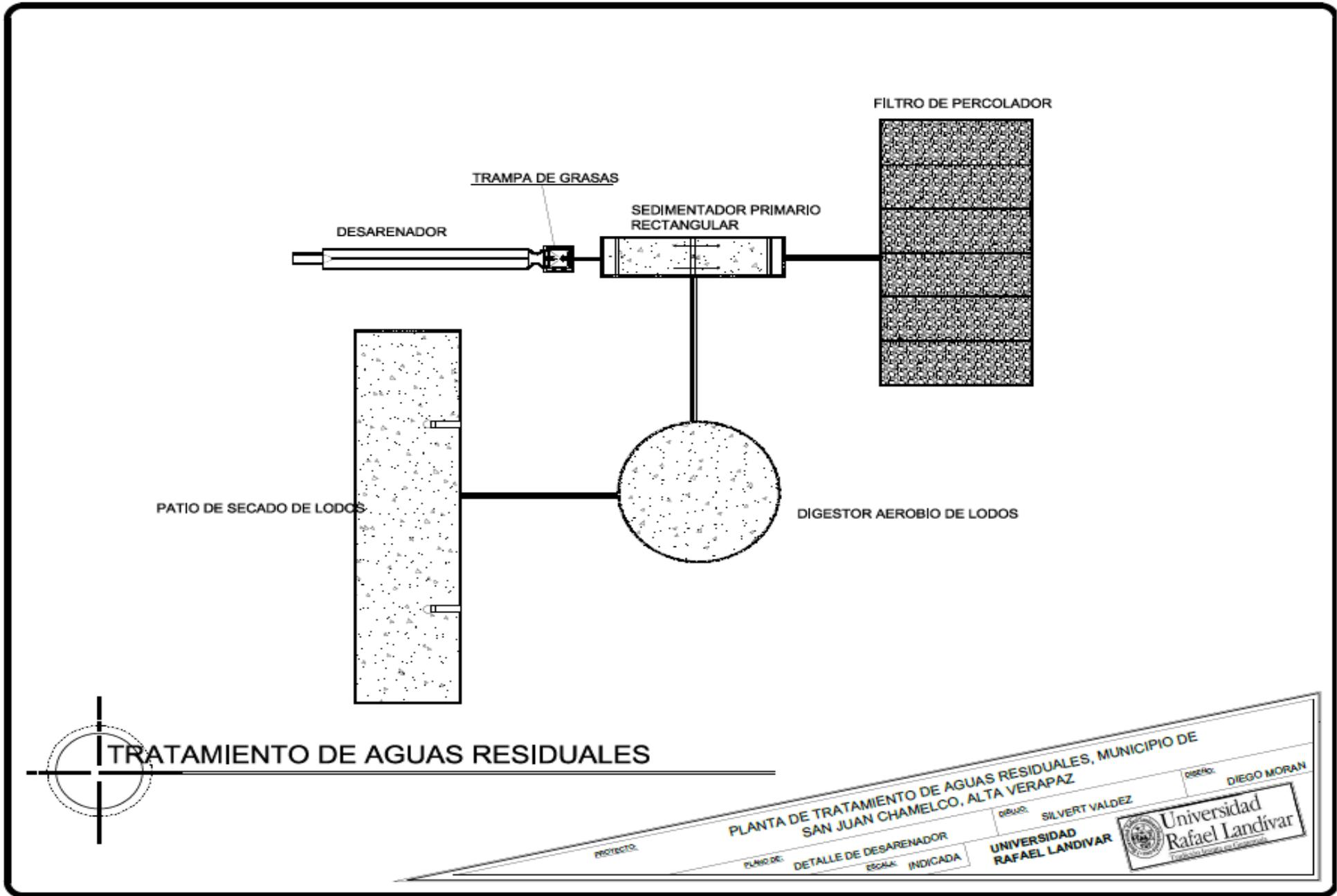


Figura 1. Plano de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (Morán, 2014)

## 6.6 DIMENSIONAMIENTO DEL PRE-TRATAMIENTO

### 6.6.1 Dimensionamiento del canal de entrada

Para el diseño del canal de entrada, el parámetro principal a tomar en cuenta es el caudal máximo que puede tener la planta en operación y el valor que se tomó es el caudal máximo horario.

Se asume una velocidad propuesta de 0.60 m/seg para rejillas de limpieza manual (Metcalf&Eddy, 1995) que da como resultado un area de 0.205m<sup>2</sup>, también asumiendo un ancho de canal  $b = 0.50$ , donde T es igual al tirante o a la profundidad (Metcalf&Eddy, 1995) se obtiene que la tirante necesaria es, de 41cm .

Para las características de las rejillas de barras se toma un valor promedio para ancho de 0.01 m y para la abertura de 0.04 m.

**Cuadro 5.** Dimensiones canal de entrada.

<b>Canal de entrada</b>	
<b>Q<sub>máximo</sub></b>	0.123 m <sup>3</sup> /s
<b>Área</b>	0.205 m <sup>2</sup>
<b>Ancho</b>	0.50 m
<b>Tirante</b>	41 cm

Fuente: elaboración propia.

### 6.6.2 Dimensionamiento rejillas

Para que se cumpla con las características específicas y completar el proceso de la unidad se requiere de lo siguiente:

**Cuadro 6.** Dimensiones rejillas

<b>Rejillas</b>	
<b>Ancho de barras</b>	0.01 m
<b>Abertura</b>	0.04 m
<b>Inclinación</b>	60°
<b>Velocidad de acercamiento</b>	0.60 m/s
<b>Coefficiente de la sección</b>	1.79
<b>Ancho de la rejilla</b>	0.625 m
<b>Altura de la rejilla</b>	0.54 m
<b>Eficiencia</b>	0.80
<b>Ancho útil libre</b>	0.4 m
<b>Ancho ocupado por las barras</b>	0.1 m
<b>Numero de barras</b>	10
<b>Pérdida de carga</b>	0.0105 m - 1.05 cm
<b>Pérdida por obstrucción al 50%</b>	0.079 m – 7.8 cm

Fuente: elaboración propia.

Las rejillas son la primera operación unitaria del proceso de tratamiento, es decir son el inicio del sistema se ubican luego del canal de entrada hacia el sistema. La función de las rejillas es proteger las unidades del sistema y evitar que se tenga un inadecuado funcionamiento desde el inicio, cuya finalidad es la retención de objetos de mayor tamaño que sobrepasen las medidas establecidas con las cuales el sistema se vea comprometido. Por ejemplo objetos como ramas, plásticos, telas u otro material sólido que no se encuentre desintegrado o degradado, cuando el agua residual circule a través del sistema.

En relación a los materiales sólidos que queden atrapados en las rejillas se retiran manualmente, para luego darle una disposición final dependiendo del tipo de los mismos luego de que pierdan la humedad. Si son desechos biodegradables pueden ser enterrados y desechos no biodegradables ser llevados a contenedores de basura, pasando por una separación previa dependiendo de su naturaleza para dicho proceso.

Con las dimensiones calculadas se determina que las rejillas poseen el tamaño necesario para la obstrucción de los desechos sólidos mencionados, es decir, sólidos que sean demasiado gruesos para las siguientes etapas del sistema. Lo anterior permite mantener la fluidez necesaria del agua dentro del sistema al determinar que su

pérdida de carga se encuentra en un nivel permisible, además de reducir en 85% según (Crites & Tchobanoglous, 2000) la materia flotante cuyo porcentaje restante se removerá en las posteriores unidades..

Además cumple con el cuadro de parámetros de diseño para rejillas de barras (véase anexo 2, cuadro 15) porque las pérdidas de carga permisibles no deben pasar de 15 cm. y la pérdida de carga de la rejillas propuestas el valor es de 1.05 cm por lo cual es un parámetro aceptado. Cuando las rejillas tengan un nivel de obstrucción, es decir una pérdida de carga de 8 centímetros deberá de limpiarse, para no comprometer el proceso.

### 6.6.3 Dimensionamiento desarenador

Para que cumpla con las características específicas y completar el proceso de la unidad se requiere de lo siguiente:

**Cuadro 7.** Dimensiones desarenador

<b>Desarenador</b>	
<b>Velocidad de sedimentación</b>	9.66 cm/s
<b>Sección de control rectangular</b>	1.23 m – 123 cm
<b>Velocidad sección de control</b>	2.79 m/s
<b>Ancho de la sección de control</b>	0.056 m – 5.6 cm
<b>Ancho para caudal medio</b>	0.696 m – 69.64 cm
<b>Altura para caudal medio</b>	1.074 m – 107 cm
<b>Profundidad de la sección parabólica del desarenador (caudal medio)</b>	
<b>Anchura</b>	0.484 m – 48 cm
<b>Ancho para caudal mínimo</b>	0.44 m – 44 cm
<b>Altura para caudal mínimo</b>	0.67 m – 67 cm
<b>Profundidad de la sección parabólica del desarenador (caudal mínimo)</b>	
<b>Anchura</b>	1.30 m -130 cm
<b>Velocidad de las partículas</b>	1.1 m/min
<b>Tiempo de paso</b>	49 segundos
<b>Longitud desarenador</b>	19 m

Fuente: elaboración propia.

Con una velocidad de 0.3 m/s, permite que la arena de 0.2mm se sedimente (Eddy, 1995). La longitud de turbulencia  $La = 0.25L$  en la cual la L es igual a la longitud del canal desarenador se toma en cuenta el dato para el caudal. Para la sección de control que se eligió, es necesario un desarenador con una sección transversal parabólica. Esta condición permitiría que la velocidad anteriormente propuesta fuera constante.

La función del desarenador es retener, sedimentar y no permitir que las arenas gravas avancen a las siguientes fases del sistema, al igual que todo aquel material cuyo peso específico sea superior a materiales sólidos orgánicos putrefactibles, que estén presentes en el agua residual y que puedan generar un incorrecto funcionamiento de las siguientes unidades del sistema.

Se determinó la función al calcular la sección hidráulica de capas necesarias para que se mantenga una velocidad de sedimentación en el rango de 0.3 m/s, al estar dentro de este valor de velocidad, tiende a arrastrar las partículas a través del canal desarenador y a la suspensión de las nuevas partículas que ingresan y se hayan depositado, lo cual permite que la arena que posee mayor peso se sedimente.

Este proceso conlleva a la eliminación de materiales que puedan generar desperfectos en las siguientes unidades, contribuye a la conservación del equipo de un desgaste inadecuado reduciendo la abrasión del mismo, de igual manera reduce la formación de depósitos excesivos de materiales pesados en tuberías, en el canal y los conductos de la unidad. Además de disminuir la necesidad y la frecuencia de una limpieza constante en el área digestora, permitiendo una mayor eficiencia de la unidad.

El desarenador propuesto cumplirá con las funciones claves en el funcionamiento del sistema, establecerá una distribución uniforme y controlada del flujo de agua dentro de la unidad, permitiendo una velocidad constante de manera que se logre el propósito de que las partículas se depositen por gravedad y el diseño permite que estas partículas ya sedimentadas no se vean alteradas por la velocidad del agua que pase dentro del sistema.

Las ventajas que presenta este tipo de desarenador horizontal ante otro tipo es que no requiere de piezas ni equipo específico para su funcionamiento, limpieza y remoción de las arenas, lo cual hace de él un sistema ampliamente utilizado y eficiente por la facilidad que representa, cumpliendo de igual manera con el objetivo de la unidad.

Aunado a lo anterior representa un bajo costo de construcción por su estructura simple, un bajo costo de operación y de mantenimiento que es un factor clave para la toma de decisiones sobre la unidad propuesta.

En esta etapa se tratará el cromo hexavalente por medio de un agente reductor que convierta el Cr (VI) a soluciones básicas, mediante un proceso de bioremediación con residuos o materiales como la corteza de árbol (*Pyrus comunnis* o *Quercus crassipes*) o cáscara de aguacate . Este proceso consiste en lavar ya sea la corteza o la cáscara con agua desmineralizada, deshidratarla y posteriormente molerla, luego verterla a lo largo del desarenador y se mezcle con el agua residual que ingresa para remover el Cromo hexavalente.

Los dimensionamientos finales de la unidad que cumple con las especificaciones antes mencionadas, se observan en el siguiente plano:

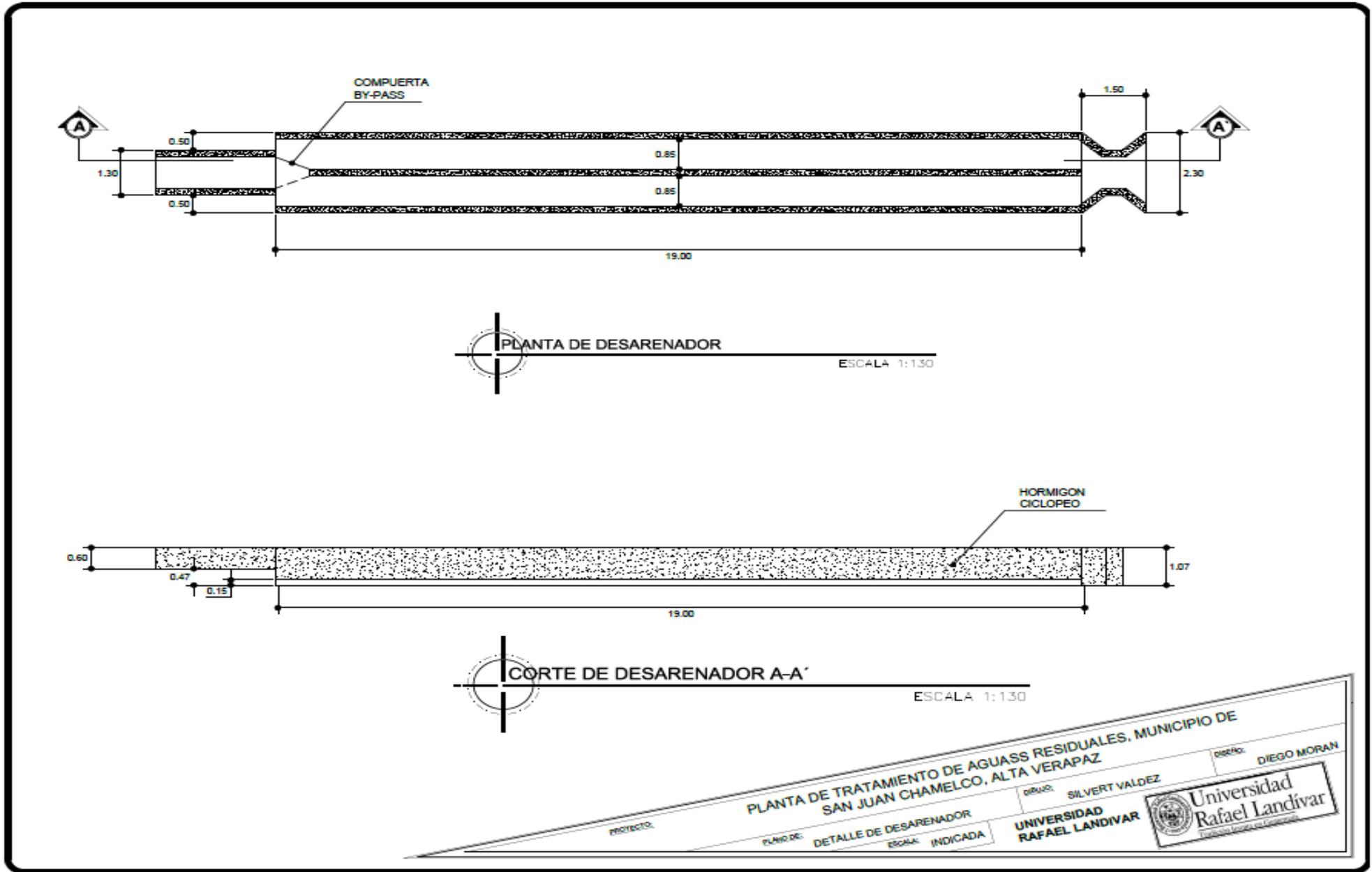


Figura 2. Plano de planta y corte desarenador (Morán, 2014)

#### 6.6.4 Dimensionamiento medidor de caudal tipo Parshall

Para este diseño se toman como parámetros el caudal máximo y el caudal mínimo, los cuales son  $Q_{max}=0.123\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_{min}= 0.0548 \text{ m}^3/\text{s}$  proyectados a 25 años.

Se toma el valor del cuadro límites de aplicación medidores Parshall con descarga libre (véase anexo 2, cuadro 16), el valor que encaja con los parámetros de los caudales es el de  $W= 152.5 \text{ cm}$ . Los valores restantes se toman del cuadro Dimensiones típicos de medidores Parshall (véase anexo 2, cuadro 17).

**Cuadro 8.** Dimensiones de medidores Parshall.

W	A	B	C	D	E	F	G	K	N
5" – 152.5	192.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61	91.5	7.6	22.9

Medición de caudal

Para esta medición se emplea la siguiente fórmula:

$$Q=KH^n$$

Los valores de  $n$  y  $K$  se toman del cuadro valores del exponente  $n$  y el coeficiente  $K$  (véase anexo 2, cuadro 18)

$W= 5, 1.525\text{m}$ ;  $n= 1.587$ ;  $K= 3.728$  (unidad métrica);  $K= 20.00$  (unidad inglesa)

El dimensionamiento del medidor de caudal tipo Parshall para que cumpla con las características necesarias y completar el proceso de la unidad es el siguiente:

**Cuadro 9.** Dimensiones medidor de caudal Parshall

Medidor caudal Parshall	
Q máximo	0.123 m <sup>3</sup> /s
Q mínimo	0.0548 m <sup>3</sup> /s
Ancho	152.5 cm
Medida de carga H	2/3 A
	2/3 B

Fuente: elaboración propia.

