

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Planta de tratamiento de aguas residuales a base de energía renovable para
el reúso en riego de plantaciones de banano en el municipio de Morales,
Izabal

Trabajo de graduación presentado por Vivian Arell Arreaza Díaz para optar
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



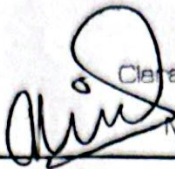
Planta de tratamiento de aguas residuales a base de energía renovable para
el reúso en riego de plantaciones de banano en el municipio de Morales,
Izabal

Trabajo de graduación presentado por Vivian Arellí Arreaza Díaz para optar
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil


Guatemala,

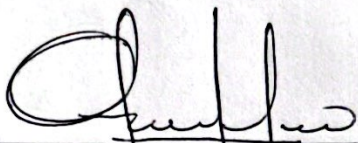
2025

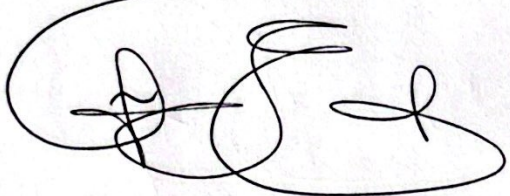
Vo.Bo.:

(f) 
Clara María Recinos Arenas
Ingeniera Civil
MSc. Ingeniería Sanitaria
Col. 10.755
Ing. Clara María Recinos

Tribunal Examinador:

(f) 
Clara María Recinos Arenas
Ingeniera Civil
MSc. Ingeniería Sanitaria
Col. 10.755
Ing. Clara María Recinos

(f) 
Ing. Otoniel Echeverría

(f) 
Ing. Héctor Espinoza

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de febrero de 2025.

PREFACIO

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, quien me ha otorgado la sabiduría y la fortaleza necesarias para recorrer este camino. Su guía constante ha sido mi mayor apoyo, especialmente en los momentos más difíciles, tanto durante los cinco años de mi carrera como en el proceso de investigación y realización de este proyecto de graduación.

A mi padre, Elder Arreaza, gracias desde lo más profundo de mi corazón. No me alcanzará la vida para retribuir todo el amor, entrega y confianza que siempre has depositado en mí. Tu apoyo incondicional, desde el primer día de universidad hasta hoy, ha sido un pilar fundamental para alcanzar este logro.

A mi madre, Arely Díaz, por su amor inquebrantable y su apoyo constante en cada paso de mi vida. Tus palabras de ánimo y tu presencia en cada desafío han sido invaluable.

A mi hijo, Pedro Mancilla, mi mayor inspiración y la razón que me impulsa cada día a ser mejor. Eres el motor de mi vida y mi mayor motivación para seguir adelante.

A mis hermanas, Daniela y Fátima Arreaza, por su cariño y apoyo continuo. Gracias por estar siempre a mi lado, levantándome el ánimo cuando más lo necesitaba.

A mis abuelitos, cuyo amor ha sido un refugio invaluable. En especial, a mi abuelita, mi ángel en el cielo, quien sé que me cuida y estaría profundamente orgullosa de este logro.

A mis amigos, quienes con su compañía y alegría hicieron de estos años de estudio una experiencia más llevadera y memorable. Gracias por su amistad sincera y por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A mis tías, primos y demás familiares, por su apoyo y palabras de aliento a lo largo de este camino. Cada gesto, por pequeño que parezca, ha significado mucho para mí.

A mi asesora, la Ing. Clara Recinos, mi más sincero agradecimiento por compartir su conocimiento, experiencia y orientación durante este proyecto. Su dedicación y paciencia han sido esenciales para el logro de los objetivos planteados.

Finalmente, agradezco a la Municipalidad del municipio de Morales, Izabal, por su valiosa colaboración al proporcionarme la información y las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación.

A todos y cada uno de ustedes, gracias por ser parte de este viaje. Este logro no sería posible sin el amor, la confianza y el apoyo que he recibido a lo largo del camino.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	IV
LISTA DE CUADROS	X
LISTA DE GRÁFICOS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. OBJETIVOS	4
A Objetivo general	4
B Objetivos específicos	4
IV. MARCO TEÓRICO	5
A Calidad del agua	5
1 Agua superficial	5
2 Agua subterránea	7
B Usos de los recursos de agua	8
1 Usos domésticos	10
2 Usos industriales y comerciales	10
3 Usos agrícolas	10
C Clasificación de aguas residuales	10
1 Aguas residuales ordinarias	10
2 Aguas residuales especiales	11
D Características de las aguas residuales	11
1 Características físicas	11
2 Características químicas	12
3 Características biológicas	14
E Reutilización del agua residual	14
1 Requerimientos previos	15
2 Efectos secundarios	15
3 Precauciones	15
F Planta de tratamiento de aguas residuales	16
1 Tratamiento preliminar	16

2	Tratamiento primario	17
3	Tratamiento secundario	18
4	Tratamiento terciario	19
G	Energía renovable y su aplicación en tratamiento de aguas	20
1	Fuentes de energía renovable	20
2	Beneficios del reúso del agua residual	21
H	Riego en plantaciones de banano	22
1	Fuente de agua utilizada	22
I	Reúso de aguas residuales en la agricultura	23
1	Calidad del agua para riego	23
2	Requerimientos de nutrientes del cultivo de banano	25
J	Aspecto legal	25
1	Normas sobre manejo de aguas residuales en Guatemala	26
2	Constitución Política de la República de Guatemala	27
3	Acuerdo Gubernativo No. 236-2006	28
4	Código de salud; Decreto 90-87	29
K	Entidades vinculadas a la fiscalización de aguas en Guatemala	30
L	Entidades agrícolas en Guatemala	31
V.	METODOLOGÍA	32
A	Ubicación del área de estudio	32
B	Unidades de análisis	32
C	Tipo de investigación	32
D	Recopilación de datos	32
E	Análisis de datos	33
F	Diseño de la planta de tratamiento	33
G	Evaluación de la eficiencia energética	33
H	Método de presentación	33
VI.	RESULTADOS	34
A	Parámetros fisicoquímicos del agua residual del municipio	34
B	Cálculo de población futura	35
C	Características del agua residual a tratar	35
D	Sistema de tratamiento propuesto	37
E	Dimensionamiento del pretratamiento	39
1	Dimensionamiento rejillas	39
2	Dimensionamiento canal Parshall y desarenador	39
3	Dimensionamiento trampa de grasa	41
F	Dimensionamiento del tratamiento primario	42
1	Dimensionamiento sedimentador primario	42
G	Dimensionamiento del tratamiento secundario	43

1	Dimensionamiento digestor aerobio	43
2	Dimensionamiento sedimentador secundario	44
H	Dimensionamiento del tratamiento terciario	45
1	Dimensionamiento tanque de contacto de cloro	45
I	Dimensionamiento patio de lodos	46
I	Cálculo relación de sodio residual	47
K	Parámetros del agua residual tratada	47
L	Calculo de área regable con el efluente de la planta de tratamiento	47
M	Comparativa entre el uso de agua residual tratada para riego y la forma tra-	
	dicional de riego en plantaciones de banano	48
N	Comparación de fuente de energía renovable	49
N	Cálculos de paneles solares	50
1	Comparación de costos	51
VII.	DISCUSIÓN	53
VIII.	CONCLUSIONES	55
IX.	RECOMENDACIONES	56
X.	BIBLIOGRAFÍA	57
XI.	APÉNDICES	62
A	Anexo 1. Planos	62
B	Anexo 2. Tablas parámetros de diseño	70
C	Anexo 3. Fórmulas de diseño	84
1	Medición de caudal	84
2	Población futura	84
3	Caudal promedio	84
4	Carga de parámetros	84
5	Volúmen	85
6	Área de trampa de grasa	85
7	Ancho de trampa de grasa	85
8	Largo de la trampa de grasa	85
9	Alfura en canal Parshall	86
10	Grada entre el canal y el desarenador	86
11	Diferencia de altura entre altura máxima en canal parshall y la grada entre el canal y el desarenador	86
12	Ancho del desarenador	86
13	Longitud del canal Parshall	87
14	Alfura del desarenador	87
15	Velocidad en desarenador	87

16	Eficiencia	87
17	Velocidad máxima en el canal	87
18	Velocidad máxima en rejillas	88
19	Área	88
20	Longitud mínima en canal de salida	88
21	Volúmen	88
22	Tiempo de retención hidráulico	88
23	Largo	89
24	Ancho	89
25	Remoción DBO	89
26	Remoción sólidos suspendidos totales	89
27	Fración biodegradable	90
28	Volúmen del reactor aerobio	90
29	Tiempo de retención hidráulico	90
30	Producción de lodos VSS (Pxv)	90
31	Extracción de lodos	90
32	Tasa de uso de oxígeno	91
33	Oxígeno para nitrificación	91
34	Demanda de oxígeno total	91
35	Area	91
36	Tasa de carga de sólidos	91
37	Volúmen	92
38	Masa de sólidos que conforman los lodos	92
39	Carga de sólidos que ingresan al sedimentador	92
40	Volúmen diario de lodos digeridos	92
41	Volúmen de lodos a extraer del patio	92
42	Dimensiones del patio de secado	93
D	Anexo 4. Manual de mantenimiento	94

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Categorías según índice simplificado de calidad de agua	6
2 Objetivo de los procesos de pretratamiento	17
3 Parámetros y límites máximos permisibles para reuso	24
4 Regulación legal del agua	26
5 Parámetros para determinar las características de las aguas residuales	28
6 Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para aguas residuales municipales	29
7 Comparación agua residual municipal con el Acuerdo Gubernativo 236 - 2006	34
8 Comparación agua residual municipal con los parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola	34
9 Criterio de diseño - caudales	36
10 Caudal máximo, medio y mínimo	36
11 Concentración de parámetros	36
12 Carga de parámetros	37
13 Criterio de diseño - rejilla	39
14 Resultados dimensionamiento - rejilla	39
15 Criterio de diseño - canal Parshall y desarenador	40
16 Resultados dimensionamiento - canal Parshall	40
17 Dimensionamiento - desarenador	41
18 Criterio de diseño - trampa de grasa	41
19 Resultados dimensionamiento - trampa de grasa	41
20 Criterio de diseño - sedimentador primario	42
21 Resultados dimensionamiento - sedimentador primario	43
22 Resultados de entrada, salida y tasa de remoción - sedimentador primario	43
23 Criterio de diseño - digestor aerobio	44
24 Resultados dimensionamiento - digestor aerobio	44
25 Criterios de diseño - sedimentador secundario	45
26 Resultados dimensionamiento - sedimentador secundario	45
27 Resultados de entrada, salida y tasa de remoción - sedimentador secundario	45
28 Criterios de diseño - tanque de contacto de cloro	45
29 Resultados dimensionamiento - tanque de contacto de cloro	46
30 Resultados dimensionamiento - patio de lodos	46
31 Criterios de diseño y calculo de RAS	47
32 Comparación del Acuerdo Gubernativo 236 - 2006 y la descarga del agua tratada	47
33 Área de cultivo regada con el efluente de la planta de tratamiento	48

34	Comparativa entre el uso de agua residual tratada para riego y la forma tradicional de riego en plantaciones de banano	48
35	Comparativa de fuentes de energía renovable	49
36	Consumo eléctrico de la planta de tratamiento	50
37	Dimensionamiento de núm. de paneles solares	51
38	Costo energía eléctrica convencional	51
39	Costo paneles solares	52
40	Análisis de calidad del agua Morales, Izabal	71
41	Parámetros de diseño para rejillas	71
42	Parámetros de diseño para canal Parshal	72
43	Sistemas de medida de caudal en canales abiertos	72
44	Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa	73
45	Parámetros de diseño para sedimentador primario	73
46	Valores de constantes empíricas a y b	74
47	Calidad normal de fango producido por distintos procesos de tratamiento	74
48	Digestión discontinua de los lodos de sedimentación libre a diferentes temperaturas	75
49	Parámetros de diseño para digestor aerobio	75
50	Parámetros de diseño para sedimentador secundario	76
51	Parámetros y límites máximos permisibles para reuso	76

LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración	Página
1 Cantidad y calidad del agua	8
2 Aprovechamiento de los recursos hídricos en Guatemala	9
3 Parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola	24
4 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento propuesto	37
5 Comparativa entre la inversión del sistema tradicional de energía eléctrica y el sistema de paneles solares	52
6 Plano rejillas	62
7 Plano planta de desarenador	63
8 Plano corte de desarenador	63
9 Plano planta trampa de grasa	64
10 Plano corte trampa de grasa	64
11 Plano planta sedimentador primario	65
12 Plano corte sedimentador primario	65
13 Plano planta digestor aeróbico	66
14 Plano corte digestor aeróbico	66
15 Plano planta sedimentador secundario	67
16 Plano corte sedimentador secundario	67
17 Plano planta tanque de contacto de cloro	68
18 Plano corte tanque de contacto de cloro	68
19 Plano patio secado de lodos	69
20 Puntos de muestreo aguas residuales Morales, Izaba	70
21 Ficha técnica del módulo fotovoltaico	77
22 Costo módulo fotovoltaico	78
23 Información Solar Global Atlas	79
24 Ficha técnica inversor fotovoltaico	80
25 Ficha técnica bombas	81
26 Ficha técnica soplador	82
27 Ficha técnica luminarias	83

RESUMEN

Una planta de tratamiento se define como una instalación diseñada para llevar a cabo procesos específicos con el objetivo de purificar y acondicionar las aguas residuales o las aguas contaminadas para hacerlas seguras para su descarga en el medio ambiente o su reutilización.

Existen diversos tipos de plantas, dependiendo de la fuente y el tipo de aguas residuales que se estén tratando. Estas plantas desempeñan un papel crucial en la gestión adecuada de los recursos hídricos y en la protección del medio ambiente, al prevenir la contaminación de fuentes de agua naturales y mantener la salud pública.

La integración de energía renovable en las plantas de tratamiento se alcanza a través de un diseño sostenible. Estas plantas integran tecnologías de tratamiento de aguas con fuentes renovables de energía para reducir su huella ambiental y promover la sostenibilidad.

Estas instalaciones utilizan fuentes de energía como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica o biomasa para alimentar sus procesos de tratamiento. Esto reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

La presente tesis, tuvo como objetivo principal, el diseño una planta de tratamiento de aguas residuales, para utilizar dicha agua tratada en riego de plantaciones, con el fin de reducir sus descargas contaminantes al mar. En este documento se encuentran los estudios básicos necesarios a realizar, asimismo, se establecen los parámetros básicos de diseño de una planta de tratamiento.

La tecnología planteada para la planta de tratamiento consta de un tratamineto preliminar integrado por rejillas, canal parshall y desarenador, trampa de grasas, un tratamiento primario dado por un sedimentador primario, el tratamiento secundario conformado por lodos activados y un patio de secado de lodos. Asimismo, la planta de tratamiento funciona mediante el uso de energía renovable con la instalación de paneles solares.

El diseño propuesto para la planta de tratamiento logró que el agua tratada cumpla con los límites máximos permisibles según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, así como con los parámetros de calidad de agua de riego para cultivos.

Además, se realizó el dimensionamiento de paneles solares cumpliendo con el objetivo de que la planta funcione al 100 por ciento mediante energía renovable.

ABSTRACT

A treatment plant is defined as a facility designed to carry out specific processes aimed at purifying and conditioning wastewater or contaminated water to make it safe for discharge into the environment or for reuse.

There are various types of plants, depending on the source and type of wastewater being treated. These plants play a crucial role in the proper management of water resources and in protecting the environment by preventing the contamination of natural water sources and maintaining public health.

The integration of renewable energy in treatment plants is achieved through sustainable design. These plants incorporate water treatment technologies with renewable energy sources to reduce their environmental footprint and promote sustainability.

These facilities utilize energy sources such as solar, wind, hydroelectric, geothermal, or biomass to power their treatment processes. This reduces dependence on fossil fuels and decreases greenhouse gas emissions.

The main objective of this thesis was to design a wastewater treatment plant to use the treated water for irrigation of crops, with the aim of reducing its pollutant discharges into the sea. This document includes the necessary basic studies, as well as the basic design parameters for a treatment plant.

The proposed technology for the treatment plant consists of a preliminary treatment integrated with screens, a Parshall flume, a degritter, a grease trap, primary treatment through a primary sedimentation tank, secondary treatment using activated sludge, and a sludge drying bed. Additionally, the treatment plant operates using renewable energy through the installation of solar panels.

The proposed design for the treatment plant ensures that the treated water meets the maximum permissible limits according to Government Agreement 236-2006, as well as the water quality parameters for irrigation of crops.

Furthermore, the sizing of solar panels was carried out to ensure that the plant operates at 100 percent using renewable energy.

I. INTRODUCCIÓN

El rápido aumento de la población, junto con la expansión de las áreas urbanas y rurales, ha hecho que la gestión de las aguas residuales domésticas e industriales se convierta en un problema grave en los últimos años. Esto ha tenido un impacto directo en el medio ambiente, generando serios problemas de contaminación, particularmente en países en desarrollo como Guatemala.

La carencia de acceso a agua potable es un problema crítico que afecta a millones de niños y niñas en todo el mundo, especialmente en países en desarrollo como Guatemala. De acuerdo con datos de UNICEF, uno de cada cinco niños a nivel global no dispone de suficiente agua para cubrir sus necesidades diarias.

Guatemala enfrenta diversos desafíos en cuanto al acceso y la calidad del agua, entre los cuales destacan la dificultad para obtener agua potable en áreas rurales, la contaminación de los recursos hídricos debido a la agricultura y la minería, y la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales.

El sector agrícola, en algunos casos, opera de manera poco responsable, lo que puede generar impactos negativos en la población y el medio ambiente. Un ejemplo de ello es el uso intensivo de agroquímicos y pesticidas en los cultivos, que provoca una combinación altamente contaminante capaz de afectar ríos y arroyos cercanos (World Vision, 2023).

Por otro lado, el tratamiento de aguas residuales es un proceso fundamental que transforma los contaminantes presentes en el agua, permitiendo su reincorporación al ciclo natural con un impacto ambiental mínimo o su reutilización para otros fines. Existen plantas especializadas en el tratamiento de efluentes tanto industriales como urbanos, donde se emplean procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar elementos nocivos y garantizar un agua más segura y limpia.

Este tratamiento es fundamental para preservar el ciclo del agua y proteger el medio ambiente, ya que facilita el acceso al agua potable, previene problemas de salud derivados de las aguas residuales, reduce los costos energéticos y disminuye la contaminación. En los últimos años, la reutilización de aguas residuales tratadas ha surgido como una solución viable para mitigar la escasez de agua (Contyquim, 2022).

Uno de los primeros casos de filtración de agua a gran escala ocurrió en Venecia. Aunque la ciudad estaba rodeada de agua, esta no era apta para el consumo, por lo que se dependía del agua de lluvia. Para captarla y almacenarla, se pavimentaron plazas y espacios públicos con el fin de recolectar la mayor cantidad posible. Se construyeron aljibes bajo capas de arena, que actuaban como filtros, organizados en diferentes granulometrías para optimizar la filtración.

Hacia finales del siglo XIX, mientras se mejoraban los sistemas de filtración, surgió la teoría de los gérmenes como causantes de enfermedades, gracias a las investigaciones de científicos como Louis Pasteur, Robert Koch, entre otros. Esto desafió la creencia común de que las enfermedades se propagaban por medio de vapores dañinos.

Según Luis Rodolfo Castro, viceministro del agua en Guatemala, en 2023 existían 600 plantas de tratamiento en el país. Sin embargo, la cantidad mínima cantidad deberían ser 2 mil plantas, ya que la cobertura no supera el 20 por ciento de lo que se requiere. El 80 por ciento restante de la cobertura del tratamiento de aguas residuales puede llegar a ser atendido con aproximadamente 1000 plantas más, las cuales deben tener mejor adecuación a las fluctuaciones de caudal (Ecoquimsa, [2024](#)).

En 2006 se publicó el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. Este acuerdo establece los criterios, límites permisibles y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. El cumplimiento de los parámetros de medición de características de las aguas residuales se fijó a través de modelos de reducción progresiva, las cuales establecieron en varias etapas desde el año 2011 y que finalmente deben ser cumplidas al 2 de mayo de 2024. Aunque el último plazo ya se cumplió, existen muchas comunidades que aún no lo cumplen.

El presente trabajo de graduación plantea el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, cuya agua tratada será posteriormente utilizada para el riego de plantaciones de banano en el municipio de Morales, Izabal. La implementación de este sistema fomenta el uso eficiente de los recursos hídricos y es crucial para la preservación del medio ambiente, ya que se reduce el impacto que generan las aguas residuales al ambiente. La importancia del proyecto radica en tratar adecuadamente el agua y garantiza que la misma sea segura para su reutilización en actividades agrícolas, reduciendo la presión sobre las fuentes de agua.

II. JUSTIFICACIÓN

La escasez del agua es un problema grave a nivel mundial del cual Guatemala no es la excepción. Una de las principales causas de la escasez del agua es la destrucción de los ecosistemas naturales. Según la Brigada Internacional de Paz en Guatemala PBI, al país solo le queda la tercera parte de la cobertura natural de bosques, el resto ha sido destruido y transformado para otros usos como generación de energía eléctrica, la industria y la ganadería (PBI, 2020).

El crecimiento de la población, ligado al aumento de las áreas urbanas y rurales, es otra causa de la escasez de agua. Como resultado, la disponibilidad de agua para actividades domésticas e industriales disminuye cada vez más. Esta situación ha llevado a que el agua residual se convierta en un problema grave de contaminación. Según el INE, la población de Morales, Izabal, para el año 2010 era de 110,310 habitantes.

Debido al crecimiento poblacional, el recurso hídrico es cada vez más escaso. Además de esto, las aguas residuales domésticas son desechadas a cuerpos de agua o al suelo sin ser tratadas. En Guatemala, desde el año 2003, más del 90 por ciento de los ríos y lagos tenían algún grado de contaminación. Esto no solo causa contaminación, sino que también se pierde la oportunidad de reutilizar esta fuente de agua (Guzmán et al. 2011).

El río Motagua atraviesa el municipio de Morales, este es uno de los ríos más contaminados del país. Como una alternativa para mermar la contaminación en el río Motagua, las autoridades ambientales le apuntan a la puesta en marcha de la ley que establece que todas las municipalidades del país deben tener plantas de tratamiento, pues en los últimos gobiernos esto ha sido aplazado y pocas comunidades cumplen con esta normativa (Marroquín, C. y Domínguez, A, 2022).

Las ventajas del tratamiento de agua residual empiezan por el hecho de que las aguas residuales se reutilizan, es beneficioso para el medio ambiente, se ahorra agua y se minimizar los residuos. El agua es un recurso indispensable en cada una de las actividades que se realizar día con día, tanto domésticas, industriales y agrícolas. Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el agua utilizada para el riego representa casi el 65 por ciento de las extracciones de agua dulce del mundo.

La actividad agrícola demanda agua residual por la necesidad de abastecerse regularmente para compensar la escasez del recurso. En Venezuela, por ejemplo, el efluente de un sistema de lagunas fue reutilizado para el riego de una parcela experimental de 8 hectáreas. El comportamiento de las especies irrigadas con este efluente y con agua fresca fue similar y no se encontraron problemas de toxicidad ni salinidad (Silva et al. 2008).

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales municipales que opere mediante energía renovable, y utilizar el agua ya tratada para riego de plantaciones de banano en el municipio de Morales, Izabal.

