



Universidad de Oriente
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Hidráulica

Trabajo de Diploma

TEMA: Idea conceptual para el Sistema de Tratamiento de Residuales del poblado Palenque de Yateras Guantánamo.

AUTOR: Leandro Jesús Roque Marrero

TUTORES:

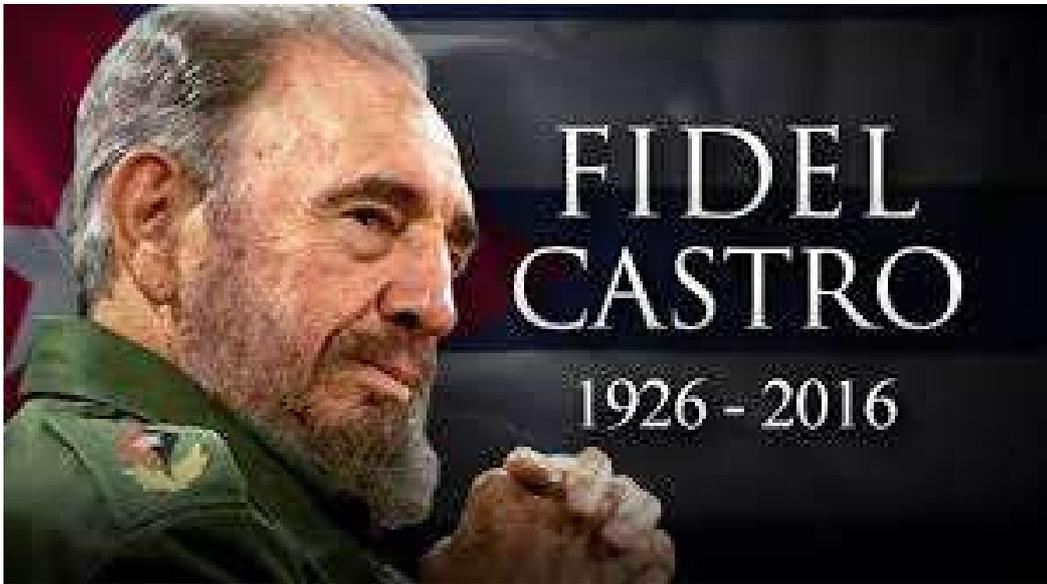
MSc. Fernando Álvarez Vega
MSc. Yamiles Johnson Brizo

Fecha: junio - 2019

PENSAMIENTO

Una importante especie biológica está en riesgo de desaparecer por la rápida y progresiva liquidación de sus condiciones naturales de vida: el hombre.

Fidel Castro



El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza.

Leonardo da Vinci

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a toda mi familia en especial a mis padres y a mis tíos Guillermo y Elicet los cuales son como mis segundos padres en la vida. Por haberme brindado todo su cariño y apoyo durante todos estos años de formación académica y profesional.

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A mis padres por todo el apoyo que me han brindado durante mi formación académica y personal, por su ejemplo de vida, amor y sabios consejos.
- ❖ A mis tíos Guillermo y Elicet por su cariño, dedicación y sus consejos que siempre me guiaron por el camino correcto de la vida.
- ❖ Al profesor Fernando Alvares Vega por haberme guiado con sus conocimientos y experiencia durante la realización de este trabajo de diploma.
- ❖ A mi novia Inaisy por su paciencia y dedicación todo este tiempo.
- ❖ A todos mis compañeros de estudio que de una forma u otra me apoyaron en todos estos años de la carrera.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo seleccionar y diseñar preliminarmente un sistema para la depuración de las aguas residuales del poblado Palenque. Para la selección del mismo, se utilizó el método de la matriz de selección a partir de parámetros sencillos de medir como el caudal de agua residual, la temperatura de la región, la concentración de DBO₅, la profundidad del nivel freático, la pendiente del terreno en el lugar de implantación, la permeabilidad del suelo y el área disponible para implantar la tecnología y para el diseño se realizaron varias variantes empleando hojas de cálculo en Excel. Resultando un esquema de tratamiento consistente en una cámara de rejas con vertedor para la medición de caudal y una laguna de estabilización de tipo facultativa. El diseño de la laguna se realizó por el método convencional para el modelo de mezcla completa y el de flujo disperso, concluyéndose que los resultados son similares y que con 17 días de tiempo de retención se pueden cumplir los requisitos impuestos por el vertimiento.

SUMARY

The objective of this work is to select and preliminarily design a system for the purification of wastewater from the Palenque town. For the selection of the same, the selection matrix method was used from simple parameters to measure such as the residual water flow, the temperature of the region, the concentration of BOD5, the depth of the water table, the slope of the ground. At the implantation site, the permeability of the soil and the area available to implement the technology and for the design several variants were made using spreadsheets in Excel. Resulting in a treatment scheme consisting of a grate chamber with a spout for flow measurement and a facultative type stabilization pond. The design of the lagoon was carried out by the conventional method for the complete mix model and the dispersed flow model, concluding that the results are similar and that with 17 days of retention time the requirements imposed by the discharge can be met.

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.1 Aguas Residuales, clasificación y caracterización	5
1.1.1 Clasificación de las aguas residuales	5
1.1.2 Caracterización de las aguas residuales	6
1.2 Tecnologías de tratamiento de aguas residuales	8
1.2.1 Tecnologías de tratamiento para pequeñas comunidades	10
1.3 Tratamiento de las aguas residuales en pequeñas comunidades	16
1.3.1 Situación en Cuba con el tratamiento de las aguas residuales en pequeñas comunidades	18
1.4 Métodos de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales.....	19
1.5 Parámetros a considerar para la selección de las tecnologías de tratamiento.....	20
CAPITULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	25
2.1 Ubicación geográfica	25
2.2 Relieve	26
2.3 Clima	26
2.4 Caracterización del poblado	26
2.5 Caracterización del sistema de abastecimiento de agua	27
2.6 Caracterización del alcantarillado y el saneamiento en general	28
CAPITULO 3: SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO	29
3.1 Parámetros del lugar de implantación del sistema	29
3.2 Aplicación de la matriz de selección	30
3.3 Las lagunas de estabilización	32
3.3.1 Objetivos de las lagunas de estabilización	33
3.3.2 Ventajas y desventajas de la utilización de lagunas de estabilización	33
3.3.3 Recomendaciones para el diseño de las lagunas facultativas en Cuba	34
3.3.3.1 Criterios de diseño	34
3.3.3.2 Métodos de diseño	35
3.3.4 Diseño constructivo de las lagunas	37
3.3.5 Pretratamiento y medición de caudales	39

3.3.6 Sistemas de entrada y de salida	39
CAPITULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	40
4.1 Descripción del Proyecto	40
4.2 Diseño de los componentes del sistema	40
4.2.1 Diseño del sistema de medición de caudales (vertedor en V)	40
4.3.2 Diseño de la cámara de rejillas	41
4.3.3 Diseño de la laguna facultativa	45
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFIA	52

Introducción

En el mundo actual el crecimiento poblacional ha sido de tal manera que la contaminación del ambiente que este provoca, mediante la generación de desechos sólidos, productos tóxicos y el vertimiento de aguas residuales, se ha convertido en una situación preocupante.

Las aguas residuales están constituidas fundamentalmente por las aguas de abastecimiento después de haber pasado por diversos usos y son generadas por residencias, instituciones de servicio y pequeñas o medianas industrias. Estas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual se generan o recogidas y conducidas mediante una red de tuberías y eventualmente bombas a una planta depuradora local. (Pérez., 2016)

La capacidad de autodepuración de ríos, lagos y mares va disminuyendo a medida que la contaminación por vertimientos de aguas residuales se hace frecuente en fuentes superficiales y subterráneas. Adicionalmente, la escasez de agua dulce debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el cambio climático han hecho aún más crítica la situación.

A razón de la problemática en el manejo del agua residual, es pertinente buscar alternativas de tratamiento que sean seguras, confiables y que reduzcan el impacto en el ambiente y que además al mismo tiempo, resulten sostenibles desde los puntos de vista económico, social y ambiental. Se propone como estrategia los esquemas descentralizados para el manejo del agua residual urbana, para lo cual es necesario identificar los aspectos claves que potencializan su implementación. (VILLADA, 2004).

El tratamiento de las aguas residuales por métodos naturales se presenta como una opción sostenible para las pequeñas y medianas poblaciones dada su alta eficiencia, bajos costos de operación, mantenimiento y facilidad de construcción.

En Cuba, las soluciones que más se han empleado para el tratamiento y disposición final de las aguas residuales, se basan en sistemas de tanques sépticos y lagunas de estabilización las cuales a pesar de todo no han sido completamente efectivas.

Paralelamente a este avance han surgido y desarrollado otras variantes tecnológicas con un enfoque más sostenible, de mejora de la calidad de vida de las personas, mediante la disminución de la contaminación y aplicación de medidas de reutilización del residuo, en beneficio social y económico, en combinación armónica con la protección del medio ambiente; de modo que se satisfacen las necesidades de las actuales generaciones, sin poner en riesgo la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

Los tratamientos descentralizados de aguas residuales ofrecen la oportunidad de tratar las aguas residuales domésticas cerca de su fuente de origen, en zonas rurales y pequeñas comunidades ubicadas en la periferia de los grandes asentamientos humanos (zonas periurbanas), con menores costos de inversión, con bajos costos de operación, mantenimientos y bajos consumos de energía, lo cual representan alternativas muy atractivas para países como Cuba. (Pérez., 2016)

Diseño metodológico de la investigación

Situación problemática

Entre los principales problemas identificados en el marco del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas, se encuentran los asociados al saneamiento, con particular atención en el poblado Palenque perteneciente al municipio Yateras, provincia Guantánamo y localizado dentro de los límites de la cuenca del río Toa.

En el poblado, en la década del 70's, se construyó el alcantarillado y una laguna de depuración al otro lado del río para dar servicio inicialmente a un grupo de instituciones públicas y viviendas, y al que luego se conectaron otras viviendas existentes. Este sistema funcionaba adecuadamente y con el mismo, se trataba una parte de las aguas residuales que se generaban en dicha cabecera municipal.

En mayo de 1993, se produjo una gran crecida del río que destruyó por completo el sistema de tuberías que lo atravesaban, por lo que dejó de funcionar la laguna trayendo como consecuencia que las aguas residuales que se colectan se viertan directamente al río.

Debido al desarrollo que ha tenido el poblado en los últimos 20 años, ha crecido el número de instituciones y viviendas, generando una contaminación cada vez mayor.

Este poblado está catalogado como uno de los más importantes focos contaminantes de la cuenca del río Toa. Actualmente las aguas residuales generadas por el poblado son vertidas directamente al medio sin tratamiento alguno, generando la consecuente contaminación de las aguas superficiales de tan importante cuenca hidrográfica.

Problema de investigación

¿Cómo mejorar las condiciones de saneamiento del poblado de Palenque para mitigar los efectos ambientales negativos identificados en la cuenca del río Toa?

Objeto de investigación

Tratamiento de aguas residuales

Objetivo General

Seleccionar y realizar el diseño preliminar de un sistema para la depuración de las aguas residuales del poblado de Palenque, basados en tecnologías sostenibles y su aplicabilidad, de manera que contribuya a disminuir la carga contaminante que se vierte en el río Toa, favoreciendo la disminución de enfermedades de origen hídrico y mejorando la calidad de vida de la población.

Campo de investigación

Tratamiento de aguas residuales municipales en pequeñas comunidades

Objetivos Específicos

1. Analizar el estado del arte concerniente a las tecnologías de tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades y los aspectos a considerar en la selección del tren de tratamiento.
2. Describir el poblado de Palenque.
3. Seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales más adecuada en el poblado de Palenque.
4. Dimensionar el sistema de tratamiento seleccionado para el poblado de Palenque.

Hipótesis de investigación

La propuesta de un sistema de tratamiento para las aguas residuales generadas en el poblado de Palenque, mejorará las condiciones sanitarias del lugar y contribuirá a mitigar los problemas ambientales identificados en la cuenca del río Toa.

Tareas de investigación

1. Revisar la bibliografía técnica sobre el tema objeto de estudio.
2. Sintetizar la información revisada a partir de los objetivos de la investigación.
3. Recopilar toda la información referente al área de estudio y caracterizarlo.
4. Decidir los criterios a evaluar para la selección de la tecnología de tratamiento.
5. Aplicar los criterios de selección de la tecnología de tratamiento.
6. Proponer el tren de tratamiento más adecuado para las condiciones del poblado de Palenque.
7. Diseñar el tren de tratamiento para la depuración de las aguas residuales del poblado Palenque.
8. Escribir la monografía de la tesis.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Aguas Residuales, clasificación y caracterización

El término **agua residual** define un tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales. Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación.

La FAO define las aguas residuales como aquella agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó, ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar. Las aguas de refrigeración no se consideran aguas residuales (wikipedia, 2014).

A las aguas residuales también se les llama **aguas servidas, fecales o cloacales**. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; y cloacales porque son transportadas mediante cloacas. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales. En todo caso, están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno. (wikipedia, 2014).

1.1.1. Clasificación de las aguas residuales

Las aguas residuales se suelen dividir teniendo en cuenta su procedencia en:

Aguas residuales domésticas: Son las aguas de origen principalmente residencial (desechos humanos, baños, cocina) y otros usos similares.

Aguas residuales industriales: Son aguas provenientes de los procesos industriales y la cantidad y composición de ellas es bastante variable, dependiendo de la actividad productiva y de muchos otros factores (tecnología empleada, calidad de la materia prima, etc.).

