

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN  
DE PLANTAS COMPACTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES MBBR EN COMUNIDADES PEQUEÑAS

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. Frank Robinson Curasi Trujillano**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

TACNA – PERÚ  
2025

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**“ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
PLANTAS COMPACTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
MBBR EN COMUNIDADES PEQUEÑAS”**

Tesis sustentada y aprobada el día 01 de agosto del 2025 estando integrado  
el Jurado Calificador por:

**PRESIDENTE**

  
: .....  
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga

**SECRETARIO**

  
: .....  
Mag. Ing. Julia Cleila Laura Quispe

**VOCAL**

  
: .....  
Ph. D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

**ASESOR DE TESIS**

  
: .....  
Ph. D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Ph. D. Edwin Martin Pino Vargas, en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N° 852-2024-FIAG/UNJBG del 11 de noviembre del 2024, del Trabajo de Tesis titulado: "ESTUDIO TECNICO Y ECONOMICO PARA LA IMPLEMENTACION DE PLANTAS COMPACTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MBBR EN COMUNIDADES PEQUEÑAS". Presentado por el Bach. Frank Robinson Curasi Trujillano. Para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

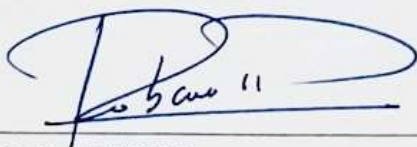
Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 06 %. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de Ingeniero Civil, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 01 de agosto del 2025.



FIRMA ASESOR

Nombres y apellidos: Ph. D. Edwin Martin Pino Vargas  
DNI: 00486621



FIRMA AUTOR

Nombres y apellidos: Frank Robinson Curasi Trujillano  
DNI: 70359139

## **DEDICATORIA**

*A Dios, quien me guía en cada paso de mi vida y me provee de salud, inteligencia, discernimiento y fortaleza para seguir adelante.*

*A mis padres, mis hermanos, mis amigos y a todos quienes han estado para ayudarme siempre.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios, por ser mi mayor inspiración, por darme vida y permitirme alcanzar mis sueños.*

*A todos los docentes que han sido parte de mi formación profesional, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y sus conocimientos compartidos.*

*A mis padres, mis hermanos, y amistades, quienes siempre han estado a mi lado para ayudarme y me han motivado a superarme día a día.*

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvii
	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>19</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	19
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	20
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	22
1.3.1 Interrogante general .....	22
1.3.2 Interrogantes específicas.....	22
1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....	23
1.4.1 Hipótesis general .....	23
1.4.2 Hipótesis específicas.....	23
1.5 JUSTIFICACIÓN .....	23
1.6 DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS .....	25

1.6.1	Objetivo general .....	25
1.6.2	Objetivos específicos .....	25
1.7	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	25
1.7.1	Caracterización de las variables .....	25
1.7.2	Medición operacional de las variables.....	26
1.8	ALCANCES Y LIMITACIONES .....	26
1.8.1	Alcances.....	26
1.8.2	Limitaciones .....	27
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....</b>		<b>29</b>
2.1	CONCEPTOS GENERALES.....	29
2.1.1	Definición y características generales de las aguas residuales .....	29
2.1.2	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales o domesticas.	31
2.2	NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL.....	32
2.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	35
2.3.1	Parámetros físicos.....	35
2.3.2	Parámetros químicos .....	37
2.3.3	Parámetros biológicos .....	39
2.4	CAUDAL DE DISEÑO.....	41
2.4.1	Factores que Influyen en el Caudal de Diseño .....	41
2.4.2	Componentes del Caudal de Diseño.....	43
2.4.3	Métodos para Calcular el Caudal de Diseño .....	44

2.5 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	
MUNICIPALES .....	45
2.5.1 Soluciones de tratamiento preliminar .....	46
2.5.2 Soluciones de tratamiento primario .....	52
2.5.3 Soluciones de tratamiento secundario. ....	55
2.5.4 Tratamiento terciario .....	61
2.5.5 Ventajas y desventajas de diferentes tecnologías .....	66
2.6 TECNOLOGÍA REACTOR DE BIOPELÍCULA DE LECHO MÓVIL	
MBBR (MOVING BED BIOFILM REACTOR) .....	67
2.6.1 Fundamentos y principios de operación .....	67
2.6.2 Componentes principales del sistema MBBR .....	70
2.6.3 Mecanismos y factores importantes para la remoción de contaminantes.	
.....	73
2.6.4 Análisis del diseño de procesos MBBR .....	79
2.7 FACTORES TÉCNICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA	
DE TRATAMIENTO MBBR .....	80
2.7.1 Criterios de dimensionamiento o parámetros de entrada.....	80
2.7.2 Factores que afectan el rendimiento de la implementación de una PTAR	
.....	82
2.7.3 Eficiencias típicas de remoción .....	83
2.7.4 Requerimientos de energía .....	84

2.7.5	Consideraciones climáticas.....	86
2.7.6	Consideraciones geográficas .....	87
2.8	FACTORES ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO MBBR .....	88
2.8.1	Componentes de costos de inversión (CAPEX).....	89
2.8.2	Costos operativos y de mantenimiento (OPEX).....	91
2.8.3	Vida útil de componentes .....	94
	<b>CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>95</b>
3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	95
3.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	95
3.3	DISEÑO METODOLÓGICO .....	95
3.4	VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN .....	98
3.5	HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS .....	99
	<b>CAPÍTULO IV DIAGNOSTICO TÉCNICO .....</b>	<b>100</b>
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	100
4.1.1	Ubicación de la zona de estudio .....	100
4.1.2	Accesibilidad .....	101
4.1.3	Infraestructura existente .....	101
4.1.4	Población objetivo .....	102
4.1.5	Parámetros ambientales .....	103
4.1.6	Área disponible.....	104

4.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES .....	105
4.2.1	Analítica del agua residual e interpretación de resultados .....	105
<b>CAPÍTULO V DISEÑO TÉCNICO DEL SISTEMA MBBR .....</b>		<b>107</b>
5.1	ESTIMACIÓN DE CAUDALES .....	107
5.2	DISEÑO DE CÁMARA DE REJAS.....	111
5.3	DISEÑO DE DESARENADOR HORIZONTAL.....	113
5.4	DISEÑO DE TRAMPA DE GRASAS .....	115
5.5	DISEÑO DE TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN .....	116
5.6	DISEÑO DE REACTOR MBBR .....	117
5.7	DECANTADOR LAMELAR .....	118
5.8	ESPEADOR DE LODOS.....	119
5.9	FILTRACIÓN.....	120
5.10	DESINFECCIÓN .....	120
<b>CAPÍTULO VI ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>		<b>122</b>
6.1	COSTOS DE LA INVERSIÓN.....	122
6.1.1	Presupuesto de obras civiles .....	123
6.1.2	Presupuesto de equipamiento y tecnología.....	124
6.1.3	Otros costos y resumen de costos .....	125
6.2	COSTOS OPERATIVOS .....	126
6.3	ANÁLISIS COMPARATIVO.....	128
6.3.1	Criterios de comparación.....	129

6.3.2	Comparación Técnica y Económica .....	129
<b>CAPÍTULO VII ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>		<b>132</b>
7.1	DISEÑO TÉCNICO PROPUESTO .....	132
7.1.1	Caudal de diseño.....	132
7.1.2	Caracterización del afluente .....	133
7.1.3	Esquema del diseño propuesto .....	133
7.1.4	Diseño estructural y distribución espacial .....	135
7.2	EFICIENCIA ESTIMADA DEL SISTEMA MBBR.....	136
7.3	COSTOS ESTIMADOS DEL SISTEMA .....	137
7.4	COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS.....	139
7.5	EVALUACIÓN DE FACILIDAD OPERATIVA Y REQUERIMIENTOS DE ESPACIO .....	142
7.6	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD EN CONTEXTO RURAL .....	145
<b>CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>147</b>
8.1	CONCLUSIONES.....	147
8.2	RECOMENDACIONES .....	148
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>150</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>159</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01 Límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR .....	34
Tabla 02 Parámetros físicos de las aguas residuales. ....	35
Tabla 03 Parámetros químicos de las aguas residuales. ....	37
Tabla 04 Parámetros biológicos de las aguas residuales. ....	39
Tabla 05 Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento .....	66
Tabla 06 Diferentes tipos de carriers utilizados. ....	75
Tabla 07 Valores típicos de flujo de remoción (J). ....	76
Tabla 08 Factores que impactan en el rendimiento de la depuración. ....	82
Tabla 09 Rangos de remoción de contaminantes en un sistema de MBBR. ....	83
Tabla 10 Factores de impacto energético. ....	85
Tabla 11 Consumos energético de PTAR's. ....	85
Tabla 12 Metodología para el diseño y evaluación del sistema MBBR. ....	99
Tabla 13 Resultados de laboratorio (DBO, DQO, SST) .....	105
Tabla 14 Dotación según tipo de opción tecnológica. – poblaciones rurales .....	107
Tabla 15 Dotación mínima para el diseño de infraestructura sanitaria .....	108
Tabla 16 Dotación por consumos no domésticos. ....	108
Tabla 17 Parámetros de diseño. ....	108
Tabla 18 Datos de caudal de diseño. ....	111
Tabla 19 Parámetros de diseño (cámara de rejillas). ....	111
Tabla 20 Dimensiones finales de la cámara de rejillas. ....	112
Tabla 21 Parámetros de diseño (desarenador horizontal). ....	114

Tabla 22 Dimensiones finales del desarenador horizontal.....	114
Tabla 23 Parámetros de diseño (trampa de grasas).....	115
Tabla 24 Dimensiones finales de la trampa de grasas.....	115
Tabla 25 Parámetros de diseño (tanque de homogeneización).....	116
Tabla 26 Dimensiones finales del tanque de homogeneización.....	116
Tabla 27 Parámetros de diseño (reactor biológico de lecho móvil MBBR). .....	117
Tabla 28 Dimensiones finales del reactor biológico de lecho móvil MBBR.....	118
Tabla 29 Dimensiones finales del decantador lamelar.....	118
Tabla 30 Dimensiones finales del tanque espesador de lodos. ....	119
Tabla 31 Diseño del sistema de filtro multimedia. ....	120
Tabla 32 Diseño del sistema de desinfección. ....	121
Tabla 33 Costos directos (Obras civiles). ....	123
Tabla 34 Costos directos (Equipamiento y tecnología MBBR).....	125
Tabla 35 Resumen de costos CAPEX.....	126
Tabla 36 Cálculo de los costos operativos PTAR.....	126
Tabla 37 Resumen de costos operativos .....	128
Tabla 38 Comparación técnico y económica – I.....	129
Tabla 39 Comparación técnico y económica – II.....	130
Tabla 40 Caudal de diseño. ....	132
Tabla 41 Caracterización del afluente.....	133
Tabla 42 Tabla comparativa CAPEX y OPEX con otras tecnologías .....	139
Tabla 43 Tabla comparativa técnica y económica .....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01. Tren de tratamiento de aguas residuales municipales.....	45
Figura 02. Sistema de tratamiento de aguas residuales - sistema aerobio .....	46
Figura 03. Rejillas gruesas en planta de tratamiento de aguas residuales.....	47
Figura 04. Rejillas finas en planta de tratamiento de aguas residuales.....	47
Figura 05. Tamices automáticos .....	48
Figura 06. Diagrama de desarenador de flujo horizontal.....	49
Figura 07. Elemento de vórtice o ciclónico para remoción de arenas. ....	49
Figura 08. Tanque con aireación desde el inferior.....	50
Figura 09. Trampa de grasas típico.....	51
Figura 10. Esquema de sistema de recogida de flotantes debido a aireación. ....	51
Figura 11. Variación de caudal horario.....	52
Figura 12. Vista de corte de un sedimentador primario.....	53
Figura 13. Sistema de flotación por aire disuelto y recogida de flotantes mediante mecanismo tipo pala.....	54
Figura 14. Tren de tratamiento con adición de coagulante y floculante.. ....	54
Figura 15. Lodos activados convencional. Con recirculación de lodos.....	56
Figura 16. Reactor de biofilm de lecho móvil MBBR y sedimentador .....	57
Figura 17. Filtro percolador. ....	58
Figura 18. Zonificación de lagunas de estabilización.....	59
Figura 19. Esquema de reactor anaerobio de flujo ascendente RAFA. ....	59

Figura 20. Filtro multimedia. ....	63
Figura 21. Filtro de carbon activado.. ....	63
Figura 22. Humedal superficial vertical.....	65
Figura 23. Sistema MBBR para remoción de DBO, en reactor de 2 etapas .....	69
Figura 24. Componentes principales del sistema MBBR .....	71
Figura 25. Difusores de burbuja gruesa para sistemas de aireación. ....	72
Figura 26. Carrier con biofilm microbiano adherido.....	73
Figura 27. Varios portadores de biomasa plásticos (carriers) .....	75
Figura 28. Costos de inversión (CAPEX).....	91
Figura 29. Costos operativos y de mantenimiento (OPEX).....	93
Figura 30. Fases secuenciales .....	96
Figura 31. Ubicación del proyecto .....	101
Figura 32. Accesibilidad al área de estudio .....	101
Figura 33. Rosa de viento de estación meteorológica.....	103
Figura 34. Accesibilidad al área de estudio .....	104
Figura 35. Esquemático planta y perfil de cámara de rejillas. ....	113
Figura 35. Esquemático planta de PTAR MBBR. ....	134

## RESUMEN

Este estudio evalúa la viabilidad técnica y económica de un sistema de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR (Reactor Biológico de Lecho Móvil) para el centro poblado rural de Ticapampa. Se desarrolla un diseño sistemático de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), desde la cámara de rejillas hasta el tanque de contacto de cloro, considerando las condiciones específicas del terreno y las normativas vigentes. Los requisitos clave incluyen un área reducida ( $< 200 \text{ m}^2$ ) y una operación simplificada, validados mediante cálculos técnicos.

Además, se determinan los costos de inversión (CAPEX) y operación-mantenimiento (OPEX), proporcionando un análisis económico comparativo con tecnologías convencionales (ej: lodos activados, filtros percoladores). Asimismo, se identifican las ventajas y desventajas del MBBR en términos de eficiencia ( $\geq 90\%$  remoción de DBO<sub>5</sub>), costos y facilidad operativa.

La investigación sigue un enfoque aplicado-descriptivo, iniciando con la caracterización del caudal y carga orgánica, seguido del diseño del tren de tratamiento y la evaluación económica. Finalmente, se contrastan los resultados con otras soluciones comunes, tanto cuantitativamente (parámetros de eficiencia, costos) como cualitativamente (operación, escalabilidad). Para futuras

investigaciones, se recomienda ampliar la cotización con proveedores nacionales e internacionales y explorar combinaciones tecnológicas.

**Palabras clave:** Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), reactor biológico de lecho móvil (MBBR), tren de tratamiento, lodos activados, centros poblados rurales, viabilidad técnica-económica.

## INTRODUCCIÓN

En el Perú, muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) presentan deficiencias en la remoción de contaminantes, mientras que, otras carecen incluso de sistemas de monitoreo de efluentes. Aunque las PTAR urbanas son supervisadas por la SUNASS, en el ámbito rural la situación es crítica: las plantas, administradas por municipalidades o juntas de usuarios, suelen tener un mantenimiento deficiente o tecnologías extensivas que dependen de operación manual, lo que deriva en su colapso progresivo.

Este problema se agrava en localidades como Ticapampa, donde la PTAR quedó inoperativa debido a un deficiente mantenimiento y crecida del río, reduciendo aún más el espacio disponible para su reconstrucción. Ante esto, se requieren tecnologías compactas, eficientes y de fácil operación, como el Reactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR), que elimina la necesidad de recirculación de lodos (a diferencia de los lodos activados) y ha demostrado ser confiable en condiciones similares (Madan et al., 2022).

La metodología combina enfoques cuantitativos (modelamiento técnico-económico) y cualitativos (comparación de tecnologías), siguiendo un diseño no experimental en cuatro fases: diagnóstico, diseño técnico, evaluación económica y

análisis comparativo. Esto permitirá validar la viabilidad del MBBR para Ticapampa bajo criterios de eficiencia, compactibilidad y operatividad

El objetivo de esta investigación es evaluar la viabilidad técnica y económica de una PTAR con tecnología MBBR en Ticapampa, asegurando una remoción  $\geq 90\%$  de DBO5, un área menor a 200 m<sup>2</sup> y operación simplificada. Para ello, se diseñará el sistema, se calcularán los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), y se comparará el MBBR con tecnologías convencionales en eficiencia, costos y mantenimiento. Los resultados permitirán determinar si esta solución es aplicable en zonas rurales con restricciones de espacio y recursos técnicos.

# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Se realizó una revisión bibliográfica de la tecnología MBBR, sus avances en los últimos 20 años, futuras líneas de investigación y retos que existen. Y además se analizaron los factores que afectan su rendimiento, estado del arte y aplicación para tratamiento de diferentes efluentes. Los carriers con un área mínima de 200-250 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y el llenado entre el 30-70% del volumen del tanque, logran porcentajes de remoción de BOD, COD, fosforo total, nitrógeno total del 97%, 96%, 99% y 99%, con un tiempo de retención hidráulica entre 2 – 6 horas. El sistema MBBR demuestra ser flexible, de fácil mantenimiento, huella de carbono menor, y resistente a impacto de carga orgánica (Madan et al., 2022).

Se evaluó la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) MBBR en Pachacamac - Lima - Perú, con el objetivo de producir agua tratada que cumpla con los estándares de calidad para su reusó en riego, contribuyendo así en una gestión sostenible de los recursos hídricos (Renzo Abraham Velásquez Lozano, 2024).

Se desarrolló la optimización del tratamiento de aguas residuales domesticas de la planta de tratamiento de aguas residuales de origen domestico de Caylloma, mediante la implementación de tecnología MBBR, que permitió tratar eficientemente un incremento de 40% del caudal efluente y mejorar su calidad para que pueda ser empleado con fines de riego (Reyes Araujo, 2020).

Se realizó un diagnóstico sobre el funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas del campamento minero ubicada en la provincia de Condesuyos bajo el sistema de tratamiento de Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR): Reactor de biopelícula de lecho móvil y verificar si la planta cumple con el D.S. N°003-2010-MINAM (Rosado et al., 2025)

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales es un desafío global, y es un problema agravante en los centros poblados rurales, donde los recursos financieros y técnicos son limitados. Se busca cerrar brechas de saneamiento, optimizar recursos públicos y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6: Agua limpia y saneamiento.

En el Perú, para el año 2023, el porcentaje de hogares rurales con alcantarillado u otras formas de disposición de excretas solo asciende a 42.1% (E. M. P. L. de Presupuesto Sector Publico 2025), en este ámbito no participan las empresas prestadoras de servicio (EPS) de saneamiento, las plantas de tratamiento de aguas

residuales (PTAR) en centros poblados rurales son administradas por las municipalidades distritales o junta de usuarios (JASS).

Para el tratamiento de aguas residuales en centros poblados rurales se prefiere el uso de tecnologías extensivas como lagunas de estabilización, zanjas de oxidación, humedales artificiales y filtro percoladores, por su bajo capital, costos y facilidad en la operación y mantenimiento, sin embargo, requieren áreas extensas y el descuido en su mantenimiento rutinario genera colapso y contaminación ambiental en las áreas de ocupación y cercanías.

El centro poblado rural de Ticapampa, ubicado a 1100 m.s.n.m. cuenta con una población de 180 hab, (INEI 2017), carece de una planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que el efluente del alcantarillado sanitario descarga sin tratamiento en el Rio Salado, lo que ocasiona severos impactos ambientales. Además, el área disponible para el proyecto es limitado hasta 500 m<sup>2</sup>, y se encuentra a unos 100 m del centro poblado, por lo que debe evitarse generar malos olores.

Debido a la preferencia del uso de tecnologías extensivas en estos casos, hay pocos estudios para evaluar la viabilidad del uso de tecnologías intensivas (lodos activados, SBR, MBBR, etc) para centros poblados rurales. Se dificulta encontrar antecedentes para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la propuesta.

Este estudio busca realizar una evaluación de la viabilidad técnica y económica para el caso real del centro poblado Ticapampa, la propuesta es una planta de tratamiento de aguas residuales mediante la tecnología de reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR).

### 1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

#### 1.3.1 Interrogante general

¿Es viable técnica y económicamente la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR en centros poblados rurales?

#### 1.3.2 Interrogantes específicas

¿Como es el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR en centros poblados rurales, en condiciones de espacio reducido, y de fácil operación y mantenimiento?

¿Cuál es el costo de inversión inicial, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR?

¿Cuáles son las ventajas y desventajas del sistema MBBR en centros poblados rurales en comparación con otros sistemas de tratamiento convencionales?

## 1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

### 1.4.1 Hipótesis general

La evaluación técnica y económica permite determinar la viabilidad de implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR en centros poblados rurales. Caso de estudio centro poblado Ticapampa – Ilabaya – Jorge Basadre - Tacna.

### 1.4.2 Hipótesis específicas

El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR en centros poblados rurales, cumple con las condiciones de espacio reducido, y de fácil operación y mantenimiento.

Según el análisis se realiza el cálculo de costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR.

Del análisis realizado la tecnología MBBR requiere menor intervención operativa y mínimo mantenimiento en comparación con otros sistemas convencionales.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

En el Perú, las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS) y organismos reguladores como SUNASS no tienen competencia directa sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en centros poblados rurales. Esta

limitación ha generado una falta de información estadística, técnica y financiera, así como el deterioro de muchas PTAR por ausencia de mantenimiento (Medrano et al., 2020).

Además, existe escasa información sobre tecnologías modernas y compactas de tratamiento, lo que impide evaluar su viabilidad técnica y económica frente a sistemas convencionales. Esta situación limita su implementación en zonas rurales, donde se requiere soluciones de bajo costo, fácil operación y adaptables a espacios reducidos.

En este contexto, la tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) representa una alternativa eficiente. Al combinar biomasa suspendida y adherida, supera desventajas operativas de sistemas tradicionales, requiere menor área y ofrece buen rendimiento ante altas cargas orgánicas.

La presente tesis evalúa la viabilidad técnica y económica del sistema MBBR en condiciones rurales, proponiendo un diseño optimizado para espacios menores a 200 m<sup>2</sup> y operación simplificada. Además, compara sus costos de inversión y operación con tecnologías convencionales, aportando evidencia técnica para su implementación como solución sostenible en el ámbito rural peruano.

## 1.6 DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo general

- Evaluar la viabilidad técnica y económica de una planta tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR en centros poblados rurales, considerando restricciones de espacio reducido y de fácil operación.

### 1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar el sistema de tratamiento de aguas residuales para el centro poblado rural Ticapampa, con una eficiencia de remoción  $\geq 90\%$  de DBO<sub>5</sub>, espacio reducido ( $< 200 \text{ m}^2$ ), y de fácil operación.
- Determinar los costos de inversión inicial (CAPEX en S/.) , costos de operación y mantenimiento (OPEX en S./año) de una planta de tratamiento con tecnología MBBR.
- Identificar las ventajas y desventajas del sistema MBBR frente a sistemas convencionales en términos de eficiencia, costos y operación.

## 1.7 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

### 1.7.1 Caracterización de las variables

- a) Variables independientes

- Sistema de tratamiento de aguas residuales MBBR (cálculo de espacios (m<sup>2</sup>) con Autocad 2025, adaptado a las condiciones de Ticapampa (espacio reducido y fácil de operación).

b) Variables dependientes

- La viabilidad técnica (eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub>/DQO (%), espacio ocupado por la planta (m<sup>2</sup>), requerimientos de operación).
- La viabilidad económica: Costos de inversión (CAPEX en S/.), costos de operación y mantenimiento (OPEX en S/./año).
- Comparativa de eficiencia, costos y operación,

1.7.2 Medición operacional de las variables

- Diseño con la normativa OS.090 (2009) y “Metcalf and Eddy 2014 Wastewater treatment plant and reuse” en hojas de Excel, búsqueda de catálogos de proveedores de carriers y de equipos compactos, costos de construcción, equipos e insumos (S/) según cotización de proveedores, cálculo de espacios (m<sup>2</sup>) con Autocad 2025, comparación sistemática con casos similares de PTAR’s convencionales existentes.

1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.8.1 Alcances

- Para el diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales MBBR para centros poblados rurales con condiciones de espacio reducido y mínimo

mantenimiento requerido, se empleará una combinación de métodos del estado del arte de la tecnología MBBR y las recomendaciones de la bibliografía especializada.