B. Objetivos específicos

- Definir una tecnología apropiada para el tratamiento del agua residual que cumpla con los parámetros de calidad para el uso en riego de banano.
- Evaluar las distintas opciones de energía renovable que sean viables para la planta de tratamiento y elegir la más conveniente.
- Realizar una comparativa entre el uso de agua residual tratada para riego y la forma tradicional de riego en plantaciones de banano.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Calidad del agua

En Guatemala la calidad del agua representa cada vez una preocupación más grande. La contaminación química originada en la agricultura constituye una de las principales fuentes de contaminación tanto de las aguas superficiales como subterráneas, y contribuye significativamente a la degradación de ríos y arroyos. En particular, las regiones agrícolas más afectadas por este tipo de contaminación son la planicie costera del Pacífico y el valle del río Motagua. En estas zonas, tanto los recursos hídricos en la superficie como los acuíferos subterráneos muestran signos de contaminación (Fundación para la Conservación del Agua (FUNCAGUA), [2022](#)).

Según el Plan Nacional de Agua y Saneamiento del Ministerio de Salud en Guatemala, en 2014, solo el 40 por ciento de las muestras de agua analizadas para determinar cloro residual cumplían con las normas nacionales. En 2013, menos del 40 por ciento del agua destinada al consumo humano en zonas urbanas recibió desinfección. En muchos casos, el agua se toma directamente de ríos o lagos y se distribuye sin tratamiento alguno. Los niveles de bacterias coliformes y patógenas son altos, similares a los de aguas residuales no tratadas, lo que representa un riesgo para la salud de la población.

Las enfermedades diarreicas agudas están entre las cinco principales causas de morbilidad y mortalidad en el país, con un 24 por ciento de las muertes, principalmente en niños menores de cinco años, atribuibles a estas enfermedades. Los problemas de salud están directamente relacionados con la red de distribución de agua, evidenciando contaminación debido a filtraciones en el sistema de alcantarillado. Además, la crisis económica y los eventos climáticos adversos pueden agravar esta situación, ya que Guatemala es uno de los 10 países más afectados por el cambio climático y el cuarto más vulnerable a desastres naturales, según la ONU (Unicef, [2012](#)).

1. Agua superficial

En 2017, el Ministerio de Medio Ambiente de Guatemala informó que el 95 por ciento de las fuentes de agua superficial del país estaban contaminadas, principalmente debido a la ausencia de una ley del agua y la mala gestión de los recursos hídricos. Los cambios climáticos extremos agravan la escasez de agua, afectando sobre todo a las familias en situación de pobreza extrema, ya que carecen de los recursos y capacidades para adaptarse a fenómenos como sequías, estrés hídrico y la contaminación de las fuentes superficiales.

Según un monitoreo realizado en Morales, Izabal por el Insivumeh para determinar la calidad del agua superficial, dio como resultado una calidad intermedia, indica que el agua puede ser utilizada para riego e industria. El punto ubicado en la vertiente del Caribe fue evaluado utilizando la metodología ISQA (índice simplificado de calidad de agua).

Para determinar el ISQA se hace uso de 5 parámetros físico químicos los cuales son la temperatura, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. Cada uno de estos parámetros proporciona información esencial sobre diversos aspectos de la calidad del agua, como su capacidad para mantener la vida acuática, la presencia de contaminantes orgánicos, la concentración de sólidos en suspensión, la disponibilidad de oxígeno necesario y la conductividad eléctrica que revela la presencia de sales disueltas. La fórmula utilizada según Prat, Puértolas y Rieradevall (2008) es la siguiente:

$$ISQA = T * (A + B + C + D)$$

T se deduce de la temperatura en °C del agua.






A se deduce de la oxidabilidad al permanganato expresada en mg/l.

B se deduce a partir de los sólidos suspendidos totales en mg/l.

C se deduce a partir del oxígeno disuelto en mg/l.

D se deduce de la conductividad eléctrica expresada en µS/cm a 18 °C

A continuación se encuentra la tabla de calificación según el ISQA y sus diversas aplicaciones:

ISQA	Categoría	Posibles usos	Propiedades del agua	Color
85-100	Excelente	Todos los usos. Si es usado para consumo humano siempre y cuando cumpla con la Norma Técnica Guatemalteca (NTG) 29001.	Son aguas muy claras y limpias, aptas para el crecimiento y bienestar de la biodiversidad acuática, se asocian a zonas de montaña y/o de nacimientos (manantiales, otras).	
60-85	Buena	La mayoría de usos. Si es usado para consumo humano debe ser tratado previamente y cumplir con la Norma Técnica Guatemalteca (NTG 29001).	Son aguas claras que todavía son limpias. Favorece la diversidad de la biodiversidad acuática.	
45-60	Intermedia	Riego e industria (restringidas). Su uso involucra tratamientos previos o bien puede ser agua de reúso siempre y cuando cumpla con la normativa de aguas residuales (Acuerdo Gubernativo No. 236-2006).	Son aguas sucias que pueden tener coloraciones, malos olores y de mal gusto. Las condiciones no son aptas para el buen desarrollo de los peces.	
30-45	Malta	Riego (restringido y vigilado; para cultivos permanentes arbóreos y según el tipo de riego).	Aguas deterioradas. No es aconsejable su uso para el consumo humano. Bajos niveles de oxígeno disuelto que soporten la vida acuática, y pueden existir sedimentos con fermentación anaeróbica.	
0 - 30	Peligrosa	Inadmisibles y peligrosos.	Son aguas con fermentaciones anaeróbicas por todas partes y puede presentarse una situación global de alta degradación del río. Las aguas subterráneas cercanas al cauce podrían estar degradadas. No es aconsejable su uso para el consumo humano. Son aguas residuales con o sin dilución.	

Cuadro 1. Categorías según índice simplificado de calidad de agua

Fuente: adaptado por INSIVUMEH y el ICC de Prat, Puértolas, Rieradevall (2008)

(Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), 2023)

Los recursos de agua superficial proporcionan aproximadamente el 70 por ciento del suministro público de agua en las áreas urbanas y el 90 por ciento del suministro de agua en las áreas rurales del país. En su mayoría dulce con excepciones en la costa del país. Los pesticidas utilizados en actividades agrícolas representan una de las mayores contaminaciones en ellos (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), [1991]).

A pesar de la abundancia de recursos hídricos superficiales, estos están distribuidos de manera desigual, son altamente estacionales y suelen estar contaminados. Durante la temporada seca, muchos arroyos se secan por completo. En los períodos de transición estacional, los recursos hídricos superficiales suelen estar en su punto más bajo y con un flujo mínimo. Los recursos hídricos superficiales aguas abajo, ya sea al pie de las montañas o en las llanuras costeras, tienen cuencas más grandes que proporcionan descargas más amplias, capaces de satisfacer demandas mayores (Arteaga, [1998]).

Los servicios de agua en Guatemala se concentran mayormente en áreas urbanas, impulsados por la migración interna, lo que deja a casi el 46 por ciento de la población rural sin acceso a inversión pública. En cuanto al saneamiento, los municipios han incrementado las conexiones a redes de drenaje y sistemas de recolección de aguas residuales, aunque gran parte de esta agua no recibe el tratamiento adecuado y termina vertiéndose en fuentes locales (Hábitat para la Humanidad Guatemala, [2020]).

2. Agua subterránea

La contaminación de los acuíferos de Guatemala tiene varias causas, la principal de ellas es la disposición de desperdicios provenientes de los humanos y animales. También la contaminación química debido al uso de fertilizantes y pesticidas en las plantaciones de banano. El agua de lluvia que no es tratada en la Ciudad de Guatemala es inyectada en los acuíferos altos, por lo que los únicos que se pueden considerar libres de contaminación son los acuíferos profundos.

En la temporada seca, los pozos poco profundos en las áreas montañosas del interior pueden agotarse hasta que haya una recarga adecuada en el acuífero. Aunque la intrusión de agua salada no es un problema en las zonas costeras en este momento, podría convertirse en un problema futuro si se bombean en exceso los pozos costeros (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, [2000]).

Los acuíferos se pueden dividir en seis tipos:

- Acuífero aluvial cuaternario no confinado, ubicado principalmente en planicies costeras, valles de ríos y cuencas internas.
- Acuífero kárstico, la cantidad de agua subterránea oscila entre baja y muy abundante.

- Acuífero volcánico piroclástico y de lava, este acuífero es fácilmente recargado debido a su alta permeabilidad.
- Acuíferos de rocas ígneas y metamórficas, el agua subterránea proviene de fracturas. Solo se dispone de pequeñas cantidades de agua en estos acuíferos.
- Acuíferos sedimentarios terciarios, el agua subterránea se origina en fisuras, lechos, juntas y porosidades.
- Acuíferos de sedimentos cuaternarios no consolidados, el agua subterránea se encuentra en los poros de los sedimentos no consolidados, pero la disponibilidad de agua dulce es escasa o inexistente .

(Basterrechea, M. y Guerra, A., 2019)

Términos Cuantitativos del Agua Superficial:

Enormes	= > 5,000 metros cúbicos por segundo (m ³ /s)(176,550 pies cúbicos por segundo(ft ³ /s))
Muy Grande	= > 500 a 5,000 m ³ /s (de 17,655 a 176,550 ft ³ /s)
Grande	= > 100 a 500 m ³ /s (de 3,530 a 17,655 ft ³ /s)
Moderada	= > 10 a 100 m ³ /s (de 350 a 3,530 ft ³ /s)
Pequeñas	= > 1 a 10 m ³ /s (de 35 a 350 ft ³ /s)
Muy Pequeñas	= < 0.1 a 1 m ³ /s (de 3.5 a 35 ft ³ /s)
Escasas	= > 0.01 a 0.1 m ³ /s (de 0.35 a 3.5 ft ³ /s)
Inadecuada	= = 0.01 m ³ /s (0.35 ft ³ /s)

Términos Cuantitativos del Agua Subterránea:

Enormes	= > 100 litros por segundo (L/s)(1,600 galones por minuto (gal/min))
Muy Grande	= > 50 a 100 L/s (de 800 a 1,600 gal/min)
Grande	= > 25 a 50 L/s (de 400 a 800 gal/min)
Moderada	= > 10 a 25 L/s (de 160 a 400 gal/min)
Pequeñas	= > 4 a 10 L/s (de 16 a 60 gal/min)
Muy Pequeñas	= > 1 a 4 L/s (de 16 a 64 gal/min)
Escasas	= > 0.25 a 1 L/s (de 4 a 16 gal/min)
Inadecuada	= = 0.25 L/s (4 gal/min)

Términos Cuantitativos:

Agua Dulce	= máximo TSD = 1,000 miligramos por litro (mg/L); máximo de cloruros = 600 mg/L; máximo de sulfatos (SO ₄) = 300 mg/L
Agua Salobre	= máximo TSD > 1,000 mg/L, pero = 15,000 mg/L
Agua Salina	= TSD > 15,000 mg/L

Figura 1. Cantidad y calidad del agua

(Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, 2000)

B. Usos de los recursos de agua

Aunque Guatemala conste de un promedio de 200 centímetros anuales de lluvia, la escasez de agua es un problema alarmante en el país. No hay una entidad nacional encargada del suministro de agua en el país. Cada municipalidad es responsable de proporcionar su propio suministro de agua y de garantizar su calidad. Si el agua no cumple con los estándares de calidad, la municipalidad está obligada a resolver el

problema. La División de Saneamiento del Medio del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social se comunica con los alcaldes de las municipalidades para que tomen medidas correctivas. En ocasiones, la falta de cumplimiento impide la resolución del problema.

La distribución del agua entre sus diversos usos deja solo una mínima parte destinada al consumo humano, lo que pone de manifiesto la necesidad de comprender mejor el manejo del agua en Guatemala.

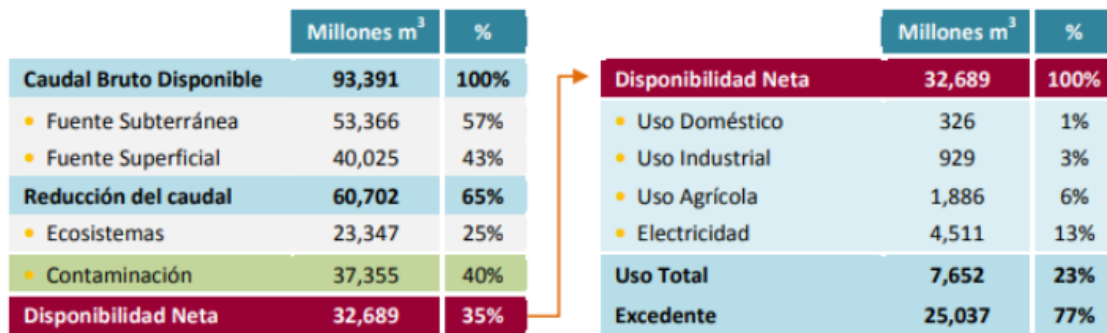


Figura 2. Aprovechamiento de los recursos hídricos en Guatemala

(Fundación para el Desarrollo de Guatemala (FUNDESA), 2012)

Del caudal total de agua en Guatemala, que es de aproximadamente 93,391 metros cúbicos al año, una reducción natural se debe al mantenimiento de los ecosistemas, especialmente en las zonas de recarga hídrica, lo que representa el 25 por ciento del caudal bruto disponible. No obstante, una fuente preocupante de reducción es la contaminación, que afecta alrededor del 40 por ciento del caudal bruto. Esto deja un remanente del 35 por ciento, es decir, unos 32,700 metros cúbicos de agua al año, para diversos usos.

Del caudal neto disponible, solo el 1 por ciento se destina a uso doméstico, 3 por ciento a uso industrial, 6 por ciento a actividades agrícolas y 13 por ciento para la generación de electricidad mediante hidroeléctricas. En total, el 23 por ciento del caudal neto se utiliza, quedando un excedente del 77 por ciento, equivalente a unos 25,000 metros cúbicos anuales. Esta cifra es clave para evaluar las oportunidades de utilizar el agua de manera productiva y contribuir al desarrollo económico del país. Sin embargo, es crucial analizar si los usuarios actuales del recurso hídrico están asumiendo los costos asociados, especialmente en relación con la contaminación (Fundación para el Desarrollo de Guatemala (FUNDESA), 2012).

1. Usos domésticos

La disponibilidad de agua potable y los servicios de saneamiento presentan niveles de cobertura muy reducidos. Según el Censo de Población y Vivienda (2002), la provisión de servicios de agua potable alcanza el 53 por ciento en zonas rurales y el 80 por ciento en áreas metropolitanas y urbanas (Lentini, 2010).

2. Usos industriales y comerciales

La mayoría de las actividades industriales y comerciales se ubican en las principales municipalidades, especialmente en la Ciudad de Guatemala. Estas municipalidades cuentan con sus propios sistemas de suministro de agua para sus operaciones, utilizando tanto fuentes de agua superficial como subterránea. En el futuro, se anticipa una mayor dependencia del agua subterránea para satisfacer las necesidades comerciales e industriales, ya que se prevé una reducción en el suministro de agua proveniente de fuentes superficiales. Sin embargo, es importante señalar que existe una escasez de información en lo que respecta al uso del agua en el sector industrial.

3. Usos agrícolas

La agencia encargada de la irrigación es el Plan de Acción para la Modernización y Fomento de la Agricultura Bajo Riego (PLAMAR). Según la PLAMAR, del agua destinada a la irrigación, alrededor del 95 por ciento se obtiene de fuentes superficiales. Sin embargo, debido a la disminución de la disponibilidad de agua superficial, que se atribuye a la deforestación y otros factores, se ha comenzado a recurrir cada vez más al uso de agua subterránea para fines de riego.

C. Clasificación de aguas residuales

La clasificación de las aguas residuales según su grado de contaminación se divide en varias categorías para facilitar su gestión y tratamiento adecuado, en función de la naturaleza y la peligrosidad de los contaminantes presentes.

1. Aguas residuales ordinarias

Las aguas residuales ordinarias, también denominadas aguas residuales domésticas, corresponden a las aguas empleadas en actividades de la vida diaria, como el saneamiento del hogar, bañarse, lavar ropa y utensilios, junto con otras labores comunes en viviendas, comercios y zonas urbanas. También incluyen las aguas pluviales, que

arrastran sedimentos, restos vegetales y contaminantes ligeros al sistema de drenaje. Estas aguas incluyen una mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos, además de detergentes y sustancias químicas utilizadas en actividades domésticas. La carga biológica suele estar compuesta por bacterias y otros microorganismos, que en su mayoría pueden descomponerse mediante procesos biológicos convencionales. Normalmente, se dirigen hacia sistemas de alcantarillado o instalaciones de tratamiento de aguas residuales con el fin de ser sometidas a un proceso de purificación y depuración antes de su devolución al entorno natural o su posible reutilización.

2. Aguas residuales especiales

Las aguas residuales especiales se refieren a las aguas utilizadas en contextos industriales, comerciales u otras aplicaciones que se apartan del tipo de aguas residuales comunes o domésticas. En las aguas residuales industriales se incluye la que se desecha desde fábricas, plantas de producción energética o de fabricación de productos comestibles o manufactureros. Este tipo de agua residual contiene un nivel elevado de metales pesados como níquel, cobre y mercurio. Asimismo se incluyen las aguas residuales de la agricultura y ganadería las cuales contienen contaminantes derivados de productos químicos (Arriols, 2024).

D. Características de las aguas residuales

El agua residual se define como el agua que proviene de aplicaciones domésticas, comerciales, agrícolas e industriales, o de una mezcla de estas, y que no ha sido sometida a ningún proceso de tratamiento después de su utilización. A continuación, se presentan las propiedades y cualidades típicas del agua residual.

1. Características físicas

La principal propiedad física destacada en el agua residual es su concentración total de sólidos, que abarca elementos en suspensión, materia sedimentable, materia coloidal y materia disuelta. Además, otras propiedades físicas relevantes incluyen el olor, la temperatura, el color y la turbidez.

- Sólidos totales: se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C (IDEAM, 2007).
- Sólidos suspendidos totales: representan la fracción de sólidos que son retenidos por un filtro de tamaño específico, medidos después de ser secados a una temperatura determinada (Morán, 2014).

- Sólidos disueltos totales: son los sólidos que atraviesan el filtro y, tras evaporarse, se secan a una temperatura específica, incluyendo coloides y sólidos disueltos (Morán, 2014).
- Sólidos disueltos totales: son los sólidos que atraviesan el filtro y, tras evaporarse, se secan a una temperatura específica, incluyendo coloides y sólidos disueltos (Morán, 2014).
- Sólidos sedimentables: son los sólidos suspendidos que se sedimentan en un tiempo específico y se expresan en mililitros por litro (Morán, 2014).
- Conductividad: mide la capacidad de una solución para transmitir corriente eléctrica, y su relevancia actual se centra en evaluar la idoneidad del agua para el riego. Se expresa en micro ohmios por centímetro (Morán, 2014).
- Olor: los olores provienen de los gases liberados durante la descomposición de la materia orgánica. El agua residual recién generada puede tener un olor algo desagradable, aunque suele ser más tolerable que el olor del agua residual séptica. El característico olor del agua residual séptica se debe principalmente a la presencia de sulfuro de hidrógeno, que se genera cuando los sulfatos se reducen a sulfitos debido a la actividad de microorganismos anaerobios.
- Temperatura: la temperatura del agua residual tiende a ser más alta que la del agua de suministro, principalmente debido a la mezcla con agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. Generalmente, oscila entre 10 y 21 °C, siendo 15 °C una temperatura promedio común (CIDTA, 2000).
- Color: en el agua residual, el color suele ser inicialmente grisáceo, pero a medida que pasa más tiempo en las redes de alcantarillado y se crean condiciones más anaeróbicas, su tonalidad cambia gradualmente de gris a gris oscuro y finalmente se vuelve negro. Cuando alcanza este último punto, se clasifica comúnmente como agua séptica (Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2022).
- Turbidez: la turbidez se refiere a la opacidad causada por la presencia de partículas suspendidas en el agua. Cuantas más partículas sólidas haya en suspensión, más turbia parecerá el agua y mayor será el valor de la turbidez. Este indicador también puede ser causado por la presencia de organismos vivos que habitan en el agua, así como por materiales derivados de la descomposición de seres vivos, como hojas, ramas, entre otros. Además, pueden contribuir partículas de origen inorgánico, como las mencionadas arcillas y limos (Universidad Complutense de Madrid (UCM), 2023).

2. Características químicas

En cuanto a las propiedades químicas de las aguas residuales, se centran en la cantidad de materia orgánica e inorgánica, además de los gases presentes en el agua residual.

La evaluación de la cantidad de materia orgánica se realiza de manera separada debido a su relevancia tanto en la administración de la calidad del agua como en la planificación de las instalaciones de tratamiento de aguas.

(Hernández, 2015)

- pH: el pH adecuado para la vida oscila entre 5 y 9. Aguas residuales fuera de este rango dificultan el tratamiento biológico. Si el pH no se ajusta antes del vertido, puede alterar el cuerpo receptor.
- Alcalinidad: es la capacidad del agua para neutralizar ácidos, y en aguas residuales se asocia con la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos. La alcalinidad regula variaciones de pH provocadas por ácidos (Morán, 2014).
- Cloro: en aguas residuales, los cloruros son un indicador clave para su reutilización. Proviene de la lixiviación natural de rocas y suelos, y en aguas residuales se añaden debido al uso humano, como en las heces, que aportan unos 6g por persona al día.
- Oxígeno disuelto: uno de los principales indicadores de la calidad del agua. Sus niveles varían entre 7 y 9 mg/L, siendo su principal fuente el intercambio con el aire, la turbulencia y la fotosíntesis en cuerpos de agua.
- Metales: son relevantes en el tratamiento y reutilización del agua, ya que organismos necesitan ciertos metales como hierro, cromo y zinc. Sin embargo, en concentraciones elevadas, pueden ser tóxicos (Morán, 2014).
- Nitrógeno: es vital para la síntesis de proteínas, por lo que es necesario conocer su presencia para evaluar el tratamiento de aguas mediante procesos biológicos. Incluye nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico.
- Fósforo: es esencial para el crecimiento de organismos, pero en exceso puede causar proliferación de algas. Se presenta en formas como ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico, siendo los ortofosfatos los más comunes en aguas residuales (Morán, 2014).
- Materia orgánica: alrededor del 75 por ciento de los sólidos en suspensión y aproximadamente el 40 por ciento de los sólidos filtrables presentes en un agua residual de concentración media son de origen orgánico. Estos sólidos provienen de organismos del reino animal y vegetal, así como de actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos (HANNA Instruments, 2014).
- Materia inorgánica: las cantidades de sustancias inorgánicas en el agua se incrementan debido a la interacción del agua con diversas formaciones geológicas, así como a la descarga de agua residual, ya sea tratada o no. Las concentraciones

de los distintos componentes inorgánicos pueden tener un gran impacto en los diversos usos del agua.

3. Características biológicas

Son fundamentales para controlar enfermedades causadas por patógenos humanos y microorganismos que participan en la descomposición de materia orgánica.

- Bacterias: muchas bacterias son inofensivas, pero cuando las heces de individuos infectados contaminan el agua, pueden introducir patógenos como *Salmonella*, *Shigella* y *Escherichia coli*.
- Protozoos: organismos como *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora* y *Giardia lamblia* pueden causar enfermedades, afectando especialmente a personas con sistemas inmunológicos debilitados, y son comunes en aguas residuales.
- Virus: las aguas residuales pueden albergar más de 100 tipos de virus entéricos que se reproducen en el tracto intestinal y se propagan a través de las excretas, representando un riesgo para la salud pública (Morán, 2014).

E. Reutilización del agua residual

La reutilización de aguas residuales para riego es una práctica que se utiliza cada vez más en muchas partes del mundo. Esta práctica cuenta con varias ventajas:

1. Reducción de riesgos externos: el tratamiento y suministro de agua fresca puede representar una parte significativa de la producción para muchas empresas. Al reciclar y reutilizar el agua tratada, las industrias pueden reducir significativamente su dependencia de fuentes externas de agua, disminuyendo así su vulnerabilidad a las condiciones climáticas y/o legislativas.
2. Uso eficiente de los recursos hídricos: la reutilización del agua residual en las industrias permite un uso más eficiente de los recursos hídricos. En lugar de utilizar agua de red en procesos industriales, se puede emplear agua reciclada que cumpla con los estándares adecuados para cada aplicación específica. De esta manera, se conservan las fuentes de agua dulce para otros usos y se protegen los ecosistemas acuáticos.
3. Mitigación del estrés hídrico: el estrés hídrico es una preocupación creciente en muchas regiones del mundo, donde la demanda de agua supera la disponibilidad de recursos hídricos. Al reutilizar el agua residual, las industrias contribuyen activamente a mitigar este estrés hídrico al reducir la extracción de agua dulce de fuentes naturales. Esto no solo beneficia a la industria misma, sino que también ayuda a preservar los recursos hídricos para las comunidades locales y los ecosistemas naturales.