El medidor no es una unidad específica en el sistema depurador e inclusive no es parte del proceso que se lleva a cabo en el tratamiento del agua residual, pero si es una unidad que proporciona un soporte importante en el funcionamiento de la misma. Ya que se utiliza para establecer, conocer y verificar cuál es caudal que ingresa y con el que se está trabajando en la planta en determinado momento. Es un sistema sencillo que consiste en una canaleta integrada por tres secciones claves, la entrada de forma convergente, la garganta en forma de W, el cual es el tramo angosto de la misma y la salida de forma divergente. Este tipo de medidor de caudal es efectivo, no es complejo y sencillo en su diseño, hace que las medidas sean fáciles de obtener por lo que se eligió para complementar en la etapa de pre-tratamiento.

El medidor de caudal estará ubicado posterior al desarenador, manteniendo una distancia y evitar un problema de turbulencia en el flujo del agua, que se podría crear por la proximidad entre ambas unidades.

### 6.6.5 Dimensionamiento trampa de grasas y aceites

Para que cumpla con las características necesarias para completar el proceso de la unidad es el siguiente:

**Cuadro 10.** Dimensiones trampa de grasas

<b>Trampa de grasas</b>	
<b>Área superficial</b>	13.7 m <sup>2</sup>
<b>Carga hidráulica</b>	4 l/s*m <sup>2</sup>
<b>Tiempo de retención</b>	5 minutos
<b>Dimensión superficial</b>	b 2.75 m
	h 4.95 m
<b>Volumen acumulado</b>	16.44 m <sup>2</sup>
<b>Fondo trampa de grasas</b>	0.80 m

Fuente: elaboración propia.

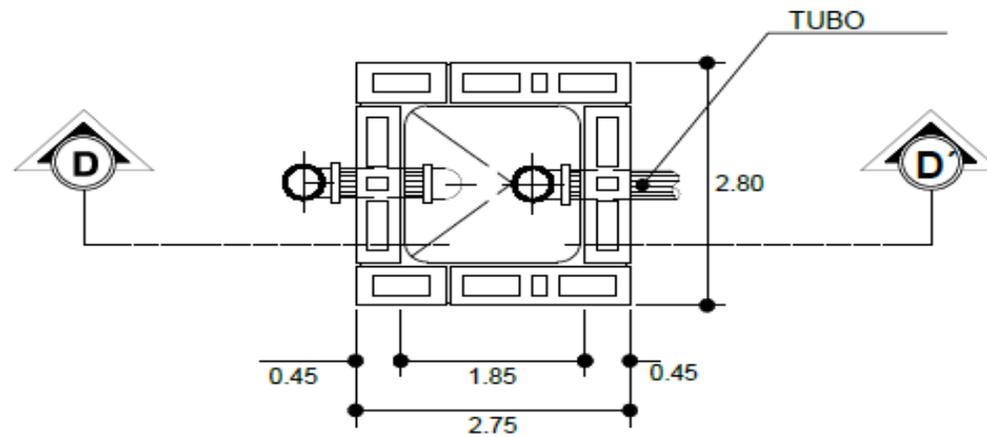
La función de esta unidad del sistema es de retener las sustancias cuyo peso específico sea menor al peso específico del agua, provocando que estas sustancias floten. El tipo de diseño establecido se basó encontrando una relación de largo-ancho de una

estructura que permitiera a las grasas y los aceites provenientes del agua residual iniciar a desprenderse y de esa manera se queden atrapadas en la estructura.

La forma de la trampa de grasas será un tanque rectangular con pantallas deflectoras ubicadas una contra la otra, una posicionada en la entrada y la otra en la salida con la finalidad de evitar la turbulencia dentro de la unidad. La pantalla que se encuentra ubicada en la salida tendrá un mayor tamaño ya que en ella se dará la retención de las grasas, aceites u otra sustancia. En este punto de salida también se extraerá por el fondo toda partícula que se haya sedimentado que pasen a la siguiente fase del tratamiento.

Derivado de lo anterior se cumplirá con la eliminación de las grasas y aceites por medio de flotación, esta se retirará de la superficie por medio de un vertedero donde este desecho se acumula y se solidifica para darle una disposición final adecuada, además de asegurar que las siguientes fases de conexión en las unidades no se atasquen ni reduzcan su flujo por acumulación de grasas y proporciona facilidad de limpieza tanto de esta unidad como de las siguientes etapas de depuración.

Los dimensionamientos finales de la unidad se observan en el siguiente plano:

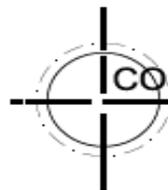
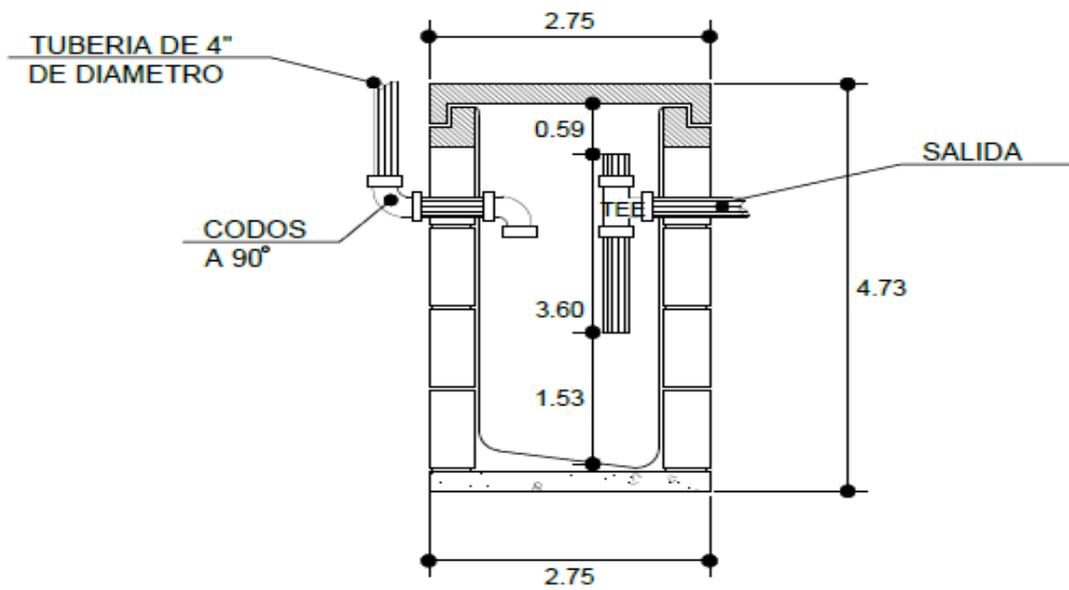


PLANTA DE TRAMPA DE GRASAS

ESCALA 1:75

PROYECTO:	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ			DISEÑO:	DIEGO MORAN
PLANO DE:	DETALLE DE TRAMPA DE GRASAS			DIBUJO:	SILVERT VALDEZ
ESCALA:	INDICADA			 <b>Universidad Rafael Landívar</b> <small>Facultad de Ingeniería y Arquitectura</small>	

Figura 3. Plano de planta trampa de grasas (Morán, 2014)



CORTE DE TRAMPA DE GRASA D-D'

ESCALA 1:75

PROYECTO:	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ			DISEÑO:	DIEGO MORAN
PLANO DE:	DETALLE DE TRAMPA DE GRASAS			DISEÑO:	SILVERT VALDEZ
ESCALA:	INDICADA			 <b>Universidad Rafael Landívar</b> <small>UNIVERSIDAD NACIONAL DE GUATEMALA</small>	

Figura 4. Plano de corte trampa de grasas (Morán, 2014)

## 6.7 DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO

### 6.7.1 Dimensionamiento sedimentador primario rectangular

Para que cumpla con las características necesarias para completar el proceso de la unidad es el siguiente:

**Cuadro 11.** Dimensiones Sedimentador primario rectangular

<b>Sedimentador primario rectangular</b>	
<b>Caudal de diseño</b>	2,922.41 m <sup>3</sup> /día
<b>Área superficial</b>	73.06 m <sup>2</sup>
<b>Ancho</b>	4.27 m
<b>Largo</b>	17.08 m
<b>Profundidad</b>	4 m
<b>Volumen del tanque</b>	272 m <sup>3</sup>
<b>Nueva carga superficial</b>	42.9 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día
<b>Tiempo de retención</b>	2.23 horas
<b>Velocidad de arrastre</b>	0.070 m/s
<b>Velocidad de arrastre vs velocidad horizontal</b>	0.0021 m/s
<b>Remoción DBO</b>	35.62%
<b>Remoción de SST</b>	62.57%

Fuente: elaboración propia.

La función del sedimentador primario es seguir el proceso de sedimentación de partículas que contenga el agua residual tratada, bajo la teoría de que los sólidos encontrándose en un estado de reposo por el peso específico al ser superior al del agua estas tiendan a depositarse en el fondo del sedimentador y aquellas partículas cuyo peso específico sea menor a la del agua tiendan a ascender. Cumpliendo con el objetivo de eliminar de manera fácil y eficaz los sólidos sedimentables y materia flotante, logrando reducir la cantidad de sólidos en suspensión del agua residual tratada por el sistema.

Al dimensionar el tanque sedimentador se pretende una reducción eficiente tanto de los sólidos suspendidos que estos varían entre un 50% y 70% y entre el 25% y 40% de la DBO de forma progresiva y se depure de mejor manera el agua entrante para la

siguiente fase del tratamiento. El sistema se encuentra en un nivel de remoción de SST 62.57% y de DBO de 35.62% por lo que los parámetros de nivel de remoción se encuentran en el rango de eficiencia propuestos teóricamente, asimismo un 50% de remoción de coliformes fecales hasta esta fase del sistema.

Las ventajas que presenta este sistema están enfocadas en la adaptación que tiene el diseño ante otro sistema porque permiten que los tiempos de remoción de los contaminantes sea regulada, evitando que se formen procesos extras anaeróbicos microbiológicos que alteren la calidad del agua tratada. Esta operación tiene un alto grado de confiabilidad, lo cual conlleva mejora de la calidad del agua tratada y la velocidad de respuesta entre el agua que ingresa y el agua que sale de la unidad.

Se destaca también otra ventaja por el tipo de construcción porque es más simple que otro sistema depurador y en el nivel operativo no requiere de personal calificado en el control diario del sistema lo que significa reducción de costos. Otro factor importante es que no requiere consumo energético o en casos donde sea necesario bombear el agua generaría un mínimo consumo, lo que se constituye en un beneficio extra de la unidad.

Los dimensionamientos finales de la unidad que cumple con las especificaciones antes mencionadas, se observan en el siguiente plano:

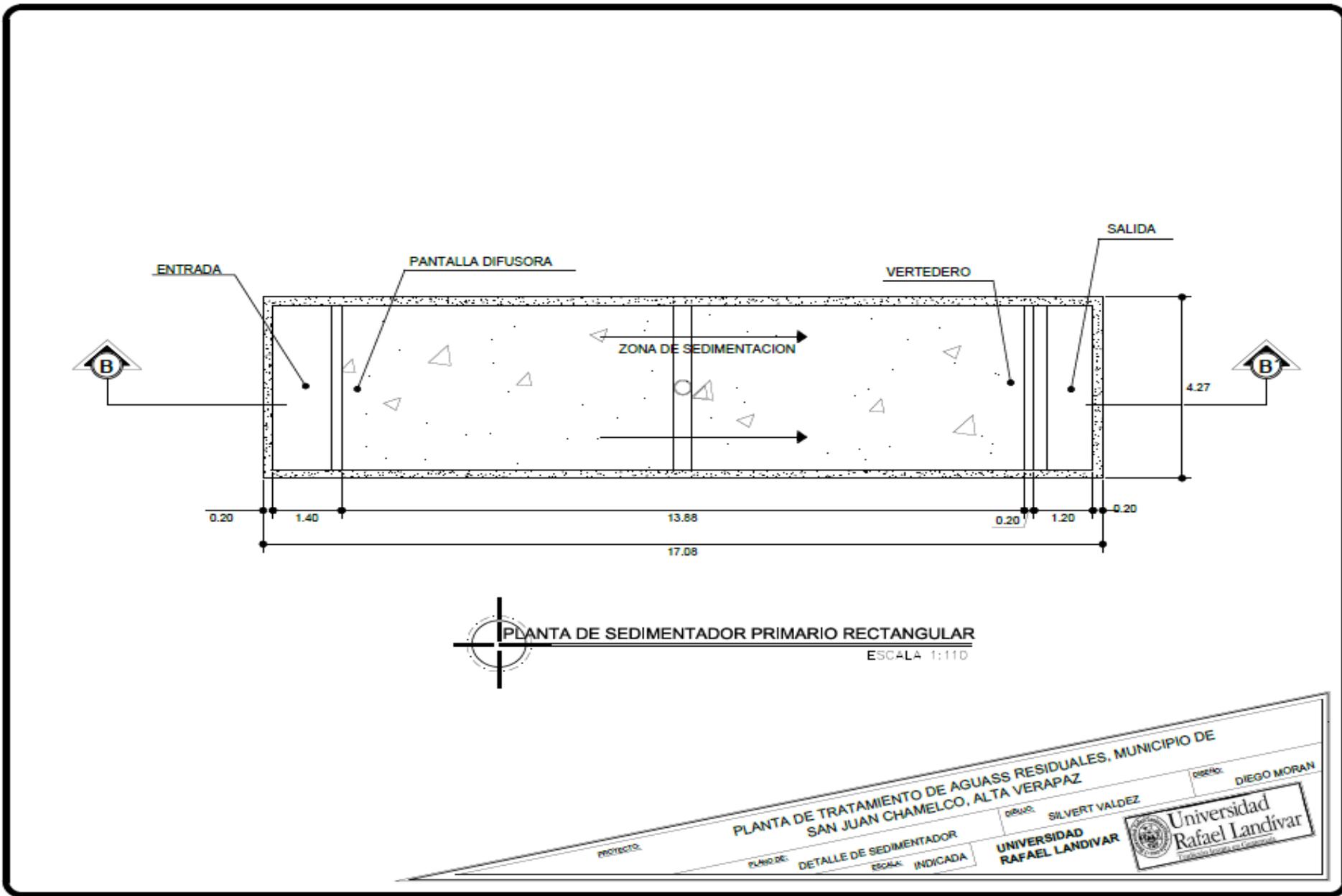


Figura 5. Plano de planta sedimentador primario rectangular (Morán, 2014)

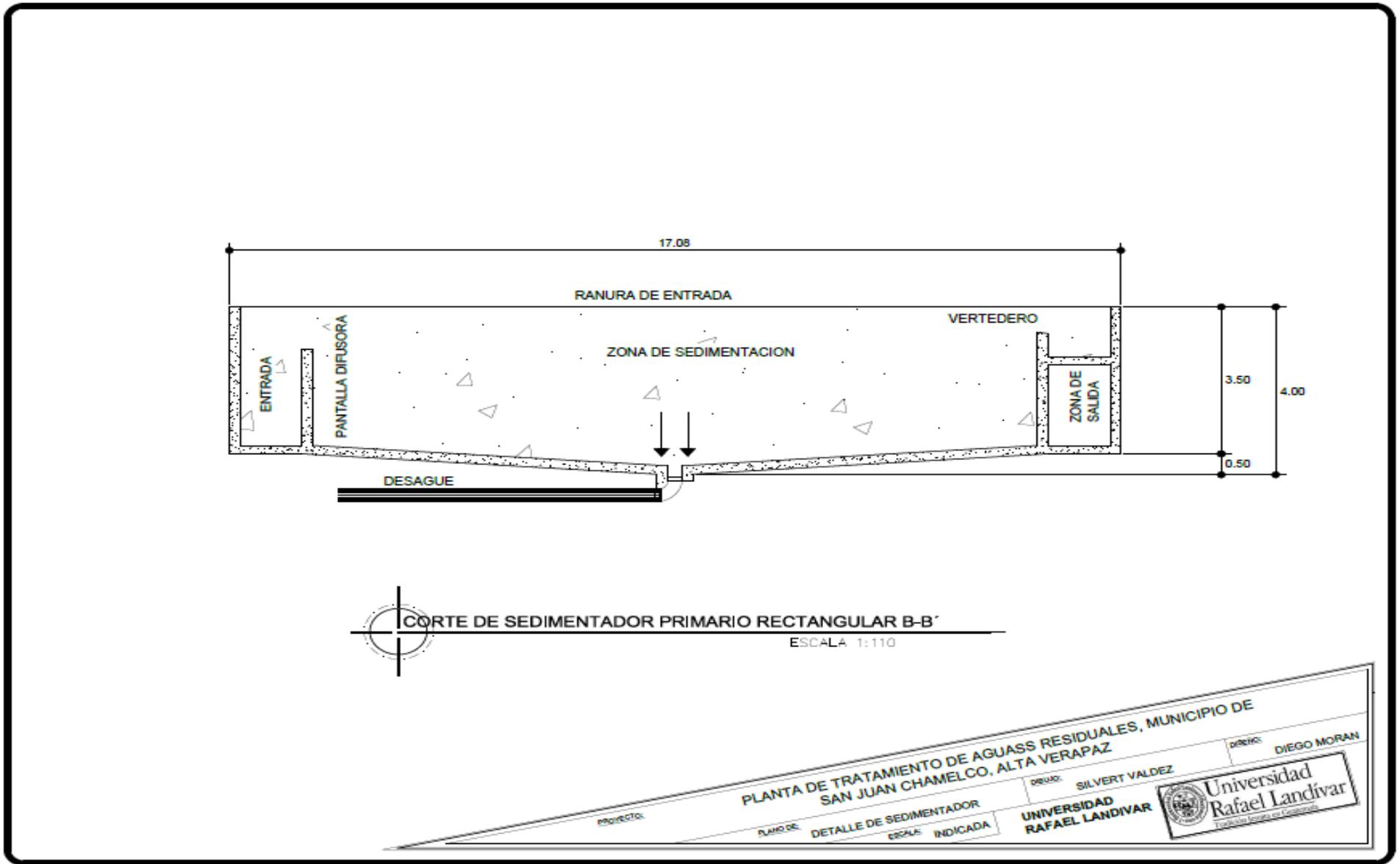


Figura 6. Plano de corte sedimentador primario rectangular (Morán, 2014)

## 6.8 DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

### 6.8.1 Dimensionamiento filtro percolador

Para que cumpla con las características específicas y completar el proceso de la unidad es el siguiente:

Filtros profundos van de 1.5 metros a 3.0 metros

Filtros bajos van de 0.90 metros a 1.50 metros.