Aguas residuales pluviales: Son la escorrentía generada por aguas de lluvias es menos contaminada que las aguas residuales domésticas e industriales, y su caudal es mayor. La contaminación mayor se produce en las primeras aguas que lavan las áreas por donde escurre. (Dambreville, 2016)

1.1.2. Caracterización de las aguas residuales

Principales características de las aguas residuales

La caracterización de las aguas residuales es necesaria ya que estos son parámetros importantes para el tipo de tratamiento, así como para la gestión técnica de la calidad ambiental. En la tabla 1.1, se presentan datos típicos de los constituyentes encontrados en un agua residual doméstica (Dambreville, 2016).

Tabla 1.1 Composición Típica del agua residual doméstica

Componente	Concentración		
	Alta	Media	Baja
Materia sólida, mg/L	1200	720	350
Disuelta total	850	500	250
<i>Inorgánica</i>	525	300	145
<i>Orgánica</i>	325	200	105
En suspensión	350	220	100
<i>Inorgánica</i>	75	55	20
<i>Orgánica</i>	275	165	80
Sólidos decantables, ml/L	20	10	5
DBO ₅ a 20°C, mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, mg/L	290	160	8
DQO, mg/ L	1000	500	250
Nitrógeno, mg/L N, total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo, mg/L P, total	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros mg/L	100	50	30
Alcalinidad, mg/L CaCO ₃	200	100	50
Grasa, mg/L	150	100	50

Fuente: (Dambreville, 2016)

Para hacer frente a proyectos de tratamiento de aguas residuales, es importante caracterizar el agua residual a tratar, que consiste en determinar.

1. **Cantidad de agua residual:** Se relaciona con los caudales de diseño y varía considerablemente durante las horas, los días, semanas y estaciones del año; dependiendo principalmente del tamaño, hábitos y costumbres de la población y de la temperatura y precipitación atmosférica de la región. Por lo tanto, no es suficiente considerar el caudal medio, por lo que es necesario cuantificar los caudales máximos y mínimo por razones hidráulicas y de proceso. Estos caudales de diseño pueden ser estimados a partir de las contribuciones domésticas, industriales, las malas conexiones y los caudales de infiltración.

2. **Calidad del agua residual:** Relacionado con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos presentes en el agua residual. Son por lo general una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos, sólidos suspendidos y disueltos, y microorganismos que provienen de las actividades domésticas e industriales de una población, del agua de lluvia y de la infiltración del agua subterránea. Las clasificaciones de los parámetros de calidad del agua se presentan en la tabla 1.2. (Dambreville, 2016).

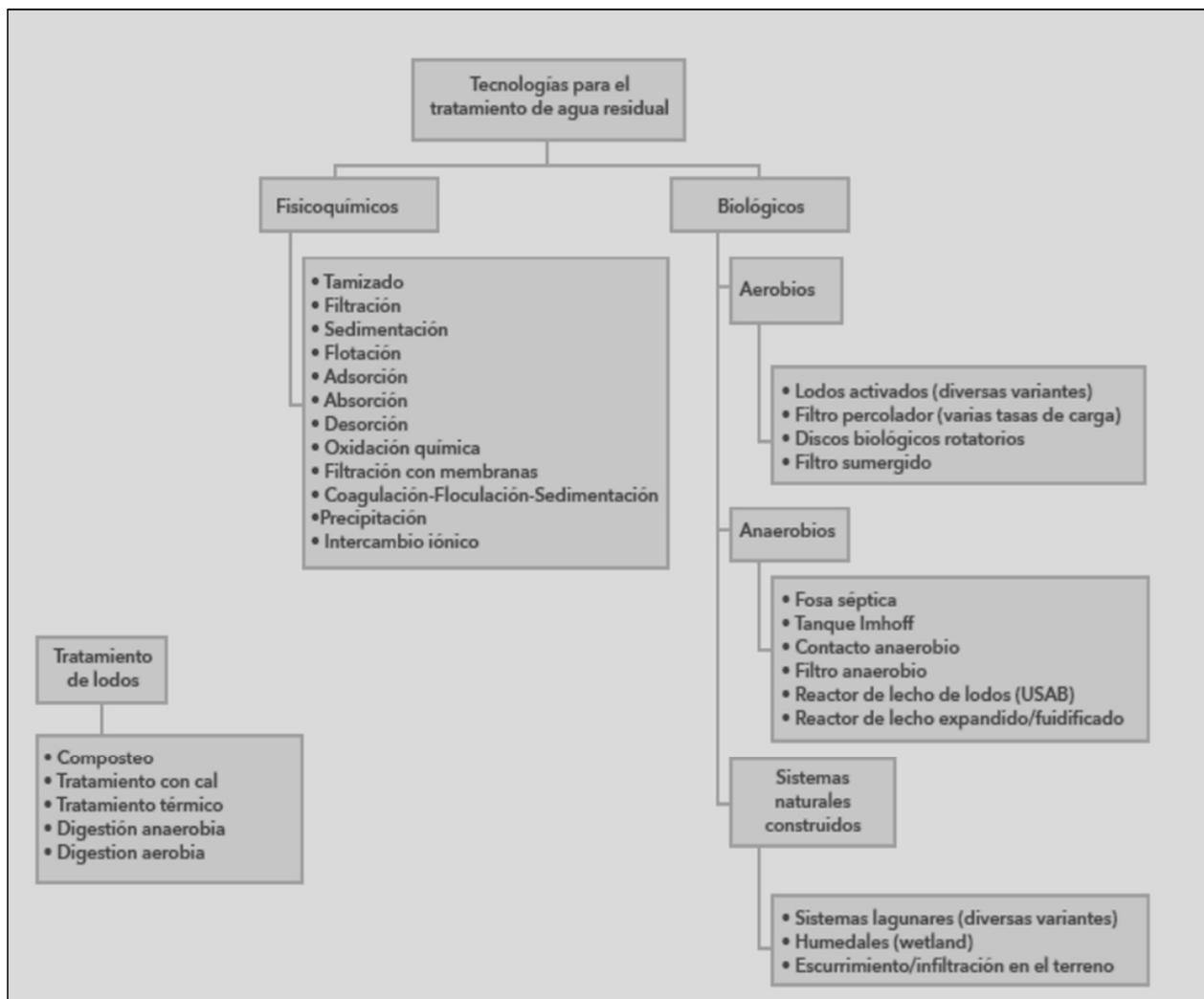
Tabla 1.2 Clasificación de parámetros presentes en las aguas residuales

Físicos	Químicos		Microbiológicos
	Orgánicos	Inorgánicos	
Temperatura	Materia orgánica:	pH	Coliformes totales
Sólidos	DQO, COT, DBO	Conductividad	Coliformes termotolerantes
Olor	Grasas y aceites	Nitrógeno	Eschericha coli
Color	Tensoactivos	Fósforo	Streptococcus fecales
Turbiedad		Alcalinidad	Aerobias
		Cloruros	(Clostridium perfringens)
		Azufre	Bacteriófagos
		Otros constituyentes (metales y gases)	

Fuente: (Dambreville, 2016)

1.2. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Existen distintas tecnologías de tratamiento para las aguas grises y negras, estas dependen directamente de la calidad de agua que se está buscando o la que se pretende lograr para reutilizar o incluir en un cuerpo receptor, como un río, laguna o mar. Asimismo, esta tecnología también está ligada a aspectos como los costos, el impacto ambiental, el uso del terreno, la dimensión, entre otros diversos parámetros. En el gráfico de la figura 1.1, se muestran los diferentes tipos de procesos (físicos, químicos o biológicos) de tratamiento.



Fuente: (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2013)

Figura 1.1 Clasificación de los procesos para el tratamiento las aguas residuales

En un sistema de tratamiento de aguas residuales, la ley de la conservación de la materia hace que al retirar de alguna forma el material contaminante del agua residual, éste solo se transforme o transfiera. Por esta simple razón, siempre se producirán residuos, tales como los lodos, acompañados por la generación de emisiones gaseosas.

Las cantidades y calidad de estos residuos dependerán de las características del agua residual a tratar y evidentemente de la configuración del sistema de tratamiento. (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2013).

Como se ha visto, existe una gran variedad de operaciones y procesos unitarios para el tratamiento de agua residual. Los componentes individuales de tratamiento se clasifican en operaciones físicas unitarias, procesos químicos o biológicos unitarios. Estas operaciones y procesos unitarios se combinan en los sistemas de depuración de aguas residuales, dando lugar a un tren de tratamiento, como se muestra en la figura 1.2.

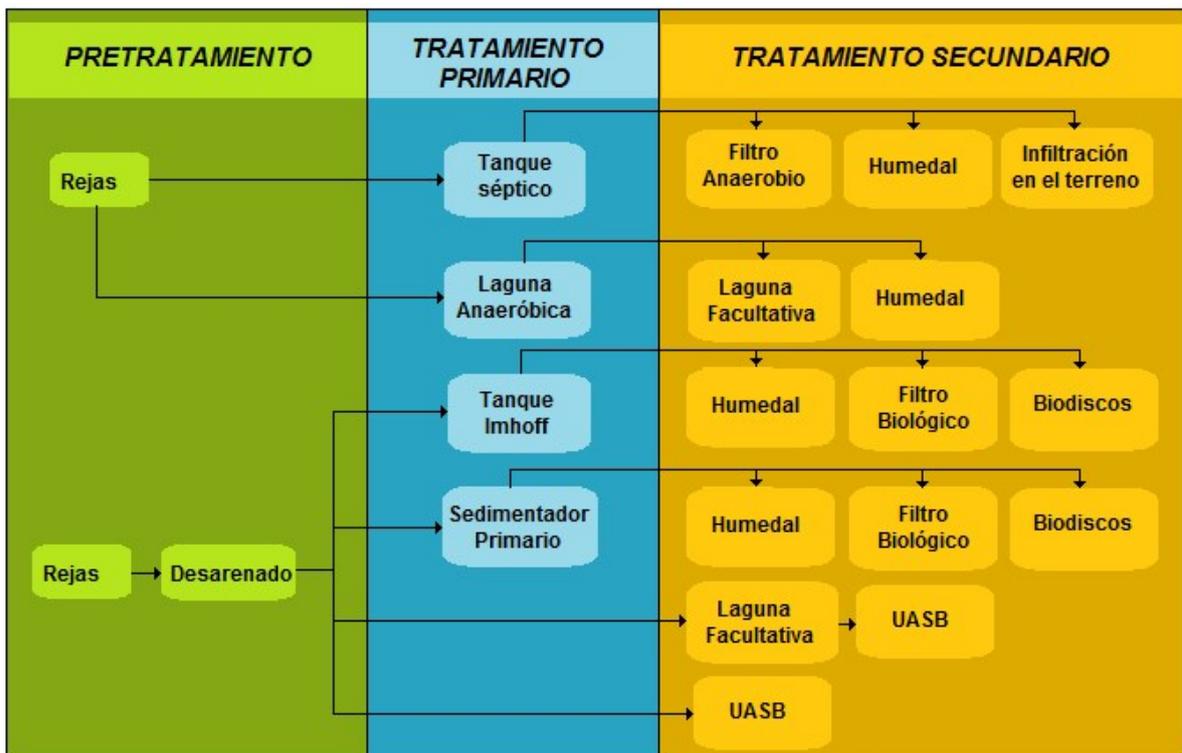


Figura 1.2 Ejemplos de integración de trenes de tratamiento de aguas residuales

1.2.1. Tecnologías de tratamiento para pequeñas comunidades

Existen diferentes formas de clasificar las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales. Según el tamaño de los procesos y los volúmenes a tratar, una de las formas más comunes de clasificarlas es en tecnologías extensivas e intensivas (ver figura 1.3) con su correspondiente pretratamiento y tratamiento primario.



Figura 1.3 Tecnologías de tratamiento de aguas residuales

Por etapas y tecnologías a utilizar se clasificarán como:

Pretratamiento

- ❖ Cámara de rejillas
- ❖ Desarenado
- ❖ Desengrasado

Tratamiento primario

- ❖ Fosas sépticas
- ❖ Tanque Imhoff
- ❖ Decantación primaria

Tecnologías extensivas

- ❖ Humedales Artificiales
- ❖ Filtros Intermitentes de Arena
- ❖ Infiltración-Percolación
- ❖ Filtros de Turba
- ❖ Lagunajes
- ❖ Filtros Verdes

Tecnologías intensivas

- ❖ Aireaciones Prolongadas
- ❖ Lechos Bacterianos
- ❖ Contactores Biológicos Rotativos (CBR)
- ❖ Reactores Secuenciales (SBR)
- ❖ Reactores de Biopelícula sobre Lecho Móvil (MBBR)

En base a estas consideraciones, las seleccionadas para su estudio de factibilidad en el presente trabajo, han sido las siguientes:

Cámara de rejas: Generalmente es el primer proceso en el tratamiento de las aguas residuales y su misión es la eliminación de sólidos de tamaño pequeño-mediano, mediante su interceptación en rejas. Las que consisten en barras paralelas que se anteponen al flujo, con separación uniforme entre ellas. Ver figura 1.4.



Figura 1.4 Cámara de rejas de limpieza manual

Desarenado: El desarenado tiene por objeto la eliminación de la mayor parte de la materia más densa presente en las aguas residuales, con un diámetro superior a 0,2 mm, para evitar su sedimentación en canales, conducciones y unidades de tratamiento, y para proteger a las bombas de la abrasión. Ver figura 1.5.



Figura 1.5 Desarenador rectangular de flujo horizontal de doble canal

Fosa séptica: Son unidades que se utilizan para tratar las aguas residuales domésticas. Son generalmente de uso individual en lugares donde no existe una red de alcantarillado sanitario, o pueden prestar servicio a un pequeño núcleo poblacional. Estos dispositivos combinan los procesos de sedimentación y digestión anaeróbica de lodos. Usualmente se diseñan con dos o más cámaras que operan en serie. En el primer compartimiento se efectúa la sedimentación, digestión de lodos y el almacenaje. Debido a que, la descomposición anaeróbica produce gases que suspenden a los sólidos, por lo cual se requiere de una cámara adicional antes de ser vertidos (Pérez., 2016). Ver figura 1.6.