Sin embargo, para lograr una reutilización efectiva y segura, se requieren tecnologías avanzadas de tratamiento y un marco regulatorio sólido para garantizar la calidad del agua y proteger la salud pública y el medio ambiente.

1. Requerimientos previos

La reutilización del agua residual se presenta como una estrategia prometedora en la gestión sustentable del agua, pero implica ciertos requisitos fundamentales para su implementación efectiva. En primer término, resulta indispensable contar con un sistema de tratamiento adecuado que permita la eliminación de contaminantes y asegure que el agua residual cumple con los estándares de calidad necesarios para su uso previsto, ya sea en la agricultura, la industria o incluso como fuente de consumo humano.

Adicionalmente, se requiere la existencia de un marco regulatorio sólido, que establezca pautas claras y regulaciones destinadas a salvaguardar la salud pública y el entorno ambiental, es de suma importancia, el cual aún no existe en Guatemala. La inversión en infraestructura, la educación de la comunidad y la generación de conciencia acerca de la relevancia de la reutilización del agua son factores clave para el éxito de estos programas. Por último, la colaboración entre gobiernos, sectores industriales y la sociedad en su conjunto desempeña un papel esencial en la promoción de prácticas de reutilización responsables y sostenibles (Telwesa, [2020](#)).

2. Efectos secundarios

Según un estudio realizado en Oaxaca, México se concluyó que el agua residual tratada mejora la fertilidad de los suelos al aportar nutrientes. En el suelo el pH, la conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica no representaron algún riesgo cuando se aplica riego con agua residual tratada, asimismo los cultivos regados con agua residual tratada tuvieron mayor altura, diámetro de tallo y número de hojas. El origen del agua residual tratada en la planta de tratamiento es doméstico (Velasco et al. [2023](#)).

3. Precauciones

Es importante que el agua tratada sea segura para su uso en riego y que no contenga ningún contaminante que pueda causar daños a los cultivos y a las personas que los consumen. Para garantizar la seguridad del agua se debe de cumplir con los parámetros del acuerdo gubernativo 236 - 2006 donde se indican los usos que puede tener el agua residual tratada y los parámetros que esta debe de tener. Asimismo, el agua residual tratada debe de cumplir con los parámetros de calidad del agua para uso en riego agrícola, el manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas,

plantas y ECP establece estos parámetros (Castellanos, 2000).

F. Planta de tratamiento de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales o PTAR, tienen la función de recolectar las aguas provenientes de zonas urbanas o industriales y eliminar las sustancias que las hacen contaminantes. El propósito principal de este procedimiento es reintegrar este recurso al ciclo natural del agua, ya sea a través de su liberación en cuerpos de agua o para su posterior empleo en aplicaciones como la agricultura.

El agua que ingresa a las instalaciones de tratamiento se somete a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos con el propósito de eliminar las impurezas presentes en el agua. Por lo general, estos procesos se dividen en cuatro etapas: el tratamiento preliminar o pretratamiento, el tratamiento primario, secundario y terciario.

1. Tratamiento preliminar

Está destinado a la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo específico de proteger las instalaciones, el funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar o reducir sensiblemente las condiciones indeseables relacionadas principalmente con la apariencia estética de las plantas de tratamiento (Rojas, 2002).

El tratamiento preliminar se divide en:

- Canal de rejillas: se utiliza para disminuir los sólidos en suspensión de diferentes tamaños. La separación entre las rejillas varía según su propósito, y la limpieza puede realizarse de manera manual o automática. El material recolectado se clasifica en finos y gruesos. Para los materiales finos se emplean aberturas de 5 mm o menos, comúnmente con mallas de acero o placas perforadas, logrando eliminar entre un 5 por ciento y un 25 por ciento de sólidos en suspensión. En el caso de los materiales gruesos, se utilizan aberturas de 4, 8 o 9 cm para evitar que objetos grandes dañen el equipo (Ramalho, 2003).
- Desarenador: el sistema más comúnmente empleado para eliminar la arena es el de tipo rectangular con flujo horizontal. En este proceso, los principales elementos a remover son sólidos como arena, cenizas y grava, los cuales pueden generar problemas operativos al acumularse alrededor de las tuberías de entrada, causando obstrucciones. Este sistema consiste en una caja o canal donde los sólidos o partículas se separan del líquido por acción de la gravedad (Brown, 2003).

- Trampa de grasa: la acumulación de grasas puede causar problemas en el sistema de alcantarillado y en las unidades posteriores de la planta de tratamiento. Es recomendable colocar una unidad removedora de grasas en la entrada a la planta. Las trampas de grasas individuales idealmente deben de colocarse en el acondicionamiento de las descargas de lavanderías, lavaplatos u aparatos sanitarios instalados en restaurantes, cocinas de hoteles y hospitales. Las trampas deben ubicarse próximas a los aparatos sanitarios que descarguen desechos grasosos, y por ningún motivo deberán ingresar aguas residuales provenientes de servicios sanitarios (Brown, 2003).

Proceso	Objetivo
Rejas	Eliminación de sólidos gruesos
Desarenador	Eliminación de arenas y gravas pequeñas
Trampa de grasa	Eliminación de aceites y grasas

Cuadro 2. *Objetivo de los procesos de pretratamiento*

2. Tratamiento primario

El propósito de esta etapa es reducir la cantidad de sólidos suspendidos en el agua. Para lograrlo, el agua se retiene en decantadores durante un período de 1 a 2 horas, permitiendo que la gravedad facilite la separación de estas partículas. Además de la eliminación de sólidos, este proceso aporta otros beneficios, como la regularización del caudal y la eliminación de materia orgánica asociada a los sólidos suspendidos.

En ocasiones, se incorporan sustancias químicas, como coagulantes y floculantes, para mejorar la sedimentación de los sólidos y eliminar el fósforo. En situaciones específicas, también se emplean sustancias ácidas o básicas para ajustar el pH del agua. Estas son algunas opciones de tratamiento primario:

- Fosa séptica: el sistema de fosa séptica es una tecnología comúnmente utilizada para el tratamiento de aguas residuales debido a que es económico y requiere un mantenimiento mínimo. Este sistema utiliza la gravedad para tratar y distribuir el agua en el suelo, consiste en una serie de tanques, seguido por el sistema de distribución (Lesikar, 2020).
- Sedimentador primario: el tratamiento primario o tanque de sedimentación primaria (TSP) es un tanque de forma rectangular o circular que facilita la precipitación de la mayoría de los sólidos presentes en el agua. Esta sedimentación mejora significativamente la calidad del agua antes de su paso al tratamiento biológico (DBO).

Normalmente, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se reduce en un 30 por ciento si se permite un tiempo adecuado para la sedimentación. La eficiencia de este proceso depende de un diseño adecuado, por lo que es fundamental contar con equipos y asesoría de calidad (Septar, 2020).

- Tanque Imhoff: el tanque Imhoff es una tecnología de tratamiento primario para aguas residuales que combina la sedimentación y la digestión del lodo en una misma unidad. Esta tecnología logra reducir entre un 50 y 70 por ciento los sólidos suspendidos, así como disminuir la demanda química de oxígeno (DQO) entre un 25 y 50 por ciento, siempre que esté bien diseñada y operada de forma adecuada (Latargere, 2018).

3. Tratamiento secundario

El objetivo de esta etapa es eliminar la materia orgánica del agua, así como los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. En el tratamiento secundario, que se basa principalmente en procesos biológicos, se emplean bacterias y microorganismos para degradar y eliminar la materia orgánica y los nutrientes presentes en el agua. Uno de los métodos más comunes es el sistema de fangos activados, en el cual el agua a tratar pasa por un tanque durante varios días, en condiciones variables de oxígeno (aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas) según los requisitos de eliminación necesarios.

En este proceso, diferentes tipos de bacterias presentes en el tanque se alimentan de la materia orgánica y los nutrientes del agua, retirándolos y almacenándolos en sus propios organismos. Luego, se lleva a cabo una segunda etapa de decantación, conocida como decantación secundaria, donde las bacterias que se han desarrollado en la etapa previa se sedimentan en la parte inferior del decantador, formando una mezcla de agua y sólidos llamada fango biológico. Esta mezcla se extrae o elimina desde la parte inferior del decantador, permitiendo que el agua clarificada salga por la parte superior sin la mayoría de las bacterias y sólidos, resultando en agua depurada. Por lo general esta etapa marca el punto final del proceso cuando el agua tratada cumple con los estándares de vertido establecidos y no se requiere una mayor calidad del agua para su reutilización o uso posterior.

Opciones de tratamiento secundario:

- Filtro anaerobio: un filtro anaerobio es un reactor biológico de lecho fijo que cuenta con una o más cámaras de filtración dispuestas en serie. A medida que las aguas residuales pasan por el filtro, las partículas quedan retenidas y la materia orgánica es descompuesta por la biomasa adherida a la superficie del material filtrante. El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el factor de diseño que más afecta el rendimiento del filtro, siendo recomendado un TRH de 12 a 36 horas (Cisneros, 2018).

- Lodos activados: este método cuenta con un sistema de recirculación y eliminación de lodos. El ambiente aerobio en el reactor se genera mediante aireadores mecánicos, los cuales también permiten mantener el líquido en completa mezcla. Tras un tiempo determinado, la mezcla de células nuevas y antiguas se dirige a un tanque de sedimentación, donde se separa el agua residual tratada de las células por sedimentación. Una parte de las células sedimentadas se recircula para mantener la concentración deseada en el reactor, mientras que la otra parte se elimina del sistema. La fracción eliminada corresponde al crecimiento del tejido celular (Méndez, 2005).

4. Tratamiento terciario

Durante la etapa de tratamiento terciario o químico, se busca mejorar la calidad final del agua con el propósito de devolverla al medio ambiente, como mares, ríos, lagos y otras cuencas hidrográficas, y en algunos casos, hacerla apta para usos humanos. Para lograr esto, se llevan a cabo una serie de procesos cuyo objetivo principal es reducir materia orgánica que puede estar presente en el agua después de otro tipo de procesos, patógenos (virus y bacterias), turbiedad, metales pesados, nitrógeno y fósforo (que pueden causar eutrofización). Actualmente, también se busca remover contaminantes emergentes, entre ellos los plaguicidas y pesticidas, fármacos, tensoactivos, aditivos industriales, productos de cuidado personal (Moksa, 2022).

- Desinfección: la desinfección se puede realizar mediante un sistema de cloración, además de eliminar los patógenos, este proceso ayuda a remover sólidos minerales y orgánicos no deseados, incluyendo las sustancias que generan olores y sabores desagradables en el agua. El cloro destruye las enzimas esenciales para la supervivencia de los agentes patógenos, garantizando así la calidad del agua (TEPCA, 2024).
- Lagunas de maduración: las lagunas de maduración tienen como objetivo principal la eliminación de bacterias patógenas. Estas lagunas siempre funcionan como una etapa secundaria, es decir, las aguas residuales han pasado por al menos un tratamiento previo antes de ingresar a ellas. La secuencia más común es una laguna anaerobia, seguida de una laguna facultativa y finalmente una laguna de maduración (CIDTA, 2003).
- Humedales: el funcionamiento es parecido al de las lagunas, la diferencia radica que los humedales utilizan plantas acuáticas en vez de algas, estas brindan el oxígeno para el desarrollo de bacterias. Esta tecnología requiere más atención que una laguna ya que se requiere de una cosecha de plantas periódicamente (Brown, 2003).

G. Energía renovable y su aplicación en tratamiento de aguas

Algunos de los métodos empleados en la purificación del agua consumen cantidades significativas de energía, lo que resulta en costos elevados tanto desde una perspectiva económica como en términos de impacto medioambiental. Por esta razón, se están explorando alternativas para reducir los costos de estos procesos.

La energía requerida para el tratamiento del agua, que usualmente es energía eléctrica, proviene en gran medida de la combustión de combustibles fósiles. Este proceso tiene un impacto negativo en el medio ambiente debido a la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero. Además, no se consideran los diversos aspectos socioeconómicos y geopolíticos relacionados con los países productores de estos combustibles.

La situación se complica aún más en las regiones remotas o aisladas, donde la escasez de agua de buena calidad, que requiere tratamientos intensivos para su optimización, coincide con dificultades en el suministro de energía eléctrica. Entre las ventajas de usar energía fotovoltaica destaca: que es una energía no contaminante, es silenciosa, gratuita, abundante, renovable, descentralizada, inacabable y el coste de mantenimiento es asequible (Remtavares, 2011).

1. Fuentes de energía renovable

La integración de fuentes de energía renovable se implementa para el funcionamiento de las plantas de aguas residuales como una alternativa sostenible para la energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles.

Algunas de las fuentes de energía renovable son:

- Energía solar: en diversas partes del mundo se ha implementado el uso de energías renovables para reducir el consumo energético de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los paneles fotovoltaicos convierten la energía solar en electricidad que se utiliza para alimentar los equipos y procesos de la planta. Asimismo, este sistema ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, permite reducir costos de electricidad y dependencia de las fuentes de energía no renovable (Acciona, 2024a).

Por ejemplo, en Perú se implementó una planta que utiliza energía fotovoltaica reduciendo el 25 por ciento del consumo eléctrico y evitando la emisión anual de 22.8 toneladas de CO₂. La unidad de energía renovable está compuesta por 160 paneles solares que anualmente producen 127 Mwh de electricidad (Acciona, 2024b).

- **Energía térmica:** se puede utilizar energía térmica para calentar tanques digestores o de secado de lodos. Esta energía puede complementar sistemas de calefacción utilizados en la planta de tratamiento reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y costos asociados.
- **Energía eólica:** la energía eólica en las plantas de tratamiento de aguas residuales es difícil de utilizar y depende de la ubicación de esta, ya que la mayoría de planta se encuentran en zonas urbanas, y de la velocidad del viento del área, sin embargo si se puede utilizar puede generar una gran cantidad de electricidad reduciendo costos.
- **Energía hidráulica:** en algunas plantas de tratamiento de aguas residuales, se dispone de cuerpos de agua en movimiento, como ríos o arroyos, cuyo caudal puede ser constante o fluctuante. Este flujo de agua puede ser utilizado para la generación de energía hidráulica (Acciona, [2024a](#)).

2. Beneficios del reúso del agua residual

El almacenamiento de energía renovable se vuelve cada vez más crítico en la industria del tratamiento de agua. Con el constante aumento de los costos energéticos, las empresas están recurriendo a fuentes de energía renovable para mitigar sus gastos y minimizar su huella ecológica. Los sistemas de almacenamiento de energía renovable ofrecen una fuente de energía confiable y rentable para las plantas de tratamiento de agua, permitiéndoles mantener su competitividad en un mercado energético en constante evolución.

Algunos de los beneficios son:

- **Respaldo confiable en caso de cortes de energía:** las plantas de tratamiento de agua son altamente dependientes de la electricidad para el funcionamiento de sus bombas y sistemas de filtración. En caso de una interrupción inesperada de energía, la planta podría enfrentar dificultades para continuar sus operaciones hasta que se restablezca el suministro eléctrico. Mediante el uso del almacenamiento de energía renovable, la planta puede aprovechar la energía almacenada durante un corte de energía, lo que garantiza que las operaciones puedan continuar sin interrupciones.
- **Reducción del impacto ambiental:** la implementación de fuentes de energía renovable en las plantas de tratamiento de agua permite la reducción de su huella de carbono, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático.
- **Reducción de costos:** la incorporación de energías renovables en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales puede disminuir de manera significativa

su dependencia de fuentes de energía convencionales, como el carbón y el gas natural. Además, al aprovechar tecnologías de almacenamiento de energía, como las baterías y el almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo, estas instalaciones pueden lograr una mayor reducción en su consumo energético.

(Frackiewicz, 2023)

H. Riego en plantaciones de banano

El estrés hídrico representa un problema serio en las plantaciones de banano y puede impactar notablemente el rendimiento de la cosecha. Aunque las raíces pueden alcanzar profundidades de hasta 0,75 m, la mayoría de las raíces activas se encuentran más cerca de la superficie del suelo; la compactación del suelo afecta negativamente la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes. La planta de banano tiene una tolerancia muy baja a la saturación de agua en el suelo. Las densidades de plantación varían entre 1400 y 1800 plantas por hectárea (NELSON, 2000).

Estos factores hacen que el banano sea un cultivo altamente sensible al agua. Es crucial una aplicación e infiltración de agua muy uniforme. Una baja tasa de aplicación alrededor de 6mm por día ayuda a minimizar la compactación del suelo, reduce la saturación, disminuye la escorrentía y facilita la infiltración. En las plantaciones de banano, los sistemas de riego subfoliar son los más utilizados y las trayectorias de chorros de 15 grados o menos son ideales para evitar mojar la fruta (NELSON, 2000).

1. Fuente de agua utilizada

La agricultura utiliza el 70 por ciento del agua dulce del mundo extraída de acuíferos, arroyos y lagos. Como resultado de la creciente población, se espera que la producción mundial de alimentos aumente un 70 por ciento para el 2050, lo que tendrá un impacto directo en los recursos hídricos. El cultivo del banano requiere un suministro constante y abundante de agua durante todo su ciclo de producción para garantizar la productividad y la calidad de la fruta. Los métodos de riego empleados para el banano incluyen aspersión subfoliar, aspersión supra foliar, goteo y riego por gravedad. La elección del sistema de riego depende de los recursos disponibles y el acceso a la tecnología. Además, se deben considerar factores como la retención de humedad, la infiltración básica, la evaporación y el potencial de equilibrio hídrico.

La gestión del agua en las plantaciones de banano es crucial, ya que la tasa de bombeo puede afectar las aguas subterráneas y superficiales debido a la construcción de pozos, bombas de riego, sistemas de canales y drenaje superficial. Esto influye en el equilibrio hídrico y en el suministro de agua en las comunidades cercanas. Por ello, es esencial implementar prácticas de manejo adecuadas para reducir el impacto social y ambiental del uso del agua (Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2017) .

En Morales, Izabal la empresa productora de banano es Bandegua, esta utiliza en Rio Motagua de atraviesa el municipio como fuente de agua para el riego de las plantaciones. Utilizan dos compuertas para que el agua pueda ingresar a las zonas de bombeo y es distribuida mediante canales (Solorzano, 2013).

I. Reúso de aguas residuales en la agricultura

El reciclaje de aguas residuales en la agricultura no solo contribuye a combatir la escasez de agua, sino que también conlleva ventajas tanto medioambientales como económicas. Esto incluye la reducción de la contaminación de cuerpos de agua y la disminución de la liberación de aguas residuales sin tratar, así como la reducción de la necesidad de extraer agua desde fuentes distantes. Además, al optimizar el uso de este recurso hídrico, los agricultores pueden incrementar la productividad y la sostenibilidad de sus cosechas, lo que en última instancia promueve la seguridad alimentaria y atenúa la presión sobre los ecosistemas acuáticos. No obstante, es esencial establecer políticas y regulaciones sólidas, junto con prácticas de gestión adecuadas, para asegurar que el reciclaje de aguas residuales en la agricultura se realice de forma segura y sostenible.

1. Calidad del agua para riego

La calidad del agua empleada en el riego de plantaciones es un factor de suma importancia que influye directamente en la salud y el rendimiento de los cultivos. El agua utilizada debe ser adecuada en términos de pureza, pH y contenido mineral para garantizar que los cultivos reciban los nutrientes necesarios y no se vean afectados negativamente por sustancias no deseadas. El pH del agua es fundamental, ya que determina la disponibilidad de nutrientes en el suelo y, por lo tanto, influye en la salud y el desarrollo de las plantas. Además, un alto contenido de sales o minerales en el agua puede causar la acumulación de sales en el suelo, lo que puede dañar las raíces y afectar la absorción de agua y nutrientes (Gisbert, 2002).

La presencia de contaminantes biológicos, químicos o físicos en el agua de riego también puede ser perjudicial para las plantaciones y, en última instancia, para la seguridad de los consumidores. Por lo tanto, es esencial llevar a cabo pruebas regulares del agua utilizada para el riego y, si es necesario, implementar sistemas de tratamiento o purificación para garantizar que cumple con los estándares de calidad necesarios para el cultivo y la salud pública. La gestión adecuada de la calidad del agua en la agricultura es crucial para optimizar el rendimiento de los cultivos, minimizar el desperdicio de recursos y mantener la seguridad alimentaria.

Parámetro	Unidad	Grado de restricción		
		Ninguno	Leve a moderado	Severo
Salinidad				
Conductividad eléctrica	dS.m ⁻¹	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Sólidos disueltos totales	mg.L ⁻¹	< 450	450-2000	> 2000
Salinidad efectiva	me.L ⁻¹	< 3.0	3.0-15.0	>15.0
Salinidad potencial	me.L ⁻¹	< 3.0	3.0-15.0	>15.0
Sodicidad				
Carbonato de sodio residual	me.L ⁻¹	< 1.25	1.25-2.5	>2.5
Relación de adsorción de sodio	me.L ⁻¹	< 3.0	3.0-9.0	> 9.0
Efecto de iones específicos				
Sodio	me.L ⁻¹	< 5.0	5.0-10.0	> 10.0
Bicarbonatos	me.L ⁻¹	< 1.5	1.5-8.5	> 8.5
Cloruros	me.L ⁻¹	< 4.0	4.0-10.0	> 10.0
Boro	mg.L ⁻¹	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Hierro	mg.L ⁻¹	< 0.1	0.1-1.5	> 1.5

Figura 3. Parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola

(Castellanos, 2000)

La sodicidad se expresa como la concentración relativa de sodio comparada con el calcio y magnesio relación de adsorción de sodio (RAS) La fórmula para determinar el RAS del agua es:

$$RAS = Na / \sqrt{(Ca + Mg)/2}$$

Donde:

RAS= Relación de absorción de sodio

Na= Sodio (Me/L)

Ca= Concentración de calcio en el agua (Me/L)

Mg= Concentración de sodio en el agua (Me/L)

Tipo de reuso	Demanda bioquímica de oxígeno, miligramos por litro	Coliformes fecales, número más probable por cien mililitros
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	<2x10 ²
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	<1x10 ⁷
Tipo V	200	<1x10 ⁷

Cuadro 3. Parámetros y límites máximos permisibles para reuso

(Acuerdo Gubernativo 236, 2006)

La tabla anterior se encuentra en el artículo 35 del acuerdo gubernativo 236 - 2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Esta indica los límites de la demanda bioquímica de oxígeno y coliformes fecales que debe tener el agua tratada para el reúso. El tipo de reúso número II está indicado para cultivos comestibles, sin embargo, este restringe frutas por lo que la aprobación para el uso debe darse por el Ministerio de Ambiente y Recursos naturales.

2. Requerimientos de nutrientes del cultivo de banano

El rendimiento potencial del cultivo de banano está vinculado a la fertilidad del suelo. En condiciones donde no hay deficiencias nutricionales, el rendimiento depende principalmente de la disponibilidad de agua y de la densidad con la que se siembran las plantas. El cultivo demanda una cantidad diferente de nutrientes en la etapa reproductiva como el nitrógeno, magnesio, fósforo, calcio, azufre y zinc son nutrientes importantes para un buen desarrollo de raíces, transporte de nutrientes y desarrollo del sistema fotosintético (Pardo, [2015](#)).