Tasa baja es de  $2 \times 10^6$  gal/ac/día

Tasa alta es de  $15 \times 10^6 - 30 \times 10^6$  gal/ac/día

Según el análisis del DBO<sub>5</sub> obtenido fue de 216.0 ml/l, se le resta el 35.62% removido en la sedimentación primaria.

#### Cuadro 12. Dimensiones filtro percolador

Filtro percolador	
Caudal de diseño	$2.807714 \times 10^6$ gal/día
Eficiencia	53%
DBO después del filtro	100 m/l
Volumen del filtro	$43.04 \times 10^3$ p <sup>3</sup>
Ancho	46.76 pie – 14.25 m
Largo	93.48 pie – 28.5 m
Carga orgánica volumétrica	4.15 lb.DBO/m <sup>3</sup> .día
Profundidad	3 m

Fuente: elaboración propia.

Como el valor de DBO después del filtro es de  $100 \text{ mg/l}$  se encuentra en el rango permisible del Acuerdo Gubernativo 236-2006 lo que demuestra que la eficiencia del filtro percolador es aceptable.

Tomando como referencia el cuadro de información de diseño para varios de tipos de filtro percoladores no sumergidos (véase anexo 2, cuadro 22) el filtro percolador propuesto se encuentra en el rango de carga intermedia, así que el material elegido como medio de filtración debe cumplir con las especificaciones técnicas cuadro, los cuales son una relación de vacío en un rango de 40% - 55% y un peso específico en un

rango de 50 – 90 lb/pie<sup>3</sup> el material que es utilizado en este proceso es la roca volcánica ya que su especificación permite que la película bacteriana se adhiera a ella y accese el proceso filtrante de manera adecuada.

La función a cumplir en esta etapa del tratamiento es remover y estabilizar toda materia orgánica que sea biodegradable en suspensión que esté presente en el agua residual que ingresa luego de haber pasado en el sedimentador primario rectangular. El medio por el cual se logra esta función es por medio de una película bacteriana que se va adhiriendo en el material filtrante que se utiliza en el filtro percolador, por un proceso físico por medio de contacto.

La estabilización de la materia orgánica se dio como resultado de encontrar la eficiencia adecuada del sistema la cual se controla la DBO, con lo que se define el medio filtrante necesario para la carga orgánica e hidráulica que cuenta el filtro. El proceso inicia cuando sale el agua residual tratada del sedimentador primario para rociarla sobre el medio o material que servirá de filtro, en el cual se adhieran las bacterias y microorganismos que llevan a cabo el proceso de estabilización de la materia orgánica.

Las ventajas que presenta esta unidad es la capacidad de mantenerse estable ante cambios en la fluctuación de la carga que entra a la unidad, las implicaciones de ello es que tiene una baja demanda de energía, baja producción de lodos y si estos se llegan a acumular son fácilmente deshidratados lo cual lo hace un sistema eficiente ante las necesidades del proyecto. También otra ventaja en la construcción por la simplicidad de su estructura y del material filtrante (roca volcánica), al no implicar un mantenimiento complicado por ser una unidad de operación sencilla.

Al culminar el proceso el agua que se obtiene cumple con los límites máximos permisibles para reuso para tipo I cuyo requerimiento es de DBO no aplica y para coliformes fecales no aplica. El tipo I se refiere para riego agrícola en general, lo que nos permitiría utilizar el efluente con los procesos de remoción que tuvo poseer la cantidades características necesarias para utilizar en riego ya sea intensivo y extensivo.

Asimismo puede ser utilizado para la recuperación y mejoramiento de suelos por los nutrientes que aun posee el efluente tratado. El reuso para riego tipo I entra en el rango tipo B propuesto por la OMS para reuso de aguas residuales.

También aplica para reuso tipo IV que se refiere al uso en pastos y otros cultivos, cuyos requerimientos son de DBO no aplica y de coliformes fecales  $<1 \times 10^7$ , se puede utilizar para riegos de pastos, forrajes, áreas verdes, jardinizaciones, plantaciones forestales y árboles frutales. El reuso de tipo IV entra en el rango tipo C propuesto por la OMS para reuso de aguas residuales.

Complementario se pueden aplicar para reuso tipo III que se refiere a para uso en la acuicultura cuyos requerimientos son de DBO 200 mg/l y de coliformes fecales no aplica, de manera que se puede utilizar el efluente para generar una nueva actividad económica como lo es la piscicultura (véase anexo2, cuadro 28).

Los dimensionamientos finales de la unidad que cumple con las especificaciones antes mencionadas, se observan en el siguiente plano:

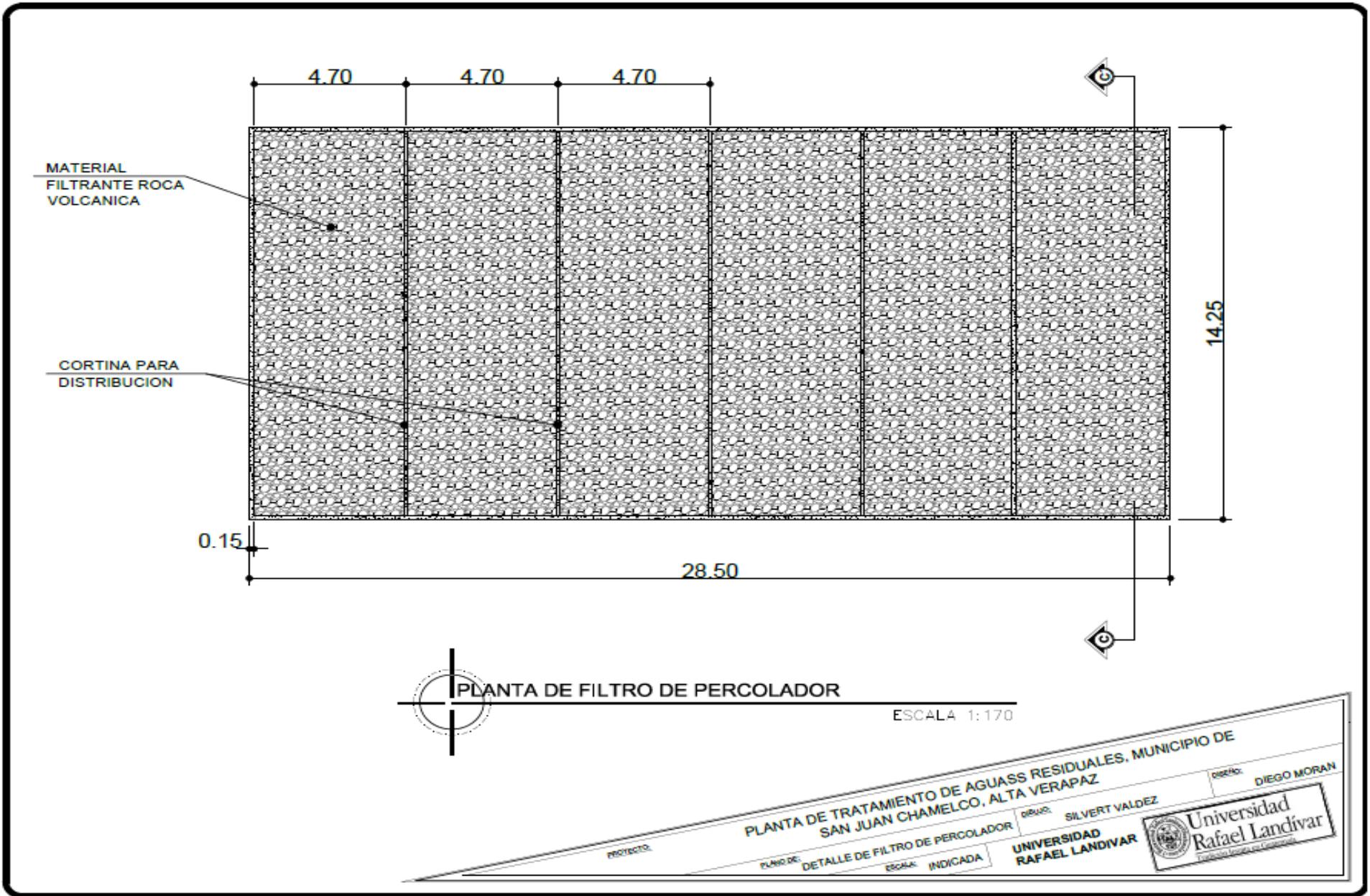


Figura 7. Plano de planta filtro percolador (Morán, 2014)

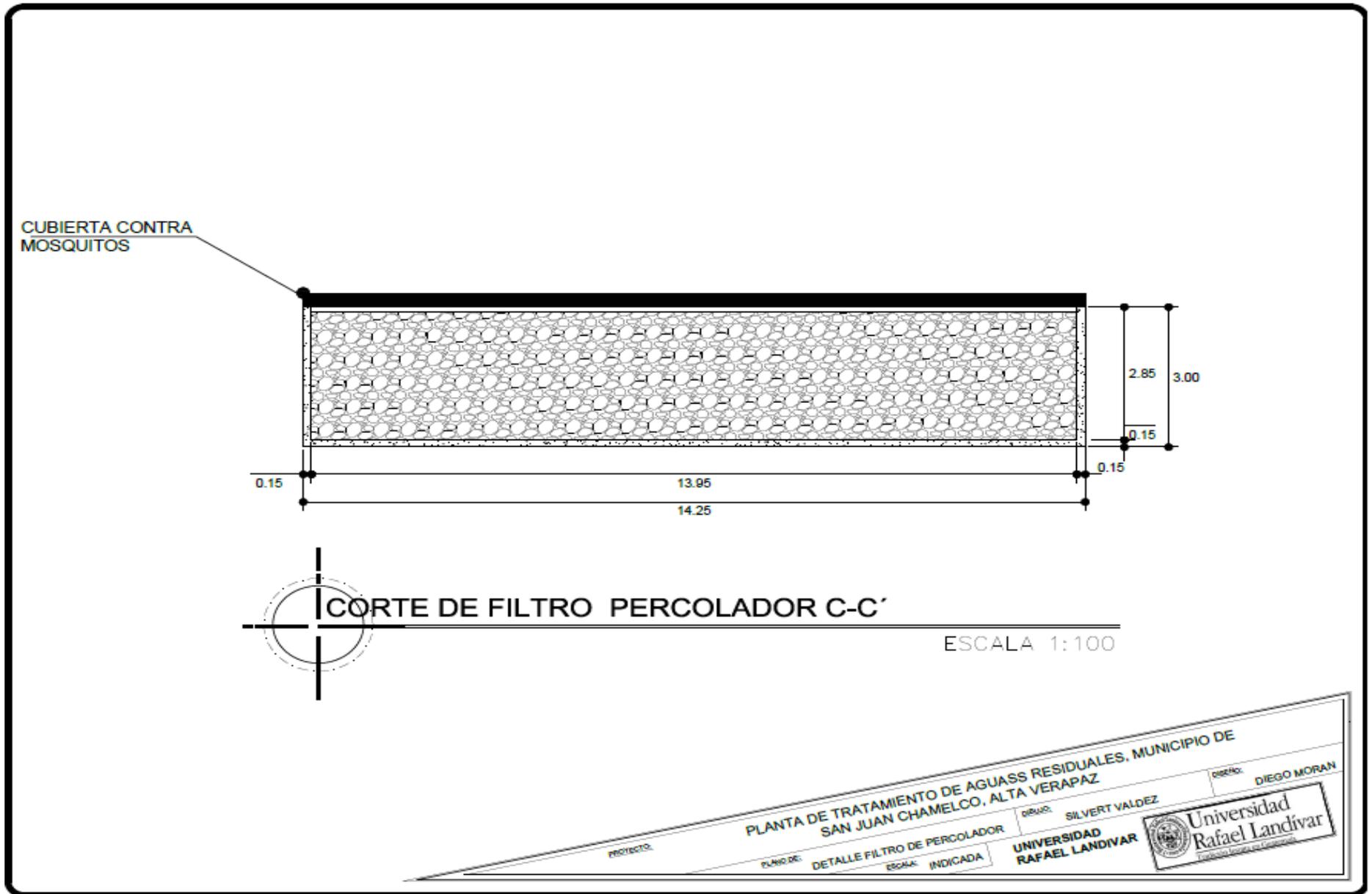


Figura 8. Plano de corte filtro percolador (Morán, 2014)

## 6.9 DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO DE LODOS

### 6.9.1 Dimensionamiento digestor de lodos

Para que cumpla con las características específicas necesarias para completar el proceso de la unidad es el siguiente:

**Cuadro 13.** Dimensiones digestor de lodos

<b>Digestor de lodo</b>	
<b>Volumen</b>	987.44 m <sup>3</sup>
<b>Volumen del fango (2.23 horas)</b>	1.199 m <sup>3</sup>
<b>Volumen fango (24 horas)</b>	12.9 m <sup>3</sup>
<b>Volumen por periodo de retención</b>	541.8 m <sup>3</sup>
<b>Diámetro del tanque</b>	7.58 m
<b>Pendiente del fondo</b>	1m vertical; 4m horizontal

Fuente: elaboración propia.

Se propone un tiempo de retención de 42 días según el cuadro de digestión discontinua de los lodos de sedimentación libre a diferentes temperaturas (véase anexo 2, cuadro 25), donde se considera una temperatura de 21.1 °C, además de tomar en cuenta lluvias u otros fenómenos climáticos o antropogénicos anormales que alteren el volumen de retención.

La pendiente del fondo deberá tener valores de 1 en la vertical por 4 en la horizontal esto incrementa 0.55 metros el fondo, en su parte central.

En esta sección del sistema de tratamiento se dará el proceso de mineralización de la materia orgánica producida en el sedimentador primario rectangular del cual se extraerá la misma. Este tanque tendrá una forma cilíndrica con una desviación o inclinación hacia el centro, para que el fango producido se acumule en esa zona y al momento de retirarlo del digestor sea de forma accesible, cómoda y fácil.

Por lo tanto se producirá una estabilización aerobia por ser ventajosa en la formación de un producto final que sea inodoro y la deshidratación tenga las características deseadas asimismo en la zona operativa y económica, lo que reduce la inversión para operar el sistema. Los principales parámetros que se tomaron en cuenta fueron el volumen del fango que se generara en la etapa anterior, el peso del fango previo al proceso de tratamiento, porcentaje de humedad y la temperatura promedio que se tiene en el municipio.

La principal ventaja de esta unidad es que facilita el manejo de cantidades dentro del rango aceptable y funcionar con una sobrecarga, ya que en la digestión reduce un porcentaje de humedad y líquidos provenientes de las fases anteriores, lo que conlleva que el producto final sea de mejor calidad al momento de pasarlo al patio de secado.

Complementario a ello se recomienda posteriores análisis para el parámetro de coliformes fecales durante el funcionamiento de la planta, ya que el nivel de remoción alcanzado es aceptable dentro de la etapa uno del reglamento pero no es suficiente para las tres etapas siguientes de cumplimiento, esto con la finalidad de cumplir con la normativa (véase anexo 2, cuadro 29).