Tanque Imhoff: Son un tipo de tanques de sedimentación primaria que incorporan la digestión de lodos en un compartimiento ubicado en la parte inferior. Su operación es muy simple y no requiere de partes mecánicas. Son muy convenientes en lugares donde el clima es cálido pues facilita la digestión de lodos. Sin embargo, producen olores fétidos. Ver figura 1.7.

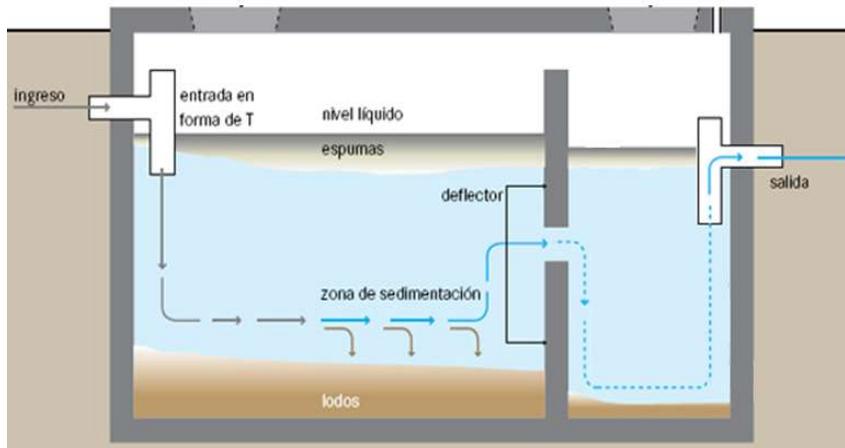


Figura 1.6. Esquema de una fosa séptica

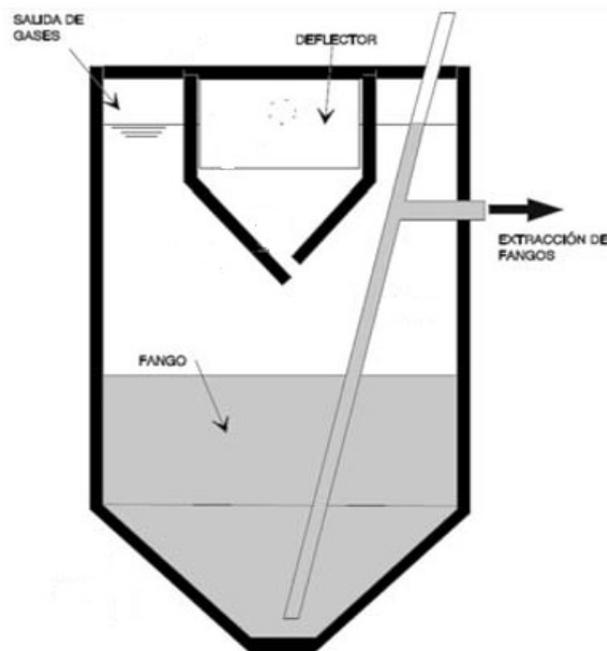


Figura 1.7 Esquema de un tanque Imhoff

Tanques de sedimentación: Los tanques de sedimentación primaria pueden proporcionar el principal grado de tratamiento del agua residual, o se pueden emplear como paso previo al tratamiento posterior (generalmente tratamiento biológico). En este caso su función es reducir la carga afluente a las unidades de tratamiento biológico. (Manotupa Dueñas, 2018). Ver figura 1.8.

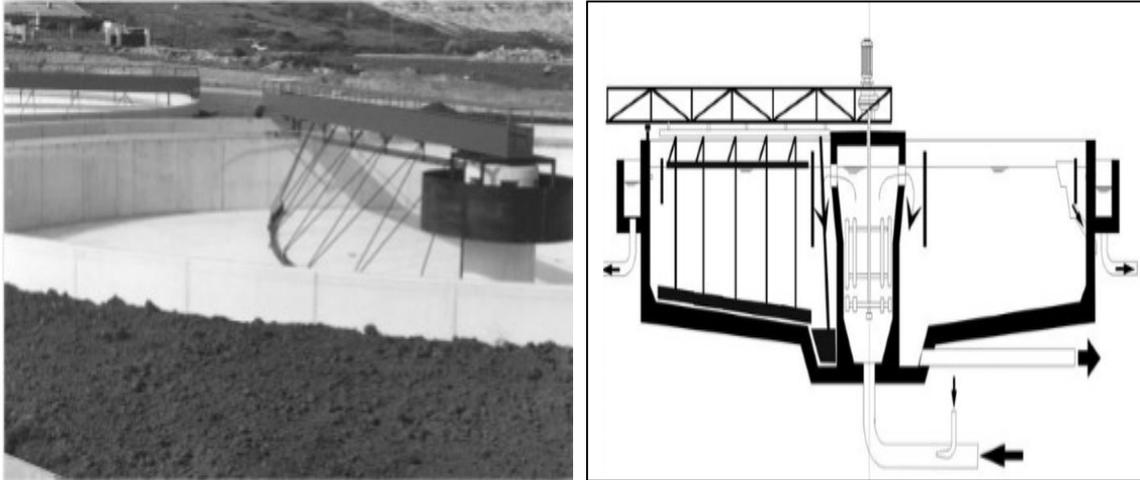


Figura 1.8 Esquema de un sedimentador primario circular

Lechos bacterianos o filtros percoladores: Consiste en un tanque que contiene un lecho de materia gruesa, compuesto en gran mayoría de los casos de materiales sintéticos o piedras de diversas formas, de alta relación área/volumen, sobre el cual son aplicadas las aguas residuales por medio de brazos distribuidores fijos o móviles. Alrededor de este lecho se encuentra adherido una población bacteriana que descompone las aguas residuales a medida que estas percolan hacia el fondo del tanque. (Pérez., 2016). Ver figura 1.9.



Figura 1.9 Filtro percolador

Lagunas de estabilización: Las lagunas de estabilización son estanques diseñados para el tratamiento secundario de las aguas residuales mediante procesos biológicos naturales con interacción de microorganismos (algas, bacterias y protozoarios) y la materia orgánica contenida en el agua residual. Este tipo de tratamiento se recomienda cuando se busca un alto grado de remoción de organismos patógenos. Ver figura 1.10.



Figura 1.10 Lagunas de estabilización

Reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB): Es un reactor de segunda generación con el distintivo particular que no requiere material de empaque para retener los microorganismos. El reactor se basa en la formación de una cama de lodos (biomasa anaerobia granular o floculada) localizada en el fondo del reactor con un volumen aproximado de 1/3 el volumen total de éste. En la parte superior del reactor se coloca el sistema de captación de biogás (campanas colectoras), que favorece la buena sedimentación de los gránulos o flóculos anaerobios que pudieran haber atravesado las campanas colectoras de biogás. Ver figura 1.11. (UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2013).

Humedales: Son estanques o canales en los que la superficie del agua puede o no encontrarse expuesta a la atmósfera y las plantas emergentes están enraizadas sobre una capa de suelo generalmente impermeabilizado, para evitar la infiltración al manto freático. Pueden ser de flujo libre o subsuperficial. Las aguas residuales aplicadas a estos sistemas usualmente son pre tratadas y la depuración de las mismas se logra,

al circular el agua a través de los tallos y raíces de las plantas. (Pérez., 2016). Ver figura 1.12.

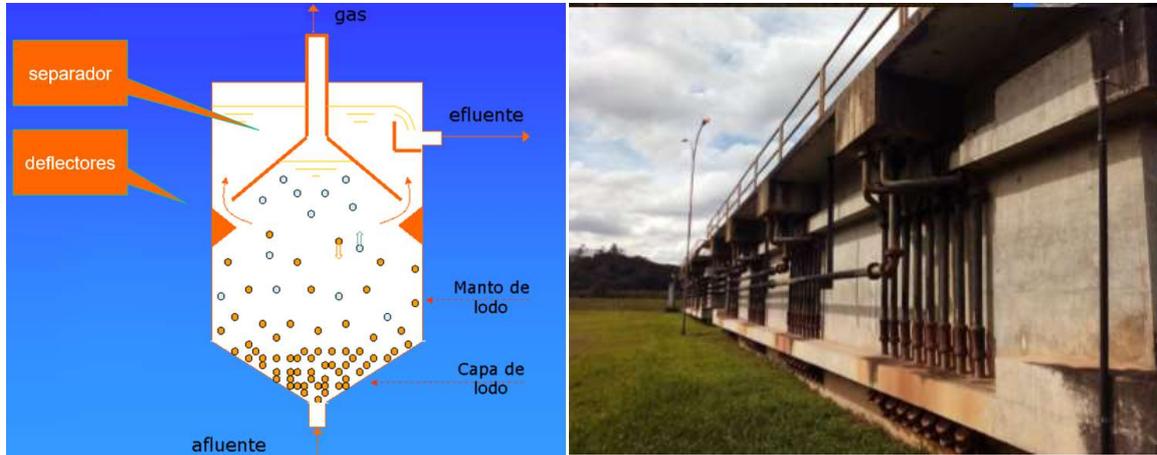


Figura 1.11 Esquema de un reactor UASB

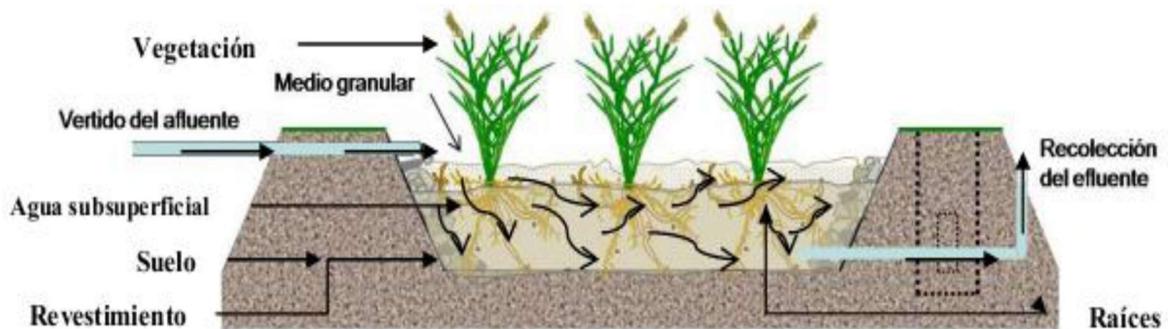


Figura 1.12 Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

1.3. Tratamiento de las aguas residuales en pequeñas comunidades

Típicamente, el tratamiento de las aguas residuales comienza por la separación física inicial de los sólidos grandes (basura) empleando un sistema de rejillas (mallas), aunque también pueden ser triturados esos materiales por equipos especiales; posteriormente se aplica un desarenado (separación de sólidos pequeños muy densos como la arena) seguido de una sedimentación primaria (o tratamiento similar) que separe los sólidos suspendidos existentes en el agua residual.

La conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales (tratamiento terciario) como desinfección, filtración, etc. El efluente final puede ser descargado o reintroducido de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial, subsuelo, etc.). Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

En la tabla 1.3, se muestra un resumen del trabajo realizado por el Instituto CINARA de Colombia, donde se presentan los esquemas tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales y los lodos generados en pequeñas comunidades.

Tabla 1.3 Esquemas tecnológicos de tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades

No.	Pretratamiento	Trat. primario	Trata. secundario	Trata. de lodos
1	Rejas	T. Séptico	Filtro anaerobio	
2	Rejas	T. Séptico	Humedal flujo libre	
3	Rejas	T. Séptico	Humedal de flujo subsuperficial	
4	Rejas	T. Séptico	Infiltración al terreno	
5	Rejas	L. Anaerobia	Humedal flujo libre	
6	Rejas	L. Anaerobia	Humedal flujo subsuperficial	
7	Rejas	L. Anaerobia	L. facultativa	
8	Rejas + desar	T. Inhoff	Humedal flujo libre	L. secado
9	Rejas + desar	T. Inhoff	Humedal flujo subsuperficial	L. secado
10	Rejas + desar	T. Inhoff	Filtro biológico + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
11	Rejas + desar	T. Inhoff	Filtro biológico + Inhoff	L. secado
12	Rejas + desar	T. Inhoff	Biodiscos + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
13	Rejas + desar	T. Inhoff	Biodiscos + Inhoff	L. secado
14	Rejas + desar	Sed. 1º Convenc.	Filtro biológico + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
15	Rejas + desar	Sed. 1º Convenc	Biodiscos + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
16	Rejas + desar	Sed. 1º A.c	Humedal flujo libre	Dig. Ana. + L. secado
17	Rejas + desar	Sed. 1º A.c	Humedal flujo subsuperficial	Dig. Ana. + L. secado
18	Rejas + desar		L. facultativa	
19	Rejas + desar		UASB	L. secado
20	Rejas + desar		UASB + L. facultativa	L. dsecado

Fuente: (Instituto Cinara, Universidad del Valle., 2015)

1.3.1. Situación en Cuba con el tratamiento de las aguas residuales en pequeñas comunidades

A partir de los años noventa, el país centró su atención en un fuerte proceso inversionista y constructivo destinado a ampliar la infraestructura hidráulica y de saneamiento.

En la actualidad, y así ha quedado expresado en la Política Nacional del Agua; el desarrollo de los servicios de agua y saneamiento, el uso racional del agua y las necesidades de reúso, seguirán siendo una política de gobierno de alta prioridad, (INRH, 2012).

Según las estadísticas, aún son insuficientes los esfuerzos realizados en materia de protección del medio ambiente a partir del saneamiento ya que más de 820 mil fosas y letrinas son inadecuadas; de las aguas residuales que son evacuadas, solamente el 47,0% reciben tratamiento de depuración en 12 plantas de tratamiento de residuales y más de 500 lagunas de estabilización en general en mal estado técnico (INRH, 2012; ONEI, 2016).

Esto ha favorecido el incremento de la carga contaminante que se vierte, contribuyendo al deterioro de las fuentes de agua para consumo, limitando o encareciendo su uso y generando condiciones de insalubridad. Por estas razones se hace necesario priorizar su tratamiento y promover la búsqueda de alternativas para su manejo mediante la implantación de sistemas eficientes, poco mecanizados y de bajo costo de inversión y operación, que permitan reducir la contaminación de las fuentes de agua y proteger la salud de los pobladores.

En Cuba, los sistemas de tratamiento de aguas residuales que más se han utilizado en pequeñas y medianas comunidades han sido los tanques sépticos y las lagunas de estabilización, los cuales en su mayoría presentan insuficiencia en su funcionamiento, generalmente por una mala operación. Otros sistemas utilizados, pero en menor consideración son los tanques Imhoff (hace muchos años han dejado de utilizarse por lo complejo de su construcción) combinados con filtros biológicos y más recientemente los humedales artificiales y los biodiscos. (Pérez., 2016).

Para este trabajo de tesis se evaluarán para la selección del esquema tecnológico, los siguientes esquemas, según la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Esquemas tecnológicos que se evaluarán

Esq.	Pretratamiento	Trat. primario	Trata. secundario	Trata. de lodos
E-1	Rejas	T. Séptico	Filtro anaerobio	
E-2	Rejas	T. Séptico	Humedal flujo libre	
E-3	Rejas	T. Séptico	Humedal de flujo subsuperficial	
E-4	Rejas	T. Séptico	Infiltración al terreno	
E-5	Rejas	L. Anaerobia	Humedal flujo libre	
E-6	Rejas	L. Anaerobia	Humedal flujo subsuperficial	
E-7	Rejas	L. Anaerobia	L. facultativa	
E-8	Rejas + desar	Sed. 1º Convenc.	Filtro biológico + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
E-9	Rejas + desar	Sed. 1º Convenc	Biodiscos + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
E-10	Rejas + desar	Sed. 1º A.c	Humedal flujo libre	Dig. Ana. + L. secado
E-11	Rejas + desar	Sed. 1º A.c	Humedal flujo subsuperficial	Dig. Ana. + L. secado
E-12	Rejas + desar		L. facultativa	
E-13	Rejas + desar		UASB	L. secado
E-14	Rejas + desar		UASB + L. facultativa	L. dsecado

1.4 Métodos de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales

La selección de un tren de tratamiento de aguas residuales, depende de criterios que sirven para realizar un análisis comparativo entre las diferentes alternativas, a fin de llegar a la selección más conveniente. Para ello debe estudiarse el afluente a ser depurado, el nivel de calidad que se desea en el agua tratada de acuerdo al objetivo del tratamiento, las características de terreno, factores ambientales y costos de construcción, operación y mantenimiento. (VILLADA, 2004).

Las características propias de cada tecnología en cuanto a eficiencia, modo de operación y mantenimiento, recursos requeridos e impacto ambiental determinan su aplicabilidad y adaptación a las necesidades de la localidad.

Se han utilizado diversas metodologías para la selección del sistema de tratamiento de aguas residuales, las más usuales se basan en:

1. **Proceso Analítico Jerárquico** (conocido por sus siglas en inglés como AHP) que modeliza los problemas de decisión mediante la conformación de una jerarquía formada por niveles que se relacionan entre sí unidireccionalmente. El nivel superior

de la jerarquía es el objetivo del problema, el nivel inferior está constituido por las alternativas a evaluar, y los niveles intermedios son los criterios y subcriterios, con base en los cuáles se evalúan las alternativas por su capacidad para satisfacer los objetivos y finalmente generar una matriz de pesos para cada nivel y hacer las comparaciones de todos sus integrantes.

2. En un **diagrama de bloques** constituido por fases secuenciales. La selección que se realiza en cada fase, está sustentada en tablas de decisión que contienen soluciones sostenibles en función del parámetro que se esté evaluando.
3. Toma de **decisiones multicriterio**, basado en criterios de expertos para evaluar diferentes alternativas tecnológicas mediante criterios de sostenibilidad.
4. También se han implementado **modelos lineales, dinámicos y no lineales** para optimizar el análisis de las alternativas de tratamiento, que tiene en cuenta aspectos cualitativos y cuantitativos de decisión que reduce el nivel de comparación de factores. A partir de los parámetros y los pesos de importancia asignados por cada parámetro, se desarrolla una matriz de evaluación por cada alternativa de tratamiento que permite ejecutar la valoración técnica, económica y ambiental de aspectos cuantitativos y cualitativos de las diferentes opciones de tecnologías.

Todos los métodos utilizados, llegan a una **matriz de decisión** que es un instrumento eficaz y fácil de manejar que permite una toma de decisión objetiva basada en fundamentos técnicos generales e información de ingeniería básica.

1.5. Parámetros a considerar para la selección de las tecnologías de tratamiento

A través de los años, se han aplicado diferentes criterios para seleccionar un sistema de tratamiento de agua residual.

En los inicios del desarrollo industrial, la escasez de fuentes de agua y la contaminación de los abastecimientos existentes, llevó a tener en cuenta el rendimiento de los procesos en relación con ciertos parámetros considerados críticos. Hoy en día, además del rendimiento de factores muy variados como DBO, DQO, etc., se tiene en cuenta en la selección, la disponibilidad tecnológica y el costo del tratamiento.

La aplicación de uno u otro criterio obedece a la política desarrollada por los organismos gubernamentales encargados del control de la contaminación, que generalmente, corresponde a un punto de encuentro entre el desarrollo y la conservación.

Existe una gran diversidad de criterios que de manera general pueden ser de tipo **técnicos** donde se evalúan las características y requerimientos de las tecnologías existentes; de tipo **económicos** donde se consideran los costos de inversión, operación y mantenimiento; de tipo **medioambientales** relacionados con la integración de la tecnología al entorno y efectos en este y de tipo **sociales** que considera los efectos sobre la población circundante y a servir. Además, se deben considerar las **características del lugar** donde se pretende implantar la tecnología.

En el trabajo realizado por el Instituto CINARA, son presentados los criterios de comparación, los que son definidos a partir de los establecidos en la literatura y mediante consulta de expertos, (Instituto CINARA, 2005).

Los parámetros que considera este procedimiento son:

1. El caudal de agua residual
2. La temperatura del agua residual
3. La concentración de DBO₅
4. El área requerida por la tecnología
5. La profundidad del nivel freático
6. La pendiente del terreno en el lugar de implantación
7. La permeabilidad del suelo en el lugar de implantación

Cada uno de estos parámetros se ha dividido en rangos que consideran la utilización de un esquema de tratamiento u otro.

En la tabla 1.5, se presentan los rangos para los diferentes criterios y la tecnología aplicable en cada caso.

Tabla 1.5 Criterios para la selección de la tecnología óptima de tratamiento

Valores	Esquemas a utilizar													
Caudal de agua residual (L/s)														
≤ 5	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14
5 a 15	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14				
15 a 30	E-6	E-7	E-8	E-9	E-11	E-12	E-13	E-14						
> 30	E-7	E-8	E-9	E-2	E-13	E-14								
Temperatura del agua residual °C														
0 a 10	E-2	E-3	E-4	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12						
> 10	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14
DBO₅ del agua residual (mg/L)														
< 200	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-14	
> 200	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14
Nivel freático del lugar (m)														
≤ 2	E-1	E-2	E-3	E-4	E-8	E-9	E-10	E-11	E-13					
> 2	E-1	E-2	E-3	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14	
Pendiente del terreno (%)														
≤ 5	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14
> 5	E-1	E-8	E-9	E-13										
Permeabilidad del suelo (mm/h)														
≤ 5	E-1	E-2	E-3	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12	E-13	E-14	
> 5	E-1	E-4	E-8	E-9	E-13									
Área de terreno requerida														
$A_{REQ} < A_{DIP}$	Si área requerida es menor que área disponible el sistema es sostenible por disponibilidad de área.													
$A_{REQ} > A_{DIP}$	Si área requerida es mayor que área disponible el sistema no es sostenible por disponibilidad de área.													

Para definir el área total requerida por el esquema tecnológico, se proponen las ecuaciones para su cálculo, las que consideran la sumatoria de las áreas de cada una de las unidades de proceso que componen un tren o esquema de tratamiento.

Es importante destacar que estas ecuaciones no consideran la superficie requerida para el tratamiento de los lodos.

En la tabla 1.6, se presentan las áreas requeridas para los esquemas tecnológicos propuestos.

Tabla 1.6 Ecuaciones para calcular el área requerida del tren de tratamiento

Esquema	Área requerida (Ha)
E -1	$A = 0,0081 * Q^{0,994}$
E -2	$A = 0,0992 * Q^{0,9923}$
E -3	$A = 0,071 * Q^{0,944}$
E -4	$A = 0,4347 * Q$
E -5	$A = 0,1014 * Q^{0,9922}$
E -6	$A = 0,0765 * Q^{0,9709}$
E -7	$A = 0,1363 * Q^{0,9999}$
E -8	$A = 0,0109 * Q^{1,0477}$
E - 9	$A = 0,0121 * Q^{1,0785}$
E -10	$A = 0,0968 * Q^{0,9931}$
E -11	$A = 0,0699 * Q^{0,9917}$
E -12	$A = 0,1318 * Q^{1,0007}$
E -13	$A = 0,0032 * Q^{0,9085}$
E -14	$A = 0,1338 * Q^{0,9987}$

El procedimiento que presentamos a continuación, lo hemos adaptado para nuestras condiciones y consiste en caracterizar el lugar donde se pretende implantar la tecnología de tratamiento y determinar:

- Caudal _____ L/s
- Temperatura _____ °C
- Concentración de DBO₅ _____ mg/L
- Área disponible _____ Ha
- Área requerida _____ Ha
- Profundidad del nivel freático _____ m
- Pendiente del terreno _____ %
- Permeabilidad del suelo _____ mm/h

Luego crear una matriz de selección como la que se muestra en la tabla 1.7.

Tabla 1.7 Matriz de selección de la tecnología de tratamiento

Esq.	Caudal (L/s)				Temp. (°C)		DBO5 (mg/L)		N. Freat. (m)		Pend. (%)		Perm. (mm/h)	
	≤ 5	5 - 15	15 - 30	> 30	0 -10	> 10	< 200	> 200	≤ 2	> 2	≤ 5	> 5	≤ 5	> 5
E-1														
E-2														
E-3														
E-4														
E-5														
E-6														
E-7														
E-8														
E-9														
E-10														
E-11														
E-12														
E-13														
E-14														

La matriz de selección se llena en función de los valores de los criterios anteriores. Lo más probable es que con estos parámetros, sea posible utilizar más de una tecnología, tendríamos que comparar entre las que queden el área que requiere y la disponibilidad de esta para ir reduciendo las alternativas posibles.

Si finalmente quedara más de una posibilidad para escoger, se deben apelar a otros criterios disponibles a fin de comparar. Por ejemplo, la eficiencia de tratamiento de cada tecnología y las exigencias del vertido, la experiencia en la construcción e implantación de una u otra tecnología, los requerimientos de operación y mantenimiento, los costos de inversión, etc.

CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación geográfica

El Consejo Popular de Palenque está ubicado al norte del municipio Yateras, limita al norte con el Consejo de Defensa Zona 35-03-04 Arroyo del Medio, al sur con él con el Consejo de Defensa Zona 35-03-05 Monte Verde, al este con él Consejo de Defensa Zona 35-03-04 Arroyo del Medio y al oeste con él Consejo de Defensa Zona 35-03-05 Monte Verde. Ver figura 2.1.

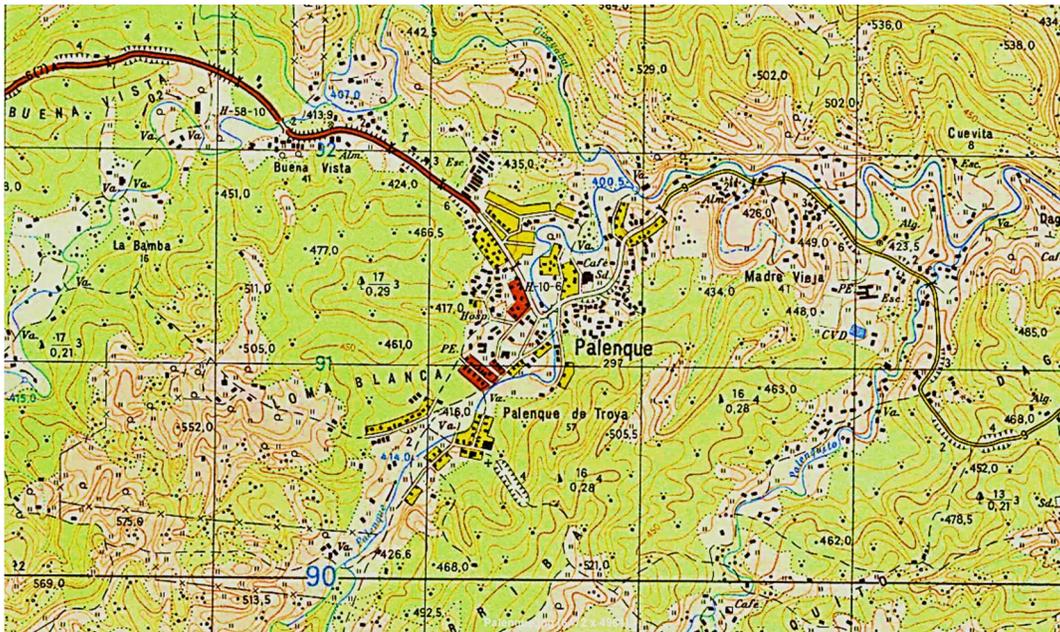


Figura 2.1 Vista cartográfica y satelital del poblado de Palenque

Cuenta con una población de 4614 habitantes y sus principales asentamientos poblacionales son: Palenque Centro, Palenque Viejo, Buena Vista, Barrio Molino, Madre Vieja, San Rafael, Palenque Arriba y Palenque los Cocos.

Tiene una superficie total de 50 Km² y su estructura administrativa está definida por 2 empresas y 36 entidades.

2.2. *Relieve*

El territorio del Consejo Popular de Palenque (CP) se caracteriza por ser totalmente montañoso.

2.3. *Clima*

El régimen pluviométrico es alto, llegando a alcanzar en algunos valores superiores a los 300 mm/año. La temperatura es inferior a los 27°C como promedio y la humedad relativa supera el 85 %.

En la tabla 2.1 se muestran los valores de las principales variables climáticas.

Tabla 2.1 Principales indicadores del clima en la estación meteorológica de Palenque

Años	Lluvia (a)		Temperatura (°C)		Viento predominante	
	Total anual(mm)	Días (U)	Máxima media	Mínima media	Dirección 16 rumbos	Velocidad (Km/hora)
2011	1 970,5	178	28,5	18,3	E	11,4
2012	1 690,2	159	29,0	18,4	E	11,2
2013	1 308,7	158	28,8	18,3	E	10,8
2014	1 537,0	122	29,2	19,1	E	10,5
2015	1 230,9	133	29,4	19,3	E	10,8
2016	1 753,3	191	28,6	19,0	E	11,4

Fuente: Oficina nacional de estadística e información 2016.

2.4. *Caracterización del poblado*

El desarrollo económico principal del Consejo Popular Palenque es el cafetalero, seguido por la forestal y en menor escala los cítricos y los cultivos varios.

La existencia en el Consejo Popular de elementos con valores paisajísticos, ecológicos, faunísticos y endémicos, como el área protegida reserva de la biosfera “El Palenque y la Vía Mulata”, le confieren a este una atención especial desde el

punto de vista de las acciones de la Ciencia, la Innovación tecnológica y la Gestión Ambiental.

La demarcación donde actúa el Consejo Popular de Palenque (CP) cuenta con las siguientes vías de comunicación:

- Una red vial desde Guantánamo hasta los límites con el Consejo de Defensa Zona 35-03-04 Arrollo del Medio, surca por todo su centro la Vía Mulata, además compuesta por carreteras y caminos que posibilitan el tráfico automotor entre asentamientos.
- Se dispone de redes técnicas por radio, televisión nacional y telefónica municipal, cuenta con un centro de ETECSA.

Sus principales recursos hídricos están localizados en dos importantes ríos, el río Palenque y el río Guayabal que corren de norte a sur y que en situaciones de huracanes e intensas lluvias provocan inundaciones en comunidades, de la misma forma la crecida de estos ríos incomunica el (CP) con la cabecera provincial, con el Municipio y entre comunidades.

2.5. Caracterización del sistema de abastecimiento de agua

El municipio Yateras cuenta con 16 sistemas de acueductos para el servicio de abasto de agua, de ellos 4 por bombeo y 12 por gravedad. En el CP Palenque el sistema de abastecimiento de agua es por gravedad y su fuente de abasto está ubicada en el arroyo La Jaiba.

Con el objetivo de garantizar la calidad del agua, el municipio cuenta con 16 instalaciones de tratamiento de agua, de ellas 10 con dosificadores de hipoclorito de sodio y las restantes con cloración manual. En el poblado Palenque se cuenta con dosificador de hipoclorito.

En la tabla 2.2 se muestra la población con cobertura de acueducto en el poblado palenque.

Tabla 2.2 Población con Cobertura de acueducto.

No.	Nombre del Lugar	Urbano	Rural	Población Benef.(Hab)			Long Tub.(Km)		
				Urbana	Rural	Total	Red	Cond.	Total
1	La Bamba		x		239	239	0.10	0.30	0.40
2	Panaderia	x		209		209	0.60	0.10	0.70
3	Palenque Taxi	x		480		480	0.20	0.60	0.80
4	Poder Popular	x		204		204	0.30	0.10	0.40
5	Internado	x		124		124	0.30	0.50	0.80
6	Molino	x		117		117	0.40	0.50	0.90
7	Madre Vieja		x		401	401	0.50	0.60	1.10
8	Buena Vista		x		305	305	0.50	0.60	1.10
9	Edificios	x		170		170	0.90	0.10	1.00
10	Los Cocos	x		217		217	0.60	0.20	0.80
11	San Manuel	x		284		284	0.40	0.80	1.20
12	Loma Blanca	x		136		136	1.00		1.00
13	Palenque Viejo	x		149		149	0.50	0.20	0.70

2.6. Caracterización del alcantarillado y el saneamiento en general

En el año 1978 se construyó el alcantarillado y una laguna de estabilización al otro lado del río en la que se instaló todo el sistema de centros ya existentes en el pueblo y un gran número de viviendas. El 31 de mayo de 1993 se produjo un gran creciente del río que destruyó por completo el sistema de tuberías que atravesaban el río y dejó de funcionar la laguna antes mencionada.

En la actualidad todos los residuales generados (más de 40 instituciones sociales donde se incluyen escuelas, el hospital, la dirección de salud, de educación y otros centros grandes, se vierten directamente al río sin tratamiento alguno y por consiguiente la contaminación es cada día mayor.

CAPITULO 3: SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO

3.1 Parámetros del lugar de implantación del sistema

Para la aplicación de la matriz de selección, se requiere conocer del área de estudio los siguientes parámetros:

1. El caudal de agua residual.
2. La temperatura del agua residual.
3. La concentración de DBO₅.
4. La profundidad del nivel freático.
5. La pendiente del terreno en el lugar de implantación.
6. La permeabilidad del suelo en el lugar de implantación.
7. El área disponible para implantar la tecnología.

A continuación, se muestran y describen los datos necesarios para seleccionar la tecnología más apropiada para el poblado Palenque.

1. Caudales de aguas residuales:

- **Población:** 3390 habitantes, esta es la población que tributará al alcantarillado.
- **Coefficiente de retorno de aguas residuales:** 0,8; según NC 1230-2018 “Especificaciones para el diseño y construcción de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial urbano”.
- **Dotación de agua potable:** Según NC 973:2013: “Determinación de la demanda del agua potable en poblaciones urbanas”, la relación matemática para determinar la dotación será:

$$Dot = 130 + 79,5 * \log\left(\frac{P}{1000}\right) = 130 + 79,5 * \log\left(\frac{3390}{1000}\right) = 172 \text{ L/hab. d}$$

- Caudal medio:

$$Q_{med} = \frac{Pob * Dot * Cr}{1000} = \frac{3390 * 172 * 0,8}{1000} = 466,5 \text{ m}^3/d = 5,4 \text{ L/s}$$

– Caudal máximo:

$$Q_{max} = Q_{med} * \left(1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{P}{1000}}} \right) = 466,5 * \left(1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{3390}{1000}}} \right) = 1584,8 \text{ m}^3/d = 18,3 \text{ L/s}$$

2. Temperatura: la temperatura del aire es: la máxima media 28,6°C y la mínima media 19 °C. La temperatura del agua residual es mayor.

3. DBO₅ del agua residual bruta

- **Aporte per cápita de DBO₅ (DBO_{per}):** 40 g/hab.d (Estudios realizados para las condiciones de Cuba arrojaron que este parámetro está entre 35 y 42 g/hab.d).

$$DBO_5 = \frac{DBO_{per} * 1000}{Dot * Cr} = \frac{40 * 1000}{172 * 0,8} = 290,7 \text{ mg/L}$$

4. Profundidad del nivel freático: suele variar entre 2 m y 5 m en dependencia de las condiciones del relieve.

5. Pendiente del terreno: el relieve de manera general es montañoso, aunque en el lugar de implantación las pendientes son inferiores al 5%.

6. Permeabilidad: Los coeficientes de filtración son:

$$K_{fmedio} = 0.83 \text{ mm/h}; \quad K_{fmax} = 5 \text{ mm/h}; \quad K_{fmin} = 0.04 \text{ mm/h}$$

7. Área disponible para implantar la tecnología: se cuenta con terrenos suficientes para implantar cualquier tecnología. Se han realizado estudios donde se han analizado diferentes variantes.

3.2 Aplicación de la matriz de selección

En la tabla 3.1 se desarrolla la matriz de selección, para las condiciones del poblado Palenque.

Tabla 3.1 Matriz de selección de la tecnología de tratamiento

Esq.	Caudal (L/s)				Temp. (°C)		DBO5 (mg/L)		N. Freat. (m)		Pend. (%)		Perm. (mm/h)		Área req. Ha
	≤ 5	5 - 15	15 - 30	> 30	0-10	> 10	< 200	> 200	≤ 2	> 2	≤ 5	> 5	≤ 5	> 5	
E-1						X		X		X	X		X		0,0433
E-2						X		X		X	X		X		0,5288
E-3						X		X		X	X		X		0,3488
E-4		X				X		X			X				2,3474
E-5		X				X		X		X	X		X		0,5404
E-6		X				X		X		X	X		X		0,3933
E-7		X				X		X		X	X		X		0,7359
E-8		X				X		X		X	X		X		0,0638
E-9		X				X		X		X	X		X		0,0746
E-10		X				X		X		X	X		X		0,5167
E-11		X				X		X		X	X		X		0,3722
E-12		X				X		X		X	X		X		0,7126
E-13		X				X		X		X	X		X		0,0148
E-14		X				X		X		X	X		X		0,7209

En la matriz de selección, los esquemas de tratamiento que están sombreados en la tabla 3.1, son esquemas de tratamiento que pueden ser utilizados para las condiciones del poblado Palenque.

Esq.	Pretratamiento	Trat. primario	Trata. secundario	Trata. de lodos
E-5	Rejas	L. Anaerobia	Humedal flujo libre	
E-6	Rejas	L. Anaerobia	Humedal flujo subsuperficial	
E-7	Rejas	L. Anaerobia	L. facultativa	
E-8	Rejas + desar	Sed. 1° Convenc.	Filtro biológico + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
E-9	Rejas + desar	Sed. 1° Convenc	Biodiscos + sed. secundario	Dig. Ana. + L. secado
E-10	Rejas + desar	Sed. 1° A.c	Humedal flujo libre	Dig. Ana. + L. secado
E-11	Rejas + desar	Sed. 1° A.c	Humedal flujo subsuperficial	Dig. Ana. + L. secado
E-12	Rejas + desar		L. facultativa	
E-13	Rejas + desar		UASB	L. secado
E-14	Rejas + desar		UASB + L. facultativa	L. dsecado

Realizando un análisis de los esquemas resultantes:

- Los esquemas E-5, E-6 y E-7, pueden resultar necesarios en aguas residuales muy cargadas que justifiquen el uso de una laguna anaeróbica.
- Los esquemas E-8 y E-9, aunque son altamente eficientes, requieren poco espacio y se han construido en nuestro país, resultan sistemas tecnológicamente más complejos, con altos costos de inversión, operación y mantenimiento.
- Los esquemas E-10, E-11 y E-12, son completamente viables, la superficie que requieren suelen ser grandes, pero no constituye un problema para el caso de Palenque. Los costos de operación y mantenimiento no son altos y tecnológicamente no son complejos. Para los esquemas E-10 y E-11, se tienen menos experiencias en nuestro país.
- Los esquemas E-13 y E-14, aunque son altamente eficientes y los costos de operación y mantenimiento no son altos, los UASB no han sido construidos en nuestro país y no se tiene experiencia de su funcionamiento.

Por todo lo anterior, proponemos para el poblado de Palenque como sistema para el tratamiento de las aguas residuales el Esquema **E-12: Cámara de rejillas + Desarenador + laguna facultativa**.

Para estos sistemas de tratamiento el desarenador no es imprescindible de manera que se puede eliminar dentro del esquema de tratamiento sin generar problemas de funcionamiento.

El esquema para el poblado quedará:

Cámara de rejillas con obra de medición de caudal + laguna facultativa

3.3 Las lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización clasifican como sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales ya sean domésticas o industriales. Pueden o no llevar pretratamiento y tienen una excelente respuesta ante cambios ambientales. Son una de las formas más sencillas de tratamiento de aguas residuales y basan su acción depuradora en su propia población microbiana.

Generalmente no llevan partes mecánicas (salvo en el caso de lagunas aereadas) por lo que su operación y mantenimiento es de bajo costo. En el mundo se han utilizado en diferentes latitudes, desde lugares con climas fríos, hasta lugares con climas muy cálidos. En nuestro país se han utilizado bastante, según las estadísticas existen más de dos mil construidas.

Definición de laguna de estabilización: Una laguna de estabilización de aguas residuales se define como una estructura simple para embalsar agua de poca profundidad (1 a 4 m) y con períodos de retención de magnitud considerable (1 – 40 días).

3.3.1 Objetivos de las lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización se construyen con los siguientes objetivos:

- Protección epidemiológica, a través de la disminución de organismos patógenos presentes en las aguas residuales y dificultando la transmisión de los mismos.
- Protección ecológica, a través de la disminución de la carga orgánica (DBO) de las aguas residuales, lográndose de esta manera que el nivel de oxígeno disuelto en los cuerpos receptores se vea menos comprometido, con el consiguiente beneficio para su reúso.
- Reúso directo del agua servida tratada en la agricultura, así como en piscicultura, evitando los riesgos e inconvenientes del reúso de aguas servidas crudas.

3.3.2 Ventajas y desventajas de la utilización de lagunas de estabilización

A continuación, se muestran las principales ventajas e inconvenientes que presenta el uso de las lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas residuales. (Dambreville, 2016).

Ventajas

- Presentan una alta eficiencia
- Su costo inicial bajo
- Los gastos de operación y mantenimiento son bajos

- Gran capacidad para recibir sobrecargas hidráulicas y orgánicas
- Son simples de operar
- No requieren de equipamiento mecánico

Desventajas

- Requieren grandes extensiones de terreno
- Pueden ocasionar problemas de olores
- Pueden producir vectores
- En épocas de frío disminuye su eficiencia
- Si el precio del terreno es alto puede salir costosa

3.3.3 Recomendaciones para el diseño de las lagunas facultativas en Cuba

A pesar de ser el sistema de tratamiento de aguas residuales más utilizado en Cuba, no son muchos los estudios que se han realizado sobre estas. De manera que se han utilizado indiscriminadamente los diferentes métodos de diseño y muchos de los criterios de diseño asociados a estos.

En el año 2015 el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, publicó el “**Manual de Lagunas de Estabilización**”, el cual constituye uno de los mejores materiales relacionados con el tema que se han publicado en nuestro país, donde los autores realizan recomendaciones a utilizar en Cuba para el diseño de las lagunas de estabilización.

Todas las recomendaciones y criterios que muestran en este trabajo para el diseño de lagunas facultativas, se basan en dicha bibliografía. (Gutiérrez y García, 2015).

3.3.3.1 Criterios de diseño

- El rango de carga orgánica superficial máxima está comprendido entre 180 – 320 KgDBO₅/ha.d, lo que se aproxima bien a la expresión de Mara para la carga orgánica máxima.

$$L_{S_{max}} = 350(1,107 - 0,002 * T)^{(T-25)}$$

- La profundidad se selecciona entre 1,5 – 2,0 metros, pudiendo ser algo mayor, pero inferior a 2,5 metros.

- La relación largo - ancho (L/B) está entre 1,0 – 1,5, aunque puede ser mayor y se recomienda.
- El tiempo de retención hidráulico puede variar entre 10 - 20 días de acuerdo con el objetivo del tratamiento.
- No se recomienda diseñar lagunas facultativas con áreas mayores de 2,00 ha, es mejor hacer más lagunas de menor superficie, lo que está de acuerdo con los caudales afluentes usuales en Cuba, para este tipo de tratamiento.
- Se recomienda mantener un borde libre de 0,5 a 0,8 m para minimizar los efectos del viento y el oleaje, así como absorber temporalmente sobrecargas hidráulicas.

3.3.3.2 Métodos de diseño

- **Modelo de mezcla completa**

El dimensionamiento de lagunas facultativas primarias parte de la aplicación del método racional propuesto por Marais y Shaw (1961) o Gloyna (1971), donde se asume el modelo de mezcla completa.

- Para la remoción de DBO₅:

$$Se = \frac{So}{Kf * R + 1}$$

Donde:

Se: DBO₅ del efluente (mg/L)

So: DBO₅ del afluente (mg/L)

R: Tiempo de retención (días)

Kf: Constante cinética de reacción para DBO₅ (d⁻¹)

La constante cinética es un parámetro que depende de la temperatura y de las características del agua a residual a tratar. Se propone que para el modelo de mezcla completa se utilicen las relaciones de Marais o Gloyna.

Método de Marais y Shaw (1961): $Kf_T = 0,3 * 1,05^{(T-20)}$

Método de Gloyna (1971): $Kf_T = 1,2 * 1,085^{(T-35)}$

Siendo **T** es la temperatura media del aire en el mes más frío (°C).

- Para la remoción de Coliformes Fecales:

$$Ne = \frac{No}{Kbf * R + 1}$$

Donde:

Ne: NMP coliformes fecales en el efluente /100ML

No: NMP coliformes fecales en el afluente /100ML

Kbf: Constante cinética de reacción de coliformes fecales (d⁻¹)

Para el constante cinética, se recomienda utilizar la expresión siguiente:

Método de Mara (2001): $Kbf_T = 2,6 * 1,15^{(T-20)}$

- **Modelo de flujo disperso**

A partir de la ecuación desarrollada por Wehner y Wilhelm (1956), para reactores que operan entre mezcla completa y régimen de flujo pistón. Thirumurthi (1969) propuso un modelo para el diseño de lagunas facultativas, que es también aplicable a lagunas de maduración. El autor consideró que no existe un flujo de mezcla completa ni de pistón, sino un comportamiento intermedio considerado de flujo disperso. La ecuación simplificada de Thirumurthi es aplicable tanto para la remoción de DBO₅ como para la remoción de coliformes fecales es:

- Para remoción de DBO₅:

$$\frac{Se}{So} = \frac{4 * a * e^{\left(\frac{1-a}{2*d}\right)}}{(1 + a)^2}$$

Donde:

a: coeficiente, se determina por: $a = \sqrt{1 + 4 * kf * R * d}$

Kf: constante cinética de remoción de DBO: $Kf_T = 0,15 * 1,07^{(T-20)}$

T: temperatura del aire en el mes más frío, (°C)

d: coeficiente de dispersión, se recomienda utilizar cualesquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Yáñez (1992): } d = \frac{L/B}{-0,2618 + 0,25392 * \left(\frac{L}{B}\right) + 1,01368 * \left(\frac{L}{B}\right)^2}$$

$$\text{Sáenz (1992): } d = \frac{0,158 * [R(B+2*H)]^{0,489} * B^{1,5111}}{(T+42,5)^{0,734} * (L*H)^{1,489}}$$

Donde:

L/B: relación larga/ancho de la laguna.

H: profundidad de la laguna (m).

El resto de los parámetros se definen igual.

- Para remoción de coliformes fecales:

$$\frac{Ne}{No} = \frac{4 * a * e^{\left(\frac{1-a}{2*d}\right)}}{(1+a)^2}$$

a: coeficiente, se determina por: $a = \sqrt{1 + 4 * kbf * R * d}$

Kbf: Constante cinética de remoción de CF: $Kbf_T = 0,6 * 1,07^{(T-20)}$

El coeficiente **d** se determinan de igual manera.

3.3.4 Diseño constructivo de las lagunas

Al agregar taludes se tendrá una reducción del volumen de la celda, a mayor relación vertical/horizontal (1/m) mayor será la reducción, el tiempo de retención será menor, se cambia de una geometría cuadrada o rectangular a una geometría de pirámide truncada.

Para dimensionar la laguna lo más común es ubicar los valores iniciales (L y B) al nivel medio (Hm) de la laguna, o sea $H_m = H/2$. Luego calcular los valores de largo y ancho en el fondo de la laguna (L_{fon} y B_{fon}), en el nivel de operación normal (superficie) de la laguna (L_{ope} y B_{ope}) y en el borde superior (nivel del dique) de la laguna (L_{borde} y B_{borde}), al hacer estas correcciones, los valores de área y volumen cambian al nivel de

operación (A_{ope} , A_{fon} y V_{ope}), estos son necesarios calcularlos para determinar las cargas reales impuestas a la laguna. (Ver figura 3.1).

- **Dimensiones del fondo:** $L_{fon} = [L - (2 * Hm * m)]$

$$B_{fon} = [B - (2 * Hm * m)]$$

$$A_{fon} = L_{fon} * B_{fon}$$

- **Dimensiones en el nivel normal operación:** $L_{ope} = [L + (2 * Hm * m)]$

$$B_{ope} = [B + (2 * Hm * m)]$$

$$A_{ope} = L_{ope} * B_{ope}$$

- **Dimensiones en el borde de la laguna:** $L_{sup} = [L_{ope} + (2 * bl * m)]$

$$B_{sup} = [B_{ope} + (2 * bl * m)]$$

- **Volumen del nivel de operación:** $V_{ope} = \frac{H}{3} [A_{ope} + A_{fon} + \sqrt{A_{ope} * A_{fon}}]$

Donde:

m: valor horizontal de la relación de talud (1/m)

bl: borde libre, (m)

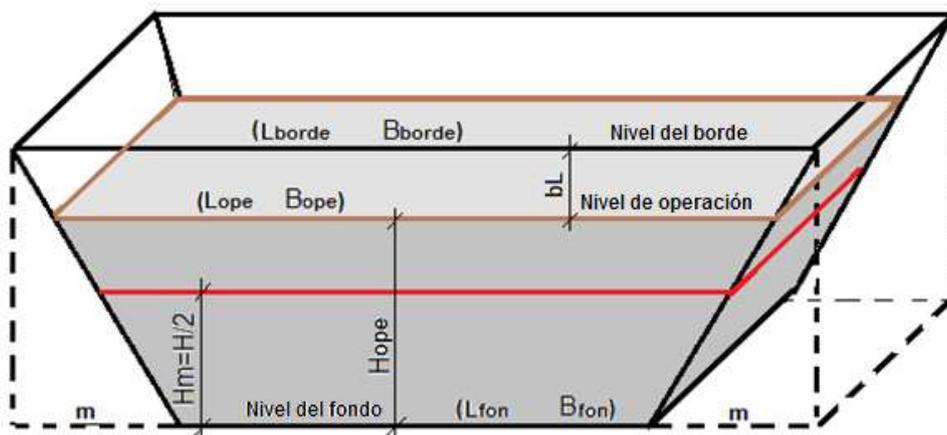


Figura 3.1 Parámetros geométricos de una laguna

3.3.5 Pretratamiento y medición de caudales

Las unidades de pretratamiento se sitúan en la entrada al sistema y tienen como objetivo eliminar, de las aguas residuales, todos aquellos elementos de tamaño considerable que pueden afectar al funcionamiento del sistema depurador, así como las arenas que por su acción mecánica y elementos minerales puedan originar sedimentación a lo largo de las conducciones.

Esta práctica, aunque muy recomendable en sistemas con lagunas, generalmente ha sido poco aplicada en las lagunas construidas en el país. Los pretratamientos que con más frecuencia se utilizan para sistemas con lagunas de estabilización que tratan aguas residuales domésticas son el desbaste (rejas) y el desarenado.

3.3.6 Sistemas de entrada y de salida

La cantidad de conductos de entrada y de salida suele ser un número par, con vistas a evitar "caminos preferenciales" en la circulación de las aguas. La cantidad dependerá de la relación (L/B), aunque en las salidas esta puede ser menor, en dependencia del diseño de la estructura de salida.

Con frecuencia las tuberías de entrada descargan sobre una losa de concreto de aproximadamente 1 m de diámetro cuando van sumergidas y en el caso de entradas sobre el nivel del agua la descarga se realiza sobre un revestimiento de piedra de aproximadamente 1 x 2 m justo debajo de la boca de la tubería para evitar la socavación del fondo de la laguna durante la fase de llenado.

CAPITULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

4.1 Descripción del Proyecto

El proyecto consiste en realizar el diseño hidráulico y constructivo del sistema de tratamiento de las aguas residuales del poblado Palenque, el cual consiste en una cámara de rejillas de limpieza manual que tiene incluido una obra de medición de caudales (vertedor V de pared delgada) y una laguna de estabilización de tipo facultativa. La laguna se diseñará por el método tradicional, aplicando el modelo de mezcla completa y el modelo de flujo disperso respectivamente.

4.2 Diseño de los componentes del sistema

4.2.1 Diseño del sistema de medición de caudales (vertedor en V)

La estructura encargada para la medición del caudal será un vertedor triangular de pared delgada con contracción parcial de la lámina recomendable para caudales pequeños, según la ecuación propuesta por King para cualquier tipo de vertedor (Dambreville, 2016).

Datos Básicos:

$Q_{med} = 466,5 \text{ m}^3/\text{d} = 5,4 \text{ L/s}$ (caudal de proyecto, el que trata el sistema)

$Q_{dis} = 1584,9 \text{ m}^3/\text{d} = 18,3 \text{ L/s}$ (caudal máximo de diseño del vertedor)

$\Theta = 90^\circ$ (ángulo del vertedor)

Ecuación de diseño:

$$Q_{cal} = 1.38 * 1 * H^{2.5}$$

Restricciones de diseño:

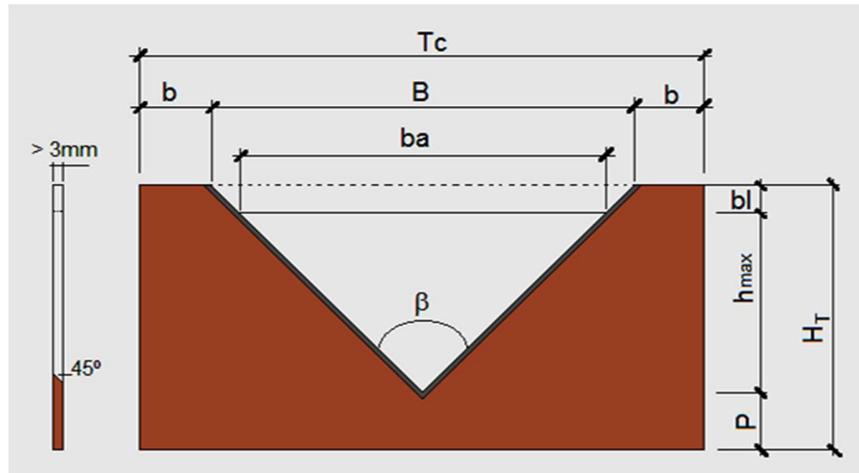
$h/P \leq$	1,3
$h/Tc \leq$	0,4
h	5 - 60 cm
$P \geq$	10 cm
Tc	60 - 90 cm

Cálculo de la carga máxima para caudal de diseño:

$$H = \left(\frac{Q}{1,38 * 1000} \right)^{2/5} = \left(\frac{18,3}{1,38 * 1000} \right)^{2/5} = 0,177 * 100 = 17,7 \text{ cm}$$

Dimensionamiento:

β	90°
Tc (cm)	71,5
B (cm)	45,5
ba (cm)	27,87
b (cm)	13
bl(cm)	5
P (cm)	13
hmax (cm)	17,7
H _T (cm)	35,7



Chequeo de las restricciones:

Restricciones		Resultados	
h/P ≤	1,3	h/P =	1,3
h/Tc ≤	0,4	h/Tc =	0,24
h	5 - 60 cm	h =	13,93 cm
P ≥	10 cm	P =	13 cm
Tc	60 - 90 cm	Tc =	71,5 cm

Cálculo de la carga para caudal de proyecto:

$$H = \left(\frac{Q}{1,38 * 1000} \right)^{2/5} = \left(\frac{5,4}{1,38 * 1000} \right)^{2/5} = 0,109 * 100 = 10,9 \text{ cm}$$

4.3.2 Diseño de la cámara de rejas

El pretratamiento consiste en un sistema de cámara de rejas de limpieza manual, debido a que este tipo de rejas es el más común para sistemas lagunares pequeños. En la tabla 4.1 se presentan los principales criterios de diseño para cámaras de rejas de limpieza manual:

Tabla 4.1. Criterios de diseño para cámaras de rejas de limpieza manual

Parámetro	Criterio recomendado
Forma de barra	Rectangular, circular, aerodinámica No debe utilizar barras de refuerzo
Ancho de barra	5—15 mm
Espesor de barra	25—40 mm
Espaciamiento (abertura) entre barras	25—50 mm 50 mm recomendado
Inclinación con la vertical	30—60°
Plataforma de drenaje	Suficiente para el almacenamiento temporal del material retenido en condiciones sanitarias
Canaleta de desvío (By-pass)	Suficiente para desviar el caudal máximo durante una emergencia
Material de barras y plataforma de drenaje	Acero inoxidable o galvanizado; aluminio
Tiempo de retención en canal de aproximación	≥ 3 s
Largo de canal de aproximación	$\geq 1,35$ m
Velocidad a través de las barras	0,3-0,6 m/s para caudal promedio ≤ 0.9 m/s para caudal máximo
Velocidad de aproximación a las rejas	0,45m/s para caudal medio
Pérdida de carga máxima	0,15 m
Escalón al pie de la reja	10 - 15cm
Borde libre	≥ 20 cm
Ancho mínimo donde se ubicarán las rejas	0,4m
Disposición final de residuos	Solución técnica utilizando métodos sanitarios

Datos generales:

Caudal medio (Q_{med}) = 466,5 m³/d = 5,4 L/s

Diámetro de las barras (S) = 1,27 cm (barras de acero liso de \varnothing 1/2”).

Separación entre barras (b) = 5 cm

Ángulo de inclinación (α) = 55°

Diámetro del conducto tributario (\varnothing CT) = 200 mm

Velocidad en el canal de aproximación (V_{ap}) = 0,45 m/s

Diseño

- Asumir ancho del canal (valor mayor o igual al ancho del vertedor)

$$W = 0,71 \text{ m}$$

- Altura de agua:

$$h = \frac{Q}{W * V_{ap}} = \frac{5,4}{0,6 * 0,45 * 1000} = 0,02 \text{ m}$$

- Longitud sumergida:

$$L_s = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{0,017 \text{ m}}{\sin 55} = 0,021 \text{ m}$$

- Número de barras:

$$n = \frac{W - b}{S + b} = \frac{71 - 5}{1,27 + 5} = 10,52 = 11 \text{ barras}$$

- Ancho real de la reja:

$$W = S * n + b(n + 1) = 1,27 * 11 + 5(11 + 1) = 74 \text{ cm} = 0,74 \text{ m}$$

- Ancho neto de canal:

$$W_n = b(n + 1) = 5(11 + 1) = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$$

- Área neta sumergida:

$$A_{ns} = 0,75 * W_n * L_s = 0,75 * 0,6 \text{ m} * 0,021 \text{ m} = 0,0093 \text{ m}^2$$

- Velocidad entre las rejillas:

$$V_{re} = \frac{Q}{A_n * 1000} = \frac{5,4}{0,0093 * 1000} = 0,581 \text{ m/s}$$

- Pérdidas de carga:

$$h_f = \beta * k * \left(\frac{S}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{V_{re}^2}{2g}\right) * \text{sen} \alpha = 1,79 * 3 * \left(\frac{1,27}{5}\right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{0,581^2}{2 * 9,81}\right) \text{sen} 55^\circ = 0,012 \text{ m}$$

- Dimensionamiento de la cámara

- Longitud de la transición de entrada:

$$L_1 = 1,37 * (W - \emptyset CT) = 1,37 * (0,74 \text{ m} - 0,2) = 0,74 \text{ m}$$

- Longitud del canal de aproximación:

$$L_2 = 1,35 - L_1 = 1,35 - 0,74 = 0,61 \text{ m}$$

- Longitud de la cámara:

Asumiendo un borde libre $bl = 0,3 \text{ m}$ y un ancho de la plataforma de drenaje $l = 0,5 \text{ m}$

$$L_3 = \frac{h + bl}{\sin \alpha} + l + W = \frac{0,017 \text{ m} + 0,4 \text{ m}}{\sin 55} + 0,5 + 0,74 \text{ m} = 1,75 \text{ m}$$

- Longitud de la transición de salida:

$$L_4 = \frac{L_1}{2} = \frac{0,74}{2} = 0,37 \text{ m}$$

- Longitud total de la cámara:

$$L_c = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 0,74 + 0,61 + 1,75 + 0,37 = 3,47 \text{ m}$$

- Escalón al pie de la reja: 10 cm

- Altura total de la cámara: 53 cm en el canal de aproximación.

63 cm en el canal de salida.

- Resumen del dimensionamiento

h	Is	n	W_{real}	W_{neto}	A_{neta}	V_{rejas}	hf	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	L_T	H_{TCa}	H_{TCs}
m	m		m	m	m ²	m/s	m	m	m	m	m	m	m	m
0,017	0,021	11	0,740	0,60	0,0093	0,5816	0,0117	0,740	0,61	1,75	0,37	3,47	0,53	0,63

En el ANEXO 1 se presenta una hoja Excel con el cálculo de la cámara de rejas.

En el ANEXO 2 se presenta un plano de la cámara de rejas con el vertedor.

4.3.3 Diseño de la laguna facultativa

Para el diseño de la laguna de estabilización utilizando el método tradicional se aplicarán 2 modelos: el modelo de mezcla completa y de flujo disperso.

Datos generales

- Caudal de medio (Qmed): 466,5 m³/d = 5,4L/s (ver epígrafe 3.1).
- Caudal máximo (Qmax): 1584,9 m³/d = 18,3L/s (ver epígrafe 3.1).
- Aporte per cápita de DBO₅: 40 g/hab.d (ver epígrafe 3.1).
- DBO₅ a la entrada (So): 290,7 mg/L (Según el aporte per cápita de DBO₅ y la dotación. Ver epígrafe 3.1).
- Carga superficial máxima permisible (Ls): (Se recomienda utilizar para el cálculo la ecuación propuesta por Mara (1987), ya que los resultados se acercan más a los criterios utilizados en Cuba).

$$L_s = 350 * (1,107 - 0,002T)^{(T-25)} = 234,53 \text{ KgDBO}_5 / \text{ha.d}$$

- DBO₅ a la salida (Se): 60 mg/L (Según la NC- 27:2012: “Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado”. El cuerpo receptor clasifica como clase C: ríos de menor valor desde el punto de vista del uso de sus aguas, debido a su calidad).
- Temperatura del aire en el mes más frío (T): 19°C (Según el Anuario estadístico de Guantánamo 2016).
- Tiempo de retención (R): 17 días (Según la bibliografía especializada, este valor se encuentra entre 10 y 20 días).
- Relación (L/W): 2 (Relación largo/ancho L/W entre 1,2-2,5).
- Profundidad (H): 1,5 m (Según la bibliografía especializada para este tipo de lagunas, la profundidad se selecciona entre 1,5 - 2,0 m).
- Talud (m): 1:3 (Por criterio de diseño este talud resultaría perfectamente estable).

- Borde Libre (Bl): 0,5 m (Por criterio de diseño se recomienda mantener un borde libre que oscile entre 0,4 - 0,8 m).

Predimensionamiento de la laguna

- Volumen de la laguna:

$$V = Qd * R = 466,5 * 17 = 7929,9 \text{ m}^3$$

- Área superficial:

$$As = \frac{V}{H} = \frac{7929,9}{1,5} = 5286,6 \text{ m}^2$$

- Ancho:

$$B = \sqrt{\frac{As}{L/B}} = \sqrt{\frac{5286,6}{2}} = 51,4 \text{ m}$$

- Longitud:

$$L = \frac{L}{B} * B = 102,8 \text{ m}$$

Dimensionamiento de la laguna con talud

- Longitud del fondo:

$$L_{fon} = L - 2 * H_{med} * m = 102,8 - 2 * 0,75 * 3 = 98,3 \text{ m}$$

- Ancho del fondo:

$$B_{fon} = B - 2 * H_{med} * m = 51,4 - 2 * 0,75 * 3 = 46,9 = 47,0 \text{ m}$$

- Área del fondo:

$$A_{fon} = B_{fon} * L_{fon} = 47,0 * 98,3 = 4612,77 \text{ m}^2$$

- Longitud del nivel de operación:

$$L_{ope} = L + 2 * H_{med} * m = 102,8 + 2 * 0,75 * 3 = 107,3 \text{ m}$$

- Ancho del nivel de operación:

$$B_{ope} = B + 2 * H_{med} * m = 51,4 + 0,75 * 3 = 56,0 \text{ m}$$

- Área del nivel de operación:

$$A_{ope} = L_{ope} * B_{ope} = 107,3 * 56,0 = 6000,9 \text{ m}^2$$

- Carga orgánica impuesta:

$$LS_{imp} = \frac{Q * S_o * 10}{A_{ope}} = \frac{466,5 * 290,7 * 10}{6000,9} = 225,97 \text{ KgDBO}_5/\text{Ha d}$$

Es menor que la carga límite máxima, y representa el 76,6 % de la Carga superficial máxima permisible para lagunas facultativas, por tanto, esta laguna podrá asumir cargas orgánicas mayores.

- Volumen del nivel de operación:

$$V_{ope} = \frac{H}{3} * (A_{ope} + A_{fon} + \sqrt{A_{ope} * A_{fon}})$$

$$V_{ope} = \frac{1,5}{3} * (6000,9 + 4612,77 + \sqrt{6000,9 * 4612,77}) = 7937,5 \text{ m}^3$$

- Longitud a nivel de la corona del talud:

$$L_{sup} = L_{ope} + (2 * Bl * m) = 107,3 * (2 * 0,5 * 3) = 110,3 \text{ m}$$

- Ancho a nivel de la corona del talud:

$$B_{sup} = B_{ope} + (2 * Bl * m) = 56 + (2 * 0,5 * 3) = 59,0 \text{ m}$$

- Área a nivel de la corona del talud:

$$A_{sup} = L_{sup} * B_{sup} = 110,3 * 59,0 = 6507,7 \text{ m}^2$$

Cálculo de la eficiencia por el modelo de mezcla completa

- Coeficiente cinético de DBO₅: (Método de Marais y Shaw)

$$K'fac = 0,30 * 1,05^{(T-20)} = 0,286 d^{-1}$$

- DBO₅ en el efluente:

$$Se = \frac{So}{K'fac * R + 1} = \frac{290,7}{0,286 * 17 + 1} = 49,63 mg/L$$

La DBO a la salida de la laguna cumple con las restricciones de vertimiento, es menor que 60 mg/L.

- Eficiencia:

$$E = \frac{So - Se}{So} = \frac{290,7 - 49,5}{290,7} * 100 = 82,9 \%$$

Cálculo de la eficiencia por el modelo de mezcla flujo disperso

- Coeficiente de dispersión: (Método de Yáñez)

$$d = \frac{L/B}{-0.2618 + 0.25392 * \frac{L}{B} + 1.01368 * \frac{L^2}{B^2}} = \frac{2}{-0.2618 + 0.25392 * 2 + 1.01368 * 2^2} = 0,465$$

- Coeficiente cinético de DBO₅:

$$K'fac = 0,15 * 1,07^{(T-20)} = 0,140 d^{-1}$$

- Coeficiente a:

$$a = \sqrt{1 + 4 * K'fac * d * R} = \sqrt{1 + 4 * 0,14 * 0,465 * 17} = 2,331$$

- DBO₅ en el efluente:

$$Se = \frac{So * 4 * e^{\left(\frac{1-a}{2*d}\right)}}{(1+a)^2} = \frac{290,7 * 4 * e^{\left(\frac{1-2,331}{2*0,465}\right)}}{(1+2,331)^2} = 58,4 mg/L$$

La DBO a la salida de la laguna cumple con las restricciones de vertimiento, es menor que 60 mg/L.

- Eficiencia:

$$E_{DBO5} = \frac{So - Se}{So} * 100 = \frac{290,7 - 58,4}{290,7} * 100 = 79,9 \%$$

- Resumen del dimensionamiento

Modelo cinético	L_{fon}	B_{fon}	L_{ope}	B_{ope}	Se	E_{R(DBO)}
	m	m	m	m	mg/L	(%)
Mezcla completa	98,3	47,0	107,3	56,0	49,63	82,9
Flujo disperso	98,3	47,0	107,3	56,0	58,4	79,9

En el ANEXO 3 se presenta una hoja Excel con el cálculo de la laguna.

En el ANEXO 4 se presenta un plano de la laguna.

CONCLUSIONES

1. Del análisis de la literatura, se establecen los esquemas de tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades y de estos se seleccionan los más utilizados en Cuba. Además, se escoge una metodología sencilla para la selección.
2. El poblado Palenque de Yateras clasifica como una pequeña comunidad, por lo que se pueden aplicar los principios que se establecen para la selección de tecnologías en pequeñas comunidades.
3. Con la información del área de estudio, se aplicó la matriz de decisión y se obtiene que se pueden aplicar para el tratamiento de las aguas residuales 10 de los 14 esquemas de tratamiento, ya que la disponibilidad de superficie no constituye un problema.
4. Del análisis de las variantes seleccionadas, se concluye que las más viable para el poblado Palenque es el esquema E - 12 constituido por una Cámara de rejas con obra de medición de caudal más una laguna de estabilización tipo facultativa.
5. Se diseñó el tren de tratamiento escogido, optimizando al máximo las dimensiones de la laguna. Esto puede traer como consecuencia que, un aumento puntual de la carga contaminante, pueda traer consigo un incumplimiento de las restricciones del vertimiento.
6. Los dos métodos utilizados para el diseño de la laguna de estabilización ofrecen resultados de eficiencia bastante similares.

RECOMENDACIONES

Recomendamos que los resultados de este trabajo sean sometidos a un exhaustivo análisis por el equipo de proyecto de la UEB de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de la provincia Guantánamo.

BIBLIOGRAFÍA

- Dambreville, Y. P. (2016). *Soluciones de diseño para la laguna de estabilización del poblado El Cristo*. Santiago de Cuba.
- INRH. (2012). Política Nacional del Agua.
- Instituto CINARA. (2005). Esquemas Tecnológicos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas y Manejo de Lodos Considerados en el Modelo Conceptual.
- Instituto Cinara, Universidad del Valle. (2015). *GUIA DE SELECCION DE TECNOLOGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS*. Cali, Colombia.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (s.f.). *Selección de alternativas para el tratamiento de aguas residuales*. MEXICO.
- Instituto Tecnológico de Canarias. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población*. CANARIA-ESPAÑA.
- Javier Mazorra Aguiar, M. M. (s.f.). "ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA IDÓNEA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA COMUNIDAD DE FALÍA, DELTA DEL SALOUM, SENEGAL.". DELTA DEL SALOUM, SENEGAL.
- Joaquín B. Gutiérrez Díaz, J. M. (2015). *MANUAL DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN*. Santiago de Cuba.
- Manotupa Dueñas, L. F. (2018). *Propuesta elaboración de una guía para el proceso de diseño en proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú*. Lima.
- MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. (2010). *Manual para la implantación*. ESPAÑA.
- NC 973:2013: "Determinación de la demanda del agua potable en poblaciones urbanas"

- NC 1230-2018 “Especificaciones para el diseño y construcción de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial urbano”.
- NC- 27:2012: “Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado”).
- ONEI. (2016).
- Pérez., R. L. (2016). *Propuesta de Rehabilitación de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad Marta Abreu de las Villas*. Santa Clara.
- Rodríguez Miranda, J. P. (2015). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*.
- Rodríguez, G. L. (2009). *El tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas como alternativa sostenible para el saneamiento periurbano en Cuba*. Santiago de Cuba.
- Rodriguez, J. J. (s.f.). *Saneamiento y depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*.
- Salazar, A. J. (Junio 2016). *Propuesta de una estación experimental para el estudio y evaluación de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal*. Santiago de Cuba.
- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. (2013). *SELECCION DE TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. MEXICO.
- UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA. (2010). *Guía para la Selección de Tecnologías de Depuración de Aguas*. Loja - Ecuador: UTPL.
- VILLADA, J. C. (2004). *ASPECTOS CLAVES PARA LA SELECCIÓN DE ESQUEMAS DESCENTRALIZADOS EN EL MANEJO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN COLOMBIA*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Sanitario, SANTIAGO DE CALI-COLOMBIA.
- wikipedia. (2014). Aguas Residuales.

ANEXO 1 CALCULO DE LA CÁMARA DE REJAS

LIBRO DE CÁLCULO [Modo de compatibilidad] - Excel

Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

Pegar Fuente Alineación Número Estilos Celdas Modificar

V12

CÁMARA DE REJAS															
DATOS			VARIABLES CALCULADAS												
Caudal (Q)	5,40 L/s		h	ls	n	Wreal	Wneto	Aneta	Vrejas	hf	L1	L2	L3	L4	Lt
Ancho de canal (W)	0,7 m		m	m		m	m	m ²	m/s	m	m	m	m	m	m
Velocidad de aproximación (V_{ap})	0,5 m/s		0,017	0,021	11	0,740	0,60	0,0093	0,5816	0,0117	0,740	0,61	1,75	0,37	3,47
Angulo de inclinación de las rejas (α)	55 °														
Separación entre barras (b)	5 cm														
Diámetro de las barras (s)	1,3 cm														
Diámetro del conducto tributario (ϕ_{CT})	200 mm														
Borde libre (b_l)	0,4 m														
Longitud de la plataforma de drenaje (l)	0,5 m														

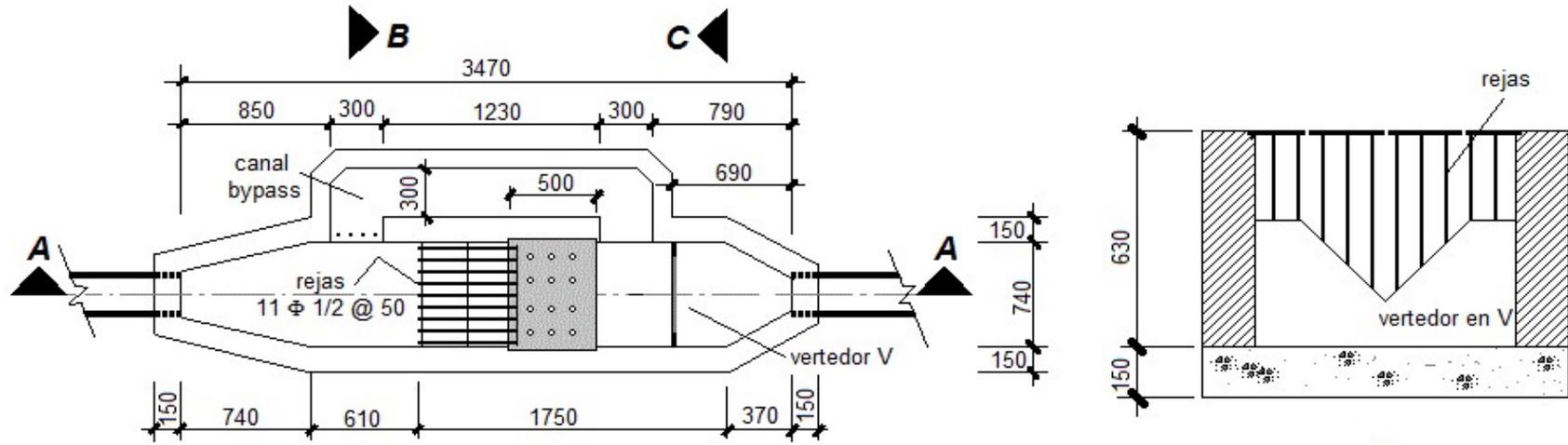
Diagrama de la cámara de rejas que muestra un canal de bypass, rejas, un vertedor V y una plataforma de drenaje. Se indican las longitudes L1, L2, L3, L4 y la longitud total Lt.

Hoja2 Desarenador Desgrasador Sedimentador Primario Filtro Biológico ...

Listo 120%

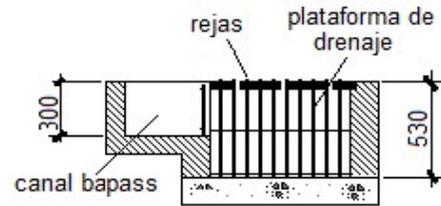
Buscar en la web y en Windows 22:35 23/05/2019

ANEXO 2 PLANO DE LA CÁMARA DE REJAS CON EL VERTEDOR

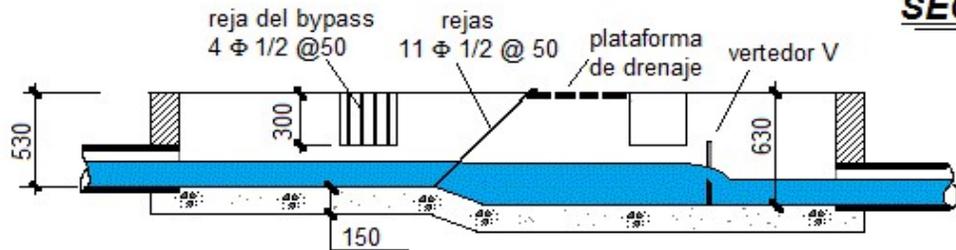


PLANTA

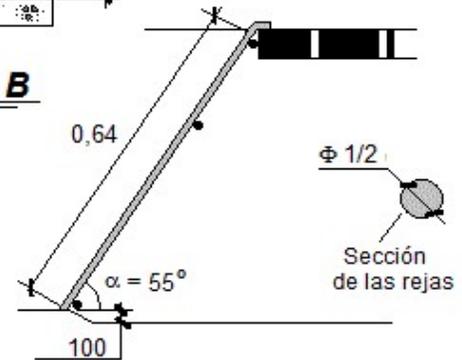
SECCIÓN C - C



SECCIÓN B - B



SECCIÓN A - A



DETALLE DE REJA

ANEXO 3 CÁLCULO DE LA LAGUNA

DISEÑO DE LAGUNAS - Excel

Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Iniciar sesión Compartir

Calibri 12 Fuente Alineación Número Estilos Celdas

Portapapeles Pegar Fuente Alineación Número Estilos Celdas

E19 $= (B21/3) * (E18 + E14 + (E18 * E14) ^ 0,5)$

DISEÑO DE LAGUNAS FACULTATIVAS											
DATOS			DISEÑO GEOMÉTRICO			MÉTODO DE MEZCLA COMPLETA			MÉTODO DE FLUJO DISPERSO		
Población de diseño (hab)	<i>P</i>	3390	Volumen de la laguna	<i>V</i>	7929,9 m ³	Coef. cinético DBO	<i>K'fac</i>	0,286 d ⁻¹	Coef. de dispersión	<i>d</i>	0,465
Dotación (L/hab.d)	<i>Dot</i>	172	Área superficial	<i>As</i>	5286,6 m ²	DBO ₅ efluente	<i>Se</i>	49,63 mg/L	Coef. cinético de DB	<i>K'fac</i>	0,140 d ⁻¹
Coef. Retorno al alcantarillado (%)	<i>r</i>	80	Longitud	<i>L</i>	102,8 m	Eficiencia de DBO	<i>E_{DBO}</i>	82,9 %	Coeficiente	<i>a</i>	2,331
Aporte per cápita de DBO (g/hab.d)	<i>Ls per</i>	40	Ancho	<i>W</i>	51,4 m	Coef. cinético CF	<i>K'bfac</i>	2,261 d ⁻¹	DBO ₅ efluente	<i>Se</i>	58,40 mg/L
Aporte per cápita de CF (NMP/hab.d)	<i>CFper</i>	2E+09	Carga org. impuesta	<i>Ls imp</i>	256,5 Kg/ha.d	CF efluente	<i>Ne</i>	368580 NMP/100ml	Eficiencia n de DBO	<i>E_{DBO}</i>	79,9 %
Temperatura del aire mes más frío (°C)	<i>T</i>	19	Longitud fondo	<i>Lfon</i>	98,3 m	Eficiencia de CF	<i>E_{CF}</i>	97,46 %	Coef. cinético de CF	<i>K'bfac</i>	0,561 d ⁻¹
Caudal de diseño (m ³ /d)	<i>Qd</i>	466,46	Ancho de fondo	<i>Wfon</i>	46,9 m				Coeficiente	<i>a</i>	4,328
Caudal de diseño (L/s)	<i>Qd</i>	5,40	Área de fondo	<i>Afon</i>	4612,77 m ²				CF efluente	<i>Ne</i>	247508 NMP/100ml
DBO ₅ afluente (mg/L)	<i>So</i>	290,70	Longitud nivel operación	<i>Lope</i>	107,3 m				Eficiencia de CF	<i>E_{CF}</i>	98,30 %
DBO ₅ efluente (mg/L)	<i>Se</i>	60	Ancho nivel operación	<i>Wope</i>	55,9 m						
CF afluente (NMP/100ml)	<i>No</i>	14534884	Área nivel operación	<i>Aope</i>	6000,9 m ²						
CF efluente (NMP/100ml)	<i>Ne</i>	1E+03	Volumen nivel operación	<i>Vope</i>	7937,5 m ³						
Carga orgánica máx. de diseño (KgDBO ₅ /ha.d)	<i>Ls</i>	234,53	Carga org. impuesta	<i>Ls imp</i>	225,97 Kg/ha.d						
Tiempo de retención (d)	<i>R</i>	17									
Relación largo/ancho	<i>L/W</i>	2									
Profundidad (m)	<i>Z</i>	1,5									
Talud	<i>m</i>	3									

LAGUNAS FACULTATIVAS LAGUNAS FACULTATIVAS CON BAFLES Hoja2 Hoja3

Listo Buscar en la web y en Windows 22:23 23/05/2019 86%

ANEXO 4 PLANO DE LA LAGUNA