Estos nutrientes son aportados al cultivo por el suelo, sin embargo, conforme el cultivo crece necesita que estos nutrientes sean aplicados por medio de fertilizantes. La fertilización se puede realizar de forma granular, orgánica y foliar dependiendo de las necesidades del cultivo (Vargas et al. [2017](#)).

Los nutrientes presentes en el agua residual tratada por una planta de tratamiento pueden funcionar como complemento a los fertilizantes que se utilizan en los cultivos. Diversos estudios han demostrado que, cuando el agua residual tratada se utiliza correctamente, puede mejorar la productividad agrícola, promover la sostenibilidad y disminuir los costos asociados con el riego y la fertilización. Un ejemplo de estos estudios es uno realizado en Los Angeles, California el cual obtuvo como resultado que el agua residual tratada proporciona al suelo nutrientes y materia orgánica, lo que aumenta el rendimiento de los cultivos y la fertilidad del suelo (Xu, J. y Zhang, Y., [2010](#)).

J. Aspecto legal

La regulación legal del agua se caracteriza por la ausencia de una ley general que abarque todas sus disposiciones. En su lugar, se compone de un conjunto de normativas que se encuentran dispersas en diversas leyes generales y específicas, sin formar un sistema unificado de derecho de aguas. Este derecho de aguas comprende aspectos relacionados con la propiedad, uso, preservación y gestión del agua, y se diferencia claramente de la normativa que rige los servicios públicos de abastecimiento de agua potable y saneamiento (Colom, [2005](#)).

TIPO DE APROVECHAMIENTO	ASPECTO REGULADO	LEY
Doméstico	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del agua para consumo humano • Calidad del agua para el abastecimiento doméstico • Uso medicinal del agua • Manejo de aguas residuales 	<ul style="list-style-type: none"> • Código de salud; Decreto 90-87. • Acuerdo Gubernativo 236 - 2006: Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.
Doméstico	<ul style="list-style-type: none"> • Presentación de servicios de agua potable y aguas residuales, regulación y vigilancia 	<ul style="list-style-type: none"> • Código Municipal; Decreto 90-97. • Acuerdo Gubernativo 236 - 2006: Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.
Agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Miniriego • Empleo de artefactos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ley de transformación agraria; Decreto 1551. • Reglamento de Riego; Acuerdo Gubernativo 4-72. • Reglamento de operación, conservación y administración de los distritos de riego; Acuerdo Gubernativo 18-72. • Reglamento para la construcción y administración de sistemas de miniriego; Acuerdo Gubernativo 183-92. • Acuerdo Gubernativo 236 - 2006: Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

Cuadro 4. *Regulación legal del agua*

(Colom, 2005)

1. Normas sobre manejo de aguas residuales en Guatemala

En Guatemala, existe un conjunto de normas y regulaciones destinadas a dirigir el manejo de aguas residuales con el objetivo de salvaguardar tanto el entorno ambiental como la salud pública. Principalmente, la Ley de Aguas Nacionales es la regulación

preminente que establece pautas para la gestión de aguas residuales y su descarga en el medio ambiente. Esta ley impone la obligación de tratar las aguas residuales previo a su liberación, lo que contribuye de manera significativa a la reducción de la contaminación de cuerpos de agua y suelos. Adicionalmente, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala (MARN) emite regulaciones y estándares técnicos específicos que rigen el tratamiento y la disposición de aguas residuales, asegurando que las instalaciones de tratamiento cumplan con requisitos tanto ambientales como de salud pública.

La puesta en marcha de estas directrices sobre la gestión de aguas residuales en Guatemala se torna imperativa para abordar los retos que plantea el ámbito ambiental y la salud en el país. Estas regulaciones tienen como finalidad preservar la calidad de los recursos hídricos y minimizar los riesgos para la población, incentivando un manejo adecuado de las aguas residuales en distintos sectores, como la industria y los municipios. De igual forma, promueven la adopción de tecnologías avanzadas de tratamiento con el propósito de disminuir la contaminación y proteger los ecosistemas acuáticos en Guatemala.

2. Constitución Política de la República de Guatemala

Según la Constitución Política de la República de Guatemala:

Artículo 93. Derecho a la salud: muestra el derecho al goce de salud de todo ser humano sin discriminación alguna.

Artículo 97. Medio ambiente y equilibrio ecológico: el Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico. Se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y el aprovechamiento de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, se realicen racionalmente, evitando su depredación.

Artículo 127. Régimen de Aguas: todas las aguas son bienes de dominio público, inalienables e imprescriptibles. Su aprovechamiento y su goce se otorgan en la forma establecida por la ley de acuerdo con el interés social. Una ley específica regulará esta materia.

Artículo 128. Aprovechamiento de aguas, lagos y ríos: el aprovechamiento de las aguas de los lagos y de los ríos para fines agrícolas, agropecuarios, turísticos o de cualquier otra naturaleza que contribuya al desarrollo de la economía nacional está al servicio de la comunidad y no de persona particular alguna, pero los usuarios están obligados a reforestar las riberas y los cauces correspondientes, así como facilitar las vías de acceso.

3. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006

El Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 plantea el reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. El documento dicta las normas para garantizar la utilización y el aprovechamiento del agua evitando su depredación. Asimismo, se previene, controla y determina los niveles de contaminación de los ríos, lagos y mares de cualquier fuente de contaminación.

El documento está compuesto por una serie de artículos en los cuales se unifican los criterios y límites adecuados para el mejoramiento del sistema hídrico del país. Se describe la caracterización inicial de las aguas residuales, el estudio técnico, tipos de descargas y cuerpos receptores, según los parámetros que se tengan para la reutilización de las aguas residuales se determinan lo que se debe de monitorear. Además, toma en cuenta los impactos perjudiciales que los nutrientes, como el nitrógeno total y el fósforo total, pueden tener en los ecosistemas receptores, especialmente en entornos cerrados como lagos y lagunas, los cuales son gravemente afectados por el proceso de eutrofización.

Temperatura
Potencial de hidrógeno pH
Grasas y aceites
Materia flotante
Sólidos suspendidos totales
DBO ₅ a 20° C
Demanda química de oxígeno
Nitrógeno total
Fósforo total
Arsénico
Cadmio
Cianuro total
Cobre
Cromo hexavalente
Mercurio
Níquel
Plomo
Zinc
Color
Coliformes fecales

Cuadro 5. *Parámetros para determinar las características de las aguas residuales*

(Acuerdo Gubernativo 236, 2006)

El Artículo 24 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 establece los límites máximos permitidos para las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores provenientes de municipios y urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público. Las municipalidades o empresas responsables del tratamiento de aguas residuales de los sistemas de alcantarillado público, así como las urbanizaciones que no están conectadas a dicho sistema, deberán cumplir con los límites máximos permitidos para las descargas a cuerpos receptores de cualquiera de las formas siguientes:

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	< 1x10 ⁶	< 1x10 ⁷	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴	< 1x10 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

Cuadro 6. Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para aguas residuales municipales

(Acuerdo Gubernativo 236, 2006)

4. Código de salud; Decreto 90-87

Artículo 86. Normas: el Ministerio de Salud establecerá las normas vinculadas a la administración, construcción y mantenimiento de los servicios de agua potable para consumo humano, vigilando en coordinación con las Municipalidades y la comunidad organizada, la calidad del servicio y del agua de todos los abastos para uso humano, sean estos públicos o privados.

Artículo 87. Purificación del agua: las municipalidades y demás instituciones públicas o privadas encargadas del manejo y abastecimiento de agua potable, tienen la obligación de purificarla, en base a los métodos que sean establecidos por el Ministerio de Salud. El Ministerio deberá brindar asistencia técnica a las Municipalidades

de una manera eficiente para su cumplimiento. La transgresión a esta disposición, conllevará sanciones que quedarán establecidas en la presente ley, sin detrimento de las sanciones penales en que pudiera incurrirse.

Artículo 88. Certificado de calidad: todo proyecto de abastecimiento de agua, previo a su puesta en ejecución, deberá contar con un certificado extendido de una manera ágil por el Ministerio de Salud en el cual se registre que es apta para consumo humano. Si el certificado no es extendido en el tiempo establecido en el reglamento respectivo, el mismo se dará por extendido, quedando la responsabilidad de cualquier daño en el funcionario o empleado que no emitió opinión en el plazo estipulado.

Artículo 90. Aguas Contaminadas: queda prohibido utilizar agua contaminada, para el cultivo de vegetales alimentarios para el consumo humano. En el reglamento respectivo, quedarán establecidos los mecanismos de control.

Artículo 96. Construcción de obras de tratamiento: es responsabilidad de las Municipalidades o de los usuarios de las cuencas o subcuencas afectadas, la construcción de obras para el tratamiento de las aguas negras y servidas, para evitar la contaminación de otras fuentes de agua: ríos, lagos, nacimientos de agua. El Ministerio de Salud deberá brindar asistencia técnica en aspectos vinculados a la construcción, funcionamiento y mantenimiento de estas.

Artículo 97. Descarga de aguas residuales: queda prohibido la descarga de contaminantes de origen industrial, agroindustrial y el uso de aguas residuales que no hayan sido tratadas sin previo dictamen favorable del Ministerio de Salud, la Comisión Nacional del Medio Ambiente -CONAMA- y la autorización del Consejo Municipal de la jurisdicción o jurisdicciones municipales afectadas. Dicho dictamen debe ser emitido en un plazo que no exceda a lo que establezca el reglamento respectivo. Se prohíbe, asimismo, la descarga de aguas residuales no tratadas en ríos, lagos, riachuelos y lagunas o cuerpos de agua, ya sean estos superficiales o subterráneos (Decreto 90, [1997](#)).

K. Entidades vinculadas a la fiscalización de aguas en Guatemala

Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS): organismo que cumple con la vigilancia de la calidad de la prestación de los servicios. Dentro de su estructura esta la Dirección General de Regulación, Vigilancia y Control de la Salud que cumple con las funciones de vigilancia de la calidad del agua suministrada a la población y emite normas y reglamentos referentes a métodos de tratamiento de agua potable y de aguas residuales, así como su manejo.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN): cumple funciones de conservación, protección y uso eficiente del agua y de las cuencas hidrográficas. Emite regulaciones y normativas que se vinculan a la evaluación del impacto ambiental, a la descarga de aguas residuales y disposición de lodos, contaminación industrial, y uso sostenible de los recursos naturales.

EMPAGUA: empresa de servicio municipal responsable de la captación, tratamiento, distribución, mantenimiento y ampliación de los servicios de agua potable y alcantarillado para la población de la Ciudad de Guatemala. Abastece de agua a la mayor parte del Área Metropolitana de la Ciudad de Guatemala.

INFOM: se creó para promover el progreso de los municipios dándoles asistencia técnica y financiera a las municipalidades en la realización de programas básicos de obras y servicios públicos, en la explotación racional de los bienes y empresas municipales, en la organización de la hacienda y administración municipal y, en general, en el desarrollo de la economía de los municipios. Esta asistencia técnica y financiera incluye lo concerniente a los servicios de agua potable y saneamiento.

Segeplan: coordina la formulación de la política pública, planificación, programación e inversión pública. Por otro lado, prioriza, gestiona, negocia, administra y contrata, por delegación de la autoridad competente, la cooperación financiera no reembolsable proveniente de organismos internacionales y gobiernos extranjeros que le sea otorgada al país para la realización de proyectos de interés común.

L. Entidades agrícolas en Guatemala

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA): promueve y vela por la aplicación de normas claras y estables en materia de las actividades agrícolas, pecuarias, hidrobiológicas, forestales y fito zoosanitarias, buscando la eficiencia y competitividad en los mercados y teniendo en cuenta la conservación y protección del medio ambiente. Encargada de promover y hacer que se cumplan las buenas prácticas en la agricultura.

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA): la entidad, creada por el Decreto Legislativo 68-72 Ley Orgánica del ICTA, tiene como objetivo conducir investigaciones tendientes a la solución de los problemas de explotación racional agrícola y que incidan en el bienestar social. Asimismo, genera, valida y promociona tecnología agrícola (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), [199]).

V. METODOLOGÍA

A. Ubicación del área de estudio

La propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales se realizó en el municipio de Morales, Izabal. Morales se encuentra a 66 kilómetros de la cabecera departamental de Izabal la cual es Puerto Barrios y a 243 kilómetros de la Ciudad de Guatemala. Se encuentra ubicado en las coordenadas 15°28'27.5 latitud norte y 88°49'40.7 longitud oeste. Cuenta con una extensión territorial de 1,296.00 km², que lo ubica en el cuarto lugar en tamaño entre los 5 municipios del departamento de Izabal (Rodríguez, 2016).

B. Unidades de análisis

El municipio de Morales cuenta con 9 puntos de desfogue municipal los cuales pueden ser visualizados en el Anexo 2, Figura 13. La unidad de análisis sujeta a estudio fue el agua residual recolectada en el área de desfogue del río Motagua. La muestra tomada es clasificada como agua residual municipal. Los parámetros analizados fueron color, temperatura, DBO, DQO, fósforo total, grasas y aceites, materia flotante, nitrógeno total, pH, sólidos sedimentales, sólidos suspendidos y coliformes fecales. Asimismo, se evaluaron los parámetros de sodio, cloruros, boro y hierro para cumplir con los parámetros de calidad de agua para uso en riego.

C. Tipo de investigación

La investigación es de carácter descriptivo, ya que en una primera etapa se identificaron aspectos relacionados con la calidad del agua residual, así como información sobre los servicios básicos y generales del municipio. A través del análisis de los parámetros evaluados, se determinó el nivel de contaminación del agua residual generada por el municipio de Morales, lo que permitió desarrollar una propuesta para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales que responda a las necesidades de la población.

D. Recopilación de datos

La primera fase permitió la recolección de los resultados del análisis de calidad del agua proporcionado por la municipalidad de Morales, Izabal. Asimismo, se obtuvo el dato del caudal proveniente de las aguas residuales. Se estableció la calidad de agua requerida según el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, el cual dicta las reglas de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

E. Análisis de datos

Con la información recolectada, se llevó a cabo una segunda fase en la cual, basándose en los parámetros obtenidos, se determinó la opción más adecuada para el tratamiento de las aguas residuales. Para ello, se organizó y analizó la información comparándola con los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Esta evaluación sirvió como base para el diseño, definiendo el nivel de tratamiento requerido y permitiendo la selección del proceso de tratamiento adecuado para las aguas residuales del municipio. Además, se identificaron las unidades a construir y aquellas que podrían ser operadas de manera eficiente y eficaz.

La reutilización del agua tratada será utilizada para el riego de plantaciones de banano, tomando como base el Acuerdo Gubernativo 236-2006, *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*, y los parámetros de calidad del agua de riego para las plantaciones de banano.

F. Diseño de la planta de tratamiento

Se solicitó estudio topográfico del área en donde se construirá la planta de tratamiento, el cual consta de la planimetría y altimetría. Posteriormente, se dimensionó cada uno de los componentes de la planta de tratamiento de aguas residuales. La planta de tratamiento se compone por un tratamiento preliminar compuesto por rejillas, canal Parshall, desarenador y trampa de grasas y aceites. El tratamiento primario consta de un sedimentador primario rectangular; posteriormente, el tratamiento secundario con tecnología de lodos activados. Finalmente, se dimensionó un patio de secado de lodos para posteriormente poder reutilizarlos.

G. Evaluación de la eficiencia energética

Se analizó y comparó el sistema de consumo energético de la planta con un sistema de conexión de energía tradicional. Se comparó el costo mensual de un sistema de energía convencional de la planta de tratamiento con el costo de los paneles requeridos para que la planta funcione al 100 por ciento mediante energía renovable.

H. Método de presentación

Se elaboró un cuadro comparativo en el cual se colocaron los resultados del análisis de calidad de agua, los parámetros solicitados según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 y los resultados del agua obtenidos posteriormente al tratamiento propuesto. Como paso final, se realizaron los planos de la planta de tratamiento para tener cada detalle. Asimismo, se realizaron gráficos comparativos del consumo energético de un sistema tradicional de conexiones eléctricas y el integrado en la planta de tratamiento con paneles.

VI. RESULTADOS

En la presente investigación se analizó la calidad del agua residual del municipio de Morales, Izabal examinando los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos para la implementación y diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales que cumpliera con la calidad de agua requerida para el riego de una plantación de banano. Los resultados obtenidos y la discusión de los mismos se presentan a continuación.

A. Parámetros fisicoquímicos del agua residual del municipio

Parámetro	Agua residual Morales	Valor Ac. 236-2006*
Temperatura	28 ºC	TCR +/-7
Color	141.0 u Pt/Co	500 u Pt/Co
DBO	91 mg/L	100 mg/L
DQO	137 mg/L	-
Fósforo total	1.10 mg/L	10 mg/L
Grasas y aceites	< 5 mg/L	10 mg/L
Materia flotante	Ausente	Ausente
Nitrógeno total	7.9 mg/L	20 mg/L
pH	7.10	6 a 9
Sólidos sedimentables	0.2 mg/L	-
Sólidos suspendidos	57 mg/L	100 mg/L
Coliformes fecales	2.2 \times 10 NMP/100mL	< 1 \times 10 NMP/100mL

Cuadro 7. Comparación agua residual municipal con el Acuerdo Gubernativo 236 - 2006

Fuente: elaboración propia. * Acuerdo al artículo 24 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, reformado por el Acuerdo Gubernativo 285-2022

Parámetro	Calidad agua riego	Agua residual Morales
Conductividad eléctrica	< 0.7 dS/m	0.54 dS/m
Sólidos disueltos	< 450 mg/L	14.61 mg/L
Relación de absorción de sodio	< 3 me/L	3.58 me/L
Sodio	< 5 me/L	3.2 me/L
Bicarbonatos	< 1.5 me/L	1.10 me/L
Cloruros	< 4 me/L	3.70 me/L
Boro	< 0.7 mg/L	0.4 mg/L
Hierro	< 0.1 mg/L	0.06 mg/L

Cuadro 8. Comparación agua residual municipal con los parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola

Fuente: elaboración propia. Comparación con parámetros del manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP (Castellanos, 2000)

La muestra de agua residual se recolectó el 6 de marzo de 2024 del punto de desfogue municipal del río Motagua, fue una muestra simple. El análisis fue realizado por el laboratorio ECOQUIMSA el cual se puede observar en el Anexo 2, Cuadro 34.

Se llevó a cabo una comparativa entre los límites máximos permisibles de la tercera etapa del Acuerdo Gubernativo 236-2006 para las descargas de aguas municipales, junto con los valores obtenidos del análisis de la muestra antes de la PTAR. Se notó que la mayoría de los parámetros están por arriba del límite permitido, lo que señala la existencia de contaminación en el agua residual de la descarga.

El valor de coliformes fecales es el más significativo que sobrepasa el límite tolerable. Además, el valor de DBO5 se encuentra próximo al límite regulatorio, siendo este uno de los factores esenciales a tener en cuenta en el diseño final del sistema de tratamiento, con el objetivo de una eliminación más amplia.

El parámetro de coliformes fecales sobrepasa los límites permisibles, lo cual se debe a que la mayor parte de la materia descargada en aguas residuales es orgánica, razón por la que es habitual la presencia de estos parámetros.

B. Cálculo de población futura

Como criterio de diseño se utilizó una proyección para a 20 años, el cual será la vida útil de la planta de tratamiento. La población que desfoga hacia el punto de muestreo del río Motagua para realizar la planta de tratamiento es de 1897 habitantes el periodo es de 20 años y una tasa de crecimiento poblacional del 4 por ciento. El dato del porcentaje de crecimiento poblacional fue proporcionado por la municipalidad de Morales.

$$N_t = N_o(1 + r)^{20}$$
$$N_t = 2589(1 + 0.04)^{20}$$
$$N_t = 5654$$

La población a futuro al periodo de diseño de 20 años será de 5654 habitantes.

C. Características del agua residual a tratar

La proyección del caudal de agua potable y de aguas residuales para los próximos 20 años, que se estima para la planta de tratamiento, determinará los caudales con los que operará y se tratarán las unidades del sistema. Este es un parámetro fundamental para la implementación de la tecnología, ya que su gestión se ajustará a los niveles de caudal previstos en el plazo establecido. La capacidad de descarga por persona de 100 L/d fue brindada por la municipalidad de Morales.

El factor de retorno utilizado es 0.90, factor para el caudal máximo 2 y factor para el caudal mínimo 0.5.

Criterio	Valor
Capacidad	5654 habitantes
Capacidad	100 L/d de descarga por persona
Factor de retorno	0.9
Factor Qmax	2
Factor Qmín	0.5

Cuadro 9. *Criterio de diseño - caudales*

Fuente: elaboración propia.

	m3/d	L/s	L/d
Qmáx	1017.56	11.78	1,017,557.59
Qmed	508.79	5.89	508,778.79
Qmin	254.39	2.94	254,389.40

Cuadro 10. *Caudal máximo, medio y mínimo*

Fuente: elaboración propia.

El caudal máximo que se espera tratar es de 1017.56 m³/d (11.78 L/s), caudal medio 508.79 m³/d (5.89 L/s), y caudal mínimo 254.39 m³/d (2.94 L/s).

Parámetro	Valor
Temperatura	28 ºC
DBO	91 mg/L
DQO	137 mg/L
Fósforo total	1.10 mg/L
Nitrógeno total	7.9 mg/L
pH	7.10
Sólidos suspendidos	57 mg/L
Coliformes fecales	2.2 x 10 ⁶ NMP/100 mL

Cuadro 11. *Concentración de parámetros*

Valores obtenidos del análisis de calidad de agua, Anexo 1.

Parámetro	Carga
DBO	46.30 kg/d
DQO	69.70 kg/d
Nitrógeno total	4.01 kg/d
Sólidos suspendidos	29.00 kg/d
Fósforo total	0.56 kg/d

Cuadro 12. Carga de parámetros

Fuente: elaboración propia.

D. Sistema de tratamiento propuesto

La planta de tratamiento de aguas residuales especiales para el municipio de Morales, Izabal, fue diseñada con los criterios mencionados anteriormente...

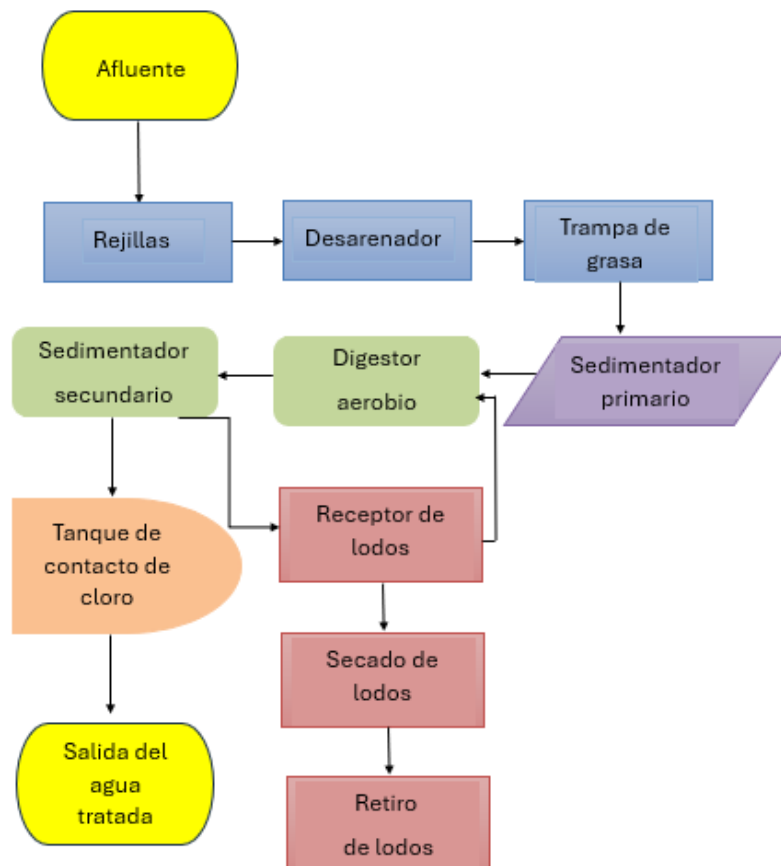


Figura 4. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento propuesto

Rejillas: constituyen la primera operación unitaria en el proceso de tratamiento, siendo el punto de inicio del sistema y ubicándose justo después del canal de entrada. Su función es proteger las unidades del sistema, evitando que desde el principio se presenten fallos en el funcionamiento, al retener objetos de gran tamaño que puedan comprometer el proceso. Estos objetos pueden incluir ramas, plásticos, telas u otros materiales sólidos que no se han desintegrado o degradado cuando el agua residual pasa a través del sistema.