Los dimensionamientos finales de la unidad que cumple con las especificaciones antes mencionadas, se observan en el siguiente plano:

:

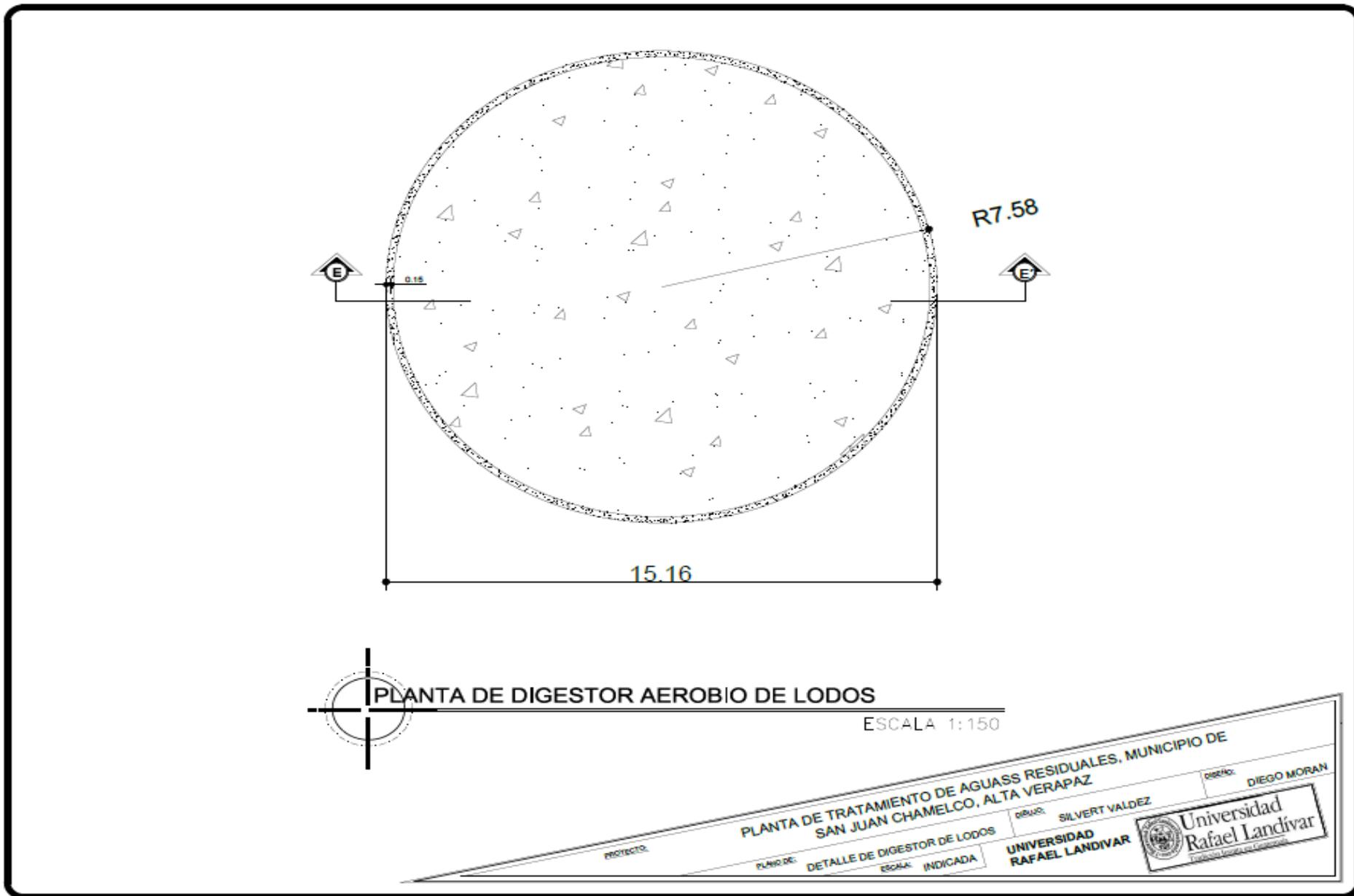
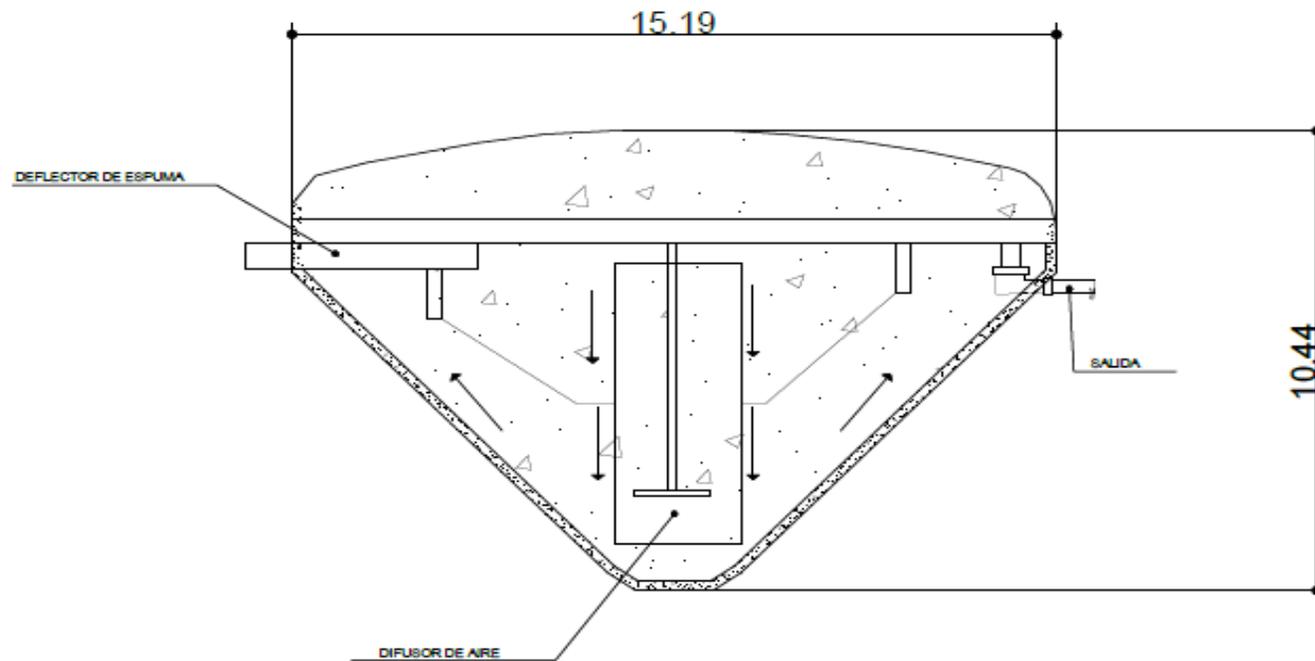


Figura 9. Plano de planta digester aerobio de lodos (Morán, 2014)



**CORTE DE DIGESTOR AEROBIO DE LODOS E-E'**

ESCALA 1:150

PROYECTOR:	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUASS RESIDUALES, MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ	DESENHO:	SILVERT VALDEZ	DESENHO:	DIEGO MORAN
PLANO DE:	DETALLE DE DIGESTOR DE LODOS	UNIVERSIDAD	Rafael Landívar		
ESCALA:	INDICADA	UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR			

Figura 10. Plano de corte digestor aerobio de lodos (Morán, 2014)

## 6.9.2 Dimensionamiento patio de secado

Para que cumpla con las características específicas para completar el proceso de la unidad es el siguiente:

**Cuadro 14.** Dimensiones patio de secado

<b>Patio de secado de lodos</b>	
<b>Población de diseño (25 años)</b>	25,077 habitantes
<b>Área</b>	1,003.08 m <sup>2</sup>
<b>Carga de sólidos</b>	7.56 Kg de SS/día
<b>Masa de sólidos</b>	2,457 Kg de SS/día
<b>Volumen de lodos digeridos</b>	23.62 l/día
<b>Volumen de lodos a extraer</b>	0.992 m <sup>3</sup>
<b>Ancho</b>	10 m
<b>Largo</b>	40 m

Fuente: elaboración propia.

El patio de secado de lodos tendrá como función la deshidratación de los lodos previamente digeridos, utilizando la radiación solar para realizar este proceso, al extraer los lodos del digester se extiende una capa de 25cm de espesor en el patio y se deja secar al tiempo indicado por la cantidad producida.

Como parte del diseño la capa que se requiere en el patio de secado de lodos es de 25mm de grava en la parte inferior seguido de una capa de arena de 30 cm y luego 5mm de grava en la parte superior, todo ello para tener un material filtrante en el patio de secado y se dé un proceso adecuado de deshidratación.

Las ventajas al tener un patio de secado es que da un alto contenido de sólidos como resultado del producto final del proceso, además del bajo costo de construcción, bajo costo de mantenimiento y fácil manejo operacional, además se propone incluir al patio un techo de lamina transparente para evitar que se comprometa el proceso de secado en la época lluviosa.

Al finalizar obtener un material inocuo que puede ser utilizado en dos actividades específicas propuestas por el reglamento ya sea disposición como material de relleno o aplicación al suelo ya sea como acondicionador, abono o compost en cultivos.

Los principales parámetros para cumplir el reuso de lodos son no exceder metales pesados, pero por el origen de las aguas residuales tratadas que son ordinarias o domésticas este tipo de compuestos no se encuentran presentes en cantidades peligrosas para una reutilización.

El material obtenido al ser un material inocuo cumple con los límites propuestos para la aplicación al suelo, de manera que pueden utilizarse como acondicionador del suelo especialmente en zonas agrícolas que los suelos suelen encontrarse con un alto grado de degradación, asimismo utilizarlos como abonos ya que este material aún posee macro y micro nutrientes que generan beneficio no solo al suelo sino a los cultivos dentro del rango B-C especificados anteriormente.

Otra utilidad de los lodos es de utilizarse como material de relleno en zonas donde se desea hacer una recuperación paisajística o recuperar alguna zona que se haya visto afectada por actividades antropogénicas o actividades naturales (véase anexo2, cuadro 28).

Complementario a lo anterior el reglamento en su artículo 46 ofrece la opción de comercializar los lodos obtenidos de un proceso de tratamiento de aguas, esta situación puede convertirse en una opción económica dentro del municipio, ya que se pueden obtener beneficios a la comunidad de los lodos obtenidos en la distribución de fertilizantes específicamente en el área rural.

Los dimensionamientos finales de la unidad que cumple con las especificaciones antes mencionadas, se observan en el siguiente plano:

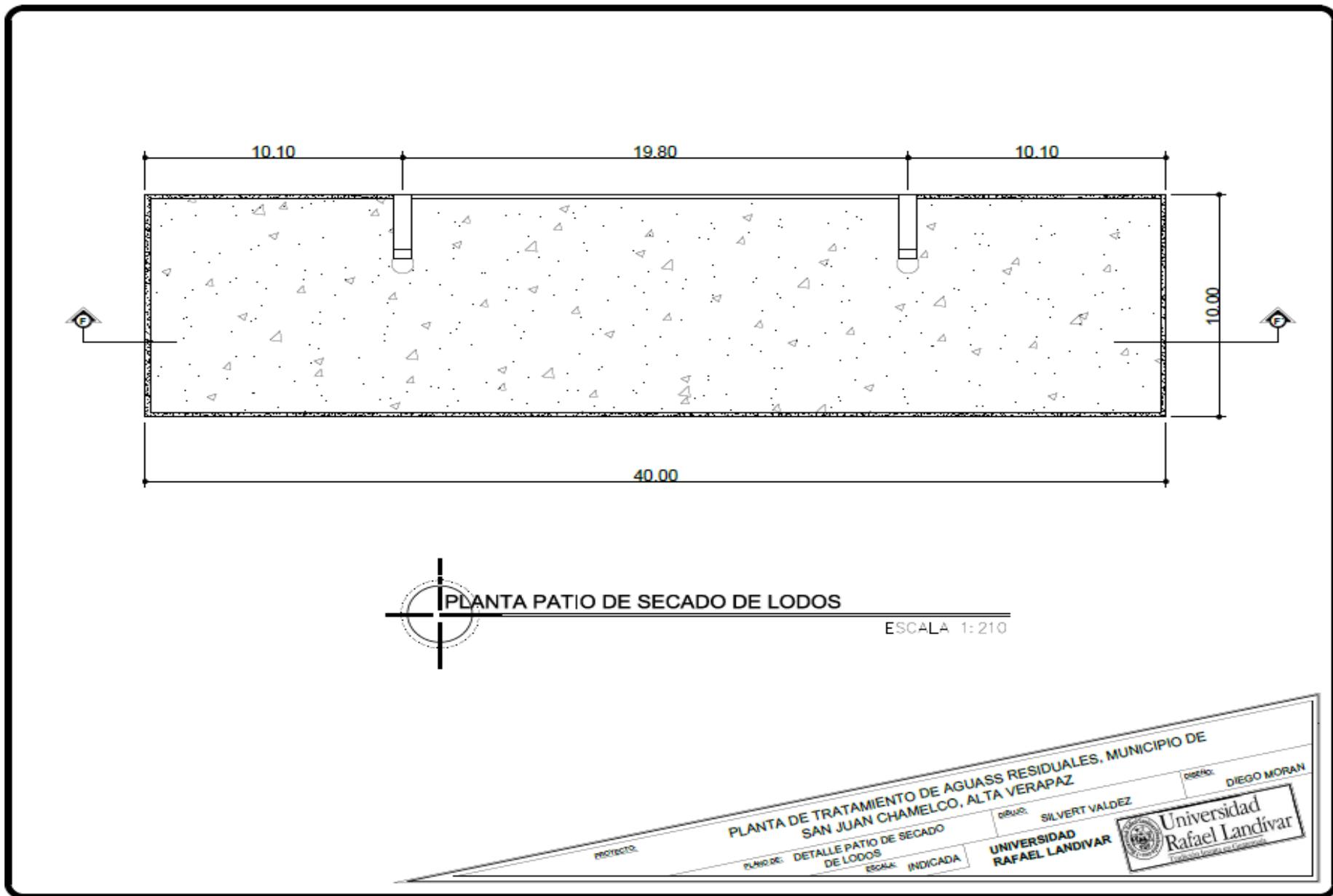


Figura 11. Plano de planta patio de secado de lodos (Morán, 2014)

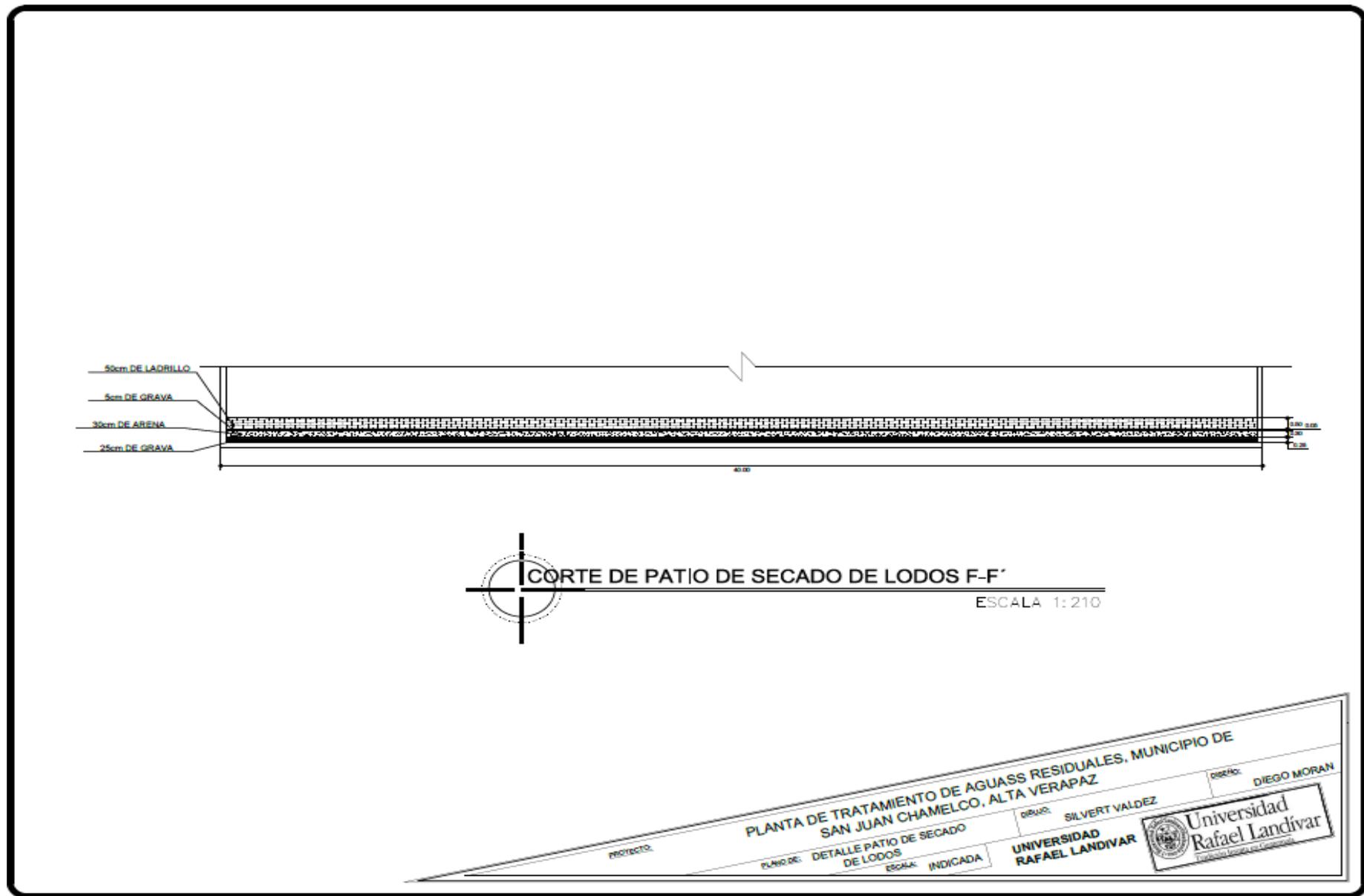


Figura 12. Plano de corte patio de secado de lodos (Morán, 2014)

## 6.10 PROPUESTA DE UBICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATEMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

### Ubicación PTAR para San Juan Chamelco



0 7,500 15,000 30,000 45,000 60,000 Meters

**Universidad Rafael Landívar**  
Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas  
Elaborado por: Mellany Díaz  
Guatemala Noviembre 2014

**Coordenadas:** N 15°25'35.1"  
W 90°19'29"  
**Altitud:** 1,387 msnm  
**Viento:** SW

Figura 13. Ubicación PTAR San Juan Chamelco

En la figura 13 podemos observar la propuesta de ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, la ubicación se encuentra en las afueras del municipio en una zona conocida como San Luis.

La PTAR tratara las aguas residuales ordinarias provenientes del área urbana del municipio. Con lo cual se prevee tras el proceso de tratamiento contribuir como una medida de mitigación al saneamiento del principal recurso hídrico del municipio el río Cahabón, el cual sirve de abastecimiento municipal.

Los principales datos de la PTAR se mencionan a continuación:

Población proyectada:	25,077 habitantes
Agua residual proyectada:	2, 821,162.5 l/día
Tipo de tratamiento:	sistema de tratamiento secundario y tratamiento de lodos
Caudal máximo de operación:	0.123 m <sup>3</sup> /s
Nivel de eficiencia:	88.62%
Tiempo de vida útil:	25 años

El terreno de construcción de la planta es de propiedad municipal, esto no compondría ningún tipo de confrontación social por la problemática de tierras, así que solo se deben considerar implicaciones técnicas relacionadas a las características del suelo y la geomorfología de la zona tomando en cuenta el origen kárstico de los suelos de la región y que complicaciones generaría esto.