- Los equipos y materiales para la construcción de una planta compacta de aguas residuales MBBR cumplen los requerimientos físicos y químicos del diseño de tratamiento y siguen el tren de tratamiento (pre tratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y línea de lodos) para alcanzar los parámetros objetivo, en este caso de reúso para riego de áreas verdes.
- Para la evaluación de costos de implementación de una planta de tratamiento se ha realizado un estudio de mercado, para constar con los precios de los componentes identificados en el diseño de la PTAR MBBR con condiciones de espacio reducido y mínimo mantenimiento requerido.
- La presente investigación constituye un aporte valioso para el diseño y construcción y recomendaciones de una planta de tratamiento de aguas residuales compacta con tecnología MBBR.

#### 1.8.2 Limitaciones

- A pesar de contar con la información del estado del arte de la tecnología de tratamiento de aguas residuales MBBR y la caracterización de aguas residuales municipales del centro poblado rural Ticapampa, siempre existirá parámetros que no puede controlar el diseñador, como presencia de metales

pesados en el agua residual, temperaturas extremas, gestión de la energía y requerimiento de seguridad ante desastres naturales, que en este caso de estudio no se tomará en cuenta.

- La tecnología disponible es una limitante ya que se encuentra en constante de desarrollo, así mismo las patentes y falta de investigación que limitan toda la información respecto las eficiencias de portadores de biomedica (carriers).
- Existe una limitada bibliografía en donde se utilicen la estimación de costos propuestos, requieren cálculo de importaciones, siendo estas desarrolladas en escenarios internacionales, mas no en el contexto nacional.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 CONCEPTOS GENERALES**

##### 2.1.1 Definición y características generales de las aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas aguas que son un subproducto de los procesos de actividades humanas, que ha llevado a variar sus características físicas, químicas y/o biológicas, por lo que requieren tratamiento previo para ser integradas nuevamente al ecosistema, sin riesgo de contaminación o que generen impactos ambientales negativos.

Por su procedencia se clasifican en:

- **Aguas residuales domésticas y municipales:** Agua de origen doméstico, comercial e institucional que contiene desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana.
- **Aguas residuales industriales:** Aquellas que provienen de actividades industriales.

Son características de las aguas residuales:

Características físicas:

- Temperatura: Variación de la temperatura natural o inicial del agua.
- Turbidez: Representa la cantidad de sólidos suspendidos o disueltos que contiene.
- Color: Representa la cantidad de materia orgánica que contiene y su grado de descomposición.
- Olor: Debido a la descomposición de materia orgánica que genera gases.

Características químicas:

- Materia orgánica: Pueden contener proteínas, carbohidratos, grasas, aceites, pesticidas, fenoles, surfactantes, VOC's, metales, metaloides, ácidos, bases, etc.
- Materia inorgánica: Pueden ser por su alcalinidad, contenido de sales cloruros, metales pesados, nutrientes como el nitrógeno, potasio, índice pH, fósforo, azufre.
- Gases disueltos: Oxígeno disuelto, dióxido de carbono, metano, sulfuro de hidrógeno.

Características biológicas:

- Pueden contener helmintos, plantas, protozoos, bacterias, virus, Organismos patógenos, Coliformes.

#### 2.1.2 Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales o domesticas

Es una instalación de ingeniería diseñada para remover contaminantes presentes en las aguas servidas provenientes de zonas urbanas y residenciales. Su objetivo principal es, procesar estas aguas mediante diversos mecanismos físicos, químicos y biológicos para reducir su carga contaminante hasta niveles que permitan su devolución segura al medio ambiente o su posible reutilización.

Estas plantas constituyen un elemento fundamental en el ciclo urbano del agua y en la gestión ambiental de las ciudades. Operan mediante una secuencia de procesos que típicamente incluyen: pretratamiento para eliminar sólidos gruesos; tratamiento primario para remover sólidos suspendidos; tratamiento secundario donde microorganismos degradan la materia orgánica; y en algunos casos, tratamiento terciario para eliminar nutrientes y patógenos residuales.

El dimensionamiento y la selección de tecnologías para estas plantas dependen de factores como el volumen y características del agua a tratar, la disponibilidad de espacio, los recursos económicos, las condiciones climáticas locales y las exigencias normativas aplicables. Su correcto diseño y operación son esenciales

para proteger los cuerpos de agua receptores, prevenir enfermedades de origen hídrico y contribuir a la sostenibilidad ambiental de las comunidades.

## **2.2 NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL**

**Norma OS.090 R.N.E. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales:** Especifica los requisitos técnicos para el diseño, construcción, y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Incluye aspectos como la selección de tecnologías de tratamiento (PTAR), dimensionamiento de unidades, y control de calidad del efluente tratado. El diseño definitivo consta de obras de llegada, tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario, otros tipos de tratamiento, desinfección, tratamiento terciario, tratamiento de lodos.

**Norma OS.100 R.N.E. Consideraciones Básicas de diseño de infraestructura sanitaria:** Esta norma establece los criterios básicos para el diseño de infraestructura sanitaria, incluyendo aspectos como la capacidad, durabilidad, y mantenimiento de las instalaciones. Es fundamental para garantizar que las PTAR's cumpla con los estándares de calidad y seguridad.

**Decreto Supremo N° 004 – 2017 – MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias:** Establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes en los cuerpos de agua (ríos, lagos, mares, etc.). Estos estándares buscan proteger la calidad del agua para sus diferentes usos, como el consumo humano, el riego agrícola, la recreación

y la conservación del ecosistema. En los parámetros físicos, químicos, biológicos y microbiológicos en cada categoría, como:

- Metales pesados: Arsénico, plomo, mercurio, cadmio, entre otros.
- Nutrientes: Nitrógeno y fósforo, para prevenir la eutrofización.
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5): Indicador de contaminación orgánica.
- Bacteriológicos: Coliformes fecales y Escherichia coli.

Categoría 1: Agua para consumo humano (tratada o no tratada). Categoría 2: Agua para riego de vegetales y bebida de animales. Categoría 3: Agua para recreación y contacto primario (por ejemplo, natación). Categoría 4: Conservación de ecosistemas acuáticos.

**Decreto Supremo N° 003 – 2010 – MINAM:** Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. Son los valores máximos de concentración o niveles de elementos, sustancias o parámetros que pueden estar presentes en un efluente tratado, antes de ser vertido en un cuerpo de agua receptor.

**Tabla 01***Límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR*

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5 - 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

*Nota:* Datos tomados de la de Norma técnica OS.090 (2009)

**Ley N° 29338. Ley de Recursos Hídricos y su reglamento:** Regula el procedimiento para la obtención y autorización de vertimiento a un cuerpo de agua (se deben cumplir los Límites Máximos Permisibles LMP y cumplimiento de los estándares de calidad ambiental ECA-agua) o reúso (se debe contar con el Instrumento De Gestión Ambiental IGA aprobado por la autoridad ambiental sectorial a la que se destine el reúso). Está prohibido el vertimiento de las aguas residuales tratadas a cuerpo de aguas marítimas o continentales, sin la autorización de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

**Reusó de aguas tratadas para riego:** La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece recomendaciones para el reúso de aguas residuales tratadas en riego agrícola, con el objetivo de proteger la salud pública y garantizar prácticas agrícolas seguras:

- Helmintos (huevos por litro):  $\leq 1$  huevo/L para cultivos que se consumen crudos, riego de parques, jardines y áreas de recreación.

- *Escherichia coli* (*E. coli*) (unidades formadoras de colonias por 100 mL):  $\leq$  1.000 UFC/100 mL para cultivos que se consumen crudos. Sin límite específico para cultivos industriales o cultivos que se cocinan antes de su consumo, aunque se recomienda minimizar la exposición.

## 2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

### 2.3.1 Parámetros físicos

Los parámetros físicos son fundamentales para caracterizar las aguas residuales municipales, ya que proporcionan información sobre las propiedades observables y medibles del agua. Estos parámetros ayudan a evaluar la calidad del agua, identificar posibles problemas y diseñar sistemas de tratamiento adecuados.

**Tabla 02**

*Parámetros físicos de las aguas residuales.*

Parámetro Físico	Concepto Técnico	Origen	Importancia	Valores Típicos
<b>Color</b>	Propiedad óptica resultante de sustancias disueltas o suspendidas que absorben y reflejan luz.	Materia orgánica, sólidos suspendidos y descargas industriales.	Indicador de contaminación y alteraciones en la composición del agua.	100-300 unidades Pt-Co
<b>Olor</b>	Sensación percibida por la presencia de gases o compuestos volátiles.	Descomposición de materia orgánica (H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , compuestos orgánicos).	Indicador de condiciones anaerobias o presencia de sustancias tóxicas.	Varía según la composición.

<b>Temperatura</b>	Medida de la energía térmica del agua.	Aguas calientes de hogares, comercios e industrias.	Afecta la solubilidad de gases, la actividad biológica y la eficiencia del tratamiento.	Ligeramente superior al agua potable (15-25°C).
<b>Sólidos Totales (ST)</b>	Incluye sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables.	Materia orgánica e inorgánica en el agua.	Indicador de la carga de contaminantes y eficiencia del tratamiento.	500-1200 mg/L
<b>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	Partículas visibles en suspensión en el agua.	Heces, alimentos, arena y arcilla.	Pueden obstruir sistemas de tratamiento y reducir la eficiencia de los procesos.	100-350 mg/L
<b>Sólidos Disueltos Totales (SDT)</b>	Sustancias disueltas en el agua (sales, compuestos orgánicos).	Sales minerales, detergentes y otros compuestos solubles.	Altas concentraciones pueden afectar la calidad del agua y su uso posterior.	300-800 mg/L
<b>Sólidos Sedimentables</b>	Partículas que se depositan en el fondo después de un tiempo de reposo.	Arena, arcilla y materia orgánica pesada.	Indicador de la cantidad de sólidos que pueden ser removidos por sedimentación.	5-15 mL/L
<b>Turbidez</b>	Medida de la claridad del agua, relacionada con partículas en suspensión.	Sólidos suspendidos (arcilla, materia orgánica, microorganismos).	Afecta la penetración de la luz y la eficiencia de los procesos de tratamiento.	50-200 NTU
<b>Conductividad</b>	Medida de la capacidad del agua para conducir electricidad,	Sales disueltas provenientes de descargas domésticas,	Indicador de la concentración de sales y contaminación por	500-1500 $\mu$ S/cm

	relacionada con iones disueltos.	industriales o naturales.	descargas industriales.	
<b>Densidad</b>	Masa por unidad de volumen del agua, ligeramente superior al agua pura.	Materia orgánica e inorgánica en el agua.	Puede afectar los procesos de sedimentación y flotación en el tratamiento.	Ligeramente superior a 1000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Espuma</b>	Formación de burbujas en la superficie del agua debido a tensioactivos.	Detergentes y descargas industriales.	Puede interferir con los procesos de tratamiento y reducir la transferencia de oxígeno.	Varía según la presencia de tensioactivos.

*Nota:* Elaboración propia.

### 2.3.2 Parámetros químicos

Los parámetros químicos son fundamentales para caracterizar las aguas residuales municipales, ya que permiten evaluar la presencia y concentración de sustancias químicas que pueden afectar la calidad del agua, los procesos de tratamiento y el medio ambiente.

**Tabla 03**

*Parámetros químicos de las aguas residuales.*

<b>Parámetro Químico</b>	<b>Concepto Técnico</b>	<b>Origen</b>	<b>Importancia</b>	<b>Valores Típicos</b>
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	Mide el oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica.	Materia orgánica (proteínas, carbohidratos, grasas) y compuestos inorgánicos.	Indicador de la carga contaminante total.	250-1000 mg/L

<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	Mide el oxígeno consumido por microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable.	Materia orgánica biodegradable (heces, alimentos, desechos vegetales).	Indicador de la carga orgánica que afecta los cuerpos receptores.	100-400 mg/L
<b>pH</b>	Medida de la acidez o alcalinidad del agua.	Descargas domésticas, industriales y naturales.	Afecta los procesos biológicos, la solubilidad de metales y la eficiencia del tratamiento.	6.5-8.5
<b>Nitrógeno Total (NT)</b>	Incluye nitrógeno orgánico, amoniacal ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).	Heces humanas, detergentes, fertilizantes y descargas industriales.	Nutriente que puede causar eutrofización en cuerpos de agua.	20-85 mg/L
<b>Fósforo Total (PT)</b>	Incluye fósforo orgánico, ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y polifosfatos.	Detergentes, heces humanas y descargas industriales.	Nutriente que contribuye a la eutrofización.	4-15 mg/L
<b>Grasas y Aceites</b>	Compuestos orgánicos no polares (lípidos, aceites minerales).	Cocinas, industrias alimentarias y lubricantes.	Pueden obstruir sistemas de tratamiento y reducir la transferencia de oxígeno.	50-150 mg/L
<b>Metales Pesados</b>	Elementos tóxicos (plomo, cadmio, mercurio, cromo, etc.).	Industrias metalúrgicas, baterías, pinturas y productos químicos.	Son tóxicos para los seres vivos y pueden acumularse en el medio ambiente.	Varía según el metal (ej. plomo: <0.1 mg/L).

<b>Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	Compuestos inorgánicos que contienen azufre.	Detergentes, descomposición de materia orgánica y minerales.	En altas concentraciones, pueden causar corrosión y problemas de olor (H <sub>2</sub> S).	20-100 mg/L
<b>Cloruros (Cl)</b>	Iones presentes en el agua.	Sal común (NaCl), desechos humanos y descargas industriales.	Altas concentraciones pueden afectar la potabilidad del agua y la corrosión.	50-200 mg/L

*Nota:* Elaboración propia.

### 2.3.3 Parámetros biológicos

Los parámetros biológicos son fundamentales para caracterizar las aguas residuales municipales, ya que permiten evaluar la presencia de microorganismos, materia orgánica biodegradable y otros componentes biológicos que pueden afectar la calidad del agua, los procesos de tratamiento y la salud pública.

**Tabla 04**

*Parámetros biológicos de las aguas residuales.*

<b>Parámetro Biológico</b>	<b>Concepto Técnico</b>	<b>Origen</b>	<b>Importancia</b>	<b>Valores Típicos</b>
<b>Coliformes Totales</b>	Bacterias indicadoras de contaminación fecal y no fecal.	Heces humanas y animales, aguas residuales domésticas y agrícolas.	Indicador de contaminación fecal y posible presencia de patógenos.	10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup> UFC/100 mL
<b>Coliformes Fecales</b>	Subgrupo de coliformes asociado específicamente	Heces humanas y animales.	Confirmación de contaminación fecal y riesgo de patógenos.	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup> UFC/100 mL

	con heces de animales de sangre caliente.			
<b>Escherichia coli (E. coli)</b>	Bacteria específica del grupo de coliformes fecales.	Heces humanas y animales.	Indicador preciso de contaminación fecal y riesgo de patógenos entéricos.	10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup> UFC/100 mL
<b>Patógenos</b>	Microorganismos que causan enfermedades (bacterias, virus, parásitos).	Heces humanas y animales, aguas residuales no tratadas.	Riesgo directo para la salud pública.	Varía según el patógeno.
<b>Materia Orgánica Biodegradable</b>	Fracción de materia orgánica descompuesta por microorganismos.	Heces, alimentos, desechos vegetales y descargas domésticas.	Principal causa de la demanda de oxígeno (DBO) en cuerpos receptores.	DBO: 100-400 mg/L; DQO: 250-1000 mg/L
<b>Microorganismos Indicadores de Actividad Biológica</b>	Bacterias heterótrofas, nitrificantes y desnitrificantes.	Presentes naturalmente en aguas residuales y sistemas de tratamiento.	Esenciales para procesos de tratamiento biológico (lodos activados, digestión).	Varía según el sistema de tratamiento.
<b>Huevos de Helmintos</b>	Parásitos intestinales (ej. <i>Ascaris</i> , <i>Trichuris</i> ).	Heces humanas y animales.	Pueden causar enfermedades parasitarias.	1-100 huevos/L
<b>Algas y Cianobacterias</b>	Microorganismos fotosintéticos que proliferan en aguas ricas en nutrientes.	Crecimiento natural en aguas con altos niveles de nitrógeno y fósforo.	Pueden causar problemas de olor, sabor y toxicidad (cianotoxinas).	Varía según la concentración de nutrientes.

*Nota:* Elaboración propia.

## 2.4 CAUDAL DE DISEÑO

El caudal de diseño es un parámetro fundamental en la planificación y diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Representa el volumen de agua residual que la planta debe ser capaz de tratar en un período de tiempo determinado, generalmente expresado en litros por segundo (L/s) o metros cúbicos por día (m<sup>3</sup>/d). En el caso de centros poblados rurales, el cálculo del caudal de diseño debe considerar factores específicos como la población, los hábitos de consumo, las variaciones estacionales y las proyecciones de crecimiento.

El caudal de diseño es un parámetro crítico que influye en la eficiencia, sostenibilidad y costo de la planta de tratamiento. Un diseño adecuado garantiza que la planta pueda manejar las variaciones de caudal, tratar eficientemente las aguas residuales y cumplir con las normativas ambientales. Además, un cálculo preciso del caudal de diseño permite optimizar los recursos económicos y técnicos, especialmente en comunidades pequeñas

### 2.4.1 Factores que Influyen en el Caudal de Diseño

#### a) Población Actual y Futura

El caudal de diseño debe basarse en la población actual y las proyecciones de crecimiento demográfico a corto, mediano y largo plazo. En comunidades

pequeñas, es común utilizar períodos de diseño de 20 a 30 años, considerando tasas de crecimiento moderadas (1-2% anual).

#### b) Dotación de Agua

La dotación de agua se refiere a la cantidad de agua potable suministrada por habitante por día (L/hab/día). En comunidades pequeñas, este valor puede variar entre 100 y 200 L/hab/día, dependiendo de factores como el clima, las condiciones socioeconómicas y la disponibilidad de servicios.

#### c) Coeficiente de Retorno

El coeficiente de retorno es la fracción de agua potable que se convierte en agua residual. En general, se asume un valor entre 0.7 y 0.9, lo que significa que el 70-90% del agua suministrada se convierte en agua residual.

#### d) Variaciones de Caudal

El caudal de aguas residuales no es constante a lo largo del día ni del año. Las variaciones diarias incluyen picos en las horas de mayor actividad (mañana y tarde), mientras que las variaciones estacionales pueden estar influenciadas por factores como la infiltración de agua pluvial en épocas de lluvia.

#### e) Infiltración y Conexiones Ilegales

En sistemas de alcantarillado antiguos o mal mantenidos, puede haber infiltración de agua subterránea o conexiones ilegales de aguas pluviales, lo que incrementa el caudal de diseño.

### 2.4.2 Componentes del Caudal de Diseño

#### a) Caudal Medio Diario (Qmd)

Es el caudal promedio que se espera en un día. Se calcula a partir de la población futura, la dotación de agua y el coeficiente de retorno. Este valor es la base para el diseño de los componentes de la planta que operan de manera continua.

#### b) Caudal Máximo Diario (Qmaxd)

Es el caudal máximo esperado en un día. Se obtiene multiplicando el caudal medio diario por un factor de seguridad (generalmente entre 1.2 y 1.5). Este caudal es utilizado para dimensionar componentes que deben manejar fluctuaciones diarias.

#### c) Caudal Máximo Horario (Qmaxh)

Es el caudal máximo esperado en una hora. Se calcula multiplicando el caudal máximo diario por un factor de punta (generalmente entre 2.0 y 3.0). Este caudal es crítico para el diseño de componentes que deben manejar picos de flujo, como las unidades de pretratamiento y los sistemas de bombeo.

### 2.4.3 Métodos para Calcular el Caudal de Diseño

#### a) Cálculo del Caudal Medio Diario (Q<sub>md</sub>)

El caudal medio diario se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Q_{md} = P \times Dot \times C \times 86400 \quad (01)$$

Donde:

P: Población futura (habitantes).

Dot: Dotación de agua (L/hab/día).

C: Coeficiente de retorno (adimensional).

86400: Factor de conversión de segundos en un día.

#### b) Cálculo del Caudal Máximo Diario (Q<sub>maxd</sub>)

El caudal máximo diario se obtiene multiplicando el caudal medio diario por un factor de seguridad:

$$Q_{maxd} = Q_d \times F_s \quad (02)$$

Donde:

F<sub>s</sub>: Factor de seguridad (1.2-1.5).

#### c) Cálculo del Caudal Máximo Horario (Q<sub>maxh</sub>)

El caudal máximo horario se calcula multiplicando el caudal máximo diario por un factor de punta:

$$Q_{maxh} = Q_d \times F_p \quad (03)$$

Donde:

F<sub>p</sub>: Factor de punta (2.0-3.0).

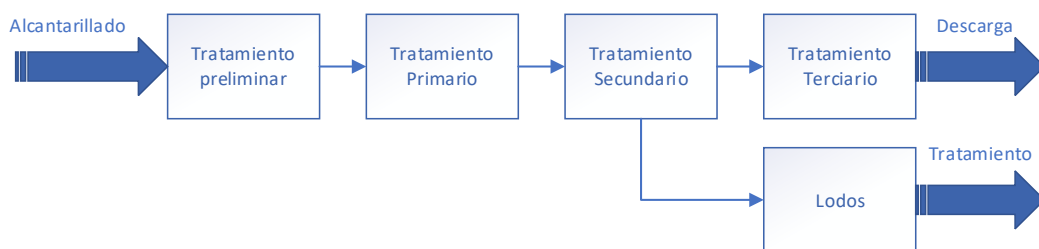
## 2.5 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

El objetivo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es crear un proceso de depuración después de que la red de alcantarillado hace ingreso de las aguas contaminadas a la planta de tratamiento de aguas residuales, hasta alcanzar un producto u objetivo en el efluente de aguas tratadas con una calidad apta para reintegrarse en el ecosistema sin generar impactos ambientales no controlados.

Para aplicar los objetivos de cada etapa de tratamiento se han desarrollado diferentes tecnologías como se verán a continuación.

**Figura 1**

*Tren de tratamiento de aguas residuales municipales*



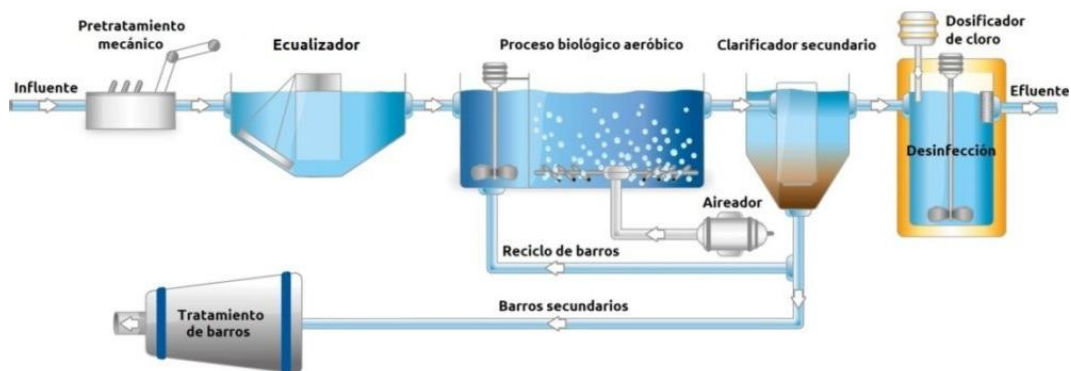
*Nota:* La figura muestra el tratamiento de aguas residuales. Fuente: Metcalf & Eddy (2015).

El tren de tratamiento de aguas residuales es el conjunto ordenado y secuencial de procesos físicos, químicos y biológicos diseñados para remover los contaminantes presentes en las aguas residuales, con el objetivo de cumplir los estándares de calidad exigidos para su descarga o reúso.

Se sigue una secuencia lógica que cumple una función específica en cada etapa diseñada para preparar el agua para el proceso siguiente, aumentando progresivamente su calidad.

**Figura 02**

*Sistema de tratamiento de aguas residuales - sistema aerobio*



*Nota:* Tomado de <https://bioingepro.com.ar/>

### 2.5.1 Soluciones de tratamiento preliminar

Eliminación de componentes del agua residual como trapos, palos, materiales flotantes, arena y grasa que pueden causar problemas de mantenimiento u operativos en los procesos y sistemas auxiliares del tratamiento.

#### a) Rejillas y Tamices

Son estructuras diseñadas para retener sólidos gruesos presentes en el agua residual, evitando su paso a procesos posteriores y protegiendo bombas, tuberías y otros equipos. Pueden ser:

### Rejillas Gruesas

Poseen una separación entre barrotes de 10 a 50 mm y capturan objetos grandes como ramas, plásticos y trapos. Pueden ser de limpieza manual o mecánica.