Desarenador: la función del desarenador es retener y sedimentar arenas, gravas y cualquier material con un peso específico mayor que los sólidos orgánicos putrefactibles presentes en el agua residual, evitando que estos avancen hacia las siguientes etapas del sistema y afecten su correcto funcionamiento.

Trampa de grasa: la función de esta unidad del sistema es retener sustancias con un peso específico menor al del agua, lo que hace que estas floten. El diseño adoptado se basó en una relación largo-ancho de la estructura que permite a las grasas y aceites presentes en el agua residual desprenderse y quedar atrapadas en la misma.

Sedimentador primario: la función del sedimentador primario es continuar el proceso de sedimentación de partículas presentes en el agua residual tratada. Basado en la teoría de que los sólidos, al estar en reposo y tener un peso específico mayor al del agua, tienden a depositarse en el fondo del sedimentador, mientras que las partículas con menor peso específico tienden a ascender. De esta manera, se logra eliminar de manera eficiente los sólidos sedimentables y la materia flotante, reduciendo la cantidad de sólidos en suspensión en el agua residual tratada.

Digestor aerobio: la digestión aerobia es un proceso en el cual se produce una aireación, por un periodo de tiempo de una mezcla de lodo digerible de la clarificación primaria, con el resultado de una disminución de materia orgánica.

Sedimentador secundario: permite que el lodo decante en el fondo, mientras que el líquido clarificado permanece en la superficie.

Tanque de contacto de cloro: su objetivo es clorar el agua para desinfectarla, manteniendo siempre una cantidad adecuada de cloro residual para asegurar que el agua tratada esté completamente libre de bacterias patógenas.

Secado de lodos: el patio de secado de lodos tiene como función deshidratar los lodos previamente digeridos, aprovechando la radiación solar para llevar a cabo este proceso. Una vez extraídos del digestor, los lodos se extienden en una capa de 25 cm de espesor en el patio, dejándolos secar durante el tiempo necesario según la cantidad producida.

Los parámetros de diseño, fórmulas y procedimiento de los resultados presentados a continuación se encuentran en la sección de Anexos.

E. Dimensionamiento del pretratamiento

1. Dimensionamiento rejillas

Se determino que las dimensiones calculadas de las rejillas poseen un tamaño ideal para retener los sólidos gruesos que puedan obstruir las unidades posteriores del sistema. Asimismo, estas cumplen con los parámetros de diseño (véase Anexo 2, Cuadro 35).

Los materiales sólidos atrapados en las rejillas se retiran manualmente y se les da una disposición final adecuada según su tipo. Una vez que pierden humedad, los desechos biodegradables pueden ser utilizados para composta, mientras que los no biodegradables se colocan en contenedores de basura, tras una separación previa de acuerdo con su naturaleza.

Criterio	Valor
Separación entre rejas	3 cm
Ancho barra (w)	1 cm
n	1.55

Cuadro 13. *Criterio de diseño - rejilla*

Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
Eficiencia (E)	0.75
Velocidad máx en canal (Vc)	0.50 m/s
Velocidad máx en rejas (Vb)	0.66 m/s

Cuadro 14. *Resultados dimensionamiento - rejilla*

Fuente: elaboración propia.

2. Dimensionamiento canal Parshall y desarenador

Los coeficientes utilizados como criterios de diseño k y n fueron seleccionados en relación a la medida del canal Parshall, se utilizó canal de 2 pulgadas. (verse en Anexo 2, Cuadro 37)

Criterio	Valor
Velocidad horizontal (Vh)	0.3 m/s
k	425 m ³ /h
n	1.55

Cuadro 15. *Criterio de diseño - canal Parshall y desarenador*

Fuente: elaboración propia.

El diseño se basó en calcular la sección hidráulica necesaria para mantener una velocidad de sedimentación de aproximadamente 0.3 m/s. A esta velocidad, las partículas son arrastradas a través del canal del desarenador, y se permite la suspensión de nuevas partículas que ingresan, mientras las arenas más pesadas se sedimentan.

Este proceso elimina materiales que podrían causar fallos en las unidades posteriores, protege el equipo de desgaste excesivo al reducir la abrasión, y disminuye la formación de depósitos de materiales pesados en tuberías y conductos. Además, reduce la necesidad de limpiezas frecuentes en el área digestora, aumentando la eficiencia de la unidad.

El desarenador propuesto cumple con las funciones clave del sistema, asegurando una distribución uniforme y controlada del flujo de agua. Mantiene una velocidad constante para que las partículas se depositen por gravedad y su diseño evita que las partículas sedimentadas sean perturbadas por la corriente del agua. Los parámetros de diseño utilizados se encuentran en Anexo 2, Cuadro 36.

Las ventajas de este tipo de desarenador horizontal, en comparación con otros, incluyen que no requiere piezas o equipos específicos para su operación, limpieza o remoción de arenas, lo que lo convierte en un sistema ampliamente utilizado y eficiente debido a su simplicidad. Además, presenta un bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, lo que lo hace una opción atractiva para la toma de decisiones sobre la unidad propuesta.

Parámetro	Q (m³/s)	Q (m³/h)	HP (m)	HD (m)	VD (m/s)
Máx	0.012	42.40	0.23	0.18	0.3
Prom	0.006	21.20	0.14	0.09	0.28
Min	0.0029	10.60	0.09	0.04	0.3

Cuadro 16. *Resultados dimensionamiento - canal Parshall*

Fuente: elaboración propia.

HP= Altura canal Parshall

HD= Altura desarenador

VD= Velocidad desarenador

Variable	Valor
Grada entre canal y desarenador (z)	0.05 m/s
Hd máx	0.20 m
Ancho desarenador (b)	0.25 m
Longitud (L)	4.00 m

Cuadro 17. *Dimensionamiento - desarenador*

Fuente: elaboración propia.

3. Dimensionamiento trampa de grasa

Se logró la eliminación de grasas y aceites mediante flotación, retirándose de la superficie a través de un vertedero donde estos desechos se acumulan y solidifican para su disposición final adecuada. Esto también garantiza que las siguientes fases del sistema no se obstruyan ni disminuyan su flujo por la acumulación de grasas, facilitando la limpieza de esta unidad y de las etapas posteriores del proceso de depuración. Los parámetros de diseño utilizados se encuentran en Anexo 2, Cuadro 38.

Criterio	Valor
Tiempo retención hidráulico (TRH)	25 min
Profundidad (h)	1 m
Forma	Rectangular
Relación largo:ancho	2:1

Cuadro 18. *Criterio de diseño - trampa de grasa*

Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
Volúmen (V)	17.66 m ³
Area (A)	17.66 m ²
Ancho (a)	3.00 m
Largo (L)	6.00 m

Cuadro 19. *Resultados dimensionamiento - trampa de grasa*

Fuente: elaboración propia.

F. Dimensionamiento del tratamiento primario

1. Dimensionamiento sedimentador primario

El diseño del tanque sedimentador busca una reducción eficiente de los sólidos suspendidos, que puede variar entre un 45 a 65 por ciento, y de la DBO entre un 20 y 40 por ciento (Environmental Protection Agency (EPA), 1997). Esto mejora progresivamente la calidad del agua para la siguiente fase del tratamiento. El sistema actualmente alcanza un nivel de remoción de SST del 49.38 por ciento y de DBO del 28.57 por ciento, situándose dentro de los rangos de eficiencia teóricos. La eficiencia del sedimentador primario se calculó según las constantes empíricas a y b (véase Anexo 2, Cuadro 40). La remoción de DQO se calculó con la relación de DQO/DBO que se tiene en el agua cruda.

Las ventajas de este sistema incluyen su capacidad para regular los tiempos de remoción de contaminantes, evitando la formación de procesos anaeróbicos microbiológicos que podrían afectar la calidad del agua tratada. Este sistema es altamente confiable, mejorando la calidad del agua tratada y optimizando la velocidad de procesamiento del agua entrante y saliente.

Otra ventaja destacada es la simplicidad de su construcción en comparación con otros sistemas depuradores. En términos operativos, no requiere de personal especializado para el control diario, lo que reduce los costos. Además, no necesita energía eléctrica, salvo en casos donde se requiera bombear el agua, en cuyo caso el consumo sería mínimo, lo que representa un beneficio adicional de la unidad.

Criterio	Valor
Carga superficial (HLR)	40 m ³ /m ² /d
Tasa de rebalse (WLR)	250 m ³ /m/d
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	2 h
Profundidad (h)	2 m

Cuadro 20. *Criterio de diseño - sedimentador primario*

Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
Volumen (V)	25.50 m ³
Área (A)	12.80 m ²
Ancho (a)	2.50 m
Largo (L)	5.00 m
Longitud mín. canal salida (Lc)	2.00 m

Cuadro 21. *Resultados dimensionamiento - sedimentador primario*

Fuente: elaboración propia.

Variable	Entrada	Tasa remoción	Salida
DBO	91.00 mg/L	28.57	65.00 mg/L
SST	57.00 mg/L	49.38	28.85 mg/L
DQO	137.00 mg/L	-	97.5 mg/L

Cuadro 22. *Resultados de entrada, salida y tasa de remoción - sedimentador primario*

Fuente: elaboración propia.

G. Dimensionamiento del tratamiento secundario

1. Dimensionamiento digestor aerobio

Es necesario proporcionar mezclado durante la digestión aerobia para poder mantener los sólidos y para lograr una eficiencia óptima de transferencia de oxígeno a lo largo de todo el proceso. Los microorganismos son sensibles a las variaciones de pH, por lo que es importante llevar el control de este durante el proceso. Los parámetros de diseño utilizados se encuentran en Anexo 2, Cuadro 43.

Criterio	Valor
SRT	10 días
HRT	6 horas
F/M	0.5 kg DBO5/kg VSS*d
Xv	2500 mg VSS/L
Fracción biodegradable (Fbt')	0.8
Productividad (Y)	0.7 g VSS/g DBO5 removido
Coefficiente de respiración endógena (Kd)	0.10 g VSS/g VSS * d
Valor deaseado DBO (S)	5 mg/L
Xr	10,000 mg/L
Tasa de recirculación de lodos (R)	0.33

Cuadro 23. *Criterio de diseño - digestor aerobio*

Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
Volúmen (V)	113.95 m ³
Fracción biodegradable (Fb)	0.67
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	2.42 horas
Producción de lodos (Pxv)	51.10 kgVSS/d
Px	76.65 kgSS/d
Extracción de lodos (Qext't')	7.66 m ³ /d
Tasa de uso de oxígeno (OURc)	16.56 kg O ₂ /d
Oxígeno para nitrificación (OURn)	36.74 kg O ₂ /d
Demanda total de oxígeno (OUR)	53.3 kg O ₂ /d
Área (As)	12.82 m ²
Ancho (a)	3 m
Largo (l)	4.5 m
Altura (h)	4 m

Cuadro 24. *Resultados dimensionamiento - digestor aerobio*

Fuente: elaboración propia.

2. Dimensionamiento sedimentador secundario

El sistema actualmente alcanza un nivel de remoción de SST del 49.38 por ciento, situándose dentro de los rangos de eficiencia teóricos, además de lograr un 30 por ciento de demanda química de oxígeno.

El valor de salida de DBO es el establecido como valor deseado de 5 mg/L. La remoción de DQO se calculó con la relación de DQO/DBO que se tiene en el agua cruda.

Parámetro	Valor
Carga superficial (HLR)	24 m ³ /m ² /d
Q _{max}	42.40 m ³ /h
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	1.2 horas

Cuadro 25. Criterios de diseño - sedimentador secundario

Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
Area (A _s)	42.40 m ²
Volúmen (V)	35.33 m ³
Altura (h)	3 m
Radio (R)	3.67 m

Cuadro 26. Resultados dimensionamiento - sedimentador secundario

Fuente: elaboración propia.

Variable	Entrada	Tasa remoción	Salida
DBO	64.99 mg/L	-	5 mg/L
SST	28.85 mg/L	49.38	14.61 mg/L
DQO	97.50 mg/L	-	7.5 mg/L

Cuadro 27. Resultados de entrada, salida y tasa de remoción - sedimentador secundario

Fuente: elaboración propia.

H. Dimensionamiento del tratamiento terciario

1. Dimensionamiento tanque de contacto de cloro

Parámetro	Valor
Velocidad	3 m/min
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	20 minutos

Cuadro 28. Criterios de diseño - tanque de contacto de cloro

Fuente: elaboración propia.

Variable	Valor
Volúmen (V)	7.07 m ³
Ancho (a)	0.3 m
Largo (l)	12 m
Altura (h)	0.5 m

Cuadro 29. Resultados dimensionamiento - tanque de contacto de cloro

Fuente: elaboración propia.

I. Dimensionamiento patio de lodos

En cuanto al diseño, el patio de secado está compuesto por una capa inferior de 25 mm de grava, seguida de una capa de arena de 30 cm, otra capa superior de 5 mm de grava y como última capa consta de ladrillo Este material filtrante asegura un adecuado proceso de deshidratación.

Las ventajas de contar con un patio de secado incluyen la obtención de un producto final con alto contenido de sólidos, además de su bajo costo de construcción, mantenimiento y facilidad de operación. Se propone también incluir un techo de lámina transparente para proteger el proceso de secado durante la temporada de lluvias.

Al final, se obtiene un material inocuo que puede ser utilizado en dos actividades específicas propuestas por el reglamento: como material de relleno o aplicado al suelo como acondicionador, abono o compost en cultivos.

Variable	Valor
Area (As)	266.12 m ²
Carga de sólidos (C)	2.53 kg/d
Masa lodos (Msd)	0.82 kg/d
Volúmen diario lodos(Vdl)	7.9 l/d
Volúmen a extraer (Ve)	0.33 m ³
Largo (L)	20.00 m
Ancho (a)	10.00 m

Cuadro 30. Resultados dimensionamiento - patio de lodos

Fuente: elaboración propia.

J. Cálculo relación de sodio residual

Parámetro	Valor
Calcio (Ca)	2.12 me/L
Magnesio (Mg)	1.08 me/L
Sodio (Na)	3.20 me/L
RAS	3.58

Cuadro 31. *Criterios de diseño y calculo de RAS*

Fuente: elaboración propia.

K. Parámetros del agua residual tratada

Parámetro	Valor Ac. 236-2006*	Valores posteriores PTAR
Temperatura	TCR +/-7	
Color	500 u Pt/Co	141.0 u Pt/Co
DBO	100 mg/L	46.42 mg/L
DQO	-	67.13 mg/L
Fósforo total	10 mg/L	1.10 mg/L
Grasas y aceites	10 mg/L	0 mg/L
Materia flotante	Ausente	Ausente
Nitrógeno total	20 mg/L	7.9 mg/L
pH	6 a 9 mg/L	7. 10 mg/L
Sólidos suspendidos	100 mg/L	14.61 mg/L
Coliformes fecales	< 1 x 10 ⁴ NMP/100mL	1 x 10 ⁴ NMP/100mL

Cuadro 32. *Comparación del Acuerdo Gubernativo 236 - 2006 y la descarga del agua tratada*

Fuente: elaboración propia. * Acuerdo al artículo 24 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, reformado por el Acuerdo Gubernativo 285-2022.

L. Calculo de área regable con el efluente de la planta de tratamiento

El cultivo de banano requiere de 100-250 mm de agua al mes, por lo que aproximadamente necesita 8 mm al día. Considerando que 1 mm de agua sobre 1 m² es igual a 1 litro de agua, para regar 1 m² de cultivo de banano se necesitan 8 litros por día (EOS Data Analytics, [2024](#)).

El efluente de la planta de tratamiento es de aproximadamente de 483 m³/d, este se calculó restándole al caudal de entrada de la planta menos un 5 por ciento considerando pérdidas de evaporación, retiro de sólidos y consumo interno. El dato de pérdida se consideró según (Metcalf, R. y Eddy, P., 2014).

Parámetro	Valor
Q salida	483 m ³ /d
Demanda de agua del banano	8 l/m ² /d
Área regable	60,417 m ²
Área regable	6.04 ha

Cuadro 33. Área de cultivo regada con el efluente de la planta de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

Con un caudal de 483,000 litros al día se puede regar un área de cultivo de banano de aproximadamente 6 hectáreas.

M. Comparativa entre el uso de agua residual tratada para riego y la forma tradicional de riego en plantaciones de banano

Aspecto	Agua Residual Tratada para riego	Forma tradicional de riego
Calidad del agua	Agua tratada para reducir contaminantes y elementos nocivos.	Agua extraída de fuentes naturales (ríos, pozos, lluvias) sin tratamiento previo.
Impacto ambiental	Reduce el consumo de agua dulce y aprovecha recursos hídricos reutilizables.	Puede generar estrés hídrico en fuentes naturales si se usa en exceso.
Riesgos para la salud	Riesgo mínimo si el tratamiento es adecuado; debe cumplir normativas sanitarias.	Generalmente seguro, pero la contaminación natural del agua puede afectar cultivos.
Fertilizantes naturales	Aporta nutrientes presentes en el agua tratada, reduciendo la necesidad de fertilizantes adicionales.	Requiere aplicación independiente de fertilizantes.
Costo	Inversión inicial alta en infraestructura, pero menores costos a largo plazo por el ahorro de agua.	Menor inversión inicial pero mayores costos a largo plazo si el agua es limitada.
Disponibilidad de agua	Permite riego continuo incluso en épocas de sequía.	Dependiente de la disponibilidad estacional de agua natural.

Cuadro 34. Comparativa entre el uso de agua residual tratada para riego y la forma tradicional de riego en plantaciones de banano

Fuente: elaboración propia.

El riego con agua residual tratada en plantaciones de banano es una alternativa sostenible que contribuye a la economía circular, aprovechando nutrientes como nitrógeno y fósforo y reduciendo el uso de fertilizantes químicos. Sin embargo, requiere estrictos controles de calidad para evitar problemas sanitarios y la salinización del suelo.

Por otro lado, el riego tradicional es más simple y confiable respecto a la calidad del agua, pero depende de fuentes de agua dulce, lo que puede provocar sobreexplotación y conflictos en zonas con alta demanda. Aunque este método es más accesible en áreas con abundante agua, es menos eficiente en el aprovechamiento integral de recursos.

N. Comparación de fuente de energía renovable

Energía Renovable	Ventajas	Desventajas
Energía Solar	<ul style="list-style-type: none"> • Morales cuenta con una alta radiación solar. • Requiere de poco mantenimiento. • El sistema se puede ampliar si es necesario. • No genera emisiones de gases de efecto invernadero. • Puede combinarse con otras fuentes de energía renovable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo inicial. • Depende de la luz solar. • Necesita de áreas amplias para la instalación de los paneles.
Energía Eólica	<ul style="list-style-type: none"> • No genera emisiones de gases de efecto invernadero. • Puede combinarse con otras fuentes de energía renovable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la disponibilidad de viento, la cual es variable en Morales, Izabal. • Las turbinas son intrusivas para las comunidades cercanas. • El costo de las turbinas es elevado.
Energía Hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • Costos bajos de operación. • No depende de las condiciones climáticas. • Morales cuenta con recursos hídricos que pueden aprovecharse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las instalaciones pueden alterar los ecosistemas acuáticos. • La construcción de una planta hidroeléctrica requiere de una inversión significativa, aunque esta sea pequeña. • La construcción de una planta no se justifica solo para ser fuente de energía de una sola planta de tratamiento.
Energía Térmica	<ul style="list-style-type: none"> • Produce energía continua. • Aprovecha materiales orgánicos que se desechan. 	<ul style="list-style-type: none"> • La combustión de biomasa puede generar contaminación si no se maneja con cuidado. • La operación y mantenimiento es elevado. • Los suministros de residuos agrícolas confiables son difíciles de conseguir.

Cuadro 35. Comparativa de fuentes de energía renovable

Fuente: elaboración propia.

Según el análisis realizado la energía solar es la mejor opción para las condiciones del proyecto, especialmente debido a la ubicación y condiciones climáticas de Morales, Izabal. Se optó por utilizar energía solar debido a su abundancia, eficiencia económica, sostenibilidad ambiental y bajo impacto. Además, es una fuente de energía flexible y escalable que puede adaptarse tanto a las necesidades actuales como a futuros aumentos en la capacidad de la planta.

Ñ. Cálculos de paneles solares

El cálculo del consumo eléctrico diario de la planta de tratamiento consta de dos sopladores, dos bombas de recirculación, dos bombas de lodos y el alumbrado. Las bombas estarán encendidas las 24 horas del día. Las fichas técnicas de las bombas y soplador utilizado se encuentran en el Anexo 2 , Figura 30. Para el alumbrado se consideraron 30 luminarias de funcionaran 12 horas al día ver ficha técnica en Anexos 2, Figura 31. El consumo total es de 610.23 Kwh/d.

Artefacto	Potencia (W)	Tiempo de uso (h)	Consumo eléctrico diario (Wh)
Soplador	12,830	24	307,825
Bomba de recirculación	6,000	24	144,000
Bomba de lodos	6,000	24	144,000
Alumbrado de planta	1,200	12	14,400

Cuadro 36. Consumo eléctrico de la planta de tratamiento

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de número de paneles solares requeridos se utilizaron los datos de irradiancia solar de Morales, Izabal (vease en Anexo 2, Figura 28) y el módulo fotovoltaico utilizado fue el JAM72S30 565GR (vease en Anexo 2, Figura 26). A continuación, se encuentra la fórmula utilizada:

$$No.depaneles = (Consumodiario)/(Potenciapanel * HSP)$$

Donde:

HSP: Hora solar pico (h/día)

Consumo diario (kWh/día)

Potencia panel (kw)

$$No.depaneles = (610.23kWh/d)/(0.509kW * 4.85h) = 248$$

Para cumplir con el consumo eléctrico de la planta de tratamiento de aguas residuales se necesita la instalación de 248 paneles solares. Al calculo de los mismos se le incluyeron los factores de temperatura de la región para que el calculo fuese exacto, asimismo se consideraron las pérdidas de potencia que puede haber en el sistema. Por esta razón en el calculo no se utilizó la potencia de paneles de 0.560 kW si no el dato de 0.509 kW. El dimensionamiento realizado la planta de tratamiento trabajaría al 100 por ciento con energía renovable.

Paneles Solares		
Parámetros	Valor	Unidad
Consumo eléctrico	610.22	kWh/d
Radiación Solar Pico (HSP)	4.84	h
Potencia de paneles	0.51	kW
No. Paneles Solares	248.00	und

Cuadro 37. *Dimensionamiento de núm. de paneles solares*

Fuente: elaboración propia.

1. Comparación de costos

A continuación, se encuentra la comparación de costos entre el consumo eléctrico con energía eléctrica convencional y el sistema de energía solar. Según la Comisión de Energía Eléctrica (CNEE) la tarifa para los usuarios de la Distribuidora de Electricidad de Oriente, S.A (DEORSA) la cual es la distribuidora en Morales, Izabal es de Q2.178 por kWh (Prensa Libre, 2024). El costo mensual de consumo energético de la planta de tratamiento sería de Q39,872.10.