Asimismo del análisis anterior aprovechar la pendiente del terreno para utilizar la PTAR por medio de la gravedad con lo que se reducían implicaciones económicas en una instalación de bombeo del agua.

## VII. CONCLUSIONES

Se plantea una medida de mitigación, ante los hallazgos encontrados en la carga contaminante. Proponiendo una PTAR de nivel secundario para reducir la carga, considerando que esta influye negativamente al municipio a nivel ambiental, social y económico.

Se verificó que las características fisicoquímicas de cuatro parámetros (materia flotante, temperatura, coliformes fecales y cromo hexavalente) encontrados en el agua residual, son adversas al ecosistema, y por lo tanto están afectando a la calidad del cuerpo receptor.

El parámetro de coliformes fecales quintuplica ( $5 \times 10^7$ ) el límite máximo permisible establecido por el Acuerdo Gubernativo 236-2006 que es de  $< 1 \times 10^7$  NMP/100 ml.

En la fase de Pretratamiento se estableció, que se alcanza un nivel de remoción de arenas gravas de 90% y de materia flotante de 85%, lo que influye en la eficiencia de la planta evitando desperfectos en la misma.

En la fase de tratamiento primario se alcanza un nivel de remoción de 35.62% de DBO, 62.57% de SST, 15% materia flotante y 50% de coliformes fecales. De los sólidos extraídos hacia el digestor se alcanza el 35% de remoción de coliformes fecales.

En la fase de tratamiento secundario se alcanza un nivel de remoción de 53% de DBO y 10% de coliformes fecales.

Con base a los resultados obtenidos se identifica que el sistema propuesto para el tratamiento de aguas residuales alcanzará un 88.62%, de eficiencia global de remoción de la carga contaminante. Porcentaje basado en el nivel de remoción de DBO.

El análisis permitió verificar que la reutilización del afluente tratado es útil para sistemas de riego forestales, cultivos B-C y jardinería, los lodos como fertilizantes o material de relleno.

## VIII. RECOMENDACIONES

Rediseñar la tubería de desfogue de las aguas residuales municipales porque se encuentra en una ubicación complicada, ya que tiene una salida por debajo del nivel del cuerpo receptor. Además tiene una contención de cemento lo cual evita que su flujo sea directo, esto puede provocar pérdidas del agua residual por afuera de la tubería y en el proceso de transporte.

Realizar pruebas de infiltración y un análisis del nivel freático en la zona de ubicación para la construcción de la planta con la finalidad de determinar la velocidad en que el agua penetra al suelo. Esto como medida preventiva en caso de que exista alguna problemática técnica que genere un escape de las aguas residuales y esto conlleve a la contaminación de un acuífero subterráneo.

Realizar una caracterización física, química e hidráulica del suelo con la finalidad de obtener información de la composición del mismo, especialmente en la zona donde se llevará a cabo el proyecto, con el objetivo de reducir el riesgo de contaminación del suelo o del manto freático y así como evitar el riesgo en la etapa de construcción de la planta.

Complementar el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual, así como de las mediciones de caudal en época de estiaje para generar una información del ciclo de descarga en un año, con la finalidad de mejorar o acoplar el sistema propuesto si así fuese el caso.

Generar información climatológica del municipio ya que este no cuenta con datos de años anteriores, ni información actualizada y generar una base de datos para el momento de tomar decisiones acerca de las medidas de mitigación y como las variaciones climáticas actuales pueden llegar a modificar las alternativas propuestas y poder prever planes acerca de los fenómenos climáticos frecuentes.

Hacer una evaluación de impacto ambiental como una herramienta que debe considerarse necesaria para la implementación de dicho proyecto, con ello alcanzar un conocimiento sobre las incidencias que el proyecto puede generar a nivel ambiental, social y económico para el municipio.

Profundizar en el análisis de la posible reutilización tanto del agua residual tratada como de los lodos, de manera que se pueda garantizar el uso de estos subproductos y evitar riesgos para la población y el ambiente.

Realizar nuevos análisis para comprobar la presencia de cromo hexavalente, para realizar pruebas de laboratorio y medir cuál de los métodos de bioremediación entrega mejores resultados. Además identificar la procedencia del cromo hexavalente hacia los drenajes de agua residual doméstica y evitar las descargas hacia el drenaje municipal.

Preparar y capacitar al personal encargado del saneamiento ambiental, haciendo énfasis en el recurso hídrico ya que es un bien valioso en la actividad humana y para la definición de medidas que reduzcan la contaminación hacia los cuerpos receptores.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” Guatemala
- Azevedo, J. (2005). *Manual de Hidraulica*. Sao Paulo: Edgard Blucher LTDA.
- Calvache, W., Chavez, M., Duran, C., Guña, E., Imba, A., & Nazate, W. (2002). *Tratamiento de aguas: tratamiento primario y parámetros hidráulicos*. Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Campos Gómez, I. (2003). *Saneamiento Ambiental*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- CATIE. (1988). *Diagnostico subcuencas prioritarias piloto xaya pixcaya*. Guatemala: Proyecto Regional de Manejo de Cuencas.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados Tomo 1*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Fair, G., Geyer, J., & Okun, D. (1971). *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales volumen II*. México: LIMUSA-WILEY, S.A.
- Fair, G., Geyer, J., & Okun, D. (1999). *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales*. Mexico D.F.: Limusa.
- Glynn, H., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería ambiental*. México: PRENTICE HALL.
- Hess, M. (2000). *Pequeños sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Sao Paulo: Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.
- IICA. (2000). *Manual de evaluación de impacto ambiental de actividades rurales*. Uruguay: Ministerio de ganadería, agricultura y pesca.
- Llorca, R., & Bautista, I. (2006). *Prácticas de atmósfera, suelo y agua*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mendoza, J., Montañés, M., & Palomares, A. (1998). *Ciencia y tecnología del medio ambiente*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Municipalidad de Cobán. (2010). *Municipalidad de Cobán Ciudad Imperial*. Obtenido de [http://www.coban.com.gt/public/index.php?option=com\\_content&view=article&id=605:avance-de-planta-de-tratamiento-esfuerzo-ii&catid=1:features&Itemid=100038](http://www.coban.com.gt/public/index.php?option=com_content&view=article&id=605:avance-de-planta-de-tratamiento-esfuerzo-ii&catid=1:features&Itemid=100038)

- Metcalf, R., & Eddy, P. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y Reutilización*. Madrid: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Niño, Z., Pérez, S., & Llobregat, M. (2004). Desarrollo de un Programa de Simulación de Procesos para el Tratamiento de Efluentes Líquidos. *Información Tecnológica*, 47-53.
- Osorio, R. (10 de Octubre de 2013). Recopilación de información básica del Municipio de San Juan Chamelco. (D. Morán, Entrevistador)
- Pacay, J. (2009). *Monografía del Municipio de San Juan Chamelco*. Guatemala: USAC.
- PROMUDEL. (1 de Mayo de 2011). *Municipios por Guatemala*. Obtenido de [http://www.promudel.org.gt/cms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=94%3Aasan-juan-chamelco&catid=56&Itemid=82](http://www.promudel.org.gt/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=94%3Aasan-juan-chamelco&catid=56&Itemid=82)
- Ramalho, R. (1993). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: REVERTÉ, S.A.
- Ramos Castellanos, P., & Márquez Moreno, M. (2002). *Avances en calidad ambiental*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Rigola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: MARCOMBO, S.A.
- Riquelme, L., & Gómez, R. (2003). *Los recursos naturales de la región de murcia un análisis interdisciplinar*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Roldán Pérez, G. A. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Romero, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Bogotá: Lemoine Editores.
- Salazar, D. (2003). *Guía para el manejo de excretas y aguas residuales municipales: enfoque Centro América*. Guatemala: PROARCA/SIGMA.
- Sans Fonfría, R., & Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. Barcelona, España: MARCOMBO, S.A.
- SEGEPLAN. (2004). *Caracterizaciones Municipales de Alta Verapaz*. Guatemala: SEGEPLAN.
- SEGEPLAN, & BID. (2006). *Estrategia para la Gestión Integrada de Los recursos Hídricos de Guatemala*. Guatemala: Gobierno de la República de Guatemala.

SEGEPLAN, & Consejo Municipal de Desarrollo del Municipio de Santa Cruz Verapaz (2010). *Plan de desarrollo Santa Cruz Verapaz*. Santa Cruz Verapaz: SEGEPLAN/DTP.

SINIP. (2012). *Construcción sistema de tratamiento aguas residuales avenida la parroquia, área urbana, Santa Cruz Verapaz, Alta Verapaz*. Santa Cruz Verapaz: SEGEPLAN.

Torres, E. (2000). *Reutilización de Aguas y Lodos Residuales*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

## X. ANEXOS

### Anexo 1. Fotografías equipo y trabajo de campo



Figura 14. Muestra de aguas residuales refrigerada

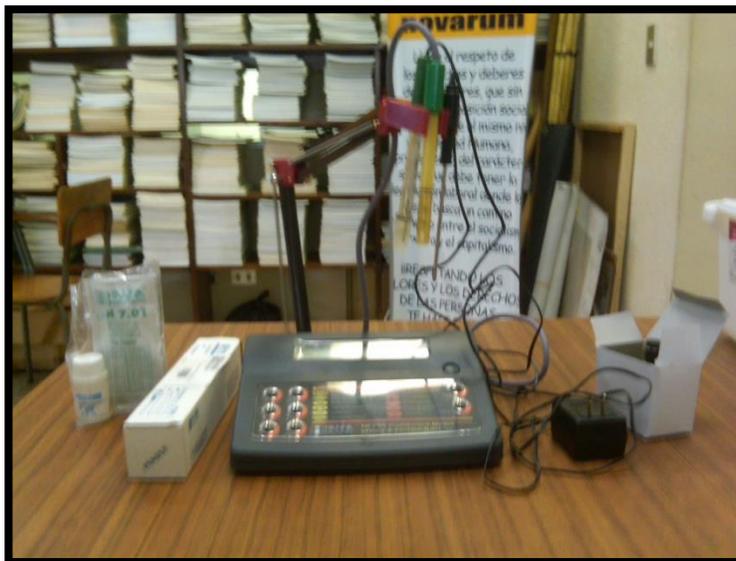


Figura 15. Multiparámetro Hanna HI 255



**Figura 14.** Salida de drenaje municipal de aguas residuales



**Figura 17.** Salida de drenaje pluvial



**Figura 18.** Obtención de muestra de agua residual



**Figura 19.** Toma de muestra en zona de desfogue



**Figura 20.** Contaminación del cuerpo receptor



**Figura 21.** Salida directa del drenaje al cuerpo receptor



Figura 22. Área aledaña a zona de desfogue inundada



Figura 15. Salida de drenaje residual inundado

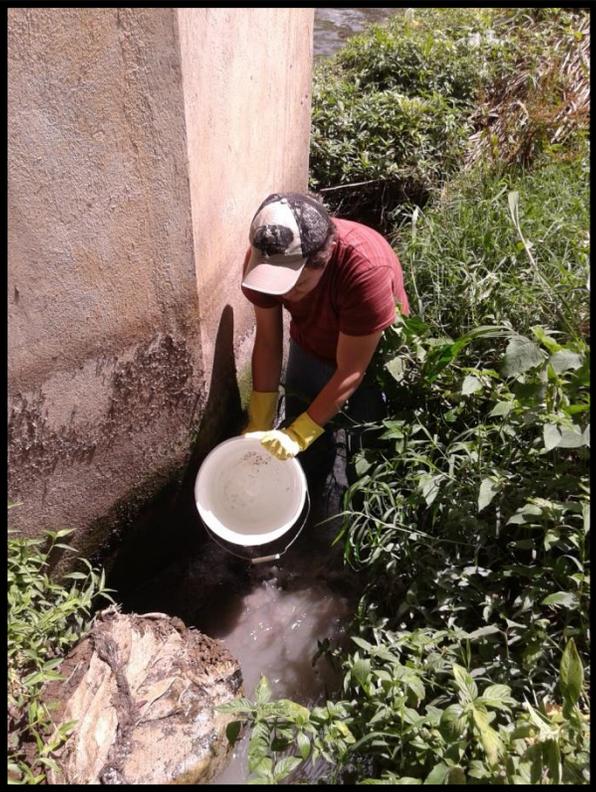


Figura 24. Medición de caudal zona de desfogue



Figura 25. Toma de mediciones zona de desfogue

## Anexo 2. Tablas valores de diseño

**Cuadro 15.** Parámetros de diseño para rejas de barras.

Concepto	Limpieza manual	Limpieza mecánica
Tamaño de la barra		
Ancho en cm.	0.5 – 1.5	0.5 – 1.5
Profundidad en cm	2.5 – 7.5	2.5 – 7.5
Separación en cm.	2.5 – 5	1.6 – 7.5
Inclinación respecto a la vertical, en °	30 – 60	0 – 30
Velocidad de aproximación, en m/s	0.3 – 0.6	0.6 – 0.9
Perdida de carga admisible, en cm	15	15

(Metcalf & Eddy, 1995)

**Cuadro 16.** Límites de aplicación medidores Parshall con descarga libre

W GARGANTA		CAPACIDAD L/S	
PULG.	CM.	MINIMO	MAXIMO
3	7.6	0.9	53.8
6	15.2	1.5	110.4
9	22.9	2.6	251.9
1	30.5	3.1	455.6
1.5	45.7	4.3	696.2
2	61.0	11.9	936.7
3	91.5	17.3	1426.3
4	122.0	36.8	1921.5
5	152.5	62.8	2422.0
6	183.0	74.4	2929.0
7	213.5	115.4	3440.0
8	244.0	130.7	3950.0
<u>10</u>	<u>305.0</u>	<u>220.0</u>	<u>5660.0</u>

(Azevedo, 2005)

**Cuadro 17.** Dimensiones típicas de medidores Parshall

	W	A	B	C	D	E	F	G	K	N
1"	2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
3"	7.6	46.6	45.7	17.8	2.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
6"	15.2	62.1	61.0	33.0	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
9"	22.9	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	45.7	7.6	11.4
1"	30.5	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
1½"	45.7	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
2"	61.0	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
3"	91.05	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
4"	122.0	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
5"	152.5	192.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
6"	183.0	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
7"	213.5	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
8"	244.0	244.0	239.2	239.2	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<u>10"</u>	<u>305.0</u>	<u>274.5</u>	<u>427.0</u>	<u>427.0</u>	<u>475.9</u>	<u>122.0</u>	<u>91.5</u>	<u>183.0</u>	<u>15.3</u>	<u>34.3</u>

(Azevedo, 2005)

**Cuadro 18.** Valores del Exponente N y el coeficiente K

W		n	K	K
Pulg. , pies	m		U. métricas	U. inglesas
3"	0.076	1.547	0.176	0.0992
6"	0.152	1.580	0.381	2.06
9"	0.229	1.530	0.535	3.07
1"	0.305	1.522	0.690	4.00
1½"	0.457	1.538	1.054	6.00
2"	0.610	1.550	1.426	8.00
3"	0.915	1.566	2.182	12.00
4"	1.220	1.578	2.935	16.00
5"	1.525	1.587	3.728	20.00
6"	1.830	1.595	4.515	24.00
7"	2.135	1.601	5.306	28.00
<u>8"</u>	<u>2.440</u>	<u>1.606</u>	<u>6.101</u>	<u>32.00</u>

(Azevedo, 2005)

**Cuadro 19.** Información típica para el diseño de tanques de sedimentación primaria

Características	Intervalo	Típico
<b>Sedimentación primaria seguida de tratamiento secundario</b>		
Tiempo de retención, h	1.5 – 2.5	2
Carga de superficie, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día		
A caudal medio	30 – 50	40
A caudal punta	80 – 120	100
Carga sobre el vertedero, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día	125 – 500	250
<b>Sedimentación primaria con adición del lodo activado en exceso</b>		
Tiempo de retención, h	1.5 – 2.5	2
Carga de superficie, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día		
A caudal medio	24 – 32	28
A caudal punta	48 – 70	60
Carga sobre vertedero, m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día	125 - 500	250

(Romero, 2004)

**Cuadro 20.** Información típica para el diseño de un Sedimentador primario rectangular

Tipo de tanque	Intervalo	Típico
<b>Rectangular</b>		
Profundidad, m	3 – 4.5	3.6
Longitud, m	15 – 90	25 – 40
Anchura, m	3 – 25	5 – 10
Velocidad de los rascadores, m/min	0.6 – 1.2	0.9

(Romero, 2004)

**Cuadro 21.** Valores de constantes empíricas a y b

Variable	a	b
<b>DBO</b>	0.018	0.020
<b>SST</b>	0.0075	0.014

(Crites & Tchobanoglous, 2000)