#### **Figura 03**

*Rejillas gruesas en planta de tratamiento de aguas residuales.*



*Nota:* Tomado de <https://www.synertech.com.co/>

### Rejillas Finas

Con aberturas de 1 a 10 mm, retienen partículas más pequeñas y generalmente están equipadas con sistemas automáticos de limpieza.

#### **Figura 04**

*Rejillas finas en planta de tratamiento de aguas residuales.*



*Nota:* Tomado de <https://temmisa.com/rejillas-manuales/>

## Tamices

Con aberturas menores a 1 mm, se utilizan para una retención más eficiente. Pueden ser rotativos, de banda o estáticos, dependiendo del diseño del sistema. Se utilizan en sistemas con altos volúmenes de agua y en plantas de tratamiento avanzadas.

### **Figura 05**

*Tamices automáticos*



*Nota:* Tomado de <https://www.synertech.com.co/>

### b) Desarenadores

Son estructuras diseñadas para la separación de arenas y otros sólidos pesados mediante sedimentación, mientras que el agua clarificada continua su flujo, evitando su acumulación en tuberías y daños por abrasión en bombas y equipos mecánicos. Se clasifican en:

Convencionales: Utilizan flujo horizontal, permitiendo la sedimentación por gravedad.

**Figura 06**

*Diagrama de desarenador de flujo horizontal.*

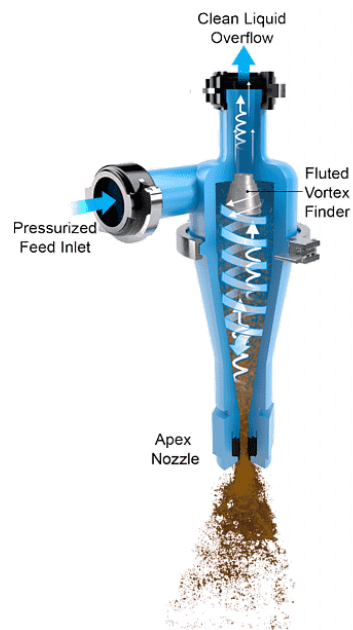


*Nota:* Tomado de [https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/cursos/uni\\_05/u5c3s2.htm](https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/cursos/uni_05/u5c3s2.htm)

Vórtice o ciclónicos: Generan un movimiento circular en el agua para separar partículas más densas.

**Figura 07**

*Elemento de vórtice o ciclónico para remoción de arenas.*

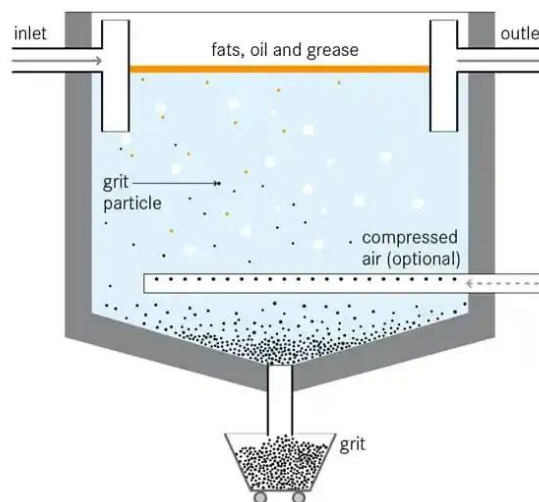


*Nota:* Tomado de <https://sswm.info/>.

Aireados: Incorporan aireación para mejorar la separación de arenas y, en algunos casos, grasas.

**Figura 08**

*Tanque con aireación desde el inferior.*



*Nota:* Tomado de <https://constructionor.com/>.

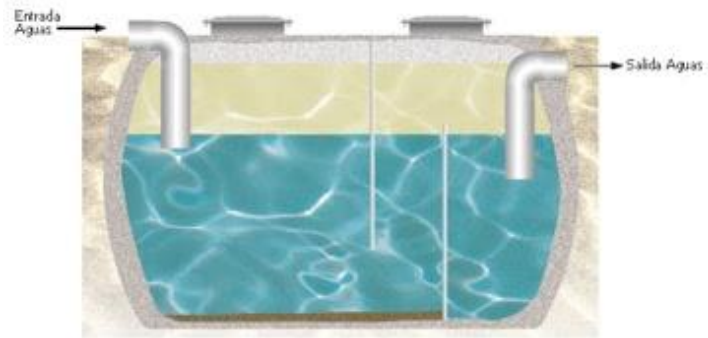
### c) Desengrasadores

Son unidades diseñadas para la separación y remoción de grasas, aceites y espumas presentes en el agua residual, evitando su acumulación en tuberías y su interferencia en procesos biológicos posteriores. Generalmente las grasas y aceites flotan y se acumulan en la superficie, donde son removidos manualmente o por medios mecánicos. Se clasifican en:

Por gravedad: Basados en la diferencia de densidad, permiten que las grasas y aceites floten en la superficie para su remoción.

**Figura 09**

*Trampa de grasas típico. Con láminas deflectoras intermedias.*

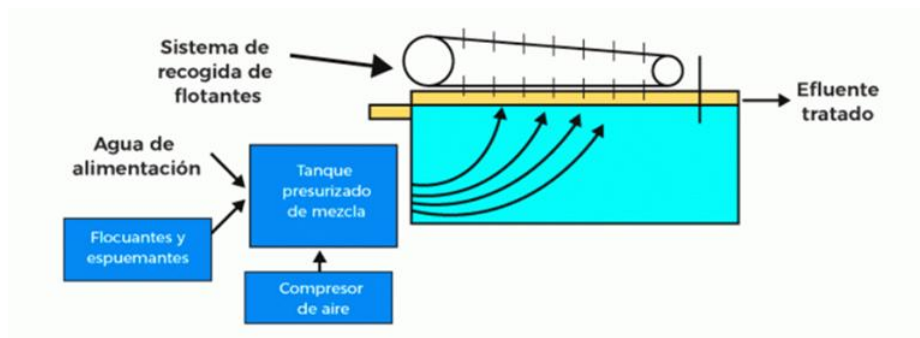


*Nota:* Tomado de <https://construnario.com/>.

Por aireación (flotación): Inyectan aire para formar microburbujas que favorecen la flotación y separación de los contaminantes.

**Figura 10**

*Esquema de sistema de recogida de flotantes debido a aireación.*



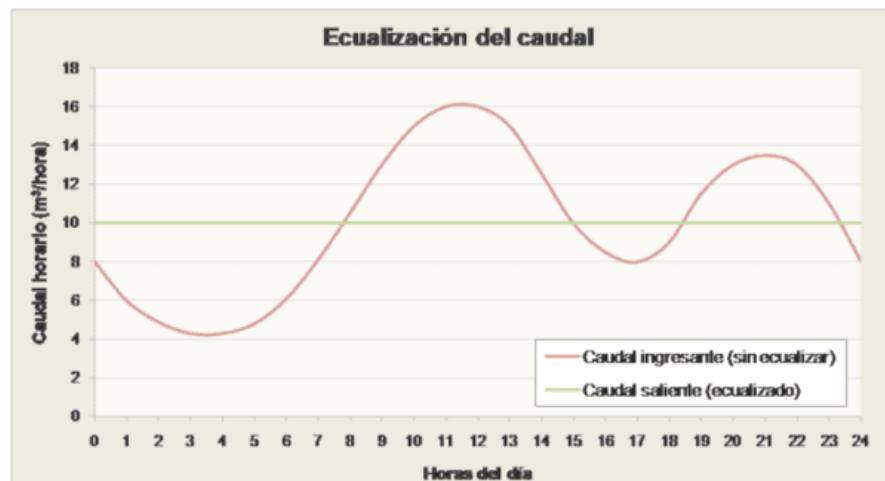
*Nota:* Tomado de <https://industriasislas.pe/>.

d) Tanques de homogeneización

Se utilizan para suavizar las variaciones en el flujo y la concentración de contaminantes, lo que ayuda a mejorar la eficiencia del tratamiento biológico y físico-químico posterior.

**Figura 11**

*Variación de caudal horario.*



*Nota:* Tomado de <https://bioingepro.com.ar/>.

### 2.5.2 Soluciones de tratamiento primario

Eliminación de una fracción de los sólidos suspendidos y materia orgánica del agua residual.

#### a) Sedimentación primaria:

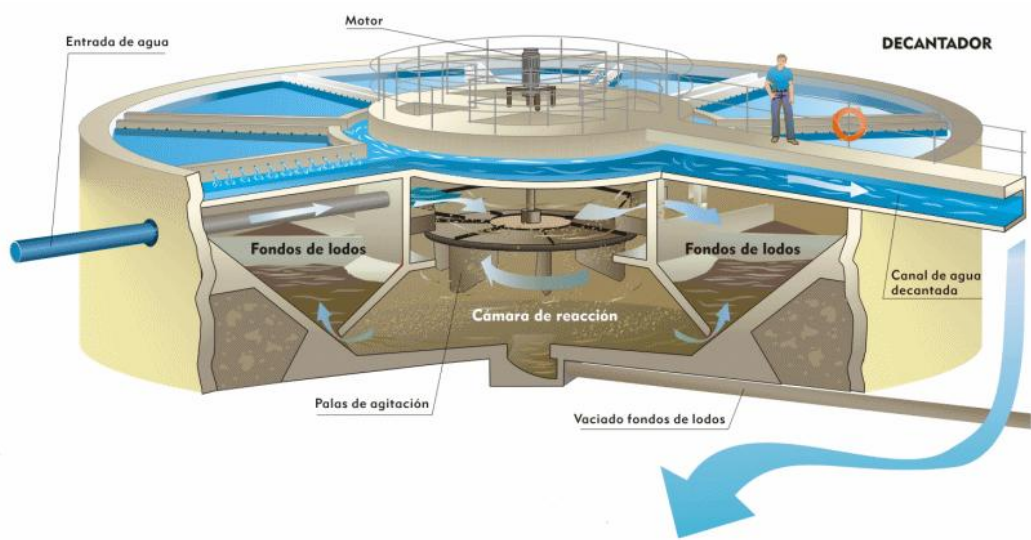
Se realiza en un tanque de sedimentación o clarificador primario.

Permite la decantación de sólidos suspendidos que forman lodos primarios en el fondo del tanque.

Puede reducir hasta un 50-60% de los sólidos suspendidos totales (SST) y hasta un 30-40% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

**Figura 12**

*Vista de corte de un sedimentador primario.*



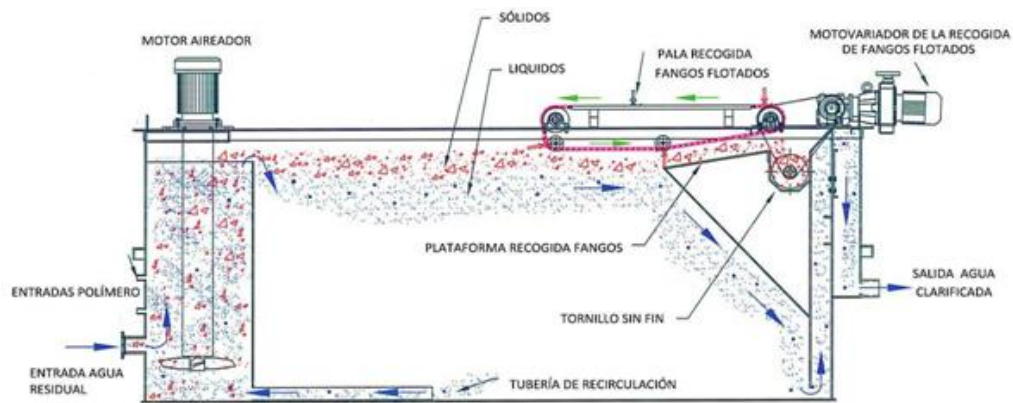
*Nota:* Tomado de <http://www.elaguapotable.com/decantacion.htm>

b) Flotación:

Se usa en algunas plantas para remover sólidos flotantes y grasas mediante la inyección de aire o químicos coagulantes.

**Figura 13**

*Sistema de flotación por aire disuelto y recogida de flotantes mediante mecanismo tipo pala.*



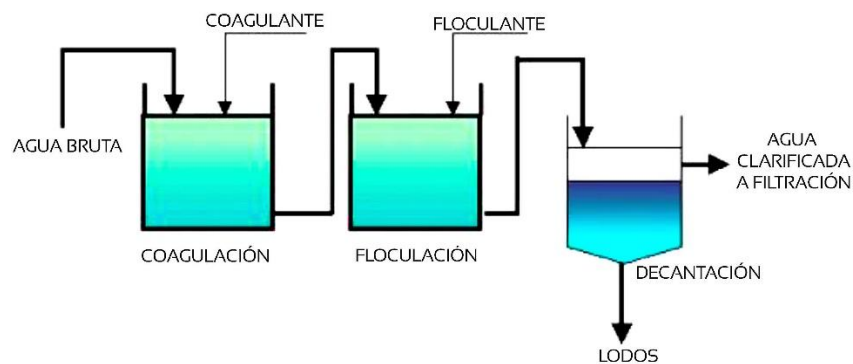
*Nota:* Tomado de <https://www.synertech.com.co/aguas-residuales/sistema-de-flotacion-por-aire-disuelto-daf>

### c) Coagulación y floculación

Se pueden añadir coagulantes como sulfato de aluminio o cloruro férrico para agrupar partículas finas y facilitar su sedimentación.

**Figura 14**

*Tren de tratamiento con adición de coagulante y floculante.*



*Nota:* Tomado de <https://flowen.com.pe/blog/reduccion-de-costos-operativos-en-una-ptar/>

### 2.5.3 Soluciones de tratamiento secundario.

El tratamiento secundario es una etapa fundamental en el proceso de depuración de aguas residuales municipales. Su principal objetivo es la eliminación de la materia orgánica biodegradable (medida comúnmente como DBO5 — Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días), así como la reducción de sólidos suspendidos y nutrientes mediante procesos biológicos. En esta etapa, se emplean microorganismos que descomponen la materia orgánica en condiciones controladas.

Pueden clasificarse en:

- Procesos Aerobios: Utilizan oxígeno para promover la actividad microbiana.
- Procesos Anaerobios: Se desarrollan en ausencia de oxígeno, siendo útiles para aguas con alta carga orgánica.
- Procesos Anóxicos: Se llevan a cabo con bajas concentraciones de oxígeno, esenciales para la desnitrificación.

#### **a) Lodos Activados:**

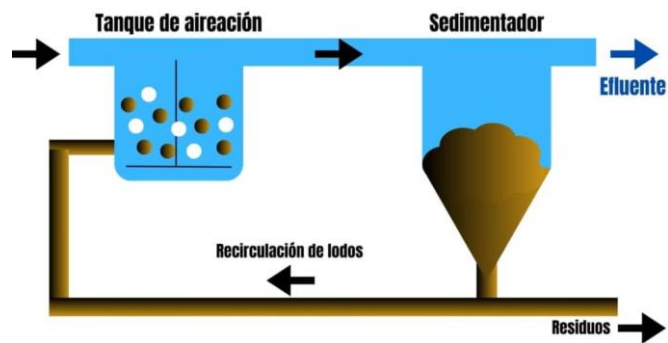
Es el método más utilizado a nivel mundial. Consiste en la aireación controlada de las aguas residuales en presencia de una biomasa suspendida (lodo activado), que metaboliza la materia orgánica. Este sistema puede variar en función de su configuración:

Convencional: Aireación continúa seguida de sedimentación secundaria.

- Tanque de aireación donde se mantiene la biomasa en suspensión
- Sedimentador secundario para separar los lodos
- Recirculación de lodos para mantener la población microbiana
- Control de parámetros como MLSS, F/M, edad del lodo.

**Figura 15**

*Lodos activados convencional. Con recirculación de lodos.*



*Nota:* Tomado de <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/lodos-activados-en-aguas-residualesaguas-residuales/>

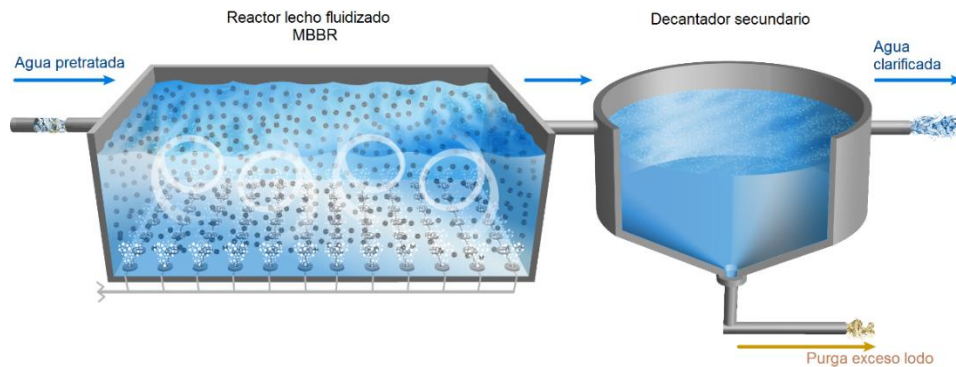
Aireación Extendida: Mayor tiempo de retención, ideal para cargas bajas.

SBR (Sequencing Batch Reactor): Opera en ciclos secuenciales de llenado, aireación, decantación y vaciado.

MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor): Incorpora medios plásticos en el reactor para favorecer la formación de biopelículas, aumentando la superficie de contacto entre los microorganismos y el agua residual. Sin recirculación de lodos.

**Figura 16**

*Reactor de biofilm de lecho móvil MBBR y sedimentador secundario.*



*Nota:* Envitech (2020).

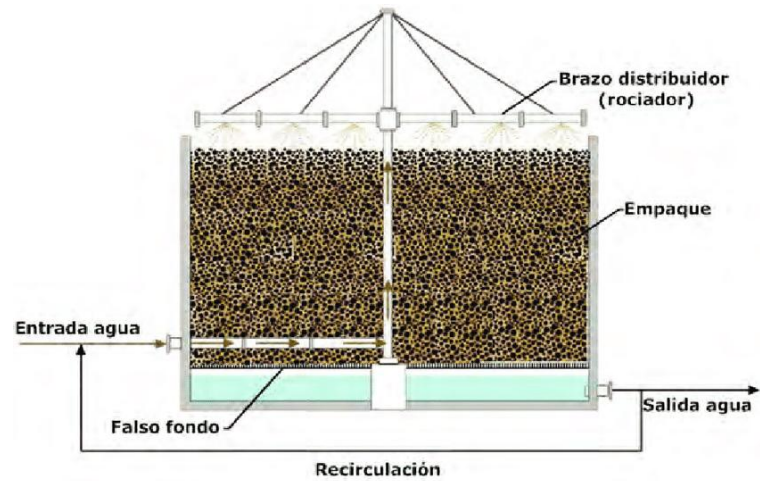
### **b) Filtros Biológicos o Percoladores:**

Consisten en lechos de material permeable (como piedra, plástico o cerámica) sobre los cuales se forma una biopelícula. El agua se distribuye sobre el lecho, y la biomasa adherida degrada la materia orgánica.

- Utiliza medio de soporte fijo donde crece la biomasa
- El agua residual se distribuye por la superficie y percola
- La materia orgánica es degradada por la biopelícula
- Requiere menor energía que lodos activados

**Figura 17**

*Filtro percolador.*



*Nota:* Noyola, Adalbert & Morgan-Sagastume, Juan & Guereca, Leonor (2013).

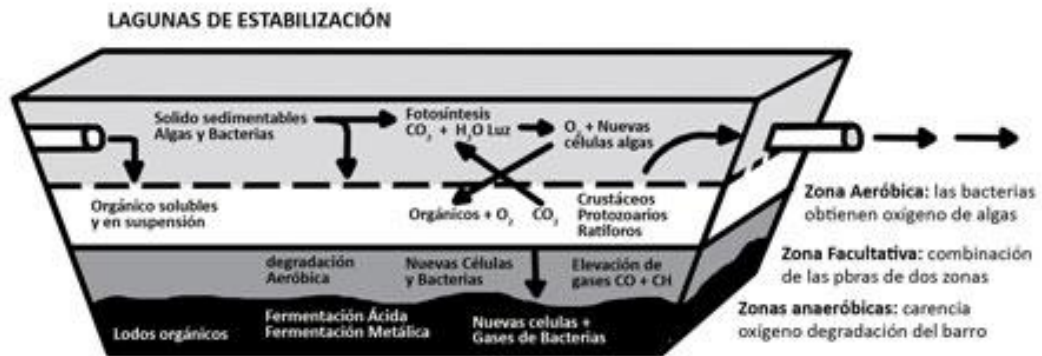
### **c) Lagunas de Estabilización:**

Son cuerpos de agua poco profundos donde los microorganismos degradan la materia orgánica de manera natural. Pueden clasificarse en:

- **Aeróbicas:** Oxígeno disuelto en toda la columna de agua.
- **Facultativas:** Con una capa superior aerobia y una inferior anaerobia.
- **Anaeróbicas:** Utilizadas para aguas con cargas orgánicas elevadas.

**Figura 18**

*Zonificación de lagunas de estabilización.*



*Nota:* Tomado de <https://ingenieroambiental2015.blogspot.com/2017/11/construccion-de-la-laguna-de-oxidacion.html>

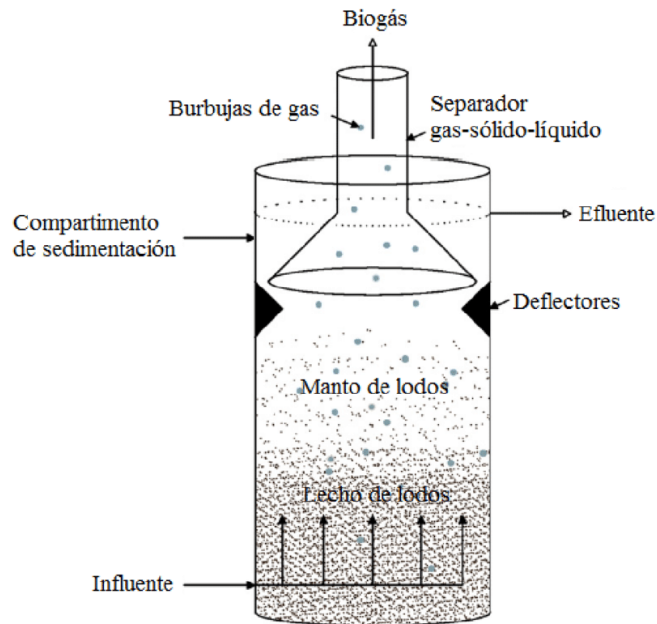
#### **d) Reactores Anaerobios:**

Se utilizan principalmente para tratar aguas con alta carga orgánica. Los tipos principales son:

- Reactor UASB o RAFA (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): El agua fluye hacia arriba a través de un manto de lodos anaerobios que degradan la materia orgánica, generando biogás como subproducto.
  - Flujo ascendente a través de manto de lodos
  - Producción de biogás (metano)
  - Ideal para aguas residuales con alta carga orgánica
  - Opera sin consumo de energía para aireación

**Figura 19**

Esquema de reactor anaerobio de flujo ascendente RAFA.



Nota: Chong et al.,2012

e) Sistemas Híbridos y Avanzados:

- Biorreactores de Membrana (MBR): Combina el proceso biológico convencional de lodos activados con una etapa de filtración mediante membranas semipermeables (de micro o ultrafiltración). Esto permite una clarificación más eficiente, eliminando casi por completo los sólidos suspendidos y microorganismos patógenos.
  - Combina lodos activados con filtración por membranas
  - Excelente calidad del efluente
  - Mayor costo, pero menor espacio requerido

- MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor): Como se mencionó anteriormente, este sistema utiliza medios plásticos suspendidos que proporcionan un soporte para la biopelícula, combinando las ventajas de los sistemas de biopelícula con la simplicidad operativa de los sistemas de lodos activados.
  - Combina biomasa suspendida y adherida
  - Mayor eficiencia en menor espacio
- Sistemas IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge): Integra lodos activados con medios de soporte para biopelículas, aumentando la capacidad de tratamiento en plantas existentes sin necesidad de grandes ampliaciones.

#### 2.5.4 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario, también conocido como tratamiento avanzado o de refinamiento, es la etapa final en el proceso de depuración de aguas residuales. Su propósito principal es la eliminación de contaminantes residuales que no fueron removidos en las etapas anteriores de tratamiento primario y secundario, como nutrientes, patógenos, metales pesados, compuestos orgánicos recalcitrantes y sólidos disueltos. Esta etapa es crucial cuando se busca la reutilización del agua o la descarga en cuerpos receptores con altos estándares de calidad ambiental. También se encarga de los procesos de:

- Reducción de nutrientes: Eliminación de nitrógeno y fósforo para evitar la eutrofización de cuerpos de agua.
- Desinfección: Eliminación de microorganismos patógenos para garantizar la seguridad sanitaria.
- Eliminación de sólidos disueltos: Reducción de sólidos totales disueltos (TDS) y turbidez.
- Eliminación de contaminantes emergentes: Como fármacos, productos de cuidado personal y disruptores endocrinos.
- Mejora estética: Reducción de color, olor y sabor del agua tratada.