Costos de energía eléctrica		
Parámetros	Valor	Unidad
Consumo eléctrico	610.22	kWh/d
Consumo eléctrico mensual	18306.75	kWh
Costo kWh	2.178	Quetzales
Costo mensual	39872.10	Quetzales

Cuadro 38. *Costo energía eléctrica convencional*

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la siguiente tabla el costo de la compra de los 248 paneles solares requeridos para el funcionamiento de la planta de tratamiento es de Q248,000.00. El módulo fotovoltaico elegido es distribuido en Guatemala y su costo es de una tienda nacional (Vease en Anexo 2, Figura 27). Asimismo, se tomó en cuenta el precio de un inversor fotovoltaico (vease en Anexo 2, Figura 29), costo de instalación y materiales extra. Para el costo de instalación de un panel solar se consideró un precio de Q750.00 el cual incluye el cable eléctrico para conectar los paneles al inversor, así como conectores y fusibles. El precio de materiales extras solo incluye cualquier cableado extra que se necesite o material de estructura para fijar el panel por lo que se considera un precio de Q150.00 por panel. Si comparamos este costo con el de la energía convencional tomaría el pago de 11 meses para cubrirlo (vease Figura 10). Aunque es una inversión considerable al inicio se puede observar que el ahorro a largo plazo es significativo.

Esta comparación se puede observar en la siguiente gráfica, donde la inversión del sistema tradicional de energía eléctrica es el pago mensual por el servicio y la inversión del sistema de paneles solares es el total del precio del sistema y se agrega un costo de Q3,405.00 mensuales por mantenimiento.

Costos Paneles Solares	
Parámetros	Valor
Costo Panel	Q 248,000.00
Inversor fotovoltaico	Q 20,000.00
Costo Instalación	Q 186,000.00
Materiales extras	Q 37,200.00
Costo Total Paneles	Q 491,200.00

Cuadro 39. Costo paneles solares

Fuente: elaboración propia.

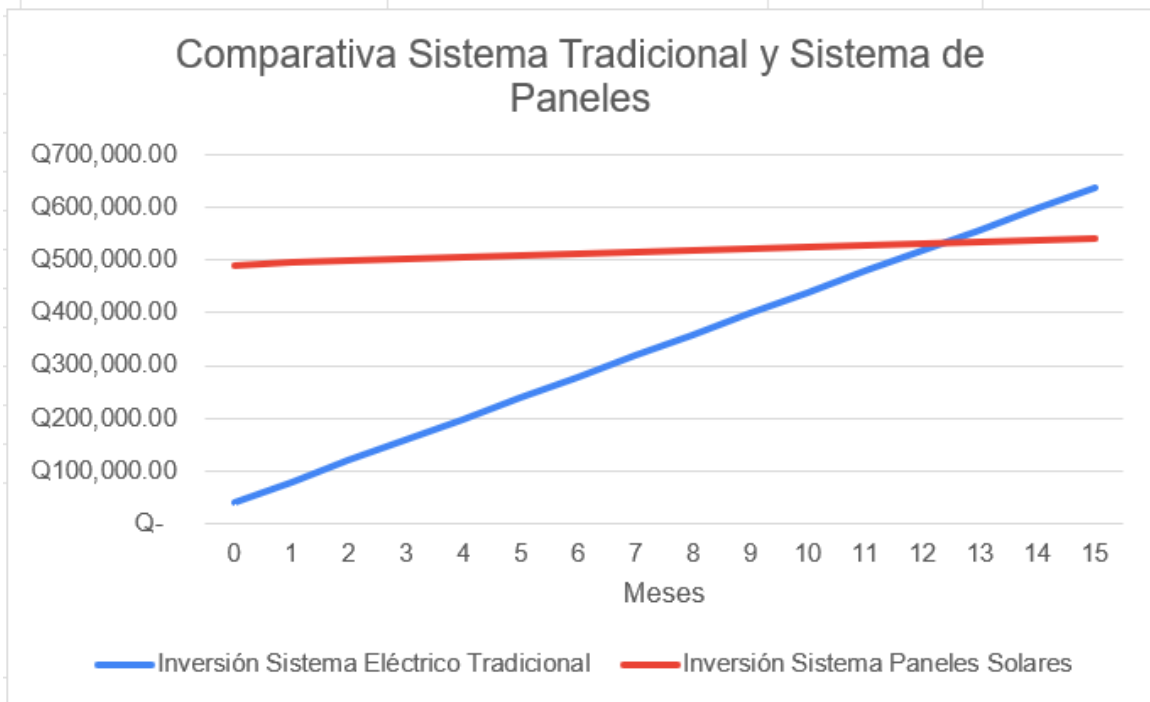


Figura 5. Comparativa entre la inversión del sistema tradicional de energía eléctrica y el sistema de paneles solares

Fuente: elaboración propia.

VII. DISCUSIÓN

Los valores del agua residual posterior a la PTAR cumplen con los límites máximos permisibles del Acuerdo Gubernativo 285-2022 de descargas a cuerpos receptores para aguas residuales municipales. Asimismo, los valores son inferiores a los parámetros de calidad de agua de riego para uso agrícola según el manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP (Castellanos, 2000). El único valor que sobrepasa por poco uno de los límites es la relación de absorción de sodio con un valor de 3.58, sin embargo, este valor aún queda dentro del grado de restricción leve. Por lo que se cumple con el primer objetivo del presente trabajo.

Al finalizar el proceso, el agua obtenida cumple con los límites máximos permisibles para el reúso de tipo I, que no establece requerimientos específicos para la DBO ni para coliformes fecales. El reúso de tipo I se refiere al riego agrícola en general, lo que permite utilizar el efluente en actividades de riego tanto intensivo como extensivo, ya que posee las características necesarias tras los procesos de remoción. Además, el efluente tratado conserva nutrientes que lo hacen adecuado para la recuperación y mejora de suelos. Este tipo de reúso se ajusta al rango tipo B propuesto por la OMS para el reúso de aguas residuales. Asimismo, el agua tratada también puede ser reutilizada en actividades de tipo II, el cual es indicado para cultivos comestibles, sin embargo, este requiere de aprobación Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales por ser una fruta.

La cantidad del efluente de la planta de tratamiento es de 483 m³/d y la planta de banano requiere de 8 l/m²/d de agua. Por lo que el área que se puede regar con el caudal de descarga es de 60,417 m² o 6.04 hectáreas de cultivo. El agua tratada será utilizada en su totalidad ya que es para el riego de plantaciones de banano de familias de escasos recursos del área. Considerando que una familia tiene un área de plantación de 100 m², se benefician aproximadamente 600 familias.

El uso de agua residual tratada para el riego de plantaciones de banano representa una alternativa sostenible frente al riego tradicional, especialmente en áreas con escasez de agua, ya que permite reciclar recursos y aporta nutrientes como nitrógeno y fósforo, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos. La planta de tratamiento trata 508.780 L/d y el agua contiene una concentración de nitrógeno de 7.9 mg/L y de fósforo de 1.1 mg/L, por lo que tiene 1,466 kg/año de nitrógeno y 205 kg/año de fósforo. El cultivo de banano requiere un aproximado de 300 kg de nitrógeno por hectárea al año y 100 kg de fósforo por hectárea al año. Considerando que el área regable con el agua tratada es de 6 hectáreas, a cada hectárea se le proporcionaría 244 kg de nitrógeno lo que equivale al 81 por ciento de la cantidad que necesita. Por otro lado, de fósforo se proporcionaría 35 kg a cada hectárea lo que equivale al 35 por ciento de lo requerido. Realizando este análisis el ahorro de fertilizantes es significativo.

Sin embargo, la implementación de agua residual tratada para el riego requiere estrictos controles de calidad para evitar riesgos sanitarios y problemas como salinización. Por otro lado, el riego tradicional, aunque generalmente más sencillo y confiable en cuanto a calidad inicial, depende de la disponibilidad de fuentes de agua dulce, lo que puede generar sobreexplotación y conflictos por el uso del recurso en zonas con alta demanda.

Mientras que el agua residual tratada fomenta la sostenibilidad y la economía circular, el riego tradicional puede ser más accesible a corto plazo en regiones con recursos hídricos abundantes, pero menos eficiente en términos de aprovechamiento integral de recursos.

La energía renovable elegida para darle funcionamiento a la planta de tratamiento fue energía solar mediante la instalación de módulos fotovoltaicos. Se logró que la planta funcione al 100 por ciento mediante energía renovable durante todo el año, ya que las horas solares picos consideran un promedio de la irradiancia solar. Asimismo, para el número de módulos fotovoltaicos necesarios se consideró el efecto de cambio de temperatura. El costo energético mediante un sistema eléctrico tradicional es de Q 39,872.10 al mes. Por otro lado, el sistema de paneles solares es de Q 491,200.00, a pesar que el un precio elevado si comparamos con el precio del sistema convencional cubrirlo solo tomaría el pago de 12 meses.

Las ventajas del sistema eléctrico convencional es que la energía es constante y no varía por factores como el clima, la conexión a la red eléctrica es de fácil acceso. Las desventajas son que los costos son variables debido a que las tarifas pueden aumentar con el tiempo, el sistema es vulnerable a las fallas en la red causando cortes de energía.

El sistema de energía solar tiene como ventajas que es inagotable, sin mencionar que es energía limpia disminuyendo el impacto ambiental. Este sistema es independiente de la red eléctrica por lo que se puede tener energía en zonas remotas y no se ve afectado por cortes de energía en la red, la reducción de costos a largo plazo es considerable y es un sistema de bajo mantenimiento ya que los paneles tienen una vida útil de 25 años. Además de la desventaja del costo inicial alto, también se requiere de almacenamiento para la energía generada y espacio para la instalación de los paneles. Para este caso se requiere un aproximado de 500 m² de terreno para la instalación de los paneles solares.

VIII. CONCLUSIONES

Se determinó que el sistema de tratamiento propuesto para la planta de aguas residuales de Morales, Izabal, cumple con los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Gubernativo 285-2022. Esto garantiza que el agua tratada sea apta para el riego agrícola, incluyendo plantaciones de banano, al cumplir con los parámetros de calidad de agua de riego según el manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP (Castellanos, 2000). La tecnología seleccionada integra procesos físicos, químicos y biológicos de manera eficiente, asegurando un tratamiento integral y sostenible.

Se optó por un sistema de 248 paneles solares para el funcionamiento completo de la planta, lo que permite un abastecimiento energético del 100 por ciento mediante energía renovable. Esta solución reduce costos operativos a largo plazo, disminuye la dependencia de la red eléctrica convencional y contribuye significativamente a la protección del medio ambiente mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

El riego con agua residual tratada demostró ser una alternativa más sostenible y eficiente en comparación con el riego tradicional. Además de cumplir con los parámetros de calidad requeridos, este método proporciona nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, lo que disminuye la necesidad de fertilizantes químicos y reduce los costos asociados. Esto promueve un manejo agrícola más sustentable y rentable. En cambio, el riego tradicional puede generar un impacto negativo si no se gestiona adecuadamente, sobre todo en áreas con escasez de agua.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar y promover el uso de agua residual tratada no solo para el riego de plantaciones de banano, sino también para una amplia variedad de cultivos agrícolas y zonas verdes.

Implementar un sistema de monitoreo constante para asegurar que el efluente tratado cumpla con los límites establecidos para el reúso en riego, especialmente para cultivos como el banano que requieren agua de buena calidad.

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para todas las unidades del sistema, desde el tratamiento preliminar hasta el patio de secado de lodos. Adicionalmente, capacitar al personal en el manejo adecuado del equipo, asegurando la sostenibilidad operativa a largo plazo.

Maximizar el beneficio del lodo deshidratado en el patio de secado utilizándolo como acondicionador de suelos o compost. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también puede generar beneficios adicionales para la agricultura local.

Considerar la instalación de techos transparentes en las áreas del patio de secado de lodos para proteger el proceso durante la temporada de lluvias, evitando que el exceso de agua comprometa la eficiencia de la deshidratación.

Comparar el marco legal y regulatorio de Guatemala sobre el manejo de aguas residuales con políticas internacionales. Esto puede ofrecer lineamientos para mejorar las políticas nacionales.

Ampliar el análisis de los efectos a largo plazo del uso de aguas residuales tratadas en la calidad del suelo y en la salud de los cultivos.

Analizar cómo la implementación de esta planta de tratamiento puede ayudar a mitigar los efectos del cambio climático en la región, especialmente en términos de disponibilidad de agua y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Acciona. (2024a). Descubre 4 tipos de energía renovable en plantas de tratamiento de aguas residuales. <https://bosstech.pe/tipos-energia-renovable-tratamiento-aguas/>
- Acciona. (2024b). La planta de agua La Chira (Perú) usará energía fotovoltaica para operar. <https://www.acciona.com/es/actualidad/articulos/planta-agua-la-chira-usa-energia-fotovoltaica/>
- Acuerdo Gubernativo 236. (2006). Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2015/07/07-Acuerdo-gubernativo-236-2006-Reglamento-descargas-y-reuso.pdf>
- Arriols, E. (2024). Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
- Arteaga. (1998). *Aguas Superficiales*.
- Basterrechea, M. y Guerra, A. (2019). *Primer informe de cambio climático en Guatemala. Capítulo 5: Recursos hídricos*. Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático (SGCCC). <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2019/06/1erRepCCGuaCap5.pdf>
- Brown, D. (2003). *Guía para el manejo de excretas y aguas residuales municipales*. Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA). https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/BROWN%202004.%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Manejo%20de%20Excretas%20y%20Aguas%20Residuales.PDF
- Castellanos, J. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP. 2a edición*. Intagri.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2003). Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-andina-nestor-caceres-velasquez/instalaciones-sanitarias/diseño-de-trampa-de-grasa-cepis/79048128>
- CIDTA. (2000). *Caracterización del agua residual*. https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/cursos/uni_03/u3c3s4.htm#:~:text=La%20temperatura%20de%20un%20agua,%C2%BAC%20un%20valor%20medio%20normal
- CIDTA. (2003). Lagunas facultativas. <https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/idades/LIBROS/logo/pdf/facultativas.PDF>
- Cisneros, P. (2018). Filtro anaerobio de flujo ascendente. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/filtro-anaerobio-de-flujo-ascendente>
- Colom, E. (2005). Estudio de los Cambios Legales en el Marco de la Privatización del Agua en Guatemala. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/

- [MORAN%202005%20Estudio%20de%20los%20Cambios%20Legales%20en%20el%20Marco-SPANISH.pdf](#)
- Contyquim. (2022). Importancia del tratamiento de aguas residuales. <https://contyquim.com/blog/importancia-del-tratamiento-de-aguas-residuales>
- Crites, R. y 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.*
- Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. (2000). *Evaluación de recursos de agua de Guatemala*. Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/2000.-Evaluaci%C3%B3n-de-Recursos-de-agua-de-Guatemala.-Cuerpo-de-Ingenieros-de-los-Estados-Unidos-de-Am%C3%A9rica.pdf>
- Decreto 90. (1997). Código de salud. <https://platform.who.int/docs/default-source/mca-documents/policy-documents/law/GTM-AD-28-01-LAW-1997-esp-Decreto-90-97-Codigo-de-salud.pdf>
- ECOQUIMSA. (2021). *Análisis de calidad del agua Morales, Izabal*.
- Ecoquimsa. (2024). Sistemas de tratamiento de aguas residuales y su concepción en la cultura guatemalteca. <https://www.ecoquimsa.com.gt/temas-tnicos/sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-y-su-concepcin-en-la-cultura-guatemalteca>
- Environmental Protection Agency (EPA). (1997). *Wastewater treatment manuals, treatment systems for small communities, business, leisure centres and hotels*. https://www.epa.ie/publications/compliance--enforcement/waste-water/EPA_water_treatment_manual_small-comm_business.pdf
- EOS Data Analytics. (2024). Cultivo de plátano: requisitos básicos y cuidados. <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-platano/#:~:text=El%20cultivo%20de%20pl%C3%A1tano%20en,mm.%20de%20agua%20al%20mes>
- Frackiewicz, M. (2023). Los beneficios del almacenamiento de energía renovable para el tratamiento de agua y aguas residuales. <https://ts2.space/es/los-beneficios-del-almacenamiento-de-energia-renovable-para-el-tratamiento-de-agua-y-aguas-residuales/>
- Fundación para el Desarrollo de Guatemala (FUNDESA). (2012). *Uso del agua en Guatemala*. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/2012.-Uso-del-Agua-en-Guatemala.-Boletín.-FUNDESA.pdf>
- Fundación para la Conservación del Agua (FUNCAGUA). (2022). Informe del agua 2022 [Versión digital]. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2022/03/Informe-del-agua-2022-version-digital.pdf>
- Geyer, j. y Okun, D. (1999). *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales*. Mexico D.F.: Limusa.
- Gisbert, C. (2002). *Enciclopedia práctica de la Agricultura y la Ganadería*. Editorial Océano, España 1032.

- Guzmán, N., Valladares, L., y Castañeda, C. (2011). *Territorio y región. Agua, drenajes y recursos naturales en Guatemala: Serie Territorio y Regionalización en Guatemala. Volumen VII*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Estudios Urbanos y Regionales.
- Hábitat para la Humanidad Guatemala. (2020). *Agua segura y saneamiento*. <https://www.habitatguate.org/agua-segura-y-saneamiento/>
- HANNA Instruments. (2014). Demanda química de oxígeno y materia orgánica. <http://www.hannaarg.com/blog/demanda-quimica-de-oxigeno-y-materia-organica/#:~:text=Los%20principales%20grupos%20de%20sustancias,residuales%2C%20se%20emplean%20diversas%20t%C3%A9cnicas>
- Hernández, R. (2015). *Planta de tratamiento de aguas residuales para reuso en riego de parques y jardines en el distrito de la esperanza, provincia Trujillo. La Libertad* [Tesis de licenciatura]. Universidad Privada Antenor Orrego. [https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/1981/1/REP_ING.CIVIL_RODRIGO_LOPEZ_KATHLEEN_HERRERA_PLANTA_TRATAMIENTO_AGUAS_RESIDUALES_REUSO_RIEGO_PARQUES_JARDINES_DISTRITO.LA.ESPERANZA.TRUJILLO.LA.LIBERTAD.pdf](https://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/1981/1/REP_ING.CIVIL_RODRIGO_LOPEZ_KATHLEEN_HERRERA_PLANTA_TRATAMIENTO_AGUAS_RESIDUALES_REUSO_RIEGO_PARQUES_JARDINES_DISTRITO_LA.ESPERANZA.TRUJILLO.LA.LIBERTAD.pdf)
- IDEAM. (2007). Sólidos totales secados a 103 105°C. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+-+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935#:~:text=Los%20%E2%80%9Cs%C3%B3lidos%20totales%E2%80%9D%20se%20definen,a%20103%20%2D%20105%20%C2%B0C>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVU-MEH). (2023). Boletín anual de calidad de agua 2023. <https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2024/06/Boletin-anual-de-calidad-de-agua-2023.pdf>
- Isern Tech. (2014). Sistemas de medida de caudal en canales abiertos. <https://cdn.website-editor.net/235f540e72e5455f8018b8ee78c5bb6e/files/uploaded/INFO%2520caudal%2520FCP%2520gral.pdf>
- Latargere, J. (2018). Tanque Imhoff. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/tanque-imhoff>
- Lentini, E. (2010). *Servicios de agua potable y saneamiento en Guatemala: beneficios potenciales y determinantes de éxito*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a8774c53-5338-41c6-ad1c-0314419d40c4/content>
- Lesikar, B. (2020). Fosa séptica convencional / campo de drenaje. https://arroyocolorado.org/media/qa2og5at/ossf_conventionalfactsheetspanish.pdf
- Marroquín, C. y Domínguez, A. (2022). Contaminación del río Motagua: ambiente habla sobre demanda de Honduras contra Guatemala. <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/contaminacion-del-rio-motagua-ambiente-habla-sobre-demanda-de-honduras-contra-guatemala/>

- Méndez, L. (2005). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. <https://core.ac.uk/download/pdf/304893961.pdf>
- Metcalf, R. y Eddy, P. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento vertido y reutilización*. Madrid: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Metcalf, R. y Eddy, P. (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA). (1991). Plan maestro de riego y drenaje, etapa 1. <https://www.maga.gob.gt/>
- Moksa. (2022). ¿Qué es el tratamiento terciario de aguas residuales? <https://moksa.com.co/tratamiento-terciario/>
- Morán, D. (2014). *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz* [Tesis de licenciatura]. Universidad Rafael Landívar. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2014/06/14/Moran-Diego.pdf>
- Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *HUELLA DE AGUA DE LA INDUSTRIA BANANERA*. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/2017.-Huella-de-agua-de-la-Industria-bananera.pdf>
- NELSON. (2000). Alta uniformidad y baja pluviometría son fundamentales para satisfacer las demandas de las plantas de banano que consumen grandes cantidades de agua. <https://nelsonirrigation.com/es/crops/bananas>
- Pardo, E. (2015). *Respuestas espectrales a la fertilización con nitrógeno y potasio en el cultivo de banano (Musa AAA simmonds), caso municipio zona Bananera*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56137>
- PBI. (2020). La escasez de agua en Guatemala. <https://pbi-guatemala.org/sites/default/files/B43.pdf>
- Prensa Libre. (2024). Ajuste trimestral: estas son las tarifas de energía eléctrica a partir del 1 de febrero.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté, S.A.
- Remtavares. (2011). Tratamiento de agua mediante energías renovables. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/01/10/131545>
- Rodriguez, M. (2016). Geografía del municipio de Morales, Izabal. <https://departamentos.deguate.com/izabal/geografia-del-municipio-de-morales-izabal/>
- Rojas, R. (2002). *Conferencia sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud.
- Septar. (2020). Equipos para tratamiento primario y secundario de aguas residuales. [https://septar.com.mx/index.php/tratamiento-primario-y-secundario-de-aguas-residuales/#:~:text=El%20tratamiento%20Primario%20o%20Tanque,al%20tratamiento%20biol%C3%B3gico%20\(DBO\).](https://septar.com.mx/index.php/tratamiento-primario-y-secundario-de-aguas-residuales/#:~:text=El%20tratamiento%20Primario%20o%20Tanque,al%20tratamiento%20biol%C3%B3gico%20(DBO).)

- Silva, J., Torres, P., y Madera, C. (2008). *Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura: una revisión*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Centro Editorial.
- Solorzano, K. (2013). *Diagnóstico ambiental y plan de actividades de gestión ambiental realizado en la compañía de desarrollo bananero de Guatemala S.A. en el municipio de Morales, departamento de Izabal, Guatemala* [Tesis de licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala. https://cunori.edu.gt/descargas/EPS_Kevin_Solorzano_-_Compaia_de_Desarrollo_Bananero_de_Guatemala_S.A._Morales.pdf
- Telwesa. (2020). Los beneficios de reutilizar el agua residual. <https://telwesa.com/beneficios-reutilizar-agua-residual/>
- TEPCA. (2024). La cloración del agua en tratamientos de aguas residuales. <https://www.tecpa.es/cloracion-tratamiento-aguas/>
- Unicef. (2012). Cambio Climático en Guatemala: efectos y consecuencias en la niñez y adolescencia. <https://www.unicef.org/guatemala/media/1391/file/Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20Guatemala.pdf>
- Universidad Complutense de Madrid (UCM). (2023). Descripción de indicadores del agua residual. <https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-turbidez%20f.pdf>
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2022). Conceptos básicos del ciclo sobre el manejo de aguas residuales y pluviales: alcantarillado, captación, conducción, bombeo y tratamiento. <https://www.campus-virtual.mineria.unam.mx/Mineria/Cursos/CicloAguasResiduales/Documentos/Unidad2.pdf>
- Vargas, A., Watler, W., Morales, M., y Vignola, R. (2017). *Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8205.pdf>
- Velasco, A., Velasco, V., Ruíz, J., Enríquez, J., Martínez, A., y Guzmán, K. (2023). Efecto del uso de agua residual tratada sobre el suelo y cultivos forrajeros de *Chenopodium quinoa* Wild y *Zea mays* L. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 14. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242023000400874&lang=pt
- World Vision. (2023). Así afecta la falta de agua potable a la niñez en Guatemala. <https://worldvision.org.gt/noticias/asi-afecta-la-falta-de-agua-potable-a-la-ninez-en-guatemala/#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20Banco%20Interamericano%20de,agua%20potable%20y%20saneamiento%20adecuado>
- Xu, J. y Zhang, Y. (2010). *Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment*. *Journal of hazardous materials*, 183(1-3), 780-786.