**Cuadro 22.** Información usual de diseño para varios tipos de filtros percoladores no sumergidos

Elemento	Carga Baja	Carga Intermedia	Carga Alta	Carga Alta	Desbaste
- Medio filtrante	Piedra/ desechos	Piedra/ desechos	Piedra/ desechos	Plástico	Plástico madera de pino
- Tamaño, pulg.	1-5 / 2-5	1-5 / 2-5	1-5 / 2-5	24x24x48	24x24x48†f
Superficie específica, pie <sup>2</sup> /pie <sup>3</sup>	12 - 30	12 - 30	12 - 30	24 - 60	24-60/12-15
- Espacio vacío, %	40 - 55	40 - 55	40 - 55	92 - 97	92 - 97/ 70 - 80
- Peso específico lb/pie <sup>3</sup>	50 - 90	50 - 90	50 - 90	2 - 6	2 - 6/ 9 - 12
- Tasa de carga hidráulica, gal/pie <sup>2</sup> . Min.	0.02 - 0.06	0.06 - 0.16	0.06 - 0.16	0.2 - 0.120	0.8 - 3.2
- Tasa de carga orgánica, lb DBO <sub>5</sub> /10 <sup>3</sup> pie <sup>2</sup> .	5 - 25	15 - 30	30 - 80	50 - 200	100 - 500
- Relación de recirculación	0	0 - 1	1 - 2	1 - 2	1 - 4
- Arrastres de sólidos	Intermitente	Intermitente	Continuo	Continuo	Continuo
- Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> ,%	80 - 90	50 - 80	65 - 90	65 - 90	40 - 70
- Moscas en el filtro	Muchas	Algunas	Pocas	Pocas o ninguna	Pocas o ninguna

(Crites & Tchobanoglous, 2000)

**Cuadro 23.** Peso específico del fango sin tratar

Tipo de sistema de alcantarillado	Intensidad del agua residual*	Peso específico**
Separativo	Débil***	1.02
Separativo	<u>Media</u>	<u>1.03</u>
Unitario	Media	1.05
Unitario	Fuerte	1.07

(Metcalf & Eddy, 1995)

**Cuadro 24.** Calidad normal de fango producido por distintos procesos de tratamiento

(Metcalf & Eddy, 1995)

PROCESO DE TRATAMIENTO	CANTIDAD NORMAL DE FANGO			HUMEDAD %	PESO ESPECÍFICO DE S. DEL FANGO	PESO ESPECÍFICO DEL FANGO	SÓLIDOS SECOS	
	M <sup>3</sup> / miles de m <sup>3</sup> de A.R.	T miles de m <sup>3</sup> de A.R.	M <sup>3</sup> / 1000 personas y días				Kg/ miles de m <sup>3</sup> de A.R.	Kg/ 1000 personas y días
<b>Sedimentación primaria</b>								
- sin digerir	2.950	3.30	1.09	95	1.40	1.02	150	56
- Digeridos en tanques separados	1.450	1.65	0.53	94	--	1.03	90	34
- Digerido y deshidratado en lechos de arena	--	0.25	0.16	60	--	--	90	34
Digerido y deshidratado en filtro de vaciado	--	0.36	0.12	72.5	--	1.00	90	34
<b>Filtro Percolador</b>	0.745	0.83	0.27	92.5	1.33	1.025	57	22
<b>Precipitación química</b>	5.120	5.80	1.9	92.5	1.93	1.03	396	150
Deshidratado en filtro de vacío	--	1.51	0.55	72.5	--	--	396	150
<b>Sedimentación primaria y fango activado:</b>	--	--	--	--	--	--	--	--
Sin Digerir	6.900	7.8	2.55	96.00	--	1.02	280	106
- Sin Digerir y deshidratado en filtro de vacío	1.480	1.55	0.56	80.0	--	0.95	280	106
- Digerido en tanque separado	2.700	3.00	1.00	94.0	--	1.03	168	63
- Digerido y deshidratado en lechos de arena	--	0.45	0.5	60.0	--	--	168	63
Digerido y deshidratado en filtros de vacío	--	0.92	0.33	80.0	--	0.95	168	63

**Cuadro 25.** Cuadro digestión discontinua de los lodos de sedimentación libre a diferentes temperaturas

Temperatura °F	50	60	70	80	<u>90</u>	100	110	120	130	140
Temperatura, °C	10.0	15.6	21.1	26.7	<u>32.2</u>	37.8	43	49	54	60
Periodo de digestión, días	75	56	42	30	<u>25</u>	24	26	16	14	18
Tipo de digestión	Mesofilica						Termofilica			

(Fair, Geyer, & Okun, Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales, 1999)

**Cuadro 26.** Aspectos climatológicos.

<b>Altura sobre el nivel del mar</b>	1900 msnm
<b>Temperatura promedio</b>	20 °C
<b>Temperatura máxima promedio</b>	23 °C
<b>Temperatura mínima promedio</b>	13°C
<b>Humedad relativa del aire</b>	81%
<b>Precipitación media anual</b>	2,181 mm

Fuente: elaboración propia. (SEGEPLAN & BID, 2006)

**Cuadro 27.** Parámetros y límites máximos permisibles para reuso

<b>Tipo de reuso</b>	<b>Demanda bioquímica de oxígeno, miligramos por litro</b>	<b>Coliformes fecales, número más probable por cien mililitros</b>
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	$<2 \times 10^2$
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	$<1 \times 10^7$
Tipo V	200	$<1 \times 10^7$

Fuente: (Acuerdo gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”)

**Cuadro 28.** Parámetros y límites máximos permisibles para lodos.

Disposición Final	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cadmio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cromo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	1500	3000	> 3000
Mercurio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	25	50	> 50
Plomo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	500	1000	> 1000

Fuente: (Acuerdo gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”)

**Cuadro 29.** Remoción teórica esperada.

Parámetro	Valor inicial	% de remoción	Valor esperado	Valor de cumplimiento Etapa Cuatro*
Grasas y aceites	22.3 mg/l	100%	0 mg/l	10 mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno	216.0 mg/l	88.62%	24.58 mg/l	100 mg/l
Sólidos suspendidos	31.0 mg/l	100%	0 mg/l	100 mg/l
Coliformes fecales	$5.0 \times 10^7$ NMP/100 ml	95%	$2.5 \times 10^6$ NMP/100 ml	$<1 \times 10^4$ NMP/100 ml

Fuente: elaboración propia

\* Valores de la etapa cuatro del Acuerdo Gubernativo 236-2006, artículo 24. Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales.

### Anexo 3. Fórmulas de diseño

1) Para la medición del caudal se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t} \left( \frac{l}{s} \right)$$

Q= caudal (l/s)

V= volumen (l)

t= tiempo (s)

2) Población futura

$$N_t = N_0(1+r)^{25} \text{ (hab)}$$

$N_t$ = Población futura, resultado de la proyección (hab)

$N_0$ = Población al inicio del periodo (hab)

t= número de años que se va a proyectar la población (año)

r= Tasa media anual de crecimiento poblacional (%)

### **3) Caudal medio de agua potable proyectado**

**Qm= Pf x dotación agua potable( Hab l/día)**

Qm= caudal medio de agua potable (l/día)

Pf= población final proyectada (hab)

### **4) Caudal medio aguas residuales proyectado**

**Qmar=Qm ×0.75(l/día agua residual)**

Qmar= caudal medio de aguas residuales(l/día agua residual)

Qm= caudal medio de agua potable (l/día)

### **Fórmulas para el diseño del canal de entrada**

#### **5) Área canal de entrada**

$$A = \frac{Q}{V} \text{ (m}^2\text{)}$$

A= área de entrada de canal (m<sup>2</sup>)

Q= caudal medio diario (m<sup>3</sup>/seg)

V= velocidad de entrada al canal (m/seg)

#### **6) Tirante de agua**

$$T = \frac{A}{B} \text{ (cm)}$$

T= tirante o profundidad de flujo (cm)

A= área de entrada del canal (m<sup>2</sup>)

B= ancho del canal (m)

### **Fórmulas para el diseño de la rejilla.**

#### **7) Ancho de la rejilla.**

$$B = a \times \frac{b+e}{e} \text{ (m)}$$

B= ancho de la rejilla (m)

a= ancho del canal (m)

e= abertura (m)

b= ancho de barras (m)

#### **8) Altura de la rejilla.**

$$h = B \sin \emptyset \text{ (m)}$$

h= altura de la rejilla (m)

B= ancho de la rejilla (m)  
Ø= inclinación (°)

### **9) Eficiencia**

$$E = \frac{a}{a+t} (\%)$$

E= eficiencia (%)

a= abertura (m)

t= ancho de barras (m)

### **10) Ancho útil libre**

$$B_u = B \times E (m)$$

B<sub>u</sub>= ancho útil libre (m)

B= ancho el canal (m)

E= eficiencia (%)

### **11) Ancho total ocupado por las barras**

$$B_p = B - B_u (m)$$

B<sub>p</sub>= ancho total ocupado por las barras (m)

B= ancho del canal (m)

B<sub>u</sub>= ancho útil libre (m)

### **12) Número de barras**

$$\# \text{ de barras} = \frac{B_p}{t} (\# \text{ de barras})$$

# de barras= total de barras a utilizar

B<sub>p</sub>= ancho total ocupado por las barras (m)

t= ancho de la barra (m)

### **13) Pérdida de carga**

$$H_f = 1.43 \times \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} (cm)$$

H<sub>f</sub>= pérdida de carga (cm)

V= velocidad a través de las barras (m/s)

G= aceleración gravitacional (m/s)

### **14) Pérdida de carga a un 50% de obstrucción**

$$H_f = 1.43 \times \frac{2V_1^2 - V_2^2}{2(9.8)} (cm)$$

H<sub>f</sub>= pérdida de carga en 50% de obstrucción (cm)

V= velocidad a través de las barras (m/s)

### **Fórmulas para el diseño del desarenador.**

### **15) Velocidad de sedimentación**

$$C_d = \frac{24}{NR} + \frac{3}{NR^{1/2}} + 0.34$$

$$V_s = (1308 (SG-1) \frac{D}{\nu})^{1/2} \text{ (cm/s)}$$

NR= número de Reynold

Vs= velocidad de sedimentación de la partícula (m/s)

D= diámetro de la partícula

Vi= viscosidad cinemática (cm<sup>2</sup>/s)

SG= gravedad específica de la partícula

Cd= coeficiente de arrastre

### **16) Caudal promedio de diseño**

$$Q_{\text{promedio}} = \text{consumo} \left( \frac{1}{\text{hab.día}} \times \text{población} \right) \text{ (m}^3\text{)}$$

Caudal promedio mínimo de diseño

$$Q_{\text{minh}} = (\text{población actual} \times \text{dotación}) (\text{factor } Q_{\text{min}}) \text{ (m}^3\text{)}$$

### **17) Sección de control rectangular**

$$H = \left( \frac{3Q}{2TV} \right) \text{ (cm)}$$

H= altura (m)

T= anchura superior (m)

Q= caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

V= velocidad de sedimentación (cm/s)

### **18) Determinación de la profundidad y altura cinética para la sección de control**

$$H + \frac{V^2}{2g} = d_c + \frac{V_c^2}{2g} + 0.10 V_c^2 \text{ (m/s)}$$

H= profundidad (m)

V<sup>2</sup>/2g= altura cinética

d<sub>c</sub>= profundidad (m)

V<sub>c</sub><sup>2</sup>/2g= pérdida de carga

### **19) Ancho de la sección de control de vertedero**

$$A_c = \frac{Q}{V_c} \text{ (cm)}$$

A<sub>c</sub>= ancho de control de vertedero (m<sup>2</sup>)

Q= caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

V<sub>c</sub>= velocidad sección de control (m/s)

### **20) Área para un caudal medio horario**

$$A_c = \left( \frac{Q^2 \times W}{g} \right)^{1/3} = d_c \times w \text{ (m}^2\text{)}$$

A<sub>c</sub>= área en la sección transversal para cualquier caudal (m<sup>2</sup>)

dc= profundidad (m)  
W= constante (m)  
G= aceleración gravitacional (m/s)

### **21) Profundidad de la sección parabólica del desarenador**

$$T = \frac{3Q}{2HV} \text{ (cm)}$$

T= ancho de la sección (m)  
Q= caudal medio (m<sup>3</sup>/seg)  
H= profundidad de la sección (m)  
V= velocidad de sedimentación (m/s)

### **22) Velocidad de paso de las partículas**

$$T = \frac{d}{V} \text{ (s)}$$

T= tiempo de retención (min)  
d= altura en condiciones de caudal máximo (m)  
V= velocidad de sedimentación (m/s)

### **23) Longitud del desarenador**

$$L = V \times T \text{ (m)}$$

L= longitud (m)  
V= velocidad de sedimentación (m/s)  
T= tiempo de retención (s)

Se considera aproximadamente un 25% de la longitud para evitar la turbulencia en el desarenador

### **Fórmulas para el diseño de la trampa de grasas**

#### **24) Dimensión superficial**

$$\text{Área superficial} = L \times B$$

Área superficial= área total (m)

L= caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)  
B= carga hidráulica (l/s.m<sup>2</sup>)

#### **25) Volumen acumulado**

$$V = T \times Q \text{ (m}^2\text{)}$$

V= volumen acumulado en un periodo de tiempo (m<sup>2</sup>)  
T= tiempo de retención (m/min)  
Q= caudal máximo (m<sup>2</sup>/s)

#### **26) Fondo de trampa de grasas**

$$a = \frac{2V}{3 \times b \times h} \text{ (m)}$$

a= área del fondo de la trampa de grasas (m)

h= altura de la trampa de grasa (m)

b= dimensiones base de la trampa de grasa (m)

V= volumen acumulado (m<sup>3</sup>)

## **Fórmulas para el diseño del sedimentador primario**

### **27) Caudal de diseño**

$$Q_p = \frac{\text{Población} \times \text{dotación}}{1000} \times \% \text{Contribución} \text{ (m}^3/\text{día)}$$

Q<sub>p</sub>= caudal pico de diseño (m<sup>3</sup>/s)

Población= total habitantes proyectado (hab)

% contribución= 0.75 porcentaje de agua residual

### **28) Área superficial**

$$A = \frac{Q}{CS} \text{ (m}^2\text{)}$$

A= área superficial del sedimentador (m<sup>2</sup>)

Q= caudal pico de diseño (m<sup>3</sup>/día)

CS= carga superficial (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día)

### **29) Relación largo-ancho**

$$4A^2 = 73.06 \text{ (m)}$$

### **30) Nueva carga superficial**

$$CS = \frac{Q}{A} \text{ (m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día)}$$

CS= nueva carga superficial (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día)

Q= caudal pico de diseño (m<sup>3</sup>/día)

A= área total del sedimentador (m)

### **31) Tiempo de retención**

$$Tr = \frac{Vol}{Q} \text{ (horas)}$$

Tr= tiempo de retención en el sedimentador (hora)

Vol= volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

Q= caudal pico de diseño (m<sup>3</sup>/día)

### **32) Velocidad de arrastre**

$$V_H = \left( \frac{8K(S-1)gd}{f} \right)^{1/2} \text{ (m/s)}$$

V<sub>h</sub>= velocidad de arrastre de partículas (m/s)

K= constante de cohesión

S= gravedad específica  
g= aceleración gravitacional (m/s)  
d= diámetro partículas (nm $\times 10^{-6}$ )  
f= factor de fricción Darcy Weisbach

### **33) Velocidad de arrastre comparada con la velocidad horizontal**

$$V_H = \frac{Q}{A_x} \text{ (m/s)}$$

V<sub>h</sub>= velocidad de arrastre horizontal (m/s)  
Q= caudal pico de diseño (m<sup>3</sup>/día)  
A<sub>x</sub>= área total horizontal (m<sup>2</sup>)

### **34) Remoción de DBO**

$$\text{Remoción DBO} = \frac{t}{a+bt} \text{ (\%)}$$

Remoción DBO= porcentaje de remoción de DBO  
t= tiempo de retención (horas)  
a, b= constantes empíricas

### **35) Remoción de sólidos suspendidos totales**

$$\text{Remoción SST} = \frac{t}{a+bt} \text{ (\%)}$$

Remoción SST= porcentaje de remoción de SST  
a, b= constantes empíricas  
t= tiempo de retención (horas)

### **Fórmulas para el diseño del digestor de lodos.**

#### **36) Volumen retenido**

$$V_r = tQ \text{ (m}^3\text{)}$$

V<sub>r</sub>= volumen retenido en el digestor (m<sup>3</sup>)  
t= tiempo de retención (hora)  
Q= caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

#### **37) Peso de los sólidos secos**

$$W_{sst} = \%R_{sst} \times V_r \times \text{concentración de sólidos (Kg)}$$

W<sub>ss</sub>= peso de los sólidos secos retenidos (kg)  
%R<sub>ss</sub>= porcentaje de remoción de sst (%)  
V<sub>r</sub>= volumen retenido en el digestor (m<sup>3</sup>)

#### **38) Volumen del fango**

$$V_f = \frac{W_{sst}}{Y} \text{ (m}^3\text{)}$$

V<sub>f</sub>= volumen del fango acumulado (m<sup>3</sup>)  
W<sub>ss</sub>= peso de sólidos secos (kg)  
Y= peso específico del fango (kg/d.m<sup>3</sup>)

### **39) Diámetro del tanque**

$$r^2 = \frac{V}{\pi \times h} \quad (m)$$

r= diámetro (m)

V= volumen de lodos (m<sup>3</sup>)

h= profundidad del tanque (m)

### **Fórmulas para el diseño del filtro percolador**

#### **40) Eficiencia del filtro**

$$E = \frac{DBO_5 - DBO \text{ final}}{DBO \text{ inicial}} \quad (\%)$$

#### **41) Volumen del filtro**

$$E^2 = \frac{100}{1 + 0.0561 \times \left(\frac{W}{V} \times F\right)^{1/2}} \quad (10^3 \text{ pie}^3)$$

$$F = \frac{1 + R}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2}$$

E= eficiencia de la remoción de DBO (%)

W= carga de la DBO al filtro (lb/día)

V= volumen del medio del filtro (10<sup>3</sup>pie<sup>3</sup>)

F= factor de recirculación

R= relación de recirculación (Q<sub>1</sub>/Q)

#### **42) Dimensiones del filtro**

$$V = L \times A \times h \quad (m)$$

$$L = 2A$$

V= volumen de filtro percolador (pie<sup>3</sup>)

L= longitud del filtro percolador (m)