Tipos:

#### a) Filtración avanzada

La filtración terciaria remueve sólidos suspendidos y algunos compuestos disueltos.

Existen varios tipos de filtros:

- Filtros de Arena o Multimedia: Utilizan capas de materiales granulares como arena, antracita, grava o granate para remover sólidos suspendidos, reducir la turbidez y proteger procesos posteriores como la desinfección.

**Figura 20**

*Filtro multimedia.*



*Nota:* Tomado de <https://hidroled.com/filtros-para-las-plantas-de-tratamiento/>

- Filtros de Carbón Activado: Tienen una gran área superficial interna. Que permite absorber compuestos orgánicos, productos farmacéuticos, pesticidas, metales pesados, color, olor y algunos contaminantes emergentes.

**Figura 21**

*Filtro percolador.*



*Nota:* Tomado de <https://hidroled.com/filtros-para-las-plantas-de-tratamiento/>

- Microfiltración (MF): Utiliza membranas con poros de 0.1 a 1  $\mu\text{m}$  para remover bacterias y sólidos finos.

- Ultrafiltración (UF): Con poros de 0.01 a 0.1  $\mu\text{m}$ , retiene virus, coloides y macromoléculas.

#### b) Procesos de Eliminación de Nutrientes

- Nitrificación y Des nitrificación: Procesos biológicos que convierten el amonio en nitrato (nitrificación) y luego el nitrato en nitrógeno gaseoso (des nitrificación).
- Precipitación Química: Se utiliza para la remoción de fósforo mediante la adición de sales de aluminio, hierro o calcio, que forman precipitados insolubles.
- Biofiltros Anaerobios: Remueven nitrógeno y fósforo simultáneamente en condiciones controladas.

#### c) Desinfección

La desinfección reduce la carga microbiana, garantizando que el agua tratada sea segura para su reutilización o descarga. Los métodos principales son:

- Cloración: Se emplea hipoclorito de sodio, cloro gaseoso o dióxido de cloro. Aunque es un método eficaz, puede generar subproductos halogenados.
- Ozono ( $\text{O}_3$ ): Gas altamente oxidante que destruye microorganismos y compuestos orgánicos. No deja residuos tóxicos.

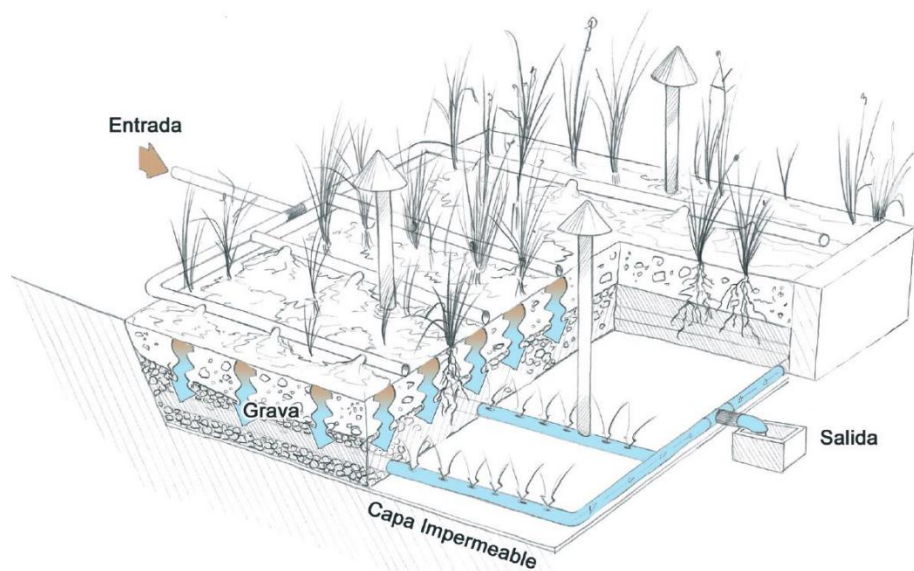
- Radiación Ultravioleta (UV): Inactiva microorganismos mediante daño en el material genético. Su eficiencia depende de la transparencia del agua y la dosis aplicada.

#### d) Humedales Construidos

Sistemas naturales que utilizan plantas acuáticas y microorganismos para remover nutrientes y metales pesados. Son soluciones de bajo costo, ideales para comunidades rurales.

**Figura 22**

*Humedal superficial vertical.*



*Nota:* Tomado de <https://depuranatura.blogspot.com/>.

## 2.5.5 Ventajas y desventajas de diferentes tecnologías

**Tabla 05**

*Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales.*

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Lodos activados (AS)</b>	- Alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica. - Flexibilidad para distintas cargas. - Bien estudiado y ampliamente aplicado.	- Alto costo de operación y energía. - Producción elevada de lodos secundarios. - Requiere control estricto del proceso.
<b>Filtros percoladores</b>	- Bajo consumo energético. - Bajo costo de operación. - Requiere menos mantenimiento.	- Menor capacidad de carga en comparación con lodos activados. - Puede generar malos olores. - Sensible a la obstrucción del medio filtrante.
<b>MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)</b>	- Alta eficiencia en espacios reducidos. - Resistente a fluctuaciones de carga. - Menor producción de lodos. - Mantenimiento sencillo.	- Mayor costo inicial por los carriers. - Requiere aireación adecuada en sistemas aerobios. - Posibles pérdidas de carriers si no se controlan.
<b>SBR (Sequencing Batch Reactor)</b>	- Proceso todo en uno (no requiere tanque de sedimentación). - Adaptable a diferentes cargas. - Fácil automatización.	- Ciclos de operación prolongados. - Mayor complejidad en la programación y control. - Alta sensibilidad a fallos mecánicos o eléctricos.
<b>Lago de estabilización</b>	- Bajo costo de construcción y operación. - No requiere alta tecnología. - Ideal para áreas rurales.	- Requiere grandes extensiones de terreno. - Baja eficiencia en climas fríos. - Difícil control de malos olores y vectores (mosquitos, etc.).

<b>Digestores anaerobios</b>	- Producción de biogás como subproducto. - Menor generación de lodos. - Adecuado para altas cargas orgánicas.	- Eficiencia limitada para bajas cargas. - Costo inicial elevado. - Requiere control estricto del pH y temperatura.
<b>Filtros de membrana (MBR)</b>	- Alta calidad del efluente, apto para reutilización. - Compacto y modular. - Reducción casi total de sólidos.	- Costos operativos y de mantenimiento elevados. - Desgaste y reemplazo frecuente de membranas. - Alto consumo energético.
<b>Reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)</b>	- Bajo costo de operación. - Genera biogás. - Compacto en comparación con otras tecnologías anaerobias.	- Lenta puesta en marcha. - Menor eficiencia en la eliminación de nutrientes. - Sensible a cargas orgánicas o hidráulicas muy variables.
<b>Lodos activados extendidos</b>	- Menor producción de lodos que el proceso convencional. - Adecuado para pequeñas comunidades.	- Mayor tiempo de retención hidráulica. - Requiere control estricto del oxígeno y del pH. - Mayor consumo de energía en comparación con otros procesos.

*Nota:* Elaboración propia.

## 2.6 TECNOLOGÍA REACTOR DE BIOPELÍCULA DE LECHO MÓVIL MBBR (MOVING BED BIOFILM REACTOR)

### 2.6.1 Fundamentos y principios de operación

La tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) es un proceso biológico avanzado para el tratamiento de aguas residuales que combina las ventajas de los

sistemas de biomasa suspendida y biomasa adherida, optimizando la eficiencia en la remoción de materia orgánica y nutrientes. Su principio de operación se basa en la utilización de elementos plásticos portadores de biomasa (carriers) dentro del tanque reactor. Estos carriers poseen una alta área superficial específica, lo que favorece el desarrollo de un biofilm microbiano encargado de la degradación de la materia orgánica y la eliminación de nutrientes presentes en el agua residual.

Durante el proceso, los carriers se mantienen en suspensión dentro del reactor gracias a la agitación generada por la aireación en sistemas aerobios o por la recirculación del flujo en sistemas anaerobios o anóxicos. Este movimiento continuo asegura un contacto eficiente entre el agua residual, el biofilm y los nutrientes, maximizando la actividad biológica y la estabilidad del sistema.

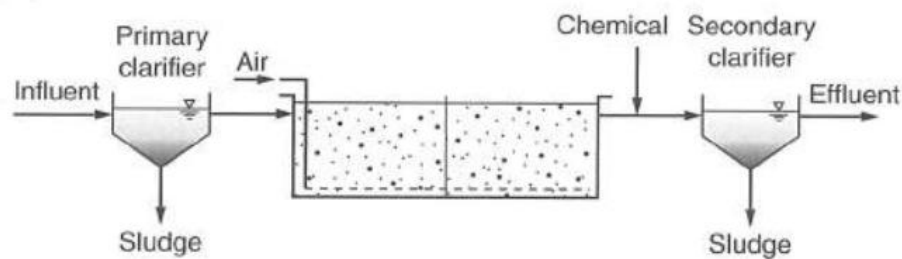
El biofilm microbiano, adherido a la superficie de los carriers, está compuesto por comunidades de microorganismos especializados que descomponen la materia orgánica y facilitan la remoción de compuestos nitrogenados y fosforados, contribuyendo a la mejora de la calidad del efluente tratado. Esta combinación de mecanismos permite que la tecnología MBBR ofrezca un tratamiento robusto, flexible y de alta eficiencia, adaptándose a diversas condiciones operativas y cargas contaminantes.

El diseño del sistema MBBR considera variables como la carga orgánica aplicada, la concentración de oxígeno disuelto, el tiempo de retención hidráulica y la relación

de volumen ocupado por los portadores. La eficiencia del sistema se evalúa mediante parámetros como la remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la eliminación de nutrientes.

**Figura 23**

*Sistema MBBR para remoción de DBO, en reactor de 2 etapas*



*Nota:* Metcalf & Eddy, 2015.

**Ventajas:**

- Alta eficiencia en la remoción de materia orgánica: Gracias a la gran superficie de adhesión del biofilm en los portadores.
- Compactación del sistema: Requiere menor espacio que los sistemas convencionales (lodos activados), ideal para centros poblados rurales con limitaciones de terreno.
- Robustez ante variaciones de carga: La biomasa adherida proporciona estabilidad al sistema frente a fluctuaciones de caudal y carga orgánica.
- Escalabilidad: Permiten una expansión o modificación sencilla para adaptarse a incrementos en la demanda de tratamiento.

- Facilidad de operación y mantenimiento: No requiere recirculación de lodos ni control estricto de la biomasa suspendida.
- Amigable con entornos rurales: Su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas, y la posibilidad de implementarse en zonas remotas lo hacen idóneo para centros poblados rurales.

#### Limitaciones:

- Costo inicial: Puede presentar una inversión inicial mayor debido a la adquisición de medios de soporte (carriers) específicos y requerir un tratamiento preliminar mejorado con cribado fino y desarenador.
- Alta demanda energética en sistemas aerobios, debido a la necesidad de operar en alta concentración de oxígeno disuelto, el suministro de aire debe ser continuo para mantener la suspensión de los medios de soporte.
- Mantenimiento: Aunque poco frecuente, la acumulación de sólidos en los medios de soporte puede reducir la eficiencia del sistema si no se realiza un mantenimiento adecuado. El mantenimiento del sistema de aireación requiere retirar medios de soporte.

#### 2.6.2 Componentes principales del sistema MBBR

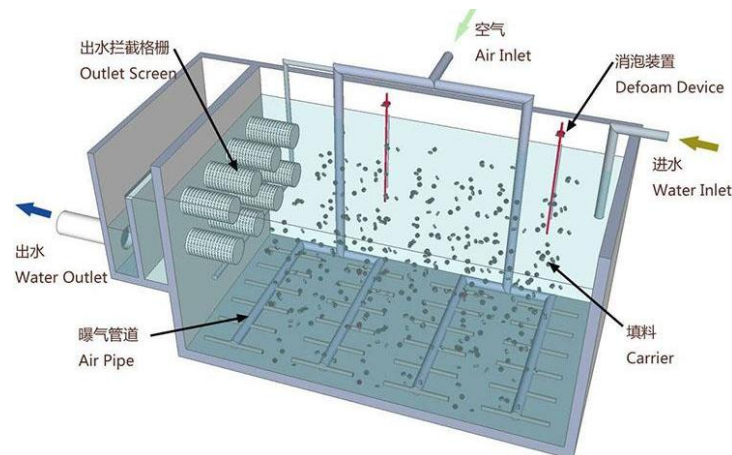
Pretratamiento: Un pretratamiento adecuado, que incluye el cribado, la desarenado y la sedimentación primaria, es necesario para evitar la acumulación de materiales inertes, como trapos, plásticos y arena, en el medio filtrante y en el tanque. Estos

materiales serían difíciles de eliminar una vez en el tanque debido a la presencia del medio filtrante fijo o en suspensión. El espaciamiento máximo recomendado entre las rejillas o el diámetro de perforación es de 6 mm con sedimentación primaria y de 3 mm sin tratamiento primario (WEF, 2011).

Separador de medios: Son elementos como pantallas o tamices de efluentes (acero inoxidable) ubicados al final del tanque para retener los carriers. La velocidad de avance en el tanque se limita a 50 a 60 m/h en condiciones de caudal máximo. Las burbujas de los difusores de aire en el suelo del reactor, proporcionan agitación para evitar acumulación de residuos y carriers.

**Figura 24**

*Componentes principales del sistema MBBR*



*Nota:* Tomado de <http://zhiqinghuanbao.com/news/html/?424.html>

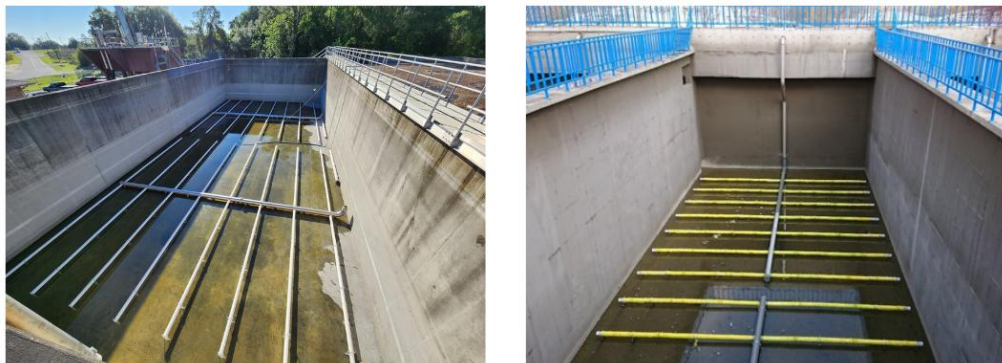
Aireación y mezclado: Se utiliza aireación por aspersion para proporcionar oxígeno y mezclado los carriers en el reactor. Se ubican los aireadores en el suelo del reactor distribuidos para facilitar la mezcla y agitación del biofilm microbiano. Se prefiere

los aireadores de burbuja gruesa para evitar los mantenimientos frecuentes. La aireación y mezclado controlan el exceso de crecimiento del biofilm adherido de los carriers.

Medios de soporte (carriers): Proporcionan un ambiente controlado para el crecimiento de microorganismos por adhesión (biofilm), protegiéndolos de las fluctuaciones externas y mejorando la degradación de contaminantes. Están fabricados de material plástico inerte de alta superficie específica, entre 500 a 3000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. El porcentaje de carriers llenado del reactor varía entre el 30 al 70% del volumen del reactor MBBR. Su densidad específica está entre 0.95 a 1.05 g/cm<sup>3</sup> para mantener en suspensión con la mínima agitación requerida.

**Figura 25**

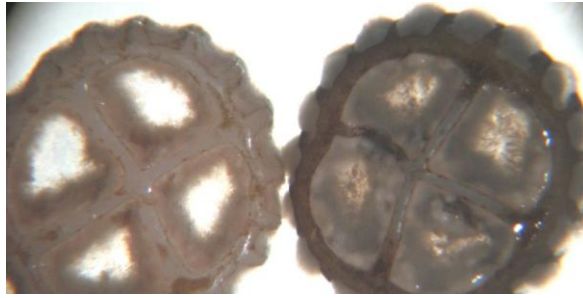
*Difusores de burbuja gruesa para sistemas de aireación*



*Nota:* Tomado de <https://esmil.eu/product/tube-air-diffusers/>

**Figura 26**

*Carrier con biofilm microbiano adherido*



*Nota:* Tomado de Mases et al. (2010, p. 460).

Reactor principal: Tanque donde se lleva a cabo el tratamiento biológico, previamente el efluente ha pasado un tratamiento preliminar y tratamiento primario para retirar material que reduzca la eficiencia del reactor.

### 2.6.3 Mecanismos y factores importantes para la remoción de contaminantes

El agente principal de remoción de contaminantes es el biofilm en los carriers (portadores de biomasa adherida), que está compuesto por comunidades microbianas heterogéneas, incluyendo:

- Bacterias heterótrofas: Degradan la materia orgánica presente en el agua residual.
- Bacterias nitrificantes: Transforman el amonio en nitratos mediante procesos de nitrificación.
- Bacterias desnitrificantes (en procesos anóxicos): Eliminan nitratos mediante la desnitrificación.

- Otros organismos: Hongos, protozoos y rotíferos que complementan el proceso de depuración.

#### Proceso de remoción de carga contaminante (sustrato)

La remoción de la carga contaminante se realiza a través de la superficie del biofilm (biomasa adherida) y se cuantifica en términos de **flujo de remoción (J)**, expresado en **g/m<sup>2</sup>\*d**. El área superficial efectiva es menor que el área superficial limpia de los carriers debido al espesor del biofilm. (Figura 13). El crecimiento excesivo de este espesor se controla mediante la aireación que generan cizallamiento hidráulico y movimiento turbulento en los carriers flotantes. Las concentraciones de biomasa adherida reportadas en la superficie del biofilm en carriers plásticos varían entre 13 y 39 g SST/m<sup>2</sup> en zonas de remoción de DBO, y entre 7 y 13 g SST/m<sup>2</sup> en zonas dedicadas exclusivamente a la nitrificación.

El **flujo de remoción (J)** está influenciado por la velocidad de difusión del sustrato hacia el biofilm, el espesor del biofilm, la intensidad de la mezcla externa del fluido y el espesor de la capa estancada del biofilm, la cinética biológica y la densidad de biomasa dentro del biofilm, así como por la disponibilidad del aceptor de electrones. A una concentración de oxígeno disuelto (OD) en el medio de 2,0 mg/L, el flujo de remoción de DBO no suele verse afectado por la velocidad de difusión del aceptor de electrones. No obstante, para la nitrificación se requiere una concentración de oxígeno disuelto (OD) superior a 2 mg/L para aprovechar los

beneficios de un sistema MBBR en el proceso de nitrificación. Los datos sobre el flujo de remoción (J) provienen de evaluaciones realizadas en plantas piloto y a escala real. *Adaptado de Metcalf & Eddy (2015).*

**Área superficial específica de carriers ( $m^2/m^3$ ) (Se).** Como se revisó anteriormente varía entre 500 a 3000  $m^2/m^3$ .

**Tabla 06**

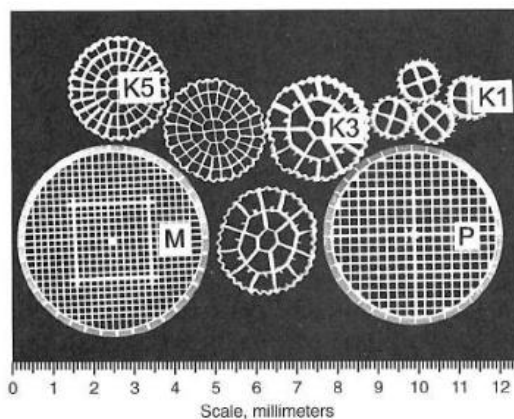
*Diferentes tipos de carriers utilizados.*

Tipo de portador de biopelícula	Gravedad específica	Dimensiones nominales, mm	Área superficial específica $m^2/m^3$
Sponge	0.95	15 × 15 × 12 prof.	850
Plastic wheel (K1)	0.96–0.98	7 × 10 diámetro	500
Plastic wheel (K3)	0.96–0.98	4 × 25 diámetro.	800
Plastic wheel (K5)	0.96–0.98	9 × 25 diámetro.	500
BioChip (P)	0.96–1.02	3 × 45 diámetro.	900
BioChip (M)	0.96–1.02	2 × 48 diámetro.	1200
Plastic square	0.96	15 × 15 × 10 prof.	680

*Nota:* Abadía (2003).

**Figura 27**

*Varios portadores de biomasa plásticos (carriers)*



*Nota:* Metcalf & Eddy (2014).

**Área superficial de carriers requerida (Ac).** El área superficial total requerida de carriers en un reactor MBBR es la tasa de remoción de carga orgánica (g DBO/d) necesaria dividida por el flujo de remoción (g/m<sup>2</sup>-d).

$$Ac = \frac{Qd*(DBO_{in}-DBO_{out})}{J} \quad (4)$$

Los valores típicos de flujo de remoción para la eliminación de DBO, la nitrificación y la desnitrificación se muestran en la tabla.

**Tabla 07**

Valores típicos de flujo de remoción (J).

Aplicación	Sustrato	Flujo de remoción J (g/m <sup>2</sup> -d)	Tasa de remoción volumétrica (kg/m <sup>3</sup> -d)
Remoción parcial de DBO	DBO	15–20	4.5–6.0
Tratamiento secundario	DBO	5–15	1.7–5.0
Pre - clarificación	DBO	4–5	1.2–1.5
Nitrificación	NH <sub>4</sub> -N	0.4–1.4	0.1–0.4
Pre - desnitrificación	NO <sub>3</sub> -N	0.20–1.0	0.1–0.3
Post - desnitrificación	NO <sub>3</sub> -N	1.0–2.0	0.3–0.6

*Nota:* Adapted from McQuarrie and Boltz (2011) and WEF (2011). Based on 60% media fill fraction.

El flujo de remoción es un parámetro clave para el diseño del proceso y depende de las concentraciones de sustrato líquido y oxígeno disuelto (OD), las condiciones de mezcla del reactor y las características de la biopelícula.

**Tasa de remoción volumétrica:** La cantidad de sustrato eliminado por los carriers depende del área superficial disponible del biofilm y del flujo de remoción.

Las relaciones de flujo de sustrato determinadas para la eliminación de DBO, la nitrificación y la reducción de nitratos a partir del análisis de procesos MBBR de planta piloto y de planta a escala real se pueden utilizar para desarrollar diseños de procesos MBBR.

**Tasa de carga de área superficial (CO) (SALR).** Es mayor que el flujo de remoción (J) y se puede estimar dividiendo el flujo de eliminación por la eficiencia de tratamiento estimada. En el diseño este se usa para estimar el volumen de carriers.

$$CO = \frac{J}{\text{eficiencia de tratamiento}} \quad (5)$$

En la tabla 6, se muestran las tasas de eliminación volumétrica equivalentes para un volumen de llenado del medio del 60 %.

La carga volumétrica de DBO de tratamiento secundario para el SALR de tratamiento secundario MBBR es aproximadamente 1,7 a 5,0 veces mayor que una carga típica de lodos activados convencionales de 1,0 kg de DBO/m<sup>3</sup>\*d.

**% Fracción de volumen llenado de carriers (% carriers).** La cantidad de portadores de biofilm plásticos (carriers) añadidos se define en términos de su fracción de llenado volumétrico o porcentaje del volumen del tanque, generalmente entre 30-70%. Según  $A_c$  (m<sup>2</sup>) y  $A_c$  específica de los carriers utilizado en el reactor.

$$\% \text{ carriers} = \frac{A_c}{V * S_e} \quad (6)$$

El área superficial de la biofilm es el producto del volumen del reactor, la fracción de volumen de llenado del medio y el área superficial específica del medio.

$$A_c = V * \% \text{ carriers} * S_e \quad (7)$$

**Concentración de oxígeno disuelto (OD).** En procesos aerobios, la aireación debe garantizar niveles adecuados de oxígeno disuelto (2-4 mg/L) para remoción de DBO, para nitrificación se suelen usar valores superiores.

**Temperatura:** La actividad microbiana es sensible a cambios térmicos; generalmente, el rango óptimo es entre 10-35 °C.