XI. APÉNDICES

A. Anexo 1. Planos

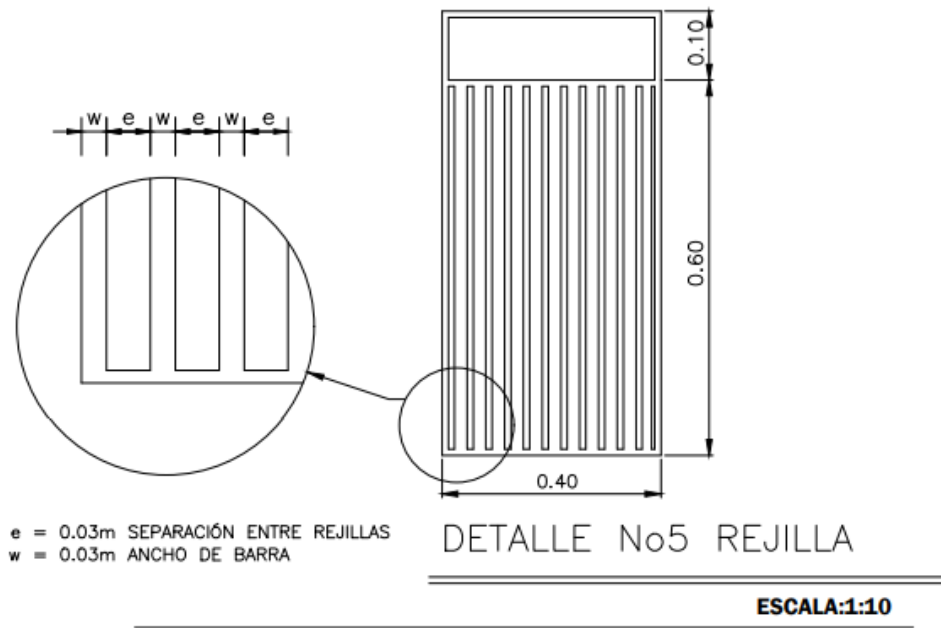


Figura 6. Plano rejillas

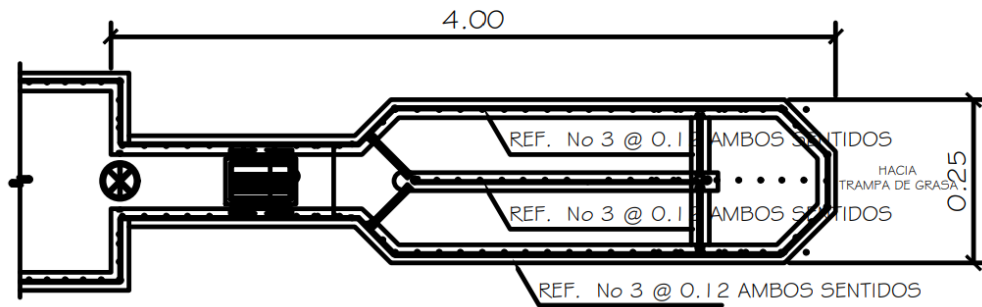


Figura 7. Plano planta de desarenador

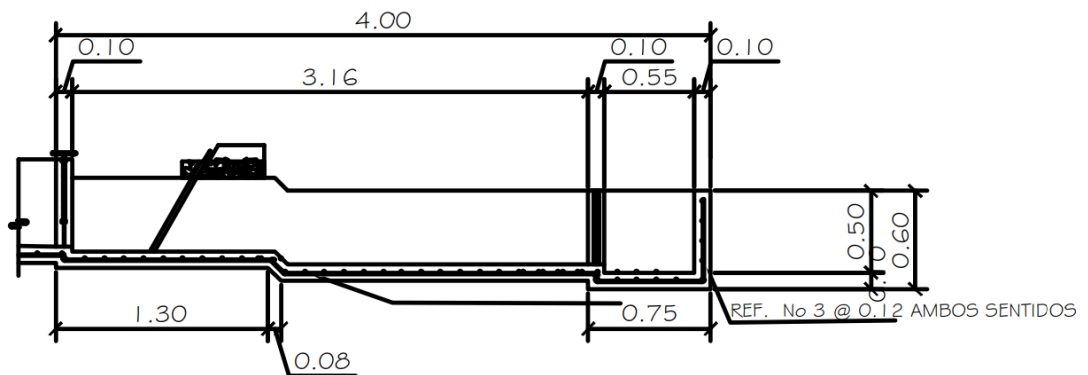


Figura 8. Plano corte de desarenador

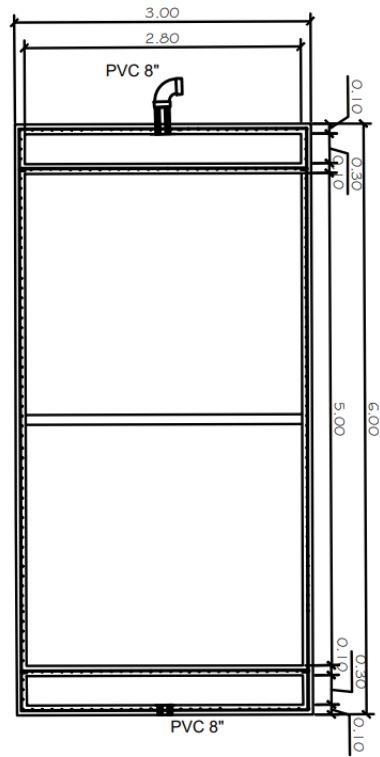


Figura 9. Plano planta trampa de grasa

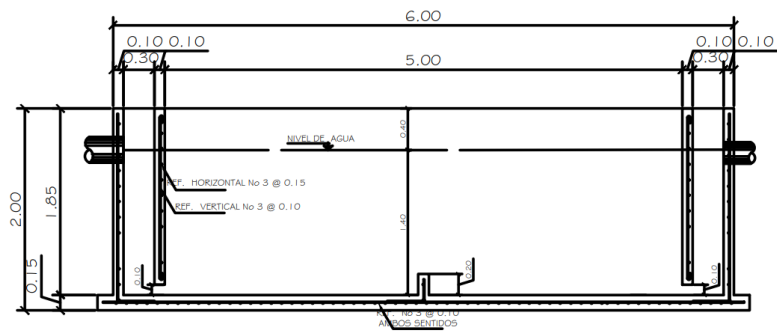


Figura 10. Plano corte trampa de grasa

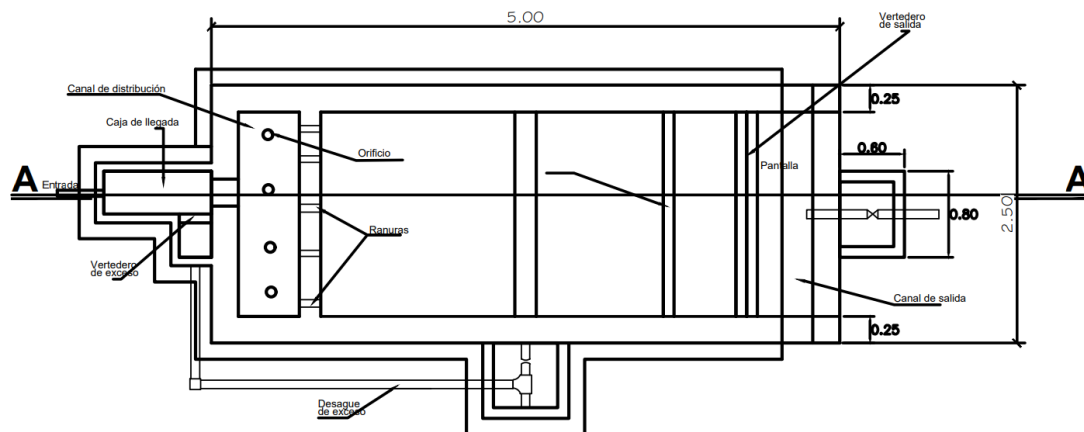


Figura 11. Plano planta sedimentador primario



Figura 12. Plano corte sedimentador primario

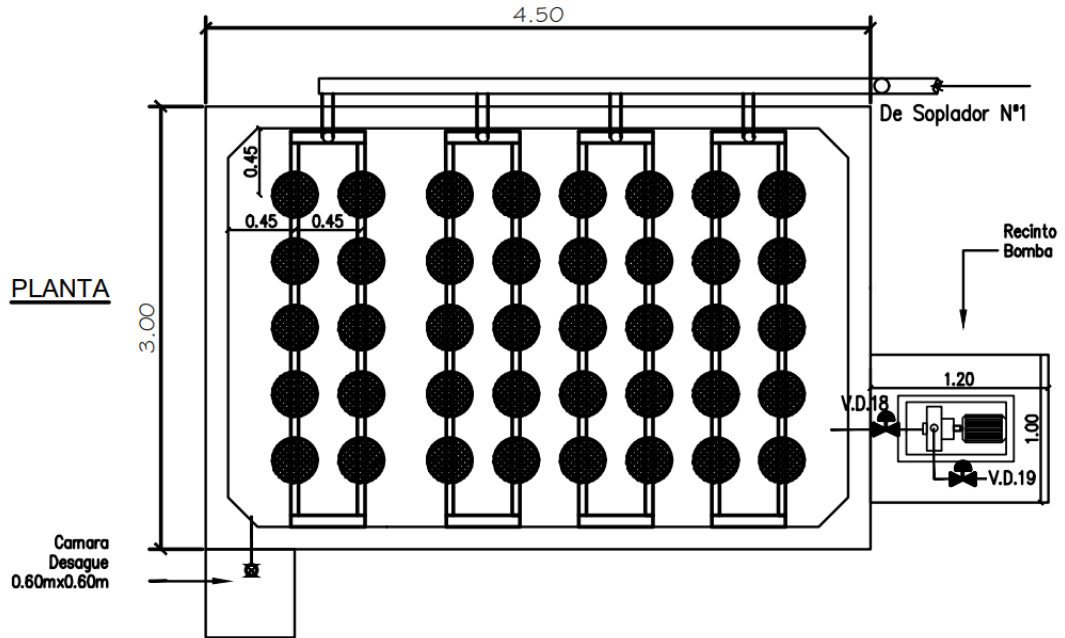


Figura 13. Plano planta digestor aeróbio

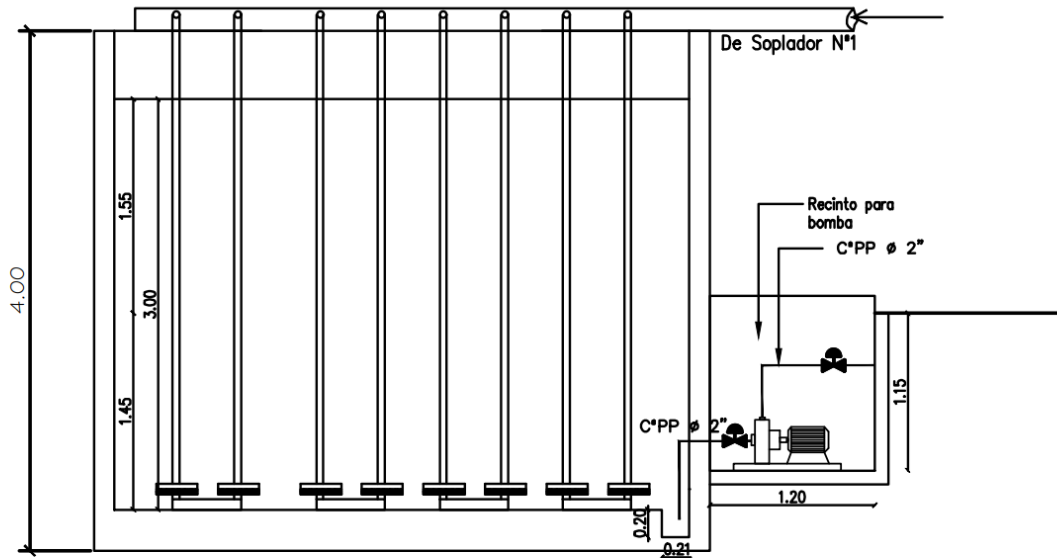


Figura 14. Plano corte digestor aeróbio

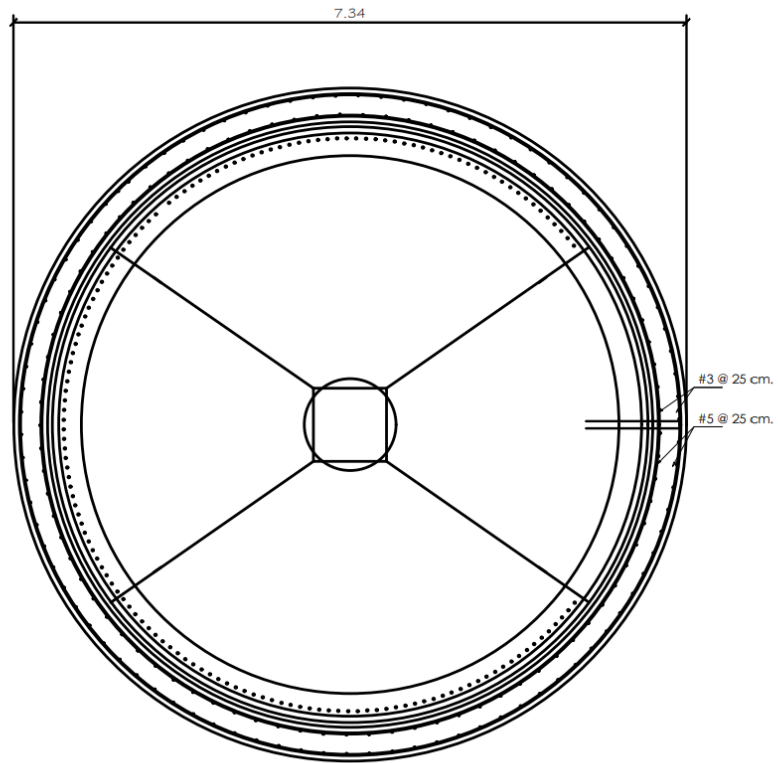


Figura 15. Plano planta sedimentador secundario

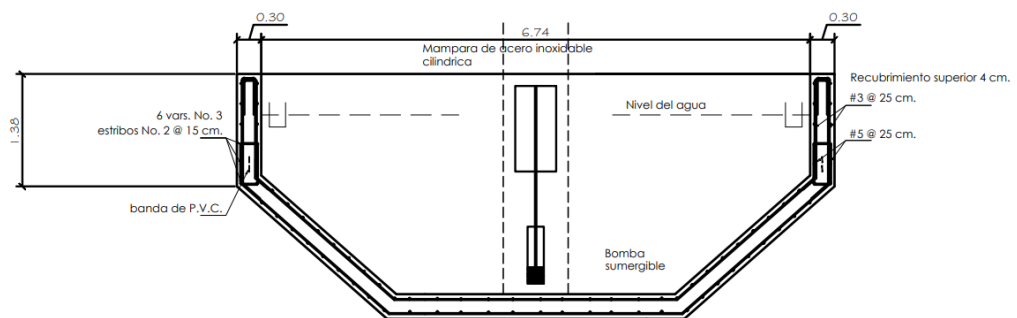


Figura 16. Plano corte sedimentador secundario

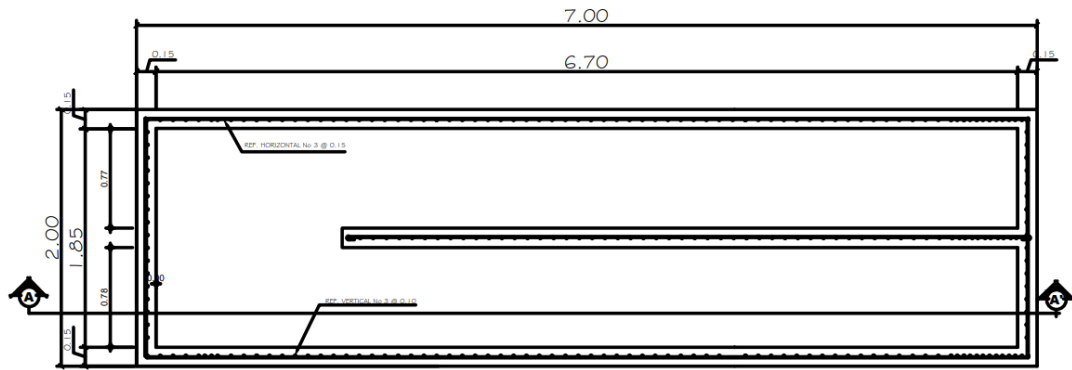


Figura 17. Plano planta tanque de contacto de cloro

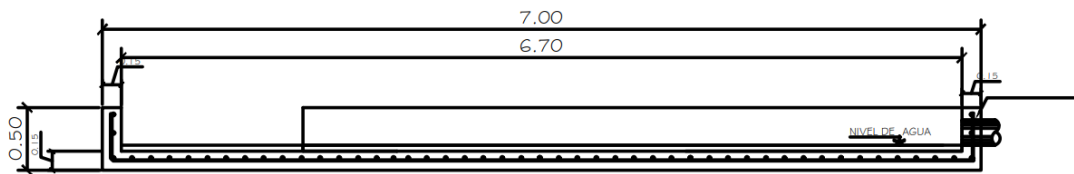


Figura 18. Plano corte anque de contacto de cloro

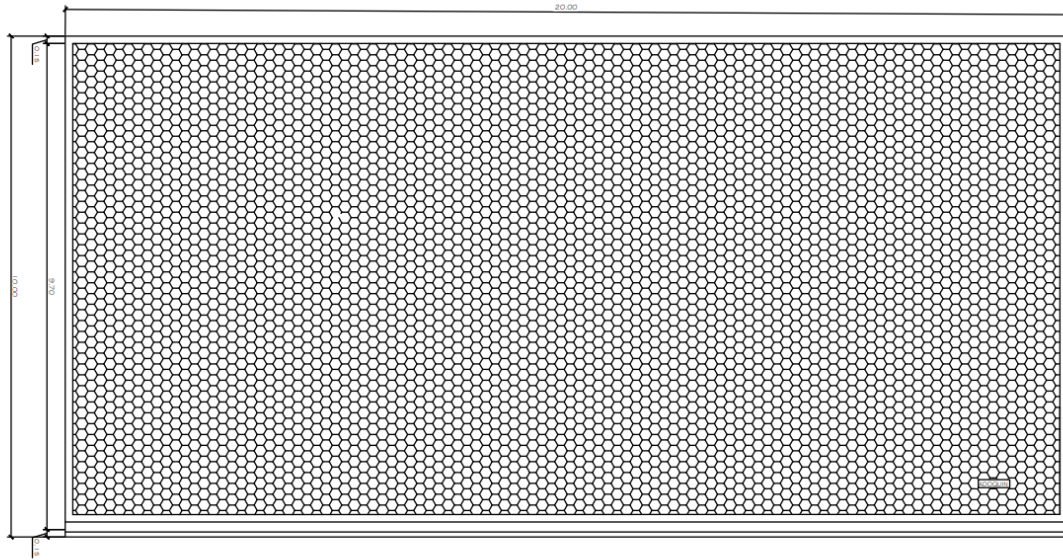


Figura 19. Plano patio secado de lodos

B. Anexo 2. Tablas parámetros de diseño



Figura 20. Puntos de muestreo aguas residuales Morales, Izabal

Análisis	Dimensional ⁽¹⁾	Límite de Detección	Resultados	Método de análisis ⁽²⁾
Color	u Pt-Co	1.40	141.0	STM 2120 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L - O ₂	3	91	COGUANOR NTG 29014h7
Demanda Química de Oxígeno ⁽³⁾	mg/L - O ₂	3	137	COGUANOR NGO 29014h8
Relación DQO/DBO	---	---	1.5	---
Fósforo Total ⁽³⁾	mg/L - P	0.025	1.10	Spectroquant® Merck 14848
Grasas y Aceites	mg/L	5	< 5	COGUANOR NTG 77002h1
Materia Flotante	---	Presente/Ausente	Ausente	Organoléptico
Nitrógeno Total ⁽³⁾	mg/L - N	0.30	7.90	Spectroquant® Merck 14773
pH	---	0.01	7.10	STM 4500-H+ B
Sólidos Sedimentables	ml/L	0.1	0.2	STM 2540 F
Sólidos Suspendidos	mg/L	2	57	STM 2540 D
Coliformes fecales	NMP/100 mL	1.8	2,200,000	STM 9221 C y E

(1) mg/L = ppm; u Pt-Co = Unidades Platino Cobalto; NMP/100 mL = número más probable por 100 mililitros.

(2) STM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition 2017.

(3) Análisis acreditado COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2005 según OGA-LE-051-13.