A= ancho del filtro percolador (m)

h= profundidad (m)

#### **43) Carga orgánica volumétrica**

$$L_{org} = \frac{W}{L} \quad DBO_5 / m^3 \cdot dia$$

W= total de carga DBO/día (DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.día)

L= longitud del filtro percolador (m)

### **Fórmulas para el diseño del patio de secado de lodos**

#### **44) Masa de sólidos que conforman los lodos**

$$Msd = (0.5 \times 0.7 \times 0.5 \times C) + (0.5 \times 0.3 \times C) \quad (Kg \text{ de } SS / dia)$$

Msd= masa de sólidos que forman parte de los lodos

C= carga de sólidos que ingresan al sedimentador (Kg de ss/día)

#### **45) Carga de sólidos que ingresan al sedimentador**

$$C=Q \times SS \times 0.0864 \text{ (Kg de ss/día)}$$

C= carga de sólidos (Kg de ss/día)

Q= caudal máximo (l/día)

SS= ss totales del agua residual (mg/l)

#### **46) Volumen diario de lodos digeridos**

$$Vld = \frac{Msd}{\rho_{lodo} \times \left(\frac{10\%}{100}\right)} \text{ (l/día)}$$

Vld= volumen de lodos digeridos (l/día)

Msd= masa de sólidos (Kg de ss/día)

Plodo= densidad de lodos (Kg/l)

#### **47) Volumen de lodos a extraer del patio**

$$Vel = \frac{Vld \times Td}{100} \text{ (m}^3\text{)}$$

Vel= volumen a extraer (m<sup>3</sup>)

Vld= volumen de lodos digeridos (l/día)

Td= tiempo de digestión (día)

#### **48) Dimensiones del patio de secado**

$$L = \frac{A}{W} \text{ (m)}$$

L= longitud del patio de secado (m)

A= área del patio de secado (m<sup>2</sup>)

W= ancho del patio de secado (m)

### **Anexo 4. Cálculos de diseño**

#### **1. Cálculo del canal de entrada**

Se asume una velocidad propuesta de 0.60 m/seg para rejillas de limpieza manual (Metcalf&Eddy, 1995), se asume un factor de Q<sub>máximo</sub> de 2.84 según (Romero, 2004).

$$Q = 43.53 \text{ l/s} \times 2.84 \rightarrow Q = 123 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{máximo}} = \frac{123.00 \text{ l/seg}}{1000 \text{ l/m}^3} \rightarrow Q_{\text{máximo}} = 0.123 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$A = \frac{Q}{V} \rightarrow A = \frac{0.123 \text{ m}^3/\text{seg}}{0.60 \text{ m}} \rightarrow A = 0.205 \text{ m}^2$$

Se asume un ancho de canal  $b = 0.50$ , donde  $T$  es igual al tirante o a la profundidad. (Metcalf&Eddy, 1995)

$$A=T \times B \text{ despejando } T = \frac{A}{B}$$

$$T = \frac{0.205 \text{ m}^2}{0.50 \text{ m}} = 0.41 \text{ m} \rightarrow T = 0.41 \text{ m} \times \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = \mathbf{41 \text{ cm}}$$

## 2. Cálculo rejillas

Ancho de la rejilla.

$$B = a \times \frac{b+e}{e} \rightarrow B = 0.5 \text{ m} \times \frac{0.01 \text{ m} + 0.04 \text{ m}}{0.04 \text{ m}} \rightarrow \mathbf{B = 0.625 \text{ m}}$$

Altura de la rejilla.

$$h = B \sin \theta \rightarrow h = 0.625 \sin 60^\circ \rightarrow \mathbf{h = 0.54 \text{ m}}$$

Eficiencia.

$$E = \frac{a}{a+t} \rightarrow E = \frac{0.04}{0.04+0.01} = \mathbf{0.8}$$

La eficiencia en la unidad varía entre 0.60 y 0.85. (Hess, 2000)

Ancho útil libre.

$$B_u = B \times E \rightarrow B_u = 0.50 \times 0.8 = \mathbf{0.40 \text{ m}}$$

Ancho total ocupado por las barras.

$$B_p = B - B_u \rightarrow B_p = (0.50 - 0.4) = \mathbf{0.1 \text{ m}}$$

Número de barras a utilizar.

$$\# \text{ de barras} = \frac{B_p}{t} \rightarrow \# \text{ de barras} = \frac{0.1}{0.01} = \mathbf{10 \text{ barras}}$$

Pérdida de carga.

$$V_a = V \times E, \text{ despejando } V = \frac{V_a}{E}$$

$$V = \frac{0.60 \text{ m/s}}{0.8} \rightarrow V = \mathbf{0.71 \text{ m/s}}$$

$$H_f = 1.43 \times \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \rightarrow H_f = 1.43 \times \frac{(0.71 \text{ m/s})^2 - (0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \rightarrow H_f = 1.43 \times \frac{(0.5041 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0.36 \frac{\text{m}}{\text{s}})}{19.6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_f = 1.43 \times \frac{0.1441}{19.6} \rightarrow \mathbf{H_f = 0.0105 \text{ m}}$$

Análisis para un 50% de obstrucción de las rejillas  $V = 2V$ , aguas arriba=entre barra.

$$A \times V = A \times \frac{V}{2} \rightarrow 2V = \frac{AV}{A} \rightarrow 2V = V$$

$$H_f = 1.43 \times \frac{2V_1^2 - V_2^2}{2(9.8 \text{ m/s}^2)} \rightarrow H_f = 1.43 \times \frac{(2 \times 0.6)^2 - 0.6^2}{19.6} \rightarrow H_f = 1.43 \times \frac{(1.44 - 0.36)}{19.6} \rightarrow H_f = 0.079 \text{ m}$$

### 3. Cálculo Desarenador

Velocidad de sedimentación.

$$C_d = \frac{24}{NR} + \frac{3}{NR^{1/2}} + 0.34 \rightarrow C_d = \frac{24}{1000} + \frac{3}{1000^{1/2}} + 0.34 \rightarrow C_d = 0.46$$

$$V_s = (1308 (SG-1) \frac{D}{CD})^{1/2} \rightarrow V_s = (1308(2.65-1) \frac{0.02}{0.46})^{1/2} \rightarrow V_s = 9.66 \text{ cm/s}$$

Caudal promedio

$$Q_{\text{promedio}} = \text{consumo} \left( \frac{1}{\text{hab.día}} \times \text{población} \right)$$

$$Q_{\text{promedio}} = \left( 150 \frac{1}{\text{hab.día}} \right) (25,077 \text{ hab}) \left( \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ seg}} \right) \rightarrow Q_{\text{promedio}} = 43.53 \frac{1}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{medh}} = 43.53 \frac{1}{\text{s}} \times 2.4 \rightarrow Q_{\text{medh}} = 104.47 \frac{1}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 0.104 \text{ m}^3$$

$$Q_{\text{minh}} = (\text{población actual} \times \text{dotación}) (\text{factor } Q_{\text{min}})$$

$$Q_{\text{minh}} = \left( 11,977 \text{ hab} \times 150 \frac{1}{\text{hab.día}} \right) \left( \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} \right) (2.4)(1.10) \rightarrow Q_{\text{minh}} = 54.94 \frac{1}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 0.0548 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sección de control rectangular.

Para la sección de control que se eligió, era necesario un desarenador con una sección transversal parabólica. Esta condición permitiría que la velocidad anteriormente propuesta fuera constante.

$$Q = \frac{A}{V} \rightarrow A = \left( \frac{2}{3} \right) \rightarrow HTQ = \left( \frac{2}{3} \times HT \right) \times V(Q_{\text{maxh}})$$

$$H = \frac{3/2 \times Q}{TV} \quad H = \left( \frac{3Q}{2TV} \right) \rightarrow H = \frac{3(0.123)}{2(0.5)(0.3)} \rightarrow H = \frac{0.369}{0.30} \rightarrow H = 1.23 \text{ m}$$

Determinación de la profundidad y altura cinética para la sección de control.

$$H + \frac{V^2}{2g} = d_c + \frac{V_c^2}{2g} + 0.10 V_c^2 \quad D_c = \frac{2V_c^2}{2g}$$

Sustituyendo la ecuación obtenemos:

$$H + \frac{V^2}{2g} = \frac{2V_c^2}{2g} + \frac{V_c^2}{2g} + \frac{0.10V_c^2}{2g} \rightarrow H + \frac{V^2}{2g} = 3.10 \frac{V_c^2}{2g} \rightarrow V_c^2 = 2g \left( H + \frac{V^2}{2g} \right) \times \frac{1}{3.10}$$

$$V_c = \left( \frac{2g}{3.10} \times H + \frac{V^2}{2g} \right)^{1/2} \rightarrow V_c = \sqrt{\frac{(2 \times 9.8)}{3.10} \times \frac{1.23 + (0.30)^2}{(2 \times 9.8)}} \rightarrow V_c = \sqrt{6.32258 \times 1.23459} \rightarrow V_c = 2.79 \text{ m/s}$$

Ancho de la sección de control de vertedero.

$$A_c = d_c \times W = \frac{Q}{V_c} \rightarrow A_c = \frac{Q}{V_c} \rightarrow A_c = \frac{0.123 \text{ m}^3/\text{s}}{2.79 \text{ m/s}} \rightarrow A_c = 0.04408 \text{ m}^2$$

Encontrando:

$$D_c = \frac{2V_c^2}{2(9.8)} \rightarrow D_c = \frac{2(2.79)^2}{2(9.8)} \rightarrow D_c = \frac{15.56}{19.6} = 0.79387 \text{ m}$$

$$W = \frac{A_c}{d_c} \rightarrow W = \frac{0.04408}{0.79387} \rightarrow W = 0.056 \text{ m}$$

Para un caudal medio horario.

$$A_c = \left( \frac{Q^2 \times W}{g} \right)^{1/3} = d_c \times w \rightarrow A_c = \left( \frac{0.104^2 \times 0.056}{9.8} \right)^{1/3} \rightarrow A_c = \left( \frac{0.0108 \times 0.056}{9.8} \right)^{1/3}$$

$$A_c = \sqrt[3]{0.000061} \rightarrow A_c = 0.039 \text{ m}^2$$

$$D_c = \frac{A_c}{W} \rightarrow D_c = \frac{0.039 \text{ m}^2}{0.056 \text{ m}} \rightarrow D_c = 0.696 \text{ m}$$

$$H = 3.1 \left( \frac{d_c}{2} \right) - \frac{V^2}{2g} \rightarrow H = 3.1 \left( \frac{0.696 \text{ m}}{2} \right) - \left( \frac{0.30^2}{2(9.8)} \right) \rightarrow H = 3.1(0.348) - 0.00459 \rightarrow H = 1.074 \text{ m}$$

Profundidad de la sección parabólica del Desarenador a caudal medio.

Anchura "T" (caudal medio)

$$T = \frac{3Q}{2HV} \rightarrow T = \frac{3/2(0.104)}{(1.074)(0.30)} \rightarrow T = \frac{0.156}{0.322} \rightarrow T = 0.484 \text{ m}$$

Esta será la anchura a caudal medio de la sección parabólica.  
 Anchura para caudal mínimo.

$$Ac = (Q^2 \times W/g)^{1/3} = dc \times W \rightarrow Ac = \left(\frac{0.0548^2 \times 0.056}{9.8}\right)^{1/3} \rightarrow Ac = \left(\frac{0.0030 \times 0.056}{9.8}\right)^{1/3}$$

$$Ac = \sqrt[3]{0.000017} \rightarrow Ac = \mathbf{0.025m^2}$$

$$Ac = dc \times W \rightarrow dc = \frac{Ac}{W} \rightarrow dc = \frac{0.025}{0.056} \rightarrow dc = \mathbf{0.44m}$$

$$H = 3.1 \left(\frac{0.44}{2}\right) - \left(\frac{0.30^2}{2(9.8)}\right) \rightarrow H = 3.1(0.22) - 0.00459 \rightarrow H = \mathbf{0.67m}$$

Profundidad a caudal mínimo.

$$T = \frac{3/2(0.0548)}{(0.21)(0.30)} \rightarrow T = \frac{0.0822}{0.063} \rightarrow T = \mathbf{1.30}$$

La longitud del desarenador se calcula con base en la velocidad en que las partículas pasan por la malla;  $V_s = 1.1 \text{ m/min}$ .

$$V = \frac{d}{t} \rightarrow T = \frac{d}{V} T = \frac{0.900}{1.10 \text{ m/min}} \rightarrow T = 0.81 \text{ min} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = \mathbf{49 \text{ seg}}$$

Para la caja de arena; donde  $V = 0.3 \text{ m/s}$

$$V = \frac{L}{T} \rightarrow L = V \times T = 0.3 \text{ m/s} \times 49 \text{ seg} \rightarrow L = \mathbf{14.72 \text{ m}}$$

Para evitar la turbulencia se incrementa la longitud en un 25%

$$L_t = 15 \text{ m}(1.25) \rightarrow L_t = 18.75 \approx \mathbf{19 \text{ m}}$$

#### 4. Cálculo medidor de caudal tipo Parshall

Punto de medición

La medida de carga H es recomendable tomarla a 2/3 A o 2/3 B.

$$PM = \frac{2}{3} B \rightarrow PM = \frac{2}{3} \times 194.1 \rightarrow PM = 129.7 \text{ cm} \approx \mathbf{130 \text{ cm}}$$

#### 5. Cálculo trampa de grasas y aceites

Se recomienda una carga hidráulica de  $4 \text{ l/s.m}^2$  y un tiempo de retención de 5 minutos.

$$\text{Área superficial}=54.8 \times 0.25\text{m}^2$$

$$\text{Área superficial}=13.7\text{m}^2$$

Dimensión superficial de la trampa de grasas.

Area superficial=LxB

$$\mathbf{AS=1.8b^2} \rightarrow b^2 = \frac{13.7}{1.8} \rightarrow b = \sqrt{7.61} \rightarrow b = \mathbf{2.75\text{m}}$$

$$\mathbf{h=1.8b} \rightarrow h = 1.8 \times 2.75 \rightarrow h = \mathbf{4.95\text{ m}}$$

Volumen acumulado

$$\mathbf{Q = \frac{V}{T}} \rightarrow V = T \times Q \rightarrow T = 5 \text{ min} \times \frac{60\text{s}}{1\text{min}} \rightarrow T = \mathbf{300\text{ s}}$$

$$V = 300\text{s} \times 0.0548 \rightarrow V = \mathbf{16.44\text{m}^2}$$

Fondo de la trampa de grasas

$$\mathbf{A \times B = V} \rightarrow V = AB \rightarrow A = \frac{V}{B}$$

$$A = (a+2a)h \rightarrow A = \frac{3a}{2 \times h} \rightarrow \frac{V}{b} = \frac{3a}{2h} \rightarrow V = \frac{3a}{2 \times b \times h} \rightarrow 2V = 3a \times b \times h$$

$$a = \frac{2V}{3 \times b \times h} \rightarrow a = \frac{2(16.44)}{(3)(2.75)(4.95)} \rightarrow a = \frac{32.88}{40.83} \rightarrow a = \mathbf{0.80\text{ m}}$$

## 6. Cálculo sedimentador primario rectangular

Caudal de diseño.

$$\mathbf{Q_p = \frac{\text{Población} \times \text{dotación}}{1000} \times \% \text{Contribución}} \rightarrow Q_p = \frac{25,977 \text{ hab} \times 150 \text{ l/día}}{1000} \times 75\%$$

$$Q_p = \mathbf{2,922.41 \text{ m}^3/\text{día}}$$

Área superficial.

Para el valor de carga de superficie (CS) se tomó del Cuadro información típica para el diseño de tanque de sedimentación primaria (véase anexo 2, cuadro 19 y cuadro 20)

$$\mathbf{A = \frac{Q}{CS}} \rightarrow A = \frac{2,922.41 \text{ m}^3/\text{día}}{40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}} \rightarrow A = \mathbf{73.06\text{m}^2}$$

Se propone una relación de largo y ancho de 4 a 1.

$$\mathbf{4A^2 = 73.06} \rightarrow A^2 = \frac{73.06}{4} \rightarrow A = \sqrt{18.265} \rightarrow A = \mathbf{4.27\text{ m}}$$

$$L=4.27 \times 4 \rightarrow L=17.08 \text{ m}$$

Con una profundidad de 4 metros se estima el volumen del tanque.

$$\text{Vol}=4\text{m} \times 17\text{m} \times 4\text{m} \rightarrow \text{Vol}=272\text{m}^3$$

Nueva carga superficial.

$$CS = \frac{Q}{A} \rightarrow CS = \frac{2,922.41 \text{ m}^3/\text{día}}{(4\text{m} \times 17\text{m})} \rightarrow CS = 42.9 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{día}$$

El tiempo de retención será el siguiente:

$$Tr = \frac{\text{Vol}}{Q} \rightarrow Tr = \frac{272\text{m}^3}{2,922.41 \text{ m}^3/\text{día}} \rightarrow Tr = 0.093\text{día} \times \frac{24\text{h}}{1\text{día}} \rightarrow Tr = 2.23 \text{ horas}$$

Velocidad de arrastre.

$$V_H = \left( \frac{8K(S-1)gd}{f} \right)^{1/2} \rightarrow V_H = \left( \frac{8K(0.05)(1.25-1)9.806 \times 100 \times 10^{-6}}{0.02} \right)^{1/2} \rightarrow V_H = 0.070 \text{ m/s}$$

Velocidad de arrastre calculada comparada con la velocidad horizontal, cuya velocidad se toma del caudal dividido entre la sección de flujo el cual es de 4 m por 4 m

$$V_H = \frac{Q}{A_x} \rightarrow V_H = \frac{2,922.41}{(4 \times 4)} \rightarrow V_H = 182.62 \rightarrow V_H = \frac{182.62}{86400} \rightarrow V_H = 0.0021 \text{ m/s}$$

El cálculo de la velocidad horizontal es menor a la velocidad de arrastre anteriormente calculada, con lo cual se puede asegurar que el material sedimentado no será suspendido y no se alterará el proceso.