**Tiempo de retención hidráulico (TRH):** Controla el contacto entre el agua residual y los carriers.

**Concentración de biomasa o de sólidos suspendidos en el licor mezcla (MLSS).** Refleja la cantidad de biomasa microbiana presente en el sistema. Se encuentra en equilibrio entre la carga contaminante y la biomasa microbiana.

**Carga orgánica:** DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) en el influente.

**pH:** Un rango de 6.5 a 8.5 es ideal para la mayoría de los microorganismos.

#### 2.6.4 Análisis del diseño de procesos MBBR

La capacidad del proceso MBBR para manejar cargas volumétricas de DBO es mucho mayor que un proceso convencional de lodos activados, solo se explica parcialmente por las diferencias en las concentraciones de biomasa del reactor (MLSS).

La concentración de sólidos superficiales en la biopelícula puede variar desde 12 g de SST/m<sup>2</sup> para una operación combinada de carbón y nitrificación hasta 28 g de SST/m<sup>2</sup> para una operación de alta tasa de eliminación de DBO (McQuarrie y Boltz, 2011).

Suponiendo una superficie específica del medio de 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y un volumen de llenado del 60 %, las concentraciones volumétricas de SST correspondientes pueden variar entre 3870 y 8400 mg/L.

Dado que las mayores tasas de eliminación volumétrica de DBO en el MBBR no pueden atribuirse completamente a las diferencias en los sólidos suspendidos del reactor, también se ha sugerido que se debe al uso de diseños altamente compartimentados y a la presencia de una mayor biomasa viable en el medio (Odegaard, 2006).

Debido a la concentración relativamente baja de sólidos en suspensión en el efluente del proceso MBBR (normalmente en el rango de 100 a 250 mg/L), no se requiere el reciclaje de sólidos, como sí ocurre en los procesos de lodos activados e IFAS, y

se pueden utilizar métodos de separación de líquidos y sólidos distintos de la clarificación secundaria. La floculación y la flotación, los filtros de arena de doble medio, los filtros de disco de tela y la floculación lastrada se han utilizado en instalaciones a gran escala (McQuarrie y Boltz, 2011).

En el proceso MBBR, la eliminación del sustrato se realiza principalmente mediante el crecimiento adherido y no cuenta con la ventaja del lodo activado para mejorar la floculación y la sedimentación de los sólidos que se desprenden del crecimiento adherido.

Según pruebas de gases de escape de un sistema con portadores de biopelícula plásticos MBBR, los valores SOTE oscilaron entre el 11 % y el 15 %, donde SOTE es la eficiencia de transferencia de oxígeno en condiciones estándar. (Metcalf & Eddy, 2014).

## 2.7 FACTORES TÉCNICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO MBBR

### 2.7.1 Criterios de dimensionamiento o parámetros de entrada

El dimensionamiento de las plantas MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) se basa en la evaluación de diversos parámetros, tales como el caudal de agua residual, la carga orgánica, la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) y la eficiencia de remoción deseada. Es fundamental considerar la superficie específica de soporte

del medio biológico, la tasa de carga orgánica volumétrica y la relación F/M (food-to-microorganisms) para garantizar un diseño eficiente.

Caudal de diseño: Se define el caudal medio diario y el caudal máximo horario, considerando las variaciones de flujo a lo largo del día y la estacionalidad.

Carga orgánica: Se estima a partir de la concentración de DBO5 y DQO en el agua residual, expresada en kg de DBO5/día o kg de DQO/día.

Superficie específica del medio soporte: El material soporte utilizado en el MBBR tiene una superficie específica ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) que influye directamente en la capacidad de crecimiento del biofilm y en la eficiencia de remoción. Comúnmente, se utilizan medios con superficies entre 500 y 1,500  $\text{m}^2/\text{m}^3$ .

Volumen del reactor: Se determina a partir de la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica (HRT) y la capacidad de tratamiento requerida.

Tasa de carga orgánica volumétrica: Se expresa en kg de DBO5/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}$  y varía entre 0,5 y 3 kg DBO5/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ , dependiendo del nivel de tratamiento requerido.

Relación F/M (food-to-microorganisms): Define la relación entre la cantidad de materia orgánica a tratar y la biomasa activa disponible.

Sistemas de aireación: En sistemas aerobios, el diseño del sistema de aireación es crucial para asegurar niveles adecuados de oxígeno disuelto y para mantener el movimiento de los medios soporte.

Tiempo de retención hidráulica (HRT): Generalmente oscila entre 4 y 12 horas, dependiendo de la carga contaminante y los objetivos de tratamiento.

### 2.7.2 Factores que afectan el rendimiento de la implementación de una PTAR

Entre los factores que influyen en el rendimiento se encuentran la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno disuelto, el tipo y la calidad del agua residual, la carga orgánica y la eficiencia del sistema de aireación. Asimismo, la dinámica del biofilm, la edad del lodo y la presencia de compuestos tóxicos pueden afectar significativamente la eficacia del proceso.

**Tabla 08**

*Factores que impactan en el rendimiento de la depuración.*

<b>Factor</b>	<b>Impacto en el Rendimiento</b>	<b>Rango/Valor Óptimo</b>	<b>Medidas de Optimización</b>
Carga orgánica (DBO/DQO)	Alta carga satura la biopelícula; baja carga reduce actividad microbiana	DBO: 100-500 mg/L (óptimo)	Ajustar TRH o volumen del reactor
Temperatura	<10°C: ralentiza metabolismo; >35°C: daña biofilm	15-30°C (ideal)	Aislamiento térmico o calentamiento (climas fríos)
Oxígeno disuelto (OD)	<2 mg/L limita oxidación; >4 mg/L puede ser innecesario	2-4 mg/L (zonas aerobias)	Control automático con sensores + difusores eficientes
Medios portadores	Superficie específica baja → menor biomasa; densidad alta → mayor energía para mezcla	500-1,000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> (superficie)	Usar materiales plásticos (ej. polietileno)
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	TRH bajo → remoción incompleta; TRH alto → costos elevados	4-8 h (aerobio); 1-3 h (anóxico)	Diseñar en etapas según calidad de efluente requerida
pH	<6 o >9 inhibe actividad microbiana	6.5-8.5	Ajustar con álcalis/ácidos o amortiguadores

Nutrientes (N y P)	Deficiencia limita crecimiento bacteriano (C:N:P = 100:5:1)	N: 20-50 mg/L; P: 5-10 mg/L	Adición externa si es necesario
Sólidos suspendidos (SS)	Exceso obstruye medios o reduce transferencia de oxígeno	<150 mg/L (entrada)	Pretratamiento (rejas, desarenadores)
Toxicidad	Metales pesados, fenoles o altas sales inhiben bacterias	-	Tratamiento previo (ej. coagulación, carbón activado)
Configuración del reactor	Diseño inadecuado genera zonas muertas o cortocircuitos	Llenado de medios: 25-70%	Mezcla homogénea + distribución uniforme de agua

*Nota:* Elaboración propia.

### 2.7.3 Eficiencias típicas de remoción

Las plantas MBBR presentan eficiencias de remoción elevadas para DBO<sub>5</sub> (80-95%), DQO (70-90%) y nitrógeno amoniacal (60-90%), dependiendo del diseño y las condiciones operativas. Estas eficiencias hacen que el MBBR sea una tecnología atractiva para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales.

**Tabla 09**

*Rangos de remoción de contaminantes en un sistema de MBBR.*

Parámetro	Rango de Remoción	Condiciones Operativas	Referencia
DBO <sub>5</sub>	85-95%	TRH: 4-8 h; OD > 2 mg/L	[1] Metcalf & Eddy, 2014
DQO	70-90%	Depende de biodegradabilidad (DQO/DBO < 2.5)	[2] Ødegaard et al., 2000
DQO soluble	60-80%	Sistema aerobio estándar	[3] Rusten et al., 2006

*Nota:* Elaboración propia, con base en Metcalf & Eddy (2014), Ødegaard et al. (2000) y Rusten et al. (2006)

#### 2.7.4 Requerimientos de energía

El consumo energético está principalmente asociado a los sistemas de aireación y recirculación de agua. Los valores típicos oscilan entre 0,3 y 0,8 kWh/m<sup>3</sup> tratado, dependiendo de la carga contaminante y del diseño del sistema. (Metcalf & Eddy, 2014).

Principales Consumos de Energía en un Sistema MBBR:

- Sistema de Aireación (50–70% del consumo total)
  - Sopladores o blowers: Proporcionan oxígeno para la degradación aerobia de la materia orgánica.
  - Potencia típica: 0.5–1.5 kW/m<sup>3</sup> de reactor (dependiendo de la carga orgánica).
  - Tecnologías eficientes: Sopladores de tornillo (lobe blowers) o turbosopladores.
  - Difusores de burbuja fina: Mejoran la transferencia de oxígeno (20–30% más eficientes que burbuja gruesa).
- Mezcla y Recirculación (20–30% del consumo total)
  - Bombas de recirculación: Mantienen los medios en suspensión y homogeneizan el reactor.
  - Agitadores mecánicos: Alternativa en reactores pequeños.
- Equipos Auxiliares (10–20% del consumo total)

- Bombas de alimentación y descarga.
- Sistema de control y monitoreo (PLC, sensores de OD/pH).
- Iluminación y sistemas de seguridad en la planta.

**Tabla 10**

*Factores de impacto energético.*

<b>Factor</b>	<b>Impacto en el Consumo de Energía</b>	<b>Solución Recomendada</b>
Carga orgánica (DBO/DQO)	Mayor carga → Más demanda de O <sub>2</sub> → Mayor aireación	Optimizar relación carga/volumen del reactor
Temperatura del agua	Frío (<10°C) → Mayor necesidad de aireación	Aislar reactores o precalentar agua
Tipo de medios portadores	Medios densos requieren más energía para mezcla	Usar materiales de baja densidad (ej: polietileno)
Eficiencia del sistema de aireación	Difusores obstruidos o sopladores ineficientes aumentan consumo	Mantenimiento preventivo y uso de difusores de alta eficiencia
Altitud	Menor oxígeno disuelto en alturas >2,500 msnm	Sobredimensionar sistema de aireación o usar oxígeno puro

*Nota:* Elaboración propia.

**Tabla 11**

*Consumos energéticos de PTAR's.*

<b>Capacidad de Tratamiento (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>Consumo Promedio (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ejemplo de Potencia Requerida</b>
Pequeña escala (50–500)	0.8–1.5 kWh/m <sup>3</sup>	40–750 kWh/día
Mediana escala (500–5,000)	0.6–1.2 kWh/m <sup>3</sup>	300–6,000 kWh/día
Gran escala (>5,000)	0.4–0.9 kWh/m <sup>3</sup>	2,000–45,000 kWh/día

*Nota:* Metcalf & Eddy (2014); UNEP & IWA (2016); U.S. EPA (2013).

## Optimización del Sistema de Aireación

- Uso de sopladores de velocidad variable (VFD): Ajustan el flujo según demanda en tiempo real.
- Difusores de alta eficiencia (ej.: membranas EPDM): Mejoran la transferencia de O<sub>2</sub> en un 30%.
- Control automático de OD: Sensores conectados a PLC regulan la aireación.
- Selección de medios portadores de bajo peso: Disminuye energía para suspensión.

#### 2.7.5 Consideraciones climáticas

El clima influye en la actividad biológica del biofilm, afectando la eficiencia de remoción. En climas fríos, es recomendable implementar sistemas de aislamiento térmico o calefacción. Factores geográficos como la disponibilidad de espacio y la accesibilidad también deben considerarse en el diseño.

**Temperatura del agua:** Efecto en la actividad microbiana: Rango óptimo: 15–30 °C (mayor actividad biológica).

Temperaturas bajas (<10 °C): Reducción en la tasa de degradación de DBO/DQO. Disminución de la nitrificación (las bacterias nitrificantes son sensibles al frío). Soluciones: Aumentar el volumen del reactor, usar recirculación o aislamiento térmico. Reactores cubiertos o enterrados.

Temperaturas altas (>35 °C): Posible muerte de bacterias beneficiosas. Riesgo de formación de biofilm demasiado grueso, reduciendo la transferencia de oxígeno.

**Clima extremo** (heladas, nevadas, calor intenso)

En zonas frías: Congelamiento de tuberías y equipos → Requiere sistemas de calefacción o enterramiento. Disminución de la eficiencia → Diseño con TRH (Tiempo de Retención Hidráulica) más largo.

En zonas desérticas o muy cálidas: Evaporación excesiva en canales abiertos. Posible necesidad de cubiertas para reducir la radiación solar.

#### 2.7.6 Consideraciones geográficas

**Altitud y presión atmosférica:** Mayor altitud → Menor oxígeno disuelto: En ciudades a más de 2,500 msnm, la aireación debe incrementarse (más energía en sopladores). Ajustar el diseño para compensar la menor transferencia de oxígeno.

**Disponibilidad de espacio y topografía:** Zonas montañosas o con pendientes pronunciadas: Requieren estructuras escalonadas o bombeo adicional. Áreas urbanas congestionadas: Sistemas MBBR compactos (ventaja frente a lodos activados convencionales). Posibilidad de plantas modulares o subterráneas.

**Riesgos naturales** (sismos, inundaciones, vientos fuertes) Zonas sísmicas: Estructuras reforzadas (ej.: tanques de fibra de vidrio en lugar de concreto). Áreas con inundaciones frecuentes: Elevar equipos eléctricos y sensores. Protección contra arrastre de medios portadores.

## 2.8 FACTORES ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO MBBR

### Factores que influyen en la viabilidad económica

La viabilidad económica depende de la inversión inicial, los costos operativos, la vida útil del sistema, la disponibilidad de financiamiento, las tarifas de tratamiento y las regulaciones locales. Adicionalmente, la capacidad de adaptación a fluctuaciones en la carga contaminante y la posibilidad de integración con otros procesos pueden afectar la rentabilidad.

### Factores que influyen en el costo total

- Capacidad de la PTAR ( $m^3/día$ ).
- Calidad del agua residual (DBO5, DQO, SST).
- Normativa de vertimiento (niveles de tratamiento requeridos).
- Ubicación (accesibilidad, terreno, clima).
- Tecnología complementaria (pretratamiento, tratamiento terciario).

### Factores que influyen en los costos

- Tamaño de la PTAR: A mayor capacidad, mayores costos, pero posible economía de escala.
- Calidad del agua residual: Cargas orgánicas altas aumentan consumo de energía y químicos.

- Automatización: Sistemas automatizados reducen mano de obra, pero incrementan costos iniciales.

### 2.8.1 Componentes de costos de inversión (CAPEX)

Los costos de inversión incluyen:

Estudios y Diseño (10-15% del total)

- Estudios de pre-factibilidad y factibilidad.
- Diseño de ingeniería (básico y detallado).
- Permisos y trámites ambientales (EIA, CIRA, licencias).
- Asesoría legal y consultoría especializada. (Estructuras, Costos, Hidráulica, Ambiental, etc).

Obras Civiles (30-50% del total)

- Excavación y movimiento de tierras.
- Construcción de estructuras:
  - o Obras de llegada
  - o Tratamiento preliminar (cámara de rejas, trampa de grasas, desarenador, etc)
  - o Tanque de ecualización.
  - o Reactores MBBR (estructura principal).
  - o Sedimentador secundario/clarificador.

- Filtración (arena, carbón activado).
- Tanque de cloración/desinfección.
- Sistema de recolección de lodos (espesador de lodos).
- Obras de conexión y tuberías.

#### Equipos y Tecnología MBBR (25-35% del total)

- Medios de crecimiento biológico (biofilm carriers): Soporte plástico para bacterias.
- Sistema de aireación: Difusores (de burbuja gruesa o fina), sopladores o turbinas.
- Bombas y sistemas de recirculación.
- Sistema de control y automatización: PLC, sensores (DQO, pH, oxígeno disuelto).
- Equipo de desinfección: Clorador, ozonizador o lámpara UV.
- Sistema de manejo de lodos: Espesador, deshidratación (centrífuga, filtro banda).

#### Instalación y Puesta en Marcha (10-15%)

- Montaje mecánico y eléctrico.
- Pruebas hidráulicas y biológicas.
- Capacitación del personal operativo.

#### Gastos Indirectos (5-10%)

- Logística y transporte de equipos.
- Seguros y garantías.
- Contingencias (10-20% del costo total).

**Figura 28**

*Costos de inversión (CAPEX)*



*Nota:* Elaboración propia.

### 2.8.2 Costos operativos y de mantenimiento (OPEX)

Los costos operativos principales se relacionan con el consumo de energía, la reposición de medios soporte, el mantenimiento de sopladores y bombas, y la

disposición de lodos. El mantenimiento preventivo y correctivo es crucial para evitar fallas y optimizar la operación.

#### Costos de Operación

a) Energía eléctrica: Consumo de bombas, sistemas de aireación (sopladores), mezcladores y equipos de control. Uno de los mayores gastos debido a la necesidad de aireación constante para el biofilm.

b) Productos químicos: Coagulantes/floculantes (si se usa tratamiento terciario).

Nutrientes (como fósforo o nitrógeno, si el agua residual es deficiente en ellos).

Ajuste de pH (ácidos o álcalis).

c) Mano de obra: Personal técnico para supervisión, control de procesos y toma de muestras. Operadores capacitados en sistemas MBBR.

d) Gestión de lodos: Costos de deshidratación, transporte y disposición final de lodos generados.

#### Costos de Mantenimiento

Mantenimiento preventivo: Limpieza de difusores de aireación (evitar obstrucciones). Inspección y lavado de medios plásticos (biofilm carriers). Calibración de sensores (pH, OD, caudalímetros).

Mantenimiento correctivo: Reparación o reemplazo de equipos (bombas, sopladores, válvulas). Sustitución de medios MBBR degradados.

Monitoreo y análisis: Costos de laboratorio para análisis de DBO, DQO, SST, nutrientes, etc. Control de calidad del efluente para cumplir normas ambientales.

### Otros Costos

Seguros y permisos: Licencias ambientales, permisos de vertimiento. Seguros de equipos y responsabilidad civil.

Capacitación: Actualización del personal en tecnologías MBBR.

Repuestos e inventario: Stock de piezas críticas (membranas, difusores, sellos).

**Figura 29**

*Costos operativos y de mantenimiento (OPEX)*



*Nota:* Elaboración propia.

### 2.8.3 Vida útil de componentes

La vida útil de los componentes varía según la calidad de los materiales y las condiciones de operación. Los medios soporte suelen tener una vida superior a 20 años, mientras que equipos mecánicos y sistemas de aireación requieren reemplazos periódicos entre 5 y 15 años.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN**

Es mixto (Cuantitativo/cualitativo): Cuantitativo porque maneja métricas técnicas/económicas (% de remoción DBO, costos) y cualitativo para comparativas de ventajas/desventajas de las tecnologías de tratamiento.

No experimental: Porque está basado en modelamiento teórico, simulación y análisis multicriterio.

#### **3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El método de investigación empleado es de tipo descriptiva por que analiza las características del sistema de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR, y es de tipo aplicada porque genera un diseño viable del sistema de tratamiento de aguas residuales MBBR, para el caso del centro poblado rural Ticapampa.

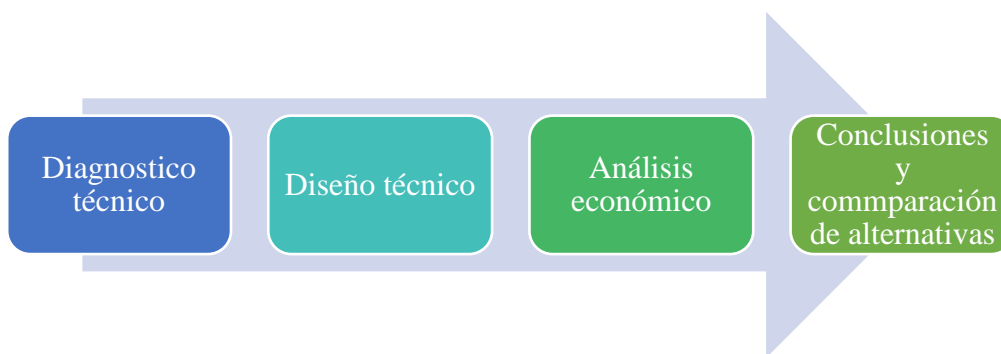
#### **3.3 DISEÑO METODOLÓGICO**

Se realizó en fases secuenciales: 1) Necesidades y diagnóstico, 2) Diseño técnico, 3) Análisis económico, 4) Comparación de alternativas. En la figura 30, se muestra

esquemáticamente la metodología que se debe seguir para el determinar la viabilidad de implementación de tecnología MBBR en zonas rurales.

**Figura 30**

*Fases secuenciales*



*Nota:* Elaboración propia.

En la primera fase comprende el diagnóstico técnico del caso particular (centro poblado rural de Ticapampa). Para ello abordaremos los siguientes puntos:

- Estudio poblacional: Determinamos la población actual, población futura, población flotante, y población equivalente (comercios, instituciones, etc).
- Caracterización de las aguas residuales: Debemos analizar la cantidad y calidad de las aguas residuales a tratar (caudal, carga orgánica, presencia de contaminantes específicos, y la variabilidad temporal - estacional, etc.).
- Identificación de las fuentes: Identificar quienes generan las aguas residuales (domestica, comercios o industrias).
- Revisión de la normativa: Identificar las regulaciones de locales, nacionales e internacionales sobre calidad del efluente y estándares de descarga.

En la segunda fase comprende el diseño técnico de la planta de tratamiento de aguas residuales MBBR.

- Esquema del Proceso: Se desarrollará el diagrama de flujo del proceso de tratamiento, incluyendo las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario, si es necesario.
- Dimensionamiento: En base a los caudales y la carga contaminante se dimensionarán las todas las unidades de tratamiento (sedimentadores, reactores biológicos, filtros percoladores, etc.).
- Diseño hidráulico: Verificar que las secciones y volúmenes hidráulicos cumplen para los caudales máximos y mínimos, verificar las tuberías, bombas y otros fenómenos hidráulicos.
- Sistemas de Control y Automatización: Se describirá los sistemas de control y automatización de la planta de tratamiento.

En la tercera fase comprende el análisis económico durante la vida útil del proyecto:

- Presupuesto de construcción: Estimación del costo de equipos, materiales y mano de obra, licencias, hasta la puesta en marcha del proyecto.
- Operación y mantenimiento: Desde la puesta en marcha, los costos operativos y de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales durante su vida útil.

En la cuarta fase comprende las conclusiones y comparación entre alternativas convencionales con un análisis multicriterio.

### 3.4 VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN

Se realizó la investigación a nivel aplicado - descriptivo de la **variable independiente:**

- Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales MBBR para la analítica de agua residuales en el efluente del centro poblado rural Ticapampa y con las restricciones del sitio.

Así mismo se alcanza el objetivo del tratamiento de aguas residuales (DBO, DQO, SST y coliformes), hasta el reúso de aguas residuales para riego de áreas verdes.

Para las **variables dependientes** serán las siguientes:

- Viabilidad técnica en m<sup>2</sup> de implementación, calidad del efluente, consumo energético, estabilidad del sistema y especificaciones técnicas.
- Costos de implementación CAPEX, de operación y mantenimiento OPEX.
- Comparación de alternativas.

Para las variables dependientes o los resultados del estudio técnico (caudal del agua residual, carga orgánica, diseño de la PTAR) y económico (costo de la inversión, costo de operación y mantenimiento) nos darán la viabilidad final del sistema propuesto, que se verá en las conclusiones y recomendaciones.

### 3.5 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS

Los instrumentos empleados para realizar el experimento son hojas de cálculo en Excel para simular el diseño de la planta de tratamientos de aguas residuales.

**Tabla 12**

*Metodología para el diseño y evaluación del sistema MBBR.*

<b>Etapa</b>	<b>Método/Técnica</b>	<b>Herramientas</b>
<b>Diseño del MBBR</b>	- Cálculo de parámetros (carga orgánica, HRT, volumen reactor). - Modelamiento conceptual.	- Normas OS0.90/OMS. - Software: Excel y AutoCAD (para planos).
<b>Diseño técnico</b>	- Simulación de eficiencia (remoción DBO5/DQO). - Evaluación de huella espacial.	- Datos de literatura (ej.: eficiencia MBBR en climas similares). - AutoCAD.
<b>Análisis económico</b>	- Cálculo de CAPEX/OPEX (costos directos e indirectos). - Análisis de ROI.	- Cotizaciones de proveedores. - Plantillas de costos (Excel).
<b>Comparativa</b>	- Benchmarking con sistemas convencionales (lagunas, lodos activados).	- Tablas comparativas ponderadas (eficiencia, costos, operación).

*Nota:* Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV**

### **DIAGNOSTICO TÉCNICO**

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

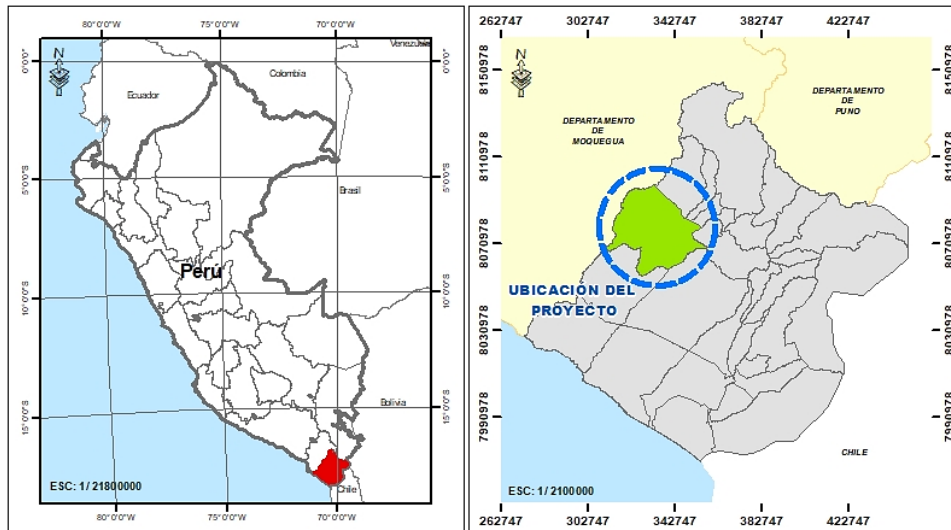
##### 4.1.1 Ubicación de la zona de estudio

La proyección de la planta de tratamiento de aguas residuales será en beneficio del centro poblado del Anexo de Ticapampa, ubicado en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, región Tacna., la cual se encuentra geo referenciada con las siguientes coordenadas 19 S, 336429E, 8067031N, políticamente está ubicado en:

- Región: Tacna
- Provincia: Jorge Basadre
- Distrito: Ilabaya
- Centro Poblado: Mirave
- Anexo: Ticapampa

**Figura 31**

*Ubicación del proyecto*



*Nota:* Tomado de <https://wikipedia.com/>.

#### 4.1.2 Accesibilidad

El proyecto se localizará en la localidad de TICAPAMPA, el ámbito de influencia del estudio posee el siguiente acceso:

**Figura 32**

*Accesibilidad al área de estudio*

TRAMO	DENOMINACIÓN	CONDICIONES DE LA VÍA	DISTANCIA LOCALIDADES (m)
MIRAVE – GRIFO MIRAVE	Carr. a Borogueña	ASFALTADO	450.00
Grifo mirave - PTAR	TA-104	ASFALTADO	480.00
TOTAL			930.00

*Nota:* Elaboración propia.

#### 4.1.3 Infraestructura existente

El proyecto cuenta con sistema de alcantarillado existente.

#### 4.1.4 Población objetivo

Se consideró los datos del INEI del CENSO del año 2017 con una población de 135 habitantes, para la tasa de crecimiento se realizó un análisis de tasa distritales el cual representa una variación con respecto a los CENSOS 1993 y CENSO 2007, obteniendo un valor de 1.3%.

Teniendo la tasa de crecimiento de 1.3% y utilizando el método geométrico para el cálculo de la población futura se obtiene una población para el año 2025 de 150 habitantes, tomando un periodo de diseño de 20 años para la PTAR, se calcula la población futura en 20 años, obteniendo una población de 194 habitantes para el año 2045.

Método geométrico: 
$$P_f = P_0 * \left( 1 + \frac{i}{100} \right)^t \quad (8)$$

Donde:  $P_f$  = población futura

$P_0$  = población actual

$i$  = índice de crecimiento anual (%)

$t$  = periodo de diseño

Entonces: 
$$P_f = 149 * \left( 1 + \frac{1.5}{100} \right)^{20} = 194 \text{ habitantes}$$

#### 4.1.5 Parámetros ambientales

Del estudio del aire:

- El centro poblado rural se encuentra a una distancia de 100 m, de la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que es preciso de que no se generen olores en la PTAR ya que los corrientes de vientos trasladaran los vectores contaminantes de la materia orgánica en descomposición.
- Al analizar el impacto potencial de la emisión de olores y gases como metano o sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) en el entorno y la comunidad cercana. Para una planta ubicada cerca a la población, el estudio recomienda contar con biofiltros o cubiertas en las unidades de tratamiento (lagunas o digestores anaeróbicos) para mitigar olores y evitar conflictos sociales.

**Figura 33**

*Rosa de viento de estación meteorológica.*



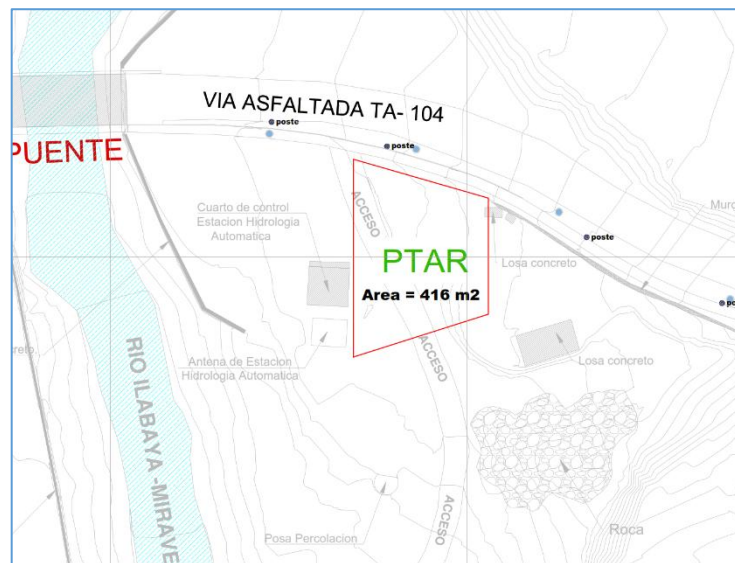
*Nota:* Elaboración propia

#### 4.1.6 Área disponible

La localización del proyecto nos garantiza solo un área disponible para el sistema de tratamiento de aguas residuales menor a 200m<sup>2</sup>, lo que limita la elección del tipo de tecnología de tratamiento, se descarta la opción de uso de tecnologías extensivas como lagunas facultativas, biofiltros, pozas de oxidación, sedimentadores, estas requieren un uso superior al terreno disponible.

**Figura 34**

*Accesibilidad al área de estudio*



*Nota:* Elaboración propia.

Además, se debe de configurar la planta de tratamiento de aguas residuales según la topografía existente.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

### 4.2.1 Analítica del agua residual e interpretación de resultados

Los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales “PTAR Ticapampa” están destinados a descargar en el Rio de Salado de la cuenta Locumba clasificado como ECA categoría 3, Riego de Vegetales y Bebida de animales, según Resolución Jefatural N° 056 – 2018 – ANA. (Decreto Supremo N° 004 – 2017 – MINAM).

Para obtener los parámetros Microbiológicos, Parasitológicos, Inorgánicos y Físico-Químicos se realizó el Análisis de Agua Residual, realizándose el monitoreo en el efluente de la red emisora existente. Anexo 02

Se realizó un cuadro comparativo entre los parámetros del análisis y parámetros fijados en los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua, con el fin de establecer cuál sería la eficiencia que deberíamos obtener en la planta de tratamiento, con este dato y la comparación de parámetros se procede a buscar una tecnología que nos garantice la eficiencia y lograr nuestro objetivo, que es tratar agua residual. Anexo 02

**Tabla 13**

*Resultados de laboratorio (DBO, DQO, SST)*

Promedio de 3 tomas de muestra del efluente	Identificación de muestra:	Muestra d1	Muestra d2	Muestra d3	¿Cumple Eca - categoría 3?
<b>Parámetros organolépticos</b>					

Demanda bioquímica de oxígeno	Mg/l	169.8	136.3	126	15	15	No
Demanda química de oxígeno	Mg o2/l	190.8	149.3	139.3	40	40	No
Aceites y grasas	Mg/l	9.9	12.3	5.4	5	10	No
Cianuro total	Mg/l	0.0044	0.0036	0.0066	0.1	0.1	Si
S.a.a.m.(detergentes)	Mg/l	2.626	1.676	0.675	0.2	0.5	No
<b>Análisis microbiológicos</b>							
Numeración de coliformes fecales o termotolerantes	Nmp/100 ml	1700000	13000000	4700000	1000	2000	No
Numeración de escherichia coli	Nmp/100 ml	140000	610000	1400000	1000	**	No
<b>Metales totales</b>							
Aluminio total	Mg/l	0.563	0.436	0.797	5	5	Si
Arsénico total	Mg/l	0.50235	0.44882	0.49888	0.1	0.2	No
Boro total	Mg/l	7.278	7.306	7.229	1	5	No

*Nota:* Elaboración propia, según resultados de laboratorio. Ver anexo 02.

Se evidencia que el agua residual para ser vertido en el río Salado no cumple con los parámetros organolépticos, como son DBO, DQO, aceites y grasas, detergentes, coliformes fecales o termo tolerantes y Escherichia coli, los cuales requieren de un tratamiento biológico para cumplir con la calidad de agua que tiene el Río Ticapampa según el ECA categoría 3 Riego de vegetales y bebida de animales (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM).

Para el tratamiento del agua residual de la PTAR Ticapampa se plantea un pretratamiento y un tratamiento biológico y de esta forma cumplir con los parámetros obtenidos del servicio de análisis de agua cruda y posterior vertido en el Río Salado.

## CAPÍTULO V

### DISEÑO TÉCNICO DEL SISTEMA MBBR

#### 5.1 ESTIMACIÓN DE CAUDALES

Se determina el caudal de medio de diseño en base a la población servida, las dotaciones para consumo humano, y los factores de contribución contenidos en la norma de redes de alcantarillado, considerándose además los caudales de infiltración y aportes industriales (4.3.5 OS.090 Plantas de tratamiento de aguas residuales). Las dotaciones diarias mínimas de agua para uso doméstico, comercial, industrial riego de jardines u otros fines (2.2 IS.010 Instalaciones sanitarias) en los cuadros siguientes:

**Tabla 14**

*Dotación según tipo de opción tecnológica. – poblaciones rurales*

Región	Dotación según tipo de opción tecnológica (l/hab.d)	
	Sin arrastre hidráulico (compostera y hoyo seco ventilado)	Con arrastre hidráulico (tanque séptico mejorado)
Costa	60	90
Sierra	50	80
Selva	70	100

*Nota:* Adaptado de norma técnica peruana OS.090 Plantas de tratamiento de aguas residuales. (2009).

**Tabla 15***Dotación mínima para el diseño de infraestructura sanitaria*

Clima	Dotación mínima (l/hab.d)		
	Sistema con conexiones	Lotes de área menor o igual a 90m <sup>2</sup>	Sistema de abastecimiento por surtidores, camión cisterna o piletas públicas
Frío	180	120	30 - 50
Cálido y templado	220	150	30 - 50

*Nota:* Adaptado de norma técnica peruana OS.090 Plantas de tratamiento de aguas residuales. (2009).

**Tabla 16***Dotación por consumos no domésticos.*

Cant.	Descripción	Nº	Dotación	Q consumo (l/s)
1	Cuna Jardín	10 estudiantes	20 l/est./día	0.002
1	Iglesia	20 asistentes	3 l/asist./día	0.001
1	Losa	150 espectadores	1 l/esp./día	0.002
1	Albergue	786.87 m <sup>2</sup>	6 l/m <sup>2</sup> /día	0.055
1	Mercado	50 m <sup>2</sup>	15 l/m <sup>2</sup> /día	0.009
Total =				0.068

*Nota:* Elaboración propia, en base de norma técnica OS.090. (2009).

**Tabla 17***Parámetros de diseño.*

Localidad	Sin Proyecto	Con Proyecto	Fuente
Población Actual (Habitantes)	149	149	INEI
Población Flotante (Habitantes)	0	0	RR.HH.
Tasa de Crecimiento Poblacional %	1.30%	1.30%	INEI
Viviendas del Proyecto	91	91	Trabajo en campo - Catastro
Densidad por lote (hab/lote)	1.60	1.60	
Dotación (L/Hab.día)	220	220	OS.100

Porcentaje de pérdidas	35%	20%	ANF SUNASS
Aporte de aguas residuales	80%	80%	OS.070
Población actual con conexiones de agua potable (red pública) (Hab.)	144	149	Trabajo en campo
Población actual abastecida con piletas (Hab.)	0.00	0.00	Trabajo en campo
Población actual con conexiones de desagüe (Hab.)	144	149	Trabajo en campo

*Nota:* Elaboración propia

### **Caudal promedio**

Por lo tanto, el caudal promedio es la dotación por habitante en el caso más crítico de 220 l/hab.día, el caudal promedio de los consumos diarios durante un año, esta expresado en l/s. Así tenemos:

$$Q_p = \frac{\text{dotacion} * \text{poblacion}}{86400} + Q_{nd} \quad (9)$$

$Q_n$  = Gasto consumo no domestico expresado en L/s

$Q_p$  = Gasto promedio expresado en L/s

$$Q_p = \frac{220 * 194}{86400} + 0.681 = 0.494 + 0.068 = 0.562$$

### **Caudal Máximo Diario**

Se define como el día de máximo consumo de una serie de registros durante los 365 días del año.

$$Q_{max \text{ diario}} = Q_p * K1 \quad (10)$$

$Q_{md}$  = Gasto máximo diario expresado en L/s

$Q_p$  = Gasto promedio expresado en L/s

$K_1$  = Coeficiente de variación diaria según RNE, se considera 1.3.

$$Q_{md} = 0.562 * 1.3 = 0.731$$

### **Caudal Máximo Horario**

Se define como la hora de máximo consumo. El consumo máximo horario está relacionado respecto al caudal promedio, mediante el coeficiente  $K_2$ .

$$Q_{max\ horario} = Q_p * K_2 \quad (11)$$

$Q_{mh}$  = Gasto máximo Horario expresado en L/s

$Q_p$  = Gasto promedio expresado en L/s

$K_2$  = Coeficiente de variación Horaria que varía entre 1.8 - 2.5, se tomara 2.

Por lo tanto, definiremos como  $K_2$  de la siguiente manera:

$$Q_{mh} = 0.562 * 2 = 1.124$$

### **Caudal de Diseño**

Se determinarán para el inicio y fin del periodo de diseño. El diseño del sistema de alcantarillado se realizará con el valor del caudal máximo horario

$$Q_{diseño} = Q_{mh} + Q_{inf} + Q_{ce} \quad (12)$$

Dónde:  $Q_{dt}$ : caudal de diseño (L/s)

$Q_{mh}$ : caudal máximo horario doméstico (L/s)

$Q_{mh}$ : caudal de consumo no doméstico (L/s)

$Q_{in}$ : caudal por infiltración (L/s)

$Q_{ce}$ : caudal por conexiones erradas (L/s)

$$Q_{diseño} = 1.124 + 0.034 + 0 = 1.158$$

**Tabla 18**

*Datos de caudal de diseño.*

De los caudales				
Caudal promedio	$Q_p$ :	0.562	l/s	Cálculo de caudales
Caudal máximo diario ( $Q_{md} = Q_p \times 1.3$ )	$Q_{md}$ :	0.731	l/s	Cálculo de caudales
Caudal máximo horario ( $Q_{mh} = Q_p \times 2.0$ )	$Q_{mh}$ :	1.124	l/s	Cálculo de caudales
Caudal por infiltración ( $Q_{inf} = 0.05 \times \text{long de red}$ )	$Q_{inf}$ :	0.034	l/s	Cálculo de caudales
Caudal por conexiones erradas	$Q_{ce}$ :	0.000	l/s	Cálculo de caudales
Caudal de diseño ( $Q_d = Q_{mh} + Q_{inf} + Q_{ce}$ )	$Q_d$ :	1.158	l/s	Cálculo de caudales
Caudal mínimo ( $K_{min} = 0.5 \times Q_p$ )	$Q_{min}$ :	0.281	l/s	Cálculo de caudales

*Nota:* Elaboración propia

## 5.2 DISEÑO DE CÁMARA DE REJAS

Para el diseño de la cámara de rejas se hará con el caudal máximo horario, se tendrán 02 canales en paralelo por temas de mantenimiento, los demás datos son tomados del R.N.E. 0.90 Plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 19**

*Parámetros de diseño (cámara de rejas).*

Parámetros de Diseño	Dato	Cantidad	Und	Fuente
Factor de forma para barras rectangulares	K:	2.42	*	Según KISCHMER

Espesor de las barras (5 - 15 mm)	e :	1/2	pulg	RNE OS.090
Separación entre barras (20 - 55 mm)	a :	1	pulg	RNE OS.090
Profundidad de la barra (30 - 75 mm)	b:	1 1/2	l/s	RNE OS.090
Velocidad en las barras (0.60 - 0.75 m/s)	V <sub>r</sub> :	0.65	m/s	RNE OS.090
Vel. antes de las barras (0.30 - 0.60 m/s)	V <sub>c</sub> :	0.6	m/s	RNE OS.090
Ang. de inclinación de la barra 45 - 60°	θ :	45	°	RNE OS.090
Gravedad	g :	9.81	m/s	Bibliografía
Coefficiente de rugosidad del canal	n:	0.014	*	Bibliografía
Ancho del Canal	B :	0.16	m	A criterio propio
Diámetro de ingreso	Φ :	0.10	m	Del emisor
Borde libre	Bl:	0.20	m	A criterio propio

*Nota:* Elaboración propia

Para el cálculo de las dimensiones de la cámara de rejas se ha elaborado la memoria de cálculo en el Anexo 01. Debido al bajo caudal de diseño de la PTAR Ticapampa ha tomado a criterio medidas mínimas del ancho de canal, para facilitar el mantenimiento (B=0.16m).

**Tabla 20**

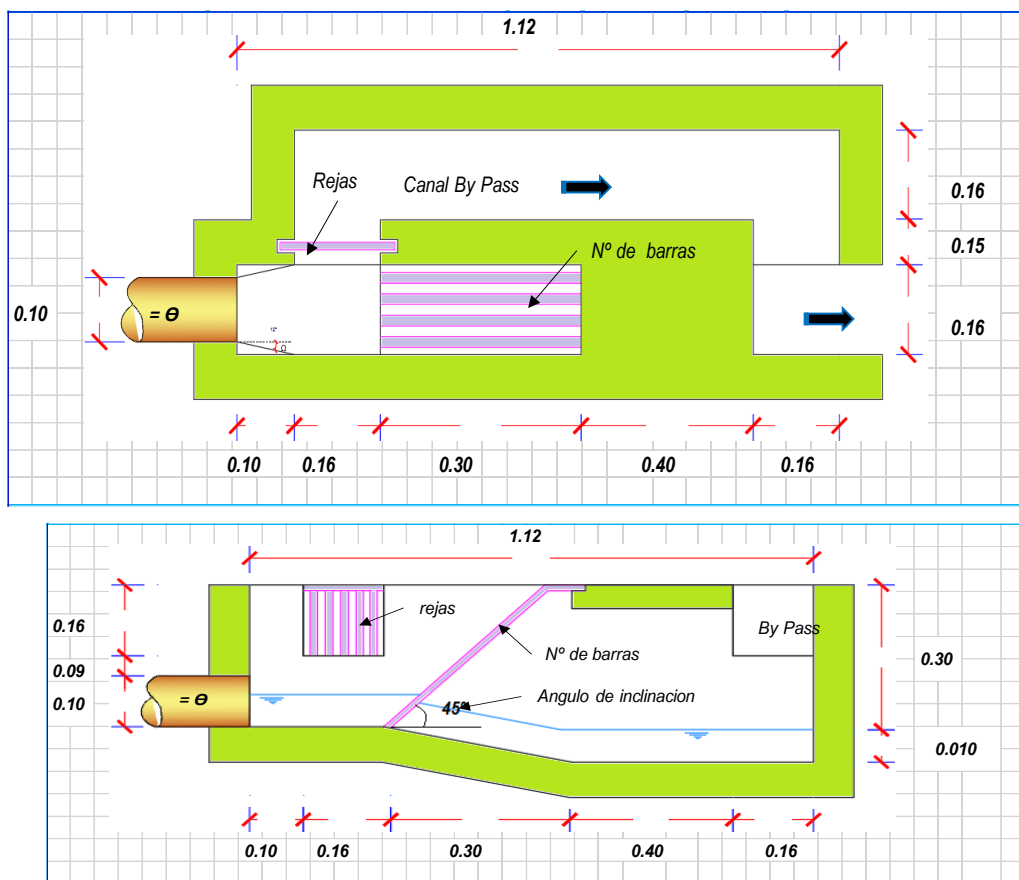
*Dimensiones finales de la cámara de rejas.*

Dimensiones	Cantidad	Und
Número de líneas	2.00	*
Ancho del Canal	0.16	m
Profundidad del Canal	1.00	m
Velocidad del agua en las barras	1.50	m/s
Área libre requerida	0.65	m <sup>2</sup>
Numero de rejas	0.60	*
Área de la unidad	45.00	m <sup>2</sup>

Nota: Elaboración propia

**Figura 13**

Esquemático planta y perfil de cámara de rejas.



Nota: Elaboración propia.

### 5.3 DISEÑO DE DESARENADOR HORIZONTAL

Para el desarenador se eligió de tipo horizontal de concreto por su simplicidad y efectividad, y de mínimo mantenimiento en el tratamiento preliminar para un caudal

$Q_d=1.158$  l/s. Después del desarenador se mide el caudal mediante un medidor de caudal tipo Parshal de régimen crítico.

**Tabla 21**

*Parámetros de diseño (desarenador horizontal).*

<b>Parámetros del diseño</b>			
Densidad relativa de la arena	Dr :	2.65	* CEPIS
Diámetro de la partícula 0.50mm	$\Phi$ :	0.05	cm RNE OS.090
Viscosidad cinética	b:	0.0101	cm <sup>2</sup> /s CEPIS
Velocidad horizontal 0.30 + 20%	Vh :	0.3	m/s RNE OS.090
Velocidad de sedimentación	Vs:	0.053	m/s CEPIS
Tasa de remoción 40 -70 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h	Gr :	70	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h RNE OS.090
Coef. De rugosidad del canal	n:	0.014	* Bibliografía
<b>Criterios del diseño</b>			
Ancho del Canal ingreso desarenador	B :	0.16	m Calculo cámara de rejas
Temperatura de agua	T:	20	°c Dato del campo

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 22**

*Dimensiones finales del desarenador horizontal.*

<b>Dimensiones</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Und</b>
Tipo	horizontal	*
Número de líneas	3	m
Caudal de diseño	1.156	l/s
Carga superficial	1.50	l/s
Área	0.65	m/s
Profundidad de agua	0.60	m/s
Velocidad promedio	45.00	°
Ancho	9.81	m/s
Longitud	2.20	m
Cantidad de arena depositada	Ver	Anexo E

*Nota:* Elaboración propia

## 5.4 DISEÑO DE TRAMPA DE GRASAS

Para el diseño de la trampa de grasas se eligió una estructura rectangular de dos compartimentos (con flujo bajo placa deflectora), TRH = 15 min, fabricada de concreto o polietileno reforzado. Se considera un fondo con pendiente del 10% para facilitar la recolección de sólidos sedimentables. Se tiene un ingreso y salida en tubería “T” extendido 0.30 cm con terminación en codo 90° para reducir turbulencias. El desnivel entre el ingreso y salida será de 0.20cm.

**Tabla 23**

*Parámetros de diseño (trampa de grasas).*

Parámetros del diseño				
Descripción	Dato	Cant	Und	Observación
Caudal de diseño (máximo horario)	Qd :	1.16	l/s	*
Tiempo de retención (T): 10 a 20 min	T :	15	min	RNE OS.090
Velocidad de flujo horizontal (V): <0.005 m/s	V :	0.0101	cm <sup>2</sup> /s	CEPIS
Profundidad útil (H): 0.3 a 1.0 m	H :	0.50	m/s	RNE OS.090
Relación largo ancho L : A		2 : 1	*	

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 24**

*Dimensiones finales de la trampa de grasas.*

Dimensiones	Cantidad	Und
Largo total	2.00	m
Ancho	1.00	m
Profundidad útil	0.50	m
Borde libre	0.20	m

*Nota:* Elaboración propia

## 5.5 DISEÑO DE TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN

El tanque de homogeneización tiene como objetivo nivelar el caudal y la carga entrante a la PTAR, mezclar los sólidos suspendidos para asegurar una mezcla uniforme. Será de tipo cuadrado de concreto reforzado (revestido con impermeabilizante químico) o fibra de vidrio reforzado, tiene un agitador mecánico de hélice axial para evitar descomposición en un TRH de 6 horas. Del tanque de homogeneización se bombea el agua residual al reactor MBBR.

**Tabla 25**

*Parámetros de diseño (tanque de homogeneización).*

Parámetros del diseño			
Descripción	Dato	Cant	Und
Caudal de diseño (máximo diario)	Qd :	0.76	l/s
Variación de caudal:		Fluctuaciones horarias	
Tiempo de retención hidráulica:	Th :	6	horas
Tipo de tanque:		Cuadrado	

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 26**

*Dimensiones finales del tanque de homogeneización.*

Dimensiones	Cantidad	Und
Tipo	Cuadrado	Concreto
Largo	3.00	m
Ancho	3.00	m
Profundidad	2.30	m
Borde libre	0.30	m
Agitador	Agitador axial	100W (AISI 304)
Bombas	Bomba sumergida	Pedrollo RX 3/20 0.75 HP AISI 304

*Nota:* Elaboración propia

## 5.6 DISEÑO DE REACTOR MBBR

El reactor biológico de lecho móvil (MBBR) para un caudal de 0.76 l/s, consta de dos compartimentos, uno de alta carga y otro de mediana carga, es de flujo continuo, de material de concreto armado o fibra de vidrio. Los portadores de biomasa (carriers) han sido escogido con 500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de superficie efectiva, para la cotización con los proveedores en el mercado. Se tiene difusores de burbuja gruesa, tamices retenedores en la salida, y un canal de purga.

**Tabla 27**

*Parámetros de diseño (reactor biológico de lecho móvil MBBR).*

Parámetros del diseño				
Descripción	Dato	Cant	Und	Observación
DBO5 ingreso:	DBO5 in :	169.80	mg DBO5/l	según analítica del agua residual
DBO5 salida:	DBO5 out :	15.00	mg DBO5/l	para cumplimiento de ECA categoría 3
Eficiencia de remoción de DBO5 requerida:	Ef :	91.17%	*	
Eficiencia de remoción de DBO5 elegida:	Ef :	95.00%	*	
Carga orgánica removida DBO5 al 95%	So :	161.31	mg DBO5/l	
Caudal de diseño:	Qd :	0.76	l/s	
Tiempo de retención hidráulica:	TRH :	6	horas	tiempo de retención recomendada
Geometría del tanque:		Rectangular (en dos etapas)		

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 28***Dimensiones finales del reactor biológico de lecho móvil MBBR.*

Dimensiones	Cantidad	Und
Tipo	Rectangular	2 etapas
Área superficial del tanque	6.60	m <sup>2</sup>
Profundidad útil del tanque	3.00	m
Dimensiones de etapa 1	2.0 x 3.5	m
Dimensiones de etapa 2	2.0 x 1.5	m
Superficie específica (carriers)	500.00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
DBO ingreso	169.80	mg DBO <sub>5</sub> /l
DBO salida	< 15	mg DBO <sub>5</sub> /l
Difusores	burbuja gruesa	*
Aire requerido	15.27	m <sup>3</sup> /h

*Nota:* Elaboración propia

## 5.7 DECANTADOR LAMELAR

Sistema compacto de separación sólido-líquido, basado en placas paralelas inclinadas a 60° respecto a la horizontal, que aumenta el área de sedimentación sin ampliar la huella física. Se colocará después del reactor biológico MBBR para decantar y remover los sólidos suspendidos del efluente.

**Tabla 29***Dimensiones finales del decantador lamelar.*

Descripción	Parámetros de diseño			Observación
	Dato	Cant	Und	
Caudal de diseño (horario)	Qdh :	2.75	m <sup>3</sup> /h	Volumen requerido, para un TRH recomendado.
Carga hidráulica superficial	CHS :	3.00	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *h	2 – 5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h para aguas residuales municipales
Ángulo de inclinación de las placas	Vol :	60.00	°	respecto a la horizontal

Longitud útil de las placas	Lp :	1	m	medida comercial
Separación entre placas	Sp :	50	mm	mínimo
Ancho del módulo	Ap :	1	m	medida comercial
Eficiencia deseada de remoción de SST	Ef SST :	> 80 %	*	considerar uso de coagulante y floculantes

*Nota:* Elaboración propia

## 5.8 ESPESADOR DE LODOS

Para reducir el volumen de los lodos generados en el proceso MBBR, aumentando su concentración de sólidos mediante sedimentación por gravedad. Para ello se escoge un coeficiente de producción de lodos de 0.40 kg SS/Kg DBO5 del tratamiento, y una concentración de lodos sin espesar de 3.5 Kg SS/m<sup>3</sup> la cual se espesará hasta una concentración de 15 Kg SS/m<sup>3</sup>.

**Tabla 30**

*Dimensiones finales del tanque espesador de lodos.*

Dimensiones	Und	Cantidad
Tipo (D x H)	Cilíndrico	1.0 x 3.0
Tiempo de retención hidráulico	TRH :	16.00 horas
Volumen del tanque	V :	1.45 m <sup>3</sup>
Producción de lodos diaria	P lodos :	4.26 kg SST/d
Caudal de lodos de entrada	Q lodos in:	1.22 m <sup>3</sup> /d
Caudal de lodos de salida	Q lodos out:	0.28 m <sup>3</sup> /d

*Nota:* Elaboración propia

## 5.9 FILTRACIÓN

Para garantizar un efluente de alta calidad ( $DBO_5 < 10 \text{ mg/L}$ ,  $SS < 5 \text{ mg/L}$ ), se propone un sistema de filtración por lecho multimedia (arena + antracita), eficiente, compacto y de bajo mantenimiento.

**Tabla 31**

*Diseño del sistema de filtro multimedia.*

Formula	Diseño de filtro multimedia		
$Ar = Q_{dh} / V_f$	Caudal de entrada diario	Qd : 2.75	m <sup>3</sup> /h
	Velocidad de filtración	Vf : 7	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *h
	Área requerida	Ar : 0.39	m <sup>2</sup>
Material filtrante:	Capa superior:	Antracita (0.8–1.2 mm, profundidad 0.3–0.5 m).	
	Capa inferior:	Arena sílice (0.4–0.8 mm, profundidad 0.3–0.5 m).	
	Grava soporte:	3–5 capas (tamaño graduado de 2–32 mm)	
	Diámetro del filtro	D : 0.71	m cilíndrico vertical
Lavado con aire + agua:		Agua: 30–40 m/h durante 5–10 min.	
		Aire: 50–60 m/h durante 2–5 min.	

*Nota:* Elaboración propia

## 5.10 DESINFECCIÓN

Tanque de contacto con NaClO para reducir los microorganismos patógenos (coliformes fecales, bacterias, virus) en el efluente final para cumplir con los límites establecidos por la normativa ( $< 1000 \text{ UFC/100 mL}$  para reúso agrícola). Primero se realiza la dosificación y luego permitir tiempo suficiente en el tanque de contacto, para activación del cloro.

**Tabla 32***Diseño del sistema de desinfección.*

Formula		Diseño de desinfección			
	Caudal de entrada diario	Qd :	2.75	m <sup>3</sup> /h	
	Efluente a desinfectar	Agua tratada post-filtro (DBO <sub>5</sub> < 20 mg/L, SST < 10 mg/L).			
	Reducción de coliformes fecales	< 1000 UFC/100 mL			
	Dosis aplicada de cloro	D :	8.00	mg/L	5–10 mg/L (dependiendo de demanda de cloro residual).
$C = Qd \times D$	Consumo diario	C :	0.53	kg/d	
$Vd = C / (.12 * 1.2)$	Volumen diario	Vd :	3.67	L/d	Solución de NaClO al 12%
Tanque de contacto	Tiempo de contacto	t :	30	min	≥ 30 min (en un tanque de contacto)
$Vol = Q * t$	Volumen	Vol :	1.38	m <sup>3</sup>	Dimensiones: 1.0 x 1.0 x 1.5 m
Bomba dosificadora	Caudal de dosificación	Qdo :	0.15	L/h	
	Volumen de dosificación (30 días)	Vol :	110.04	L/mes	
	Cloro residual libre objetivo:	Clr :	0.40	mg/L	0.2–0.5 mg/L (máximo 1 mg/L para reúso).

*Nota:* Elaboración propia

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 6.1 COSTOS DE LA INVERSIÓN

Se calculará indirectamente de la base de los porcentajes estimados:

*Estudios y Diseño (10-15% del total)* ----- *ED*

*Obras Civiles (30-50% del total)* ----- *OC*

*Equipamiento y Tecnología MBBR (25-35% del total)* -----*ET*

*Instalación y Puesta en Marcha (10-15%)* ----- *IPM*

*Gastos Indirectos (5-10%)* ----- *GI*

Costo total de la inversión:  $CTI = ED + OC + ET + IPM + GI$  (13)

Si tenemos el costo de obras civiles (OC), equipamiento y tecnología MBBR (ET) que equivalen el aproximadamente del 60 - 70% de la inversión. Por ende, podemos estimar el costo total de la inversión.

$$CTI = 1.5 \times (OC + ET) \quad (14)$$

### 6.1.1 Presupuesto de obras civiles

El presupuesto de las obras civiles, se realiza con un análisis estático con precios unitarios para los componentes más críticos.

**Tabla 33**

*Costos directos (Obras civiles).*

Ítem	Descripción	Und	Cant	Precio unitario	Precio parcial
1	<u>OBRAS PROVISIONALES, TRABAJOS PRELIMINARES Y SEGURIDAD, SALUD EN OBRA</u>				
1.01	Obras provisionales (cartel de obra, almacén, guardianía, cerco, comedor, energía eléctrica, sanitarios)	Glb	1.00	15,000.00	15,000.00
1.02	Trabajos preliminares (transporte de materiales, movilización y desmovilización de equipos)	Glb	1.00	15,000.00	15,000.00
1.03	Seguridad y salud de obra (EPP's, EPC's, señalización temporal, recursos ante emergencias, exámenes médicos, agua, etc.)	Glb	1.00	15,000.00	15,000.00
1.04	Plan de manejo ambiental (capacitación, implementación de señales, contenedores de residuos, disposición final, equipo de contingencia, monitoreos de calidad de agua, aire y suelo)	Glb	1.00	15,000.00	15,000.00
2	<u>EXPLANACIONES: CORTE DE TALUD Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA PARA PTAR</u>				
2.01	Excavación c/ maquinaria, relleno, compactación y eliminación de material excedente. Inc. control topográfico.	m2	300.00	25.00	7,500.00
3	<u>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TICAPAMPA</u>				
3.01	Construcción de pisos de concreto E=4" acabado cemento pulido a todo costo. Inc. control topográfico.	m2	300.00	50.00	15,000.00
3.02	Construcción de cámara de rejillas de C°A° con by pass, incluye accesorios (rejilla metálica e=1" Inox, compuerta metálica Inox, plataforma de limpieza inox, juntas c/water stop). Qmh = 1.16 l/s	und	1.00	3,000.00	3,000.00
3.03	Construcción de desarenador horizontal de C°A° doble, incluye accesorios de limpieza. Qmh = 1.16 l/s, incluye medidos de caudal	und	1.00	6,500.00	6,500.00

3.04	Suministro e instalación de trampa de grasas de C°A° o Fibra de vidrio, incluye accesorios de acoplamiento. Qmh = 1.16 l/s	und	1.00	2,000.00	2,000.00
3.05	Construcción de tanque de homogeneización de C°A° incluye accesorios de acoplamiento. Vol = 20m3	und	1.00	25,000.00	25,000.00
3.06	Construcción de cámara C°A° de contacto de cloro 1.0 x 1.0 x 1.5 m	und	1.00	2,000.00	2,000.00
3.07	Suministro e instalación de tubería HDPE 4" alcantarillado para emisario terrestre desde PTAR a Rio Ticapampa L = 50 m	m	50.00	500.00	25,000.00
3.08	Suministro e instalación de tableros eléctrico y de control automatizado	und	1.00	10,000.00	10,000.00
3.09	Suministro e instalación de transformado trifásico Pot máxima = 30 kW	und	1.00	20,000.00	20,000.00
4	<u>CONSTRUCCIÓN DE CASETA DE GUARDIANÍA, SS HH Y DEPOSITO</u>				
4.01	Construcción de ambientes de guardianía, sshh, almacén, en 30m2, acabado fino, techo aligerado, tanque elevado, iluminación led, pintado satinado.	m2	30.00	2,000.00	60,000.00
5	<u>CONSTRUCCIÓN DE CERCO PERIMÉTRICO DEL PTAR</u>				
5.01	Construcción de cerco perimétrico de postes metálicos, malla galvanizada y sardinel de concreto simple, con serpentina.	m	60.00	400.00	24,000.00
5.01	Instalación de iluminación en exteriores con 06 postes de CAC 8/200, reflectores de 200W led	und	6.00	5,000.00	30,000.00
				Total =	290,000.00

Nota: Elaboración propia

Costo de obras civiles, del cuadro = S/ 290,000

#### 6.1.2 Presupuesto de equipamiento y tecnología

El presupuesto de equipamiento y tecnología para una PTAR basada en el sistema MBBR se contempla tanto la adquisición de maquinaria especializada como el conjunto de sistemas tecnológicos que garantizan la eficiencia operativa y el cumplimiento normativo. El presupuesto debe considerar la cantidad, capacidad y

especificaciones (reactor, bombeo, sopladores, instrumentación y control), así como su material de fabricación (generalmente acero inoxidable o fibra de vidrio).

**Tabla 34**

*Costos directos (Equipamiento y tecnología MBBR).*

Item	Descripción	Und	Cant	Precio unitario	Precio parcial
6	<u>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TICAPAMPA</u>				
6.01	Suministro e instalación de reactor modular contenerizado MBBR (02 compartimentos de alta y mediana carga, y 01 decantador lamelar), V = 30m <sup>3</sup> , portadores de biomasa HDPE Se > 500m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> al 30%V, incluye sistema de aireación de burbuja gruesa q = 15.5 m <sup>3</sup> aire/h, sistema de retención de carriers, DBO ingreso = 170 mg/l, DBO salida < 15 mg/l, TRH = 6 h	glb	1.00	650,000.00	650,000.00
6.02	Suministro e instalación de espesador de fangos en troncocónico invertido, H = 3.0m x D = 1.0m, con accesorios de limpieza, sistema de purga, material Inox.	und	1.00	30,000.00	30,000.00
6.03	Equipamiento de sensores, automatización y monitoreo continuo	glb	1.00	20,000.00	20,000.00
6.04	Suministro e instalación de 01 filtro autolimpiante multimedia (zeolita), Q=2.75m <sup>3</sup> /h, 50 micrones	und	1.00	7,000.00	7,000.00
6.05	Suministro e instalación de bomba dosificadora de cloro q = 0.15 l/h, automatizada, incluye depósitos de reactivos	und	1.00	3,000.00	3,000.00
				<b>Total =</b>	<b>710,000.00</b>

*Nota:* Elaboración propia

*Costo de equipamiento y tecnología, del cuadro = S/ 710,000*

### 6.1.3 Otros costos y resumen de costos

$$CTI = 1.40 * (OC * ET) \quad (13)$$

$$CTI = 1.3 \times (290,000 + 710,000) = S/ 1'300,000$$

**Tabla 35***Resumen de costos CAPEX*

<i>Descripción</i>		<b>Cantidad</b>	<b>%</b>
<i>Obras Civiles (30-50% del total)</i>	OC	290,000.00	29.0%
<i>Equipamiento y Tecnología MBBR (25-35% del total)</i>	ET	710,000.00	71.0%
<b>Parcial =</b>		<b>1,000,000.00</b>	<b>100.0%</b>
<i>Estudios y Diseño (10-15% del total)</i>	ED	100,000.00	10.0%
<i>Instalación y Puesta en Marcha (10-15%)</i>	IPM	100,000.00	10.0%
<i>Gastos Indirectos (5-10%)</i>	GI	100,000.00	10.0%
<b>Total =</b>		<b>1,300,000.00</b>	

*Nota:* Elaboración propia

## 6.2 COSTOS OPERATIVOS

Para desarrollo de los costos operativos de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) depende de varios factores, como su capacidad, tecnología utilizada, tipo de tratamiento (primario, secundario, terciario), costos energéticos, mano de obra y mantenimiento. A continuación, te detallo los principales componentes:

**Tabla 36***Cálculo de los costos operativos PTAR.*

<b>A. Información técnica</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Caudal diario	m3/día	65.664
Horario de operación	h	24
Caudal horario	m3/h	2.74
<b>B. Consumo energético</b>		

Ítem	Consumo de potencia (kWh)	N° de equipos encendidos (simultáneos)	Horas de operación por día (h)	Consumo (kWd)
Bomba de Filtración	1.4	1	12	16.8
Bomba de retro lavado	1.4	1	12	16.8
Bomba sumergible	1	1	16	16
Bomba dosificadora	0.04	1	8	0.32
Soplador	3.2	1	24	76.8
Filtro de Zeolita	0.024	1	12	0.288
Consumo total (kWd)=				127.008

Ítem	Und	Valor
Consumo total =	kWh	127.01
Costo por potencia =	S/. / kWh	0.90
Costo diario =	S/. / día	114.31
<b>Costo energético =</b>	<b>S/. / m3</b>	<b>1.93</b>

#### C. Insumos químicos

Reactivos	Dosis (mg/l)	Costo (S/. Kg)
Hipoclorito de sodio	5	5.5

Ítem	Unidad	Valor
Hipoclorito de sodio	kg/H	0.014
	kg/día	0.328
	kg/mes	9.850
Costo diario	S/. / día	1.81
<b>Costo de químico</b>	<b>S/. / m3</b>	<b>0.0275</b>

#### D. Mano de obra

Ítem	Unidad	Costo (S/. Kg)
Costo de operador	S/. /h	10
Cantidad de operadores	Unidad	1
Horas de trabajo del operador	h/día	3
Costo diario	S/. /día	30
<b>Costo de mano de obra</b>	<b>S/. /m3</b>	<b>0.46</b>

#### E. Disposición de lodos y residuos

Ítem	Unidad	Valor
Costo de disposición	S/. / ton	200.000

Cantidad de lodos generados	ton/m3	0.002
Cantidad de residuos sólidos generados	ton/m3	0.001
Costo diario	S/. / día	39.40
<b>Costo de disposición</b>	<b>S/. /m3</b>	<b>0.60</b>

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 37**

*Resumen de costos operativos*

Ítem	Unidad	Costo
Costo energético	S/. / m3	1.93
Costo de químicos	S/. / m3	0.0275
Costo de mano de obra	S/. / m3	0.46
Costo de disposición (lodos y/o residuos)	S/. / m3	0.60
<b>Costo total de operación</b>	<b>S/. / m3</b>	<b>3.02</b>

*Nota:* Elaboración propia

### 6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO

Se presenta un análisis comparativo entre la tecnología MBBR y otros sistemas de tratamiento de aguas residuales comúnmente empleados en contextos urbanos y rurales, con el fin de evaluar su desempeño técnico, requerimientos espaciales y costos asociados, considerando las condiciones específicas del centro poblado Ticapampa. El diseño elaborado de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR, será la base para el análisis multicriterio comparativo.

### 6.3.1 Criterios de comparación

- Eficiencia de remoción de DBO5 (%): Indica el porcentaje de DBOs que el sistema puede eliminar del agua residual.
- Área requerida (m<sup>2</sup>): El espacio físico necesario para implementar el sistema.
- Costo de inversión inicial (CAPEX en S/.): Representa el gasto inicial para la construcción e instalación del sistema.
- Costo de operación y mantenimiento anual (OPEX en S./año); Incluye energía, químicos, mano de obra y mantenimiento.
- Facilidad de operación (baja, media, alta): Lagunas, humedales (requieren menos supervisión).
- Requerimientos técnicos: Nivel de capacitación necesario para operar el sistema.

### 6.3.2 Comparación Técnica y Económica

**Tabla 38**

*Comparación técnica y económica – I*

Criterio	MBBR	Lagunas de estabilización	Lodos activados convencionales
Remoción de DBO5 (%)	≥ 90%	60–80%	85–95%
Área requerida (m <sup>2</sup> )	80–100	> 500	150–300
CAPEX (S/.)	350,000	180,000	400,000
OPEX (S./año)	20,000	8,000	25,000
Complejidad operativa	Baja	Muy baja	Alta

Requiere energía eléctrica	Sí	No	Sí
----------------------------	----	----	----

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 39**

*Comparación técnica y económica – II*

Tecnología	Eficiencia DBO <sub>5</sub> (%)	Área Requerida (m <sup>2</sup> )	CAPEX (S/.)	OPEX (S./año)	Facilidad de Operación	Requerimientos Técnicos
<b>Lagunas de Estabilización</b>	60-80%	Muy Alta	Bajo	Bajo	Alta	Bajos
<b>Lodos Activados Convencionales</b>	85-95%	Media	Medio-Alto	Alto	Media	Medios-Altos
<b>MBBR</b> (Moving Bed Biofilm Reactor)	85-95%	Baja-Media	Medio-Alto	Medio	Media-Alta	Medios
<b>MBR</b> (Biorreactor de Membrana)	90-98%	Baja	Alto	Alto	Baja	Altos
<b>Filtros Percoladores</b>	70-85%	Media	Medio	Medio	Media	Medios
<b>Humedales Artificiales</b>	60-80%	Alta	Medio	Bajo	Alta	Medios-Bajos
<b>SBR</b> (Sequencing Batch Reactor)	85-95%	Media	Medio-Alto	Medio-Alto	Media	Medios-Altos
<b>UASB</b> (Reactores Anaerobios)	60-80% (solo anaerobio) +80% (con postratamiento)	Baja-Media	Medio	Bajo-Medio	Media	Medios-Altos

*Nota:* Elaboración propia

Eficiencia:

El sistema MBBR muestra eficiencias iguales o superiores al 90 % en remoción de DBO<sub>5</sub>, superando a tecnologías pasivas como las lagunas de estabilización, y comparable a sistemas activos como lodos activados.

Área:

La principal ventaja del sistema MBBR radica en su compacidad. Mientras que una planta convencional requiere áreas superiores a 150 m<sup>2</sup>, MBBR puede instalarse en menos de 100 m<sup>2</sup>,

## CAPÍTULO VII

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 7.1 DISEÑO TÉCNICO PROPUESTO

##### 7.1.1 Caudal de diseño

Según el diagnóstico poblacional y los patrones de consumo estimados, se adopta el siguiente caudal de diseño:

**Tabla 40**

*Caudal de diseño.*

Parámetro	Valor estimado
Población proyectada (20 años)	194 habitantes
Dotación diaria	220 L/hab·día
Caudal promedio (Q_prom)	48.56 m <sup>3</sup> /día
Caudal máximo horario (Q_maxh)	4.05 m <sup>3</sup> /h

*Nota:* Elaboración propia

Se considera un factor de caudal pico de 2.0 (máximo horario) para el diseño hidráulico de la cámara de rejillas y desarenador horizontal.

Se considera un factor de caudal pico de 1.3 (máximo diario) para el diseño hidráulico del pozo de homogeneización, reactor MBBR, decantador lamelar, filtro multimedia, tanque de contacto.

### 7.1.2 Caracterización del afluente

El afluente o agua cruda que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales tiene las siguientes características fisiológicas, químicas y bacteriológicas.

**Tabla 41**

*Caracterización del afluente.*

Parámetro	Valor típico adoptado
DBO <sub>5</sub>	300 mg/L
DQO	500 mg/L
SST (sólidos)	250 mg/L
Temperatura promedio	15–20 °C
pH	6.5–7.5

*Nota:* Elaboración propia

### 7.1.3 Esquema del diseño propuesto

El sistema MBBR se diseñará con las siguientes unidades:

Pretratamiento:

- Rejilla manual: Cámara de rejas de C°A° con by pass, incluye accesorios (rejilla metálica e=1" Inox, compuerta metálica Inox, plataforma de limpieza inox, juntas c/water stop). Qmh = 1.16 l/s

- Desarenador tipo canal trapezoidal: Construido en C°A° , de doble canal, compuertas metálicas e incluye accesorios de limpieza.  $Q_{mh} = 1.16 \text{ l/s}$

- Trampa de grasas (opcional): Fabricado de C°A° o Fibra de vidrio, incluye accesorios de acoplamiento.  $Q_{mh} = 1.16 \text{ l/s}$

- Trampa de homogeneización: Construido en C°A° incluye accesorios de acoplamiento. Agitador de mecánico.  $Vol = 20 \text{ m}^3$

Reactor biológico MBBR:

- Reactor aeróbico con medios plásticos móviles (soportes biofilm): Compartimentado de alta y mediana carga,  $V = 66.0 \text{ m}^3$ , carriers con  $Se > 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$  al 30% Vol llenado, con sistema de aireación de burbuja gruesa  $q = 15.5 \text{ m}^3 \text{ aire/h}$ , sistema de retención de carriers, DBO ingreso =  $170 \text{ mg/l}$ , DBO salida  $< 15 \text{ mg/l}$ , TRH = 6 h, carga superficial es de  $4.8 \text{ DBO}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  ,

Sistema de aireación mediante difusores tubulares en el fondo del reactor, con soplador eléctrico  $3.2 \text{ kw}$ , se estima un  $1.5 \text{ kg O}_2$  por  $\text{kg DBO}$  removida, se requiere aproximadamente  $27 \text{ kg O}_2/\text{día}$ ,

Sedimentador secundario:

- Tanque de sedimentación rápida lamelar

- Filtración multimedia:

- Espesador de lodos y retorno de purga a tanque de homogeneización

Desinfección:

- Cloración en canal con contacto de 30 minutos

#### 7.1.4 Diseño estructural y distribución espacial

Área total estimada del sistema: 80 m<sup>2</sup>

- Pretratamiento: 10 m<sup>2</sup>
- Reactor MBBR: 40 m<sup>2</sup>
- Sedimentador secundario: 20 m<sup>2</sup>
- Cloración: 5 m<sup>2</sup>
- Espacio libre para operación y accesos: 5 m<sup>2</sup>

El diseño garantiza que la planta pueda implementarse en espacios reducidos, cumpliendo el criterio < 200 m<sup>2</sup>.

Plano en planta: (aquí se incluirá un esquema o plano de distribución)

#### **Figura 36**

*Esquemática planta de PTAR MBBR.*



lo largo de las horas diarias se ha resuelto mediante el tanque de homogeneización con un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, con un agitador mecánico para evitar descomposición prematura de los efluentes almacenados.

Se complementado el reactor biológico con un sistema de decantación lamelar que funcionara recogiendo los solidos sedimentables de la materia consumida. El tratamiento terciario se tiene un filtro multimedia para retener solidos finos en el orden de 20 micras, así como bajar la turbiedad. La desinfección se realiza por el método más común y confiable como es el tanque de contacto con cloro.

### 7.3 COSTOS ESTIMADOS DEL SISTEMA

Para la estimación de costos se ha calculado el CAPEX (costo de capital) y el OPEX (costos de operación). Para el CAPEX se tiene una inversión inicial en S/. 1'300,000, la cual comprende:

Movimiento de tierras: Se ha calculado por el costo unitario m<sup>2</sup> de intervención, para un promedio de excavación de 1.0 de profundidad, según estudio de suelos.

Obra civil: Comprende las infraestructuras auxiliares como guardianía, sshh, almacén, cerco perimétrico, pisos de concreto, etc. Y además infraestructura de tratamiento de aguas residuales como la cámara de rejillas, desarenador horizontal, tanque de homogeneización, que son calculados en base los costos unitarios de partidas típicas de concretos hidráulicos, encofrados caravista y normal, acero liso de construcción, entre otros que son promedios de la ejecución de obra civil local.

El equipamiento comprende los soportes plásticos, sopladores, sensores, bombas hidráulicas, el reactor modular MBBR, espesador de fangos troncocónico metálico, dosificador de cloruro de sodio, etc, que son calculado en base a cotización con empresas especializadas en el rubro.

Las instalaciones eléctricas, son costos promedio de una planta industrial según la potencia, consumo, calidad del equipamiento electromecánicos.

Mano de obra es según los costos locales de mano de obra.

Contingencias y gastos generales, se calculan en base a porcentajes de proyectos similares.

Desglose del OPEX (S/. / año):

- Energía eléctrica, se ha realizado el cálculo de consumo energético para la operación diaria de la planta de tratamiento de aguas residuales MBBR.
- Mantenimiento preventivo, según el manual del fabricante para equipos electromecánicos y según las recomendaciones de manuales y directivas para plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Personal operativo, según los precios promedio de costo de hora hombre local.
- Insumos químicos (desinfección), según el cálculo de consumo de reactivos químicos para la etapa de desinfección con hipoclorito de sodio.

Evaluación de costos por m<sup>3</sup> tratado y comparación con otras tecnologías.

**Tabla 42**

*Tabla comparativa CAPEX y OPEX con otras tecnologías*

<b>Tecnología</b>	<b>CAPEX estimado (USD/m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>OPEX estimado (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo total (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Observaciones relevantes</b>
<b>MBBR</b>	200 – 500	0.15 – 0.30	0.25 – 0.45	Bajo mantenimiento, modular y compacto
<b>Lodos activados (convencional)</b>	400 – 700	0.30 – 0.50	0.45 – 0.80	Mayor complejidad operativa, requiere personal capacitado
<b>Filtros percoladores</b>	150 – 350	0.20 – 0.35	0.30 – 0.50	Bajo consumo energético, pero menor eficiencia en climas fríos
<b>Biodiscos (rotativos)</b>	250 – 500	0.20 – 0.40	0.35 – 0.55	Mecánicamente más delicados, sensibles a paradas por fallos
<b>Lagunaje (estabilización)</b>	50 – 150	0.05 – 0.15	0.10 – 0.30	Muy bajo costo, pero requiere gran espacio (>1000 m <sup>2</sup> ) y tiene baja eficiencia en clima frío

*Nota:* Elaboración propia

#### 7.4 COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS

Con respecto a las tecnologías convencionales (e.g., lodos activados, filtros percoladores, lagunas facultativas), se ha hallado que los costos de capital son

mayores en la propuesta de planta de tratamiento de aguas residuales MBBR, mientras que los costos operativos son similares o de menor costo.

**Tabla 43**

*Tabla comparativa técnica y económica*

<b>Criterio / Tecnología</b>	<b>MBBR</b>	<b>Lodos activados</b>	<b>Filtros percoladores</b>	<b>Biodiscos</b>	<b>Lagunaje (estabilización)</b>
<b>Eficiencia DBO</b>	85–95%	90–98%	75–90%	80–95%	60–85%
<b>Requiere retorno de lodos</b>	✗	☑	✗	✗	✗
<b>Consumo energético</b>	Medio	Alto	Bajo	Medio	Muy bajo
<b>Área requerida (&lt;200 m<sup>2</sup>)</b>	☑	✗ (>150 m <sup>2</sup> )	☑ (100–150 m <sup>2</sup> )	☑ (100–150 m <sup>2</sup> )	✗ (>1000 m <sup>2</sup> )
<b>Modular y escalable</b>	☑ Alta	⚠ Limitada	⚠ Limitada	☑ Moderada	✗
<b>Complejidad operativa</b>	Baja	Alta	Media	Media	Muy baja
<b>Nivel técnico requerido</b>	Bajo	Alto	Medio	Medio	Muy bajo
<b>Costo CAPEX (USD/m<sup>3</sup>/día)</b>	200 – 500	400 – 700	150 – 350	250 – 500	50 – 150
<b>Costo OPEX (USD/m<sup>3</sup> tratado)</b>	0.15 – 0.30	0.30 – 0.50	0.20 – 0.35	0.20 – 0.40	0.05 – 0.15
<b>Costo total estimado (USD/m<sup>3</sup>)</b>	0.25 – 0.45	0.45 – 0.80	0.30 – 0.50	0.35 – 0.55	0.10 – 0.30
<b>Requiere supervisión continua</b>	✗	☑	⚠ Eventual	⚠ Eventual	✗
<b>Climas fríos (eficiencia)</b>	☑ Buena	☑ Buena	⚠ Reducida	⚠ Variable	✗ Deficiente

*Nota:* Elaboración propia

### Factores clave

- Eficiencia de remoción DBO:
- Requerimientos de espacio (<200m<sup>2</sup>):
- Complejidad operativa:
- Costo de inversión y O&M:

Como ventajas del sistema de MBBR son lo compacto de la instalación donde se requiere menos de 200m<sup>2</sup> para un caudal de 1 L/s, mientras que tecnologías intensivas que la normativa prefiere superan fácilmente este valor.

Otra ventaja del sistema completo propuesto es la limpieza o el mínimo requerimiento de mano de obra, la planta podría operarse sola, aunque necesitaría automatizar todos los procesos.

Entre las desventajas son el costo significativamente alto respecto a tecnologías intensivas, también la manufactura de módulos de reactor biológico es de extrajeras por lo que en el tema de garantía o repuestos no es seguro. El costo energético también es alto, lo que puede descartar la tecnología en centros poblados con poca capacidad económica.

El sistema MBBR presenta mejor desempeño en términos de espacio y operación sencilla, con un CAPEX competitivo respecto a tecnologías convencionales en zonas de difícil acceso.

## 7.5 EVALUACIÓN DE FACILIDAD OPERATIVA Y REQUERIMIENTOS DE ESPACIO

7.5.1 Descripción de la rutina de operación esperada: monitoreo, limpieza, reemplazo de piezas.

- **Monitoreo**

- Frecuencia: Diaria o semanal, según el tamaño de la planta y las condiciones del afluente.
- Parámetros clave: pH, oxígeno disuelto (OD), temperatura, DBO, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), y amonio.
- Equipos requeridos: Sensores multiparamétricos y sondas, preferentemente con sistema de adquisición de datos remoto (SCADA).
- Intervención humana: Limitada a verificación visual y recolección de muestras para análisis de laboratorio cuando sea necesario.

- **Limpieza**

- Frecuencia: Mensual o bimensual, dependiendo de la carga orgánica y características del afluente.
- Actividades principales: Limpieza de rejillas, tamices, sopladores, y líneas de aireación. No se requiere limpieza de los portadores biológicos.
- Duración promedio: 2 a 4 horas por evento.

- Requerimientos: Herramientas básicas, EPP estándar. No se requiere desarme del sistema.

- **Reemplazo de piezas**

- Componentes críticos: Sopladores, difusores, sensores, bombas.
- Vida útil típica:
- Sopladores: 5 a 10 años.
- Difusores: 3 a 5 años.
- Sensores: 2 a 4 años.
- Frecuencia de reemplazo: Según fabricante y condiciones de operación. Se recomienda mantenimiento preventivo anual.

#### 7.5.2 Necesidad de personal especializado (baja o nula).

- Nivel requerido: Bajo a nulo.
- Justificación: La operación del sistema MBBR es semi-automatizada y robusta, con mínima necesidad de intervención técnica especializada. El diseño prioriza la operación simple, ideal para operadores con capacitación básica.
- Capacitación: Requiere únicamente formación inicial sobre el sistema y rutinas de mantenimiento básico.

#### 7.5.3 Evaluación del diseño en función de la fácil operación por operadores no calificados.

- Resultado: Altamente favorable.

- Características facilitadoras:
  - Automatización de monitoreo y control.
  - Sistema de aireación continua sin necesidad de intervención frecuente.
  - Ausencia de procesos complejos como retorno de lodos o control químico intensivo.
- Interfaz simple para el operador (panel HMI o SCADA básico).
- Conclusión: El diseño MBBR permite operación segura y efectiva por personal sin calificación técnica avanzada.

#### 7.5.4 Confirmación del cumplimiento del criterio de espacio reducido (< 200 m<sup>2</sup>).

- Resultado: Cumple el criterio.
- Área requerida: Dependiendo del caudal de diseño, una planta MBBR compacta puede ser instalada en un área de entre 40 y 90 m<sup>2</sup>, incluyendo tratamiento primario, reactor biológico, y decantación.
- Configuración recomendada: Estructura modular vertical u horizontal en skids o contenedores para maximizar eficiencia espacial.

#### 7.5.5 Posibilidad de modularidad o escalabilidad.

- Resultado: Alta.
- Modularidad:

- Posibilidad de instalar módulos adicionales en paralelo para aumentar la capacidad.
- Sistemas fácilmente integrables con tecnologías complementarias (e.g., desinfección UV, tratamiento terciario).
- Escalabilidad:
  - Incremento de volumen de tratamiento sin necesidad de rediseño completo.
  - Diseño flexible adaptable a distintas cargas y caudales futuros.

## 7.6 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD EN CONTEXTO RURAL

### Ventajas específicas:

- Robustez operativa: El sistema MBBR tolera fluctuaciones de caudal y carga orgánica, comunes en áreas rurales por la variabilidad en el uso del agua.
- Simplicidad mecánica: No requiere retorno de lodos ni procesos complejos, lo que reduce el riesgo de falla por mala operación.
- Baja dependencia de productos químicos: Ideal en zonas donde el abastecimiento logístico puede ser irregular.

### Limitaciones posibles:

- Dependencia energética (aunque de bajo consumo) que debe considerarse si la localidad presenta cortes frecuentes de electricidad.
- Disponibilidad de repuestos y soporte técnico en ubicaciones remotas puede requerir planificación anticipada.

## **CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1 CONCLUSIONES**

- El sistema MBBR demostró ser técnicamente viable para su implementación en centros poblados rurales como Ticapampa, logrando una eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> superior al 90% (según diseño), cumpliendo con los estándares exigidos por la normativa nacional de efluentes para el ECA categoría 3.
- La planta diseñada se adapta eficientemente a áreas reducidas, ocupando un espacio menor a 200 m<sup>2</sup>, lo que lo convierte en una solución adecuada para entornos con limitaciones físicas. Asimismo, su operación simplificada y bajo requerimiento de personal especializado la hacen apropiada para comunidades con limitada capacidad técnica.
- El análisis de costos reveló que la inversión inicial (CAPEX) es elevado con respecto a costos de proyectos con tecnologías extensivas para proyectos rurales, principalmente en los costos de operación y mantenimiento anuales (OPEX) dependiendo de la capacidad de gasto corriente de cada entidad

para ser sostenibles en el tiempo, es conveniente cuando se considera la posibilidad de financiamiento público o cooperación internacional.

- Frente a sistemas tradicionales como lodos activados o lagunas de estabilización, el MBBR ofrece ventajas significativas en eficiencia de tratamiento, menor requerimiento de espacio y facilidad operativa. No obstante, su principal desventaja radica en los elevados costos energéticos y en la necesidad de adquirir partes importadas (carriers, bombas, etc) y los repuestos de equipos, lo cual puede incrementar los costos de inversión en el ciclo de vida del proyecto.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar presencialmente el uso de la tecnología MBBR en centros poblados rurales donde el espacio sea limitado y se requiera un sistema de tratamiento eficiente y de fácil operación, especialmente en zonas altoandinas o de difícil acceso.
- Es indispensable implementar programas de capacitación técnica básica para el personal local encargado de la operación y mantenimiento del sistema, a fin de asegurar su adecuado funcionamiento y prolongar su vida útil.

- Se sugiere gestionar apoyo financiero mediante programas estatales de saneamiento rural o cooperación internacional, que permitan cubrir los costos iniciales de inversión y garanticen la sostenibilidad económica del proyecto.
- Se recomienda establecer un sistema de monitoreo periódico del rendimiento de la planta, especialmente en sus primeros años de operación, para verificar la eficiencia de remoción de contaminantes y realizar ajustes necesarios.
- Finalmente, se aconseja realizar estudios adicionales en otros centros poblados con características similares, con el fin de generar un modelo replicable y escalable de tratamiento de aguas residuales rurales basado en la tecnología MBBR.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldris, B., & Farhoud, N. (2020). Wastewater treatment efficiency of an experimental MBBR system under different influent concentrations. *DYSONA - Applied Science*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.30493/das.2020.103717>
- Araujo, W. R. (2020). Optimización del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la implementación del Sistema MBBR - Caylloma—Aquafil. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 23(45), Article 45. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v23i45.18047>
- Arocutipa, E. C., & Flores, R. A. (2005). PROPUESTA DE UNA PEQUEÑA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL MEDIO RURAL DE TACNA. *Ciencia & Desarrollo*, 9, Article 9. <https://doi.org/10.33326/26176033.2005.9.176>
- Azañedo Quilcate, V. M., Guerrero Ocas, L. A., Rojas Pérez, D. G., Ruiz Moncada, O. M., & Vásquez Sánchez, Á. R. (2020). Análisis Técnico Económico de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la Ciudad de Cajamarca, implementada bajo la modalidad de Obra por Impuestos. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652741>
- Aziz, S. Q., Omar, I., Bashir, M., & Mojiri, A. (2020). Stage by stage design for primary, conventional activated sludge, SBR and MBBR units for residential wastewater

- treatment and reusing. *Advances in Environmental Research*, 9, 233–249.  
<https://doi.org/10.12989/aer.2020.9.4.233>
- Boavida-Dias, R., Silva, J. R., Santos, A. D., Martins, R. C., Castro, L. M., & Quinta-Ferreira, R. M. (2022). A comparison of biosolids production and system efficiency between activated sludge, moving bed biofilm reactor, and sequencing batch moving bed biofilm reactor in the dairy wastewater treatment. *Sustainability*, 14(5), 2702. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01662-y>
- Cauna Quispe, C. E. (2020). *Sistema de tratamiento de aguas residuales del sector Arunta para reúso de áreas verdes del distrito de Tacna*.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12773/11366>
- Cerezo, I., & Mujica, V. (2024). Diseño y evaluación de un biorreactor a escala con tecnología MBBR en una empresa alimentaria. *Revista digital La Pasión del Saber*, 14(25), Article 25.
- Chacón Díaz, E. (2024). Condiciones de operación de un reactor de biopelícula de lecho móvil para mejorar la calidad del agua residual de Celendín—2023. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7482>
- Fernández Acuña, S. I. (2015). *Tratamiento y disposición de aguas residuales en plantas de tratamientos de agua potable en Chile*.  
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133319>

- García Fernández, L. L., & Medina Ormachea, R. E. (2021). *El tratamiento de aguas residuales como oportunidad para el desarrollo sostenible en el parque científico, tecnológico y social de Santa María del Mar—Punku*.  
<https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f5503201-a2ce-488f-b6ba-af540f87b4dd/content>.  
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20232>
- García, J. A. S., & Beltrán, A. P. M. (2020). *Trabajo Fin de Máster Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas*.
- Goswami, S., & Mazumder, D. (2019). Modelling and process design of Moving Bed Bioreactor (MBBR) for wastewater treatment—A Review. *J. Indian Chem. Soc.*, 96.
- Gutiérrez Murillo, D., & García Guzmán, F. N. (2018). *Diseño y operación de un reactor de lecho móvil aerobio para tratamiento de agua residual doméstica*.  
<https://repository.umng.edu.co/items/211f2adb-ab41-436a-b06c-81da116d5c48>
- Gzar, H. A., Al-Rekabi, W. S., & Shuhaieb, Z. K. (2021). Application of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) for Treatment of Industrial Wastewater: A mini Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1), Article 1.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012024>
- Huaman Buitron, N. A. (2023). Eficiencia del uso de bioportadores de plástico pet reciclado en reactores biológicos de lecho móvil para el tratamiento de aguas

- residuales municipales—Lima 2022. *Universidad Nacional Federico Villarreal*.  
<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/6718>
- Kamble, P. R., Lihare, H., & Thakre, N. (2022). Design of MBBR Based Sewage Treatment Plant. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(5), 4803–4809.  
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.43598>
- Khudhair, D. N., Hosseinzadeh, M., Zwain, H. M., Siadatmousavi, S. M., Majdi, A., & Mojiri, A. (2023). Upgrading the MBBR process to reduce excess sludge production in activated sludge system treating sewage. *Water*, 15(3), 408.
- Madan, S., Madan, R., & Hussain, A. (2022). Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): A review. *Applied Water Science*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01662-y>
- Manotupa Dueñas, L. F., & Muriel Ortiz, J. G. (2018). Propuesta elaboración de una guía para el proceso de diseño en proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.  
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/623193>
- Mayor Córdova, E. R. (2013). *Planeamiento integral de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales*.  
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/1764>

- Mayta Ccapa, T. P., Quispe Yucra, R. G., & Tito Luque, A. F. (2023). Diseño experimental del tratamiento secundario con tecnología MBBR para aguas residuales provenientes del camal Municipal de Cotahuasi—La Unión—Arequipa 2022. *Universidad Continental*.  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13873>
- Molinos-Senante, M., Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernández-Sancho, F., & Poch, M. (2012). Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: Environmental and economic aspects. *Science of The Total Environment*, 427–428, 11–18. [https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/64543/1/STOTEN\\_2012.pdf](https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/64543/1/STOTEN_2012.pdf).  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.023>
- Moya Chanca, S. R. (2023). Evaluación técnica y económica de unidades básicas de saneamiento con arrastre hidráulico y tipo compostera en zonas rurales. *Universidad Peruana Los Andes*.  
<http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/6268>
- Nazer Blaset, H. (2022). *Evaluación técnica y económica de un sistema de reúso y tratamiento de aguas servidas provenientes de PTAS Loma Larga ESVAL S.A.*  
<https://repositoriobibliotecas.uv.cl/handle/uvsc1/10805>
- Ochoa Foliaco, M. C. (2021). *Evaluación de la tratabilidad de nutrientes del agua residual doméstica de la Universidad EIA por medio de un biorreactor de lecho*

*fluido MBBR.* <https://repository.eia.edu.co/entities/publication/d21dd29e-8d49-48f8-805e-8eb13b386b6b>

Paz, R. E. E. (n.d.). *PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SAN JUAN DE MIRAFLORES.*

Perez Sandoval, A. C., & Sernaque Vela, K. Y. Y. (2019). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de la ciudad de Chiclayo por medio de lodos activados a través de aireación extendida.*  
[https://hdl.handle.net/20.500.12893/3894.](https://hdl.handle.net/20.500.12893/3894)

<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3894>

Ponce Melgar, G. (2019). Implementación de una PTAR para optimizar el sistema de regadío de parque en el distrito del Rímac—Lima—Perú. *Repositorio Académico USMP.* <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/6481>

Quintero, J. A. (2022). Diseño de propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales para reducir los niveles de contaminantes de un complejo agroindustrial en la ciudad de Ilo, 2022. *Universidad Continental.*  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12406>

Quiroz Pedraza, P. A. (2009). Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos.* <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/432>

- Quispe Sencia, Y. M. (2019). *Evaluación y propuesta técnica de una planta de tratamiento de aguas residuales con fines de reuso en la agricultura, para las localidades de Miraflores, las Yaras y Buena Vista en el distrito de Sama—Tacna*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10275>
- Renzo Abraham Velásquez Lozano. (2024). *Evaluación de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas MBBR para obtención de agua de riego*. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6743>
- Reyes Araujo, W. (2020). *Optimización del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la implementación del sistema MBBR en la provincia Caylloma—AQUAFIL*. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/d7be223c-ba8f-47da-9c54-0269b626106a>
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), Article 46. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03>
- Rosado, M., José, A., Valencia, S., Elmer, A., Olazaval, I. C., & Marianella, L. (2025). *Diagnóstico de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con sistema MBBR de campamento minero agosto- octubre 2023*. <https://apps.ucsm.edu.pe/UCSMERP/Docs/Tesis/011473.pdf>

- Santos, A. D., Martins, R. C., Quinta-Ferreira, R. M., & Castro, L. M. (2020). Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment. *Energy Reports*, 6, 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.158>
- Segui-Amortegui, L., Alfranca-Burriel, O., & Moeller-Chávez, G. (2014). Methodology for the technical-economic analysis of wastewater regeneration and reutilization systems. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5(2), 55–70.
- Sohail, N., Ahmed, S., Chung, S., & Nawaz, M. S. (2020). Performance comparison of three different reactors (MBBR, MBR and MBBMR) for municipal wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 174, 71–78.
- Vargas Navas, O. H., & Turca Ceballos, J. (2016). *Comportamiento de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un bioreactor de lecho móvil alimentado con agua residual doméstica, con la variación del volumen del lecho.* <https://hdl.handle.net/20.500.14625/20852>
- Wu, Y., Wan, A., Zhao, B., Xue, S., & Xu, A. (2022). Single-stage MBBR using novel carriers to remove nitrogen in rural domestic sewage: The effect of carrier structure on biofilm morphology and SND. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108267>
- Zela Esteban, J., & Olivas Aranda, G. (2022). Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (ptar) en el ámbito de las empresas prestadoras. *Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), Lima.*

*Obtenido de [https://cdn. www. Gob. Pe/uploads/document/file/3212482/informe% 20de% 20diagn% C, 3, B3stico.](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3212482/informe%20de%20diagn%C3)*

Zhu, X., Shu, M., Ge, J., Wang, X., & Huang, S. (2021). Experimental study on the treatment of rural domestic sewage by