Cuadro 40. Análisis de calidad del agua Morales, Izabal (ECOQUIMSA, 2021)

Parámetro	Criterio
Caudal	Mínimo, promedio y máximo
Velocidad en el canal (Vc)	0.3 - 0.6 m/s
Velocidad entre barras (Vb)	Vmax ≤ 1.2 m/s; Vprom 0.6 - 1 m/s
Inclinación en referencia al eje vertical	30 - 45 °

Cuadro 41. Parámetros de diseño para rejillas (Metcalf, R. y Eddy, P., 1995)

Parámetro	Criterio
Caudal	Mínimo, promedio, máximo
Velocidad horizontal	0.25 - 0.4 m/s
Longitud adicional por turbulencia	25 - 50%

Cuadro 42. *Parámetros de diseño para canal Parshall*
(Metcalf, R. y Eddy, P., 1995)

Tamaño	H _{min} (mm)	Q _{min} (m ³ /h)	H _{máx} (mm)	Q _{máx} (m ³ /h)	K (m ³ /h)	n
1"	15.0	0,32	210	19	217,5	1,55
2"	20,0	1	393	100	425	1,548
3"	31,9	3	591	275	620	1,548
6"	32,7	6	609	600	1310	1,574
9"	30,6	9	753	1200	1851	1,528
12"(1')	30,5	12	885	2000	2407	1,519
1'6"(18")	30,0	17,3	760	2502	3802	1,538
2'	46,0	43,5	760	3360	5141	1,550
3'	46,0	63	760	5115	7863	1,566
4'	60,0	110	760	6894	10631	1,578

Cuadro 43. *Sistemas de medida de caudal en canales abiertos*
(Isern Tech, 2014)

Parámetro	Criterio
Caudal	Caudal máximo horario
TRH	Primarias: 3 - 5 minutos; Principales: 20 - 30 minutos
Forma	Rectangular
Relación largo:ancho	2:1 a 3:1
Profundidad (h)	> 0.8 m

Cuadro 44. *Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa*
(Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 2003)

Parámetro	Criterio
Carga superficial (HLR) Caudal medio; Caudal pico	30 - 50 m ³ /m ² /d; 80 - 120 m ³ /m ² /d
Taza de rebalse (WLR)	125 - 500 m ³ /m ² /d
Tiempo de retención hidráulico (TRH)	1.5 - 2.5 h

Cuadro 45. *Parámetros de diseño para sedimentador primario*

Variable	A	B
DBO	0.018	0.020
SST	0.0075	0.014

Cuadro 46. *Valores de constantes empíricas a y b*
(Crites, R. y Tchobanoglous, G., 2000)

PROCESO DE TRATAMIENTO	CANTIDAD NORMAL DE FANGO			HUMEDA D %	PESO ESPECIF . DE S. DEL FANGO	PESO ESPECI F. DEL FANGO	SÓLIDOS SECOS	
	M³ miles de m³ de A.R.	T miles de m³ de A.R.	M³/ 1000 personas y días				Kg/ miles de m³ de A.R.	Kg/ 1000 persona s y días
Sedimentación primaria								
- 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
Filtro Percolador	0.745	0.83	0.27	92.5	1.33	1.025	57	22
Precipitación química	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
Sedimentación primaria y fango activado:	--	--	--	--	--	--	--	--
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 47. *Calidad normal de fango producido por distintos procesos de tratamiento*
(Metcalf, R. y Eddy, P., 1995)

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	Mesofílica						Termofílica			

Cuadro 48. *Digestión discontinua de los lodos de sedimentación libre a diferentes temperaturas*
(Geyer, j. y Okun, D., 1999)

Parámetro	Valor
SRT	4-10 días
HRT	6-8 horas
F/M	0.3-0.8 kg DBO5/kg VSS*d
X _v (conc. VSS en reactor aerobio)	1,500 - 3500 mg VSS/L
F _b ' (Fracción bidegradable inicial de X _v)	0.8
Productividad (Y _{OH0})	0.5-0.7 g VSS/g DBO5 removido
Coefficiente de respiración endógena (K _d)	0.6 -0.1 g VSS/g VSS * d

Cuadro 49. *Parámetros de diseño para digestor aerobio*
(Geyer, j. y Okun, D., 1999)

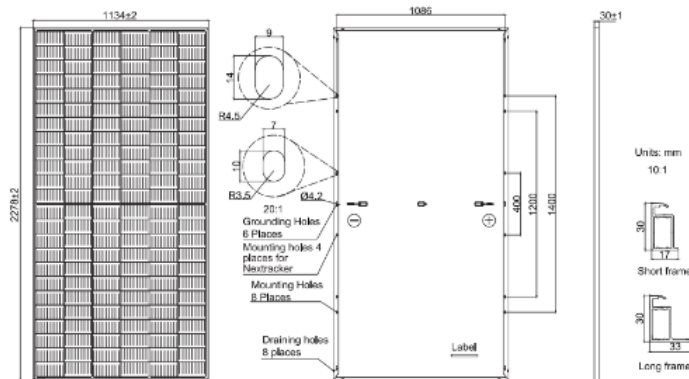
System	Hydraulic loading rate (m ³ /m ² ·hour)		Solids loading rate (kg/m ² ·hour)		Reference
	Average Q	Maximum Q	Average Q	Maximum Q	
Conventional	0.67–1.33	1.70–2.00	4.0–6.0	10.0	(1)
activated sludge	0.67–1.20	1.70–2.70	4.0–6.0	–	(2)
Extended aeration	0.33–0.67	1.00–1.33	1.0–5.0	7.0	(1)

Cuadro 50. *Parámetros de diseño para sedimentador secundario*
(Geyer, j. y Okun, D., 1999)

Tipo de reuso	Demanda bioquímica de oxígeno, miligramos por litro	Coliformes fecales, número más probable por cien mililitros
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	<2x10 ²
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	<1x10 ⁷
Tipo V	200	<1x10 ⁷

Cuadro 51. *Parámetros y límites máximos permisibles para reuso*
(Acuerdo Gubernativo 236, 2006)

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	27.3kg
Dimensions	2278±2mm×1134±2mm×30±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144(6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10-351/ MC4-EVO2A
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 200mm(+)/300mm(-); Landscape: 1300mm(+)/1300mm(-)
Packaging Configuration	36pcs/Pallet 720pcs/40HQ Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S30 -540/GR	JAM72S30 -545/GR	JAM72S30 -550/GR	JAM72S30 -555/GR	JAM72S30 -560/GR	JAM72S30 -565/GR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	540	545	550	555	560	565
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.60	49.75	49.90	50.02	50.15	50.28
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41.64	41.80	41.96	42.11	42.27	42.42
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.86	13.93	14.00	14.07	14.14	14.21
Maximum Power Current(Imp) [A]	12.97	13.04	13.11	13.18	13.25	13.32
Module Efficiency [%]	20.9	21.1	21.3	21.5	21.7	21.9
Power Tolerance	0~±5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer.They only serve for comparison among different module types.

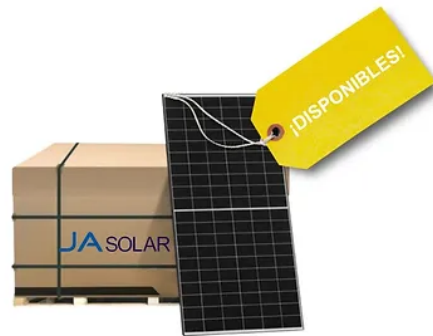
ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

TYPE	JAM72S30 -540/GR	JAM72S30 -545/GR	JAM72S30 -550/GR	JAM72S30 -555/GR	JAM72S30 -560/GR	JAM72S30 -565/GR	OPERATING CONDITIONS
Rated Max Power(Pmax) [W]	408	412	416	420	424	428	Maximum System Voltage 1000V/1500V DC
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.43	46.55	46.68	46.85	46.99	47.15	Operating Temperature -40 C ~+85 C
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38.99	39.20	39.43	39.66	39.85	40.04	Maximum Series Fuse Rating 25A
Short Circuit Current(Isc) [A]	11.09	11.13	11.17	11.21	11.26	11.31	Maximum Static Load,Front* 5400Pa(112lb/ft ²) Maximum Static Load,Back* 2400Pa(50lb/ft ²)
Max Power Current(Imp) [A]	10.47	10.51	10.55	10.59	10.64	10.69	NOCT 45±2 C
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C,wind speed 1m/s, AM1.5G						Safety Class Class II
							Fire Performance UL Type 1

*For Nextracker installations, maximum static load please take compatibility approve letter between JA Solar and Nextracker for reference.

Figura 21. Ficha técnica del módulo fotovoltaico

Inicio / Inversores Cargadores / Panel JA Solar 565W



Panel JA Solar 565W

Q1.000,00

[Envío via Guatex](#)

Ficha Técnica

[Descargar](#)



Figura 22. Costo módulo fotovoltaico

Izabal

Area: 8813.08 km²

The regional statistics of solar resource and PVOUT are calculated from long-term averages based on the period from 1994/1999/2007 (depending on the region) to 2018. The statistics were prepared for [PV study](#).



Open detail



Bookmark



Share



Reports



Download

AREA INFO

Map data (min-max range)

Per day

<input checked="" type="checkbox"/>	Specific photovoltaic power output	PVOUT	3.52 – 4.31	kWh/kWp
	Direct normal irradiation	DNI	2.72 – 4.42	kWh/m ² ▾
	Global horizontal irradiation	GHI	4.31 – 5.36	kWh/m ² ▾
	Diffuse horizontal irradiation	DIF	2.14 – 2.44	kWh/m ² ▾
	Global tilted irradiation	GTI	4.35 – 5.50	kWh/m ² ▾
	Optimum tilt of PV modules	OPTA	13 – 15	°
	Air temperature	TEMP	17.6 – 26.3	°C ▾
	Terrain elevation	ELE	0 – 0	m ▾

Figura 23. Información Solar Global Atlas



INVERSOR SOLAR MUST 10kW 48V

~~Q19.750,00~~

Q19.625,00

[Envío via Guateles](#)

- **Garantía:** 1 Año
- **Descripción del producto:**
 - Inversor Solar MUST PV35- TLV 12,000W - 48V
 - Prioridad AC/DC
 - NO INCLUYE CONTROLADOR DE CARGA SOLAR
 - Puerto de Comunicación R232
 - 9 Niveles de Selección de Batería
 - Compatible con Baterías de Gel y Plomo Acido
 - Carga con 120[V]
- **Certificaciones:**
 - ISO9001
- **Envío:** Por aparte
- Salida AC 120/240V

Figura 24. Ficha técnica inversor fotovoltaico

TSURUMI NHC – BOMBA TRITURADORA PARA AGUAS RESIDUALES



La serie NHC es una bomba de corte sumergible diseñada para el manejo de aguas residuales, aguas cloacales y aplicaciones industriales de servicio pesado, donde la bomba está sujeta a obstrucciones por material de gran tamaño.

El impulsor es de tipo semiabierto con dos paletas. Dos bordes de aleación de carburo de tungsteno sinterizado están soldados en las dos paletas del impulsor, y giran sobre un puerto de succión dentado de una cubierta de succión. Este mecanismo permite cortar las materias sólidas y fibrosas que entran en el impulsor para descargarlas.

- 1 + [COTIZAR](#)

Categoría: Bombas Sumergibles Tsurumi



DIAMETRO DE DESCARGA (MM)	MODELO	POTENCIA (KW)	FASE	MÉTODO DE ARRANQUE
50	50NHC2.75S	0.75	Single	Capacitor
50	50NHC2.75	0.75	Three	D.O.L.
50	50NHC21.1	1.1	Three	D.O.L.
50	50NHC21.5	1.5	Three	D.O.L.
50	50NHC22.2	2.2	Three	D.O.L.
50	50NHC23.0	3.0	Three	D.O.L.

Figura 25. Ficha técnica bombas

BLOWER REGENERATIVO 2RB 810 H27

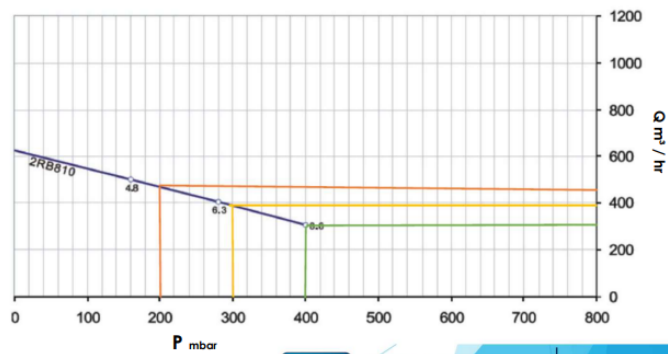
Código	Modelo	Voltaje	Frecuencia	Fases	Potencia	Caudal	Presión
BLO 304	2RB 810 H27	220V/440V	60Hz	3	8.6 KW	264 CFM	2.9 psi
						230 CFM	4.3 psi
						176 CFM	5.8 PSI



- ▶ Un Blower es un compresor de aire que trabaja con alto caudal y baja presión, elija el Blower que necesita de acuerdo al caudal y presión (altura) requeridos para su aplicación.
- ▶ Los impulsores de los Blower Serie RB, se montan directamente en el eje del motor para una compresión sin contacto y sin fricción, obteniendo bajo sonido y una máxima confiabilidad operativa, incluso con elevadas presiones diferenciales.
- ▶ Aplicaciones: Aireación de Plantas de tratamiento de aguas residuales, Aireación de piletas de cultivo de peces y camarones, equipos de succión dental, Maquinas textiles, piscinas, entre otros.
- ▶ Accesorios: Filtro de Aire, Silenciadores, válvulas de alivio.

100 mbar = 1.45 psi
1 m³ / hr = 0.59 CFM

Compressor Selection Diagram 60Hz



 www.ews.com.gt
 info.ews@comersa.com
 6634-3737 ext. 1500-1505
 Sala de ventas C.C La Plaza 20 calle local 18, zona 10



Figura 26. Ficha técnica soplador

Ficha técnica

Panel Led 40W Chipled Osram, 60x60 cm

LEDBOX®

Panel Led 40W Chipled Osram, 60x60 cm



Panel LED Backlight que ofrece 5 años de garantía contra el amarillamiento del panel led. Con chip led OSRAM Chip DURIS E 2835 de alta potencia con una altura de solo 26mm y Driver led con certificado TUV. Marco en color blanco para una mejor integración en la decoración. Ahorro de hasta un 70%. Alta luminosidad, proyección de la luz de forma uniforme, no cansa la vista. CRI80 y UGR<20



ESPECIFICACIONES

DETALLES

Incluye: Panel Led + LED Driver certificado **TUV**.

La calidad superior de los paneles LedBox son ideales para su instalación en oficinas, centros comerciales, hoteles, hospitales, edificios públicos y todos los locales que necesitan de un alumbrado constante a costes reducidos.

Ofrecen una distribución uniforme de la luz, los chip LEDs generan una iluminación de alta calidad y aseguran el máximo confort visual y una reproducción del color perfecta (CRI80). Todo esto con un ahorro energético importante.

Además de las ventajas prácticas, ha de considerarse también el buen resultado estético que se obtiene instalando estas luminarias de diseño muy fino.

Cuerpo y marco: cuerpo en chapa de acero y marco de aluminio. Difusor: extrudido de tecnopolímero opalescente con alto cociente de transmisión.

Ventajas y características de los paneles LED

- Diseño limpio y moderno. Paneles ultra planos.
- **Ahorro energético de hasta el 70%** respecto a las soluciones con luminarias fluorescentes.
- La luz se proyecta de manera muy uniforme, y no existe deslumbramiento
- Alta luminosidad, no cansa la vista.
- Arranque instantáneo, sin parpadeo, sin ruido
- Sistema de protección por sobre calentamiento, permitiendo el funcionamiento con voltajes inestables.
- No emite radiación
- No contiene mercurio
- No interfiere con radio frecuencia

Instalación de los paneles LED

Su **altura de solo 26mm** y su diseño moderno, permiten instalar estos paneles en cualquier superficie sin que destaque en el entorno. Existe varias opciones de instalación:

- En el falso techo, integrado entre las placas

Figura 27. Ficha técnica luminarias

C. Anexo 3. Fórmulas de diseño

1. Medición de caudal

$$Q = V/t$$

Q= caudal (l/s)

V=volumen (l)

t=tiempo (s)

2. Población futura

$$N_t = N_o(1 + r)^t$$

N_t= Poblacion futura (hab)

N_o= Poblacion al inicio del periodo (hab)

t= años de proyeccion (año)

r= tasa de crecimiento poblacional

3. Caudal promedio

$$Q_{prom} = P_f \cdot \text{dotación agua} \cdot fr$$

Q_{prom}= caudal promedio (l/día)

P_f= población futura(hab)

fr= factor de retorno

4. Carga de parámetros

$$C = (Q_{prom} \cdot \text{concentración}) / 1000000$$

C= carga (kg/día)

Q_{prom}= caudal promedio (l/día)

Concentración= (mg/l)

Fórmulas para el diseño de trampa de grasa

5. Volúmen

$$V = Q_{\text{máx}} * \text{TRH} * 60\text{s}$$

V = Volúmen (m³)

Q_{max} = Caudal máximo (L/s)

TRH = tiempo de retención hidráulico (min)

6. Área de trampa de grasa

$$A = V * H$$

A = área de trampa de grasa (m²)

V = volumen (m³)

H = profundidad de la trampa de grasa (m)

7. Ancho de trampa de grasa

$$a = \sqrt{A/2}$$

a = ancho de la trampa de grasa (m)

A = área de trampa de grasa (m²)

8. Largo de la trampa de grasa

$$L = a * 2$$

L = largo de trampa de grasa (m)

a = ancho de trampa de grasa (m)

Fórmulas para el diseño del canal Parshall y el desarenador

9. Altura en canal Parshall

$$H_{\text{parshall}} = (Q/k)^{1/n}$$

H_{parshall} se debe de calcular para los tres caudales (m)

Q = Caudal (m³/h)

K = coeficiente en relación a la medida del canal

10. Grada entre el canal y el desarenador

$$Z = Q_{\text{min}} * H_{\text{máx}} - Q_{\text{máx}} * H_{\text{min}} / Q_{\text{min}} - Q_{\text{máx}}$$

Z = grada entre el canal y el desarenador (m)

Q_{min} = Caudal mínimo (m³/s)

Q_{max} = Caudal máximo (m³/s)

H_{min} = Altura mínima en canal parshall (m)

H_{max} = Altura máxima en canal parshall (m)

11. Diferencia de altura entre altura máxima en canal parshall y la grada entre el canal y el desarenador

$$H_{\text{d máx}} = H_{\text{máx}} - Z$$

H_{d máx} = diferencia de altura entre altura máxima en canal parshall y la grada entre el canal y el desarenador (m)

H_{max} = Altura máxima en canal parshall (m)

Z = grada entre el canal y el desarenador (m)

12. Ancho del desarenador

$$B = Q_{\text{máx}} / V_h * H_{\text{d máx}}$$

B es el ancho del desarenador (m)

V_h = Velocidad horizontal (m/s)

H_{d máx} = diferencia de altura entre altura máxima en canal parshall y la grada entre el canal y el desarenador (m)

13. Longitud del canal Parshall

$$L = 22.5 * H_d \text{ máx}$$

L = longitud del canal (m)

H_d max = diferencia de altura entre altura máxima en canal parshall y la grada entre el canal y el desarenador (m)

14. Altura del desarenador

$$H_{\text{desarenador}} = H_{\text{parshall}} - Z$$

H desarenador se debe de calcular para los tres caudales (m)

Z = grada entre el canal y el desarenador (m)

15. Velocidad en desarenador

$$V_{\text{desarenador}} = Q/B * H_d \text{ máx}$$

V desarenador se debe de calcular para los tres caudales (m/s)

H_d max = diferencia de altura entre altura máxima en canal parshall y la grada entre el canal y el desarenador (m)

Fórmulas para el diseño de las rejillas

16. Eficiencia

$$E = \theta / \theta + w$$

E = eficiencia de las rejillas

17. Velocidad máxima en el canal

$$V_c = Q_{\text{máx}} / H_d \text{ máx} * (H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}})$$

V_c = velocidad máxima en el canal (m/s)

H_{max} = altura máxima en el canal parshall (m)

H_{min} = altura mínima en el canal parshall (m)

18. Velocidad máxima en rejas

$$V_b = V_c / E$$

V_c es la velocidad máxima en el canal (m/s)

E = eficiencia de las rejas

Fórmulas para el diseño del sedimentador primario

19. Área

$$A_s = Q_{med} / HLR$$

A_s = área (m²)

Q_{med} = caudal medio (m³/d)

HLR = Carga superficial (m³/m²/d)

20. Longitud mínima en canal de salida

$$L_c = Q_{med} / WLR$$

L_c = longitud mínima en canal de salida (m)

Q_{med} = caudal medio (m³/d)

WLR = Tasa de rebalse (m³/m/d)

21. Volúmen

$$V = A_s * H$$

V es el volúmen (m³)

A_s = Área (m²)

H = Profundidad (m)

22. Tiempo de retención hidráulico

$$h = V * 24 / Q_{med}$$

h es el tiempo de retención hidráulico (h)

$V = \text{volúmen (m}^3\text{)}$
 $Q_{\text{med}} = \text{Caudal medio (m}^3\text{/h)}$

23. Largo

$l = a^2$
 l es el largo (m)
 a = ancho (m)

24. Ancho

$a = \sqrt{A/2}$
 a es el ancho (m)
 $A_s = \text{Área (m}^2\text{)}$

25. Remoción DBO

$\text{Remoción DBO} = t/a + bt$
 $\text{Remoción DBO} = \text{porcentaje de remoción DBO}$
 $t = \text{tiempo de retención (h)}$
 $a, b = \text{constantes empíricas}$

26. Remoción sólidos suspendidos totales

$\text{Remoción SST} = t/a + bt$
 $\text{Remoción SST} = \text{porcentaje de remoción SST}$
 $t = \text{tiempo de retención (h)}$
 $a, b = \text{constantes empíricas}$

Fórmulas para el diseño del digestor aerobio

27. Fracción biodegradable

$$f_b = f_{bt}' / (1 + (1 - f_{bt}') * K_d * SRT)$$

F_{bt}' = Fracción biodegradable inicial

28. Volúmen del reactor aerobio

$$V = Y * SRT * Q * (S_o - S) / X_v * (1 + K_d * f_b * SRT)$$

Y = Productividad (g VSS/g DBO5 removido)

F_{bt}' = Fracción biodegradable inicial

29. Tiempo de retención hidráulico

$$TRH = V / Q$$

30. Producción de lodos VSS (P_{xv})

$$P_{xv} = Y * Q * (S_o - S) - K_d * f_b * X_v * V$$

Y = Productividad (g VSS/g DBO5 removido)

F_b = Fracción biodegradable

K_d = Coeficiente de respiración endógena (g VSS/g VSS * d)

31. Extracción de lodos

$$Q_{ext} t' = V * X / SRT * X_r$$

32. Tasa de uso de oxígeno

$$\text{OUR}_c = 1.46 \cdot Q \cdot (S_o - S / 1000) - 1.42 P_{xv}$$

S_o = Concentración de DBO en la entrada (g/m³)

S = Concentración de DBO en la salida (g/m³)

P_{xv} = Producción de lodos VSS (kgVSS/d)

33. Oxígeno para nitrificación

$$\text{OUR}_n = 4.57 \cdot Q \cdot (\text{TKN} / 1000)$$

TKN = concentración de nitrógeno en la entrada (g/m³)

34. Demanda de oxígeno total

$$\text{OUR} = \text{OUR}_c + \text{OUR}_n$$

Sedimentador secundario

35. Area

$$A_s = Q / \text{HLR}$$

HLR = carga superficial (m³/m²/h)

36. Tasa de carga de sólidos

$$\text{SLR} = (Q + Q_r) \cdot X_v / A_s$$

X_v = concentración de sólidos en reactor aerobio (kg/m³)

37. Volúmen

$$V = A_s \cdot h$$

A_s = Area superficial (m²)

h = profundidad (m)

Fórmulas para el diseño del patio de secado de lodos

38. Masa de sólidos que conforman los lodos

$$M_{sd} = (0.5 \cdot 0.7 \cdot 0.5 \cdot C) + (0.5 \cdot 0.3 \cdot C)$$

M_{sd} = masa de sólidos que forman parte de los lodos

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

39. Carga de sólidos que ingresan al sedimentador

$$C = Q \cdot SS \cdot 0.0864$$

C = carga de sólidos (kg de ss/día)

Q = caudal máximo (l/día)

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

40. Volúmen diario de lodos digeridos

$$V_{ld} = M_{sd} / \rho_{lodo} \cdot (0.10)$$

V_{ld} = volúmen de lodos digeridos (l/día)

M_{sd} = masa de sólidos (kg)

ρ_{lodo} = densidad de lodos (Kg/l)

41. Volúmen de lodos a extraer del patio

$$V_{el} = V_{ld} \cdot T_d / 100$$

Vel=Volúmen a extraer (m³)
Vld= volúmen de lodos digeridos (l/día)
Td= tiempo de digestión (día)

42. Dimensiones del patio de secado

$L=A/W$
L= longitud del patio de secado (m)
A= Area del patio de secado (m²)
W= ancho del patio de secado (m)

D. Anexo 4. Manual de mantenimiento

Rejillas: El mantenimiento del sistema de rejillas se debe de realizar mediante la limpieza manual una vez al día de los sólidos retenidos en las mismas. En temporada de lluvias esta limpieza debe de realizarse más de una vez al día. Asimismo, se debe de realizar limpieza del canal y las barras de la rejilla. Como mantenimiento preventivo se debe de aplicar pintura epóxica en las rejillas para evitar la corrosión de las partes de metal dos veces al año.

Desarenador: La evacuación de sedimentos que se depositan en el fondo de la unidad se debe de realizar cada 6 a 8 semanas. Se debe de engrasar los dispositivos mensualmente y pintar los elementos metálicos cada 6 meses. Adicionalmente se debe de inspeccionar minuciosamente la unidad por posibles deterioros en la estructura anualmente.

Trampa de grasa: La trampa de grasas debe limpiarse una vez al día, para evitar que se saturen y comprometan la eficiencia de la separación. Anualmente se recomienda evaluar los muros de la trampa de grasa para verificar que no haya ninguna reacción del concreto como desprendimiento o problemas de corrosión. Asimismo, se deben de extraer los sedimentos del fondo.

Sedimentador: Remover las grasas y aceites retenidas en el diariamente Se debe asegurar que los lodos acumulados en el fondo del sedimentador sean removidos regularmente para evitar que se compacten y afecten la eficiencia del proceso.

Digestor aerobio: Diariamente realizar limpieza de espumas y materiales flotantes, asimismo buscar taponamientos que puedan obstaculizar la función de la unidad. Se debe revisar el estado de los mezcladores para asegurar que funcionen correctamente.