Para el cálculo de la remoción de SST y DBO se utilizaron las constantes empíricas del cuadro valores constantes empíricas a y b de tasas de remoción (véase anexo 2, cuadro 21).

Remoción de DBO.

$$\text{Remoción DBO} = \frac{t}{a+bt} \rightarrow \text{Remoción DBO} = \frac{2.23}{0.018+(0.02)(2.23)}$$

$$\text{Remoción DBO} = \frac{2.23}{0.0626} \rightarrow \text{Remoción DBO} = 35.63\%$$

Remoción de SST.

$$\text{Remoción SST} = \frac{t}{a+bt} \rightarrow \text{Remoción SST} = \frac{2.23}{0.0075+(0.014)(2.01)}$$

$$\text{Remoción SST} = \frac{2.23}{0.03564} \rightarrow \text{Remoción SST} = \mathbf{62.57\%}$$

## 7. Cálculo Filtro percolador

Cálculo de la eficiencia.

$$0.123 \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{1000\text{l}}{1\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785\text{l}} \times \frac{86400\text{s}}{1 \text{ día}} = 2,807,714.66 \text{ gal/día}$$

$$\mathbf{QD = 2.807714 \times 10^6 \text{ gal/día}}$$

La eficiencia estimada del filtro será de 82% según (Crites & Tchobanoglous, 2000)

$$E = \frac{\text{DBO}_5 - \text{DBO final}}{\text{DBO inicial}}$$

El valor que debe tener la DBO al final de la etapa de tratamiento debe ser de 100 mg/l según el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

$$E = \frac{216 \text{ mg/l} - 100 \text{ mg/l}}{216 \text{ mg/l}} \rightarrow E = \frac{116}{216} \rightarrow E = 0.537 \times 100 \rightarrow E = \mathbf{53\%}$$

$$\text{DBO después del filtro} = 216 - (216 \times 0.537)$$

$$\text{DBO después del filtro} = 100 \text{ mg/l}$$

Cálculo del volumen del filtro.

$$E^2 = \frac{100}{1 + 0.0561 \times \left(\frac{W}{V} \times F\right)^{1/2}}$$

Donde:

$$F = \frac{1+R}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2} \rightarrow F = \frac{1+0}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2} \rightarrow F = 1$$

Para w, el factor de conversión 8.34; lb/{Mgal\*(mg/l)}

$$W = 2.807714 \times 10^6 \text{ gal/día} \times 216.0 \text{ mg/l} \times 8.34 \rightarrow W = \mathbf{5,057.92 \text{ lb DBO}_5/\text{día}}$$

Despejando V:

$$V = \frac{W(0.0561)^2}{F\left(\frac{100}{E-1}\right)^2} \rightarrow V = \frac{5,057.92(0.0561)^2}{1\left(\frac{100}{53-1}\right)^2} \rightarrow V = \frac{15.9183}{3.6982}$$

$$\mathbf{V = 4.3043 \times 10^3 \text{ p}^3 \rightarrow 43.04 \times 10^3 \text{ p}^3}$$

Dimensiones del filtro percolador.

$$\mathbf{V = L \times A \times h} \rightarrow L = 2A \rightarrow 43.04 \times 10^3 \text{ p}^3 = 2A \times A \times h \rightarrow 43.04 \times 10^3 \text{ p}^3 = 2A \times h$$

Para h=3.0 metros; 9.84 pies

$$43.04 \times 10^3 \text{ p}^3 = 2A^2 \times 9.84 \text{ pies} \rightarrow A^2 = \frac{43.04 \times 10^3}{19.68} \rightarrow A^2 = 2,186.99$$

$$A = \sqrt{2,186.99} \rightarrow A = 46.76 \text{ pies} \rightarrow 46.76 \text{ pie} \times \frac{1 \text{ m}}{3.28 \text{ pie}} = 14.25 \text{ m}$$

$$L = 2(14.25) \rightarrow L = 28.5 \text{ m} \rightarrow 28.5 \text{ m} \times \frac{3.28 \text{ pie}}{1 \text{ m}} = 93.48 \text{ pies}$$

Carga orgánica volumétrica.

$$\text{Lorg} = \frac{W}{L}$$

Donde:

$$L \times A \times \rightarrow L = 2A \rightarrow \text{Lorg} = \frac{5,057.92}{28.5(14.25 \times 3)} \rightarrow \text{Lorg} = \frac{5,057.92}{1,218.37} \rightarrow \text{Lorg} = 4.15 \text{ lb DBO}_5 / \text{m}^3 \cdot \text{día}$$

## 8. Cálculo digestor de lodos

El volumen se calcula con un tiempo de 2.23 horas, tiempo que se toma de la retención en el sedimentador primario.

$$T = 2.23 \text{ horas} \times \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ hora}} \rightarrow T = 8,028 \text{ segundos}$$

$$Q = \frac{V_r}{t} \rightarrow V_r = tQ \rightarrow V_r = (8,028 \text{ s})(0.123 \text{ m}^3/\text{s}) \rightarrow V_r = 987.44 \text{ m}^3$$

Calculando.

$$W_{ss} = \text{peso de sólidos secos} \rightarrow W_{ss} = \%R_{sst} \times V_r \times \text{concentración de sólidos}$$

De la remoción de sólidos suspendidos se tiene:  $R_{sst} = 62.57\%$

$$W_{sst} = \left( \frac{62.57}{100} \times 100 \text{ mg/l} \right) \times \frac{346.10 \text{ m}^3}{1000 \text{ m}^3 / 1000 \text{ l/m}^3} \rightarrow W_{sst} = 62.57 \text{ mg/l} \times (987,440 \text{ m}^3 / 1000 \text{ l/m}^3)$$

$$W_{sst} = 61,784.12 \text{ mg} \rightarrow 61.87 \text{ kg}$$

Cálculo del volumen del fango

$$V_f = \frac{W_{sst}}{Y}$$

Del cuadro valores del peso específico del fango sin tratar y porcentaje de humedad (véase anexo 2, cuadro 23 y cuadro 24) se toma un valor de  $1.03 \text{ kg/dm}^3$  y  $95\%$  de humedad.

$$V_f = \frac{61.78 \text{ kg}}{1.03 \text{ kg/dm}^3 \times 0.05} \rightarrow V_f = \frac{61.78 \text{ kg}}{0.0515} \rightarrow V_f = 1,199.61 \text{ m}^3 \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3} \rightarrow V_f = 1.199 \text{ m}^3$$

Este es el volumen calculado para un tiempo de 2.23 horas y sirve para el cálculo de 24 horas.

$$1.199 \text{ m}^3 \rightarrow 2.23 \text{ horas}$$

$$x \rightarrow 24 \text{ horas}$$

$$x(2.23) = 24 \times 1.199 \rightarrow x = \frac{28.776}{2.23} \rightarrow x = 12.9 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se propone un tiempo de retención de 42 días.

$$V_{dd} = 12.9 \text{ m}^3/\text{día} \times 42 \text{ días} \rightarrow V_{dd} = 541.8 \text{ m}^3$$

Cálculo del diámetro

Diámetro del tanque circular tomando una profundidad de 3 metros.

$$r^2 = \frac{V}{\pi \times h} \rightarrow r^2 = \frac{541.8 \text{ m}^3}{\pi \times 3} \rightarrow r^2 = \frac{541.8 \text{ m}^3}{9.424} \rightarrow r^2 = 57.49 \rightarrow r = \sqrt{57.49} \rightarrow r = 7.58 \text{ m}$$

La pendiente del fondo deberá tener valores de 1 en la vertical por 4 en la horizontal esto incrementa 0.55 metros el fondo, en su parte central.

## 9. Cálculo patio de secado

Población de diseño: 25,077 habitantes a 25 años.

$$\text{Área} = 25,077 \text{ hab} \times 0.04 \text{ m}^2/\text{hab} \rightarrow \text{Área} = 1,003.08 \text{ m}^2$$

Carga de sólidos que ingresan al Sedimentador.

$$C = Q \times SS \times 0.0864 \rightarrow C = 2,821.16 \times 31 \times 0.0864 \rightarrow C = 7,556.19 \rightarrow C = \frac{7,556.19}{1000} = 7.56 \text{ Kg de SS/día}$$

Masa de sólidos que conforman los lodos.

$$M_{sd} = (0.5 \times 0.7 \times 0.5 \times C) + (0.5 \times 0.3 \times C) \rightarrow M_{sd} = (0.5 \times 0.7 \times 0.5 \times 7.56) + (0.5 \times 0.3 \times 7.56)$$

$$M_{sd} = 1.323 + 1.134 \rightarrow M_{sd} = 2.457 \text{ Kg de SS/día}$$

Volumen diario de lodos digeridos.

$$V_{ld} = \frac{M_{sd}}{\rho_{lodo} \times \left(\frac{10\%}{100}\right)} \rightarrow V_{ld} = \frac{2.457 \text{ Kg de SS/día}}{1.04 \text{ Kg/l} \times \left(\frac{10\%}{100}\right)} \rightarrow V_{ld} = \frac{2.457}{1.04 \times 0.10}$$

$$V_{ld} = \frac{2.457}{0.104} \rightarrow V_{ld} = 23.62 \text{ l/día}$$

Volumen de lodos a extraer del tanque

$$V_{el} = \frac{V_{ld} \times T_d}{100} \rightarrow V_{el} = \frac{23.62 \times 42}{100} \rightarrow V_{el} = 0.992 \text{ m}^3$$

A=ancho × largo

Asumiendo un ancho de 10 metros

$$L = \frac{A}{W} \rightarrow L = \frac{1,003.08}{10} \rightarrow L = 100.30 \rightarrow L = \frac{100.30}{2.5} = 40 \text{ m}$$

## Anexo 5. Mapas del municipio

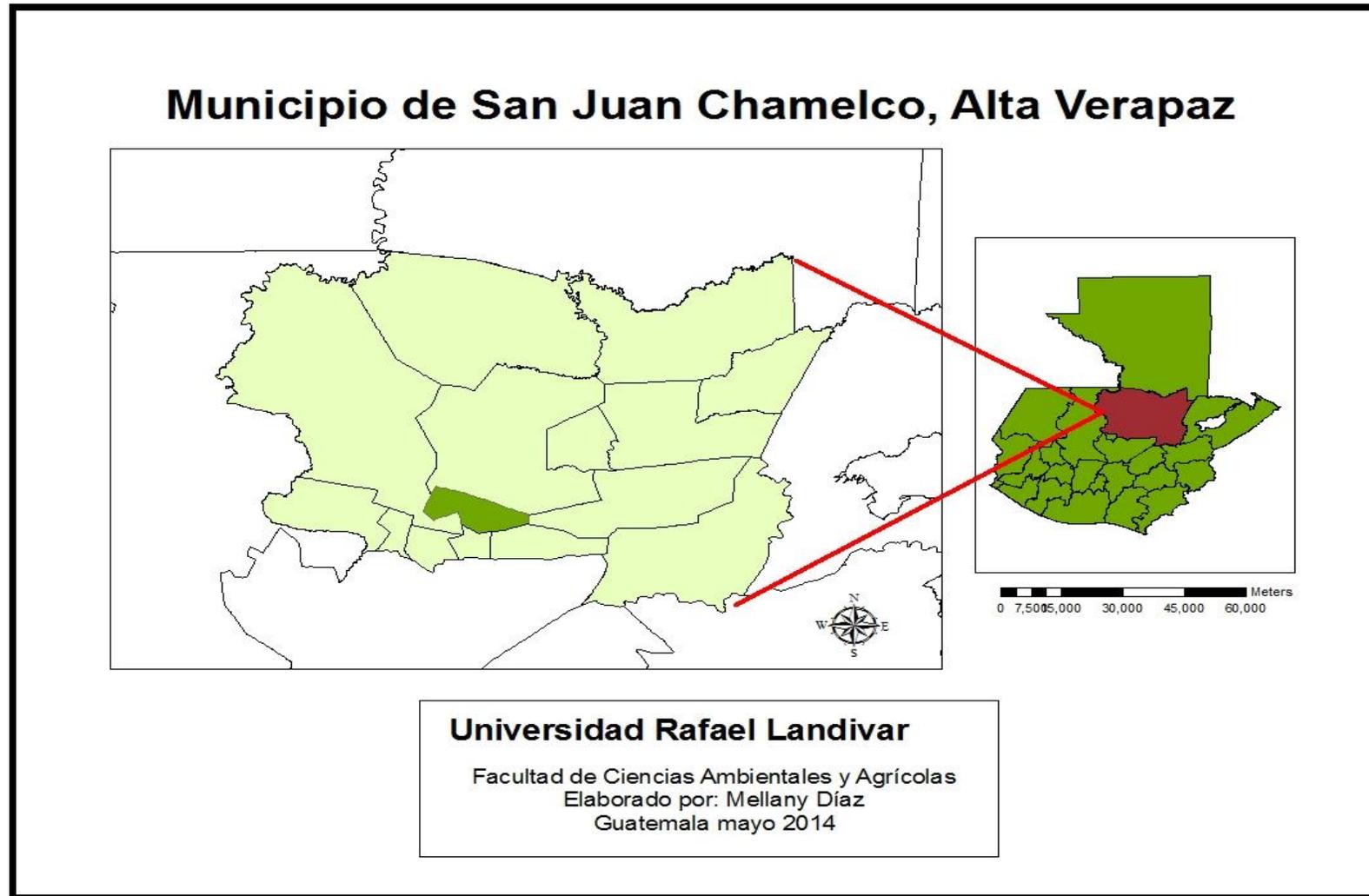


Figura 26. Mapa de Alta Verapaz, ubicación de San Juan Chamelco

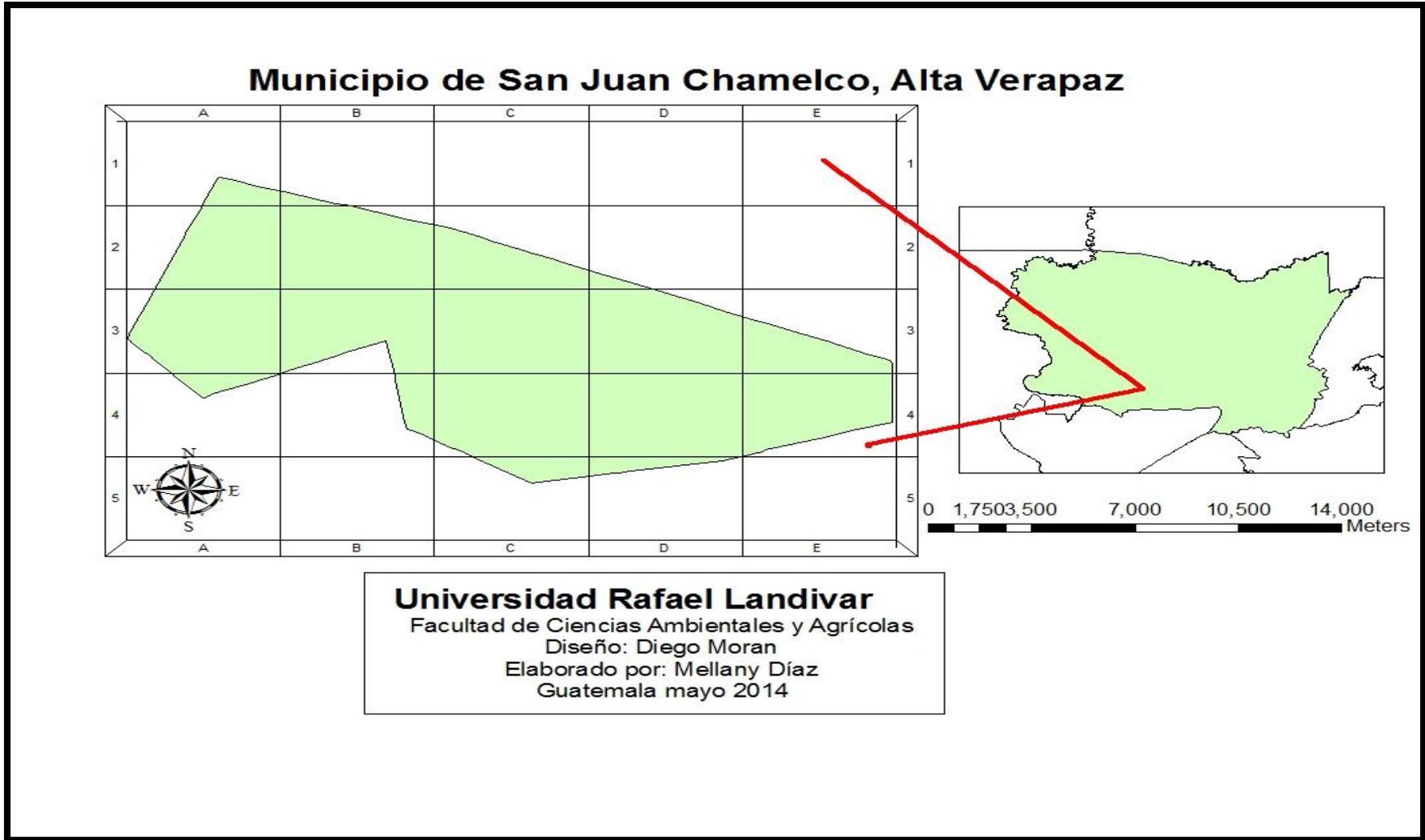


Figura 16. Mapa del municipio de San Juan Chamelco (Díaz, 2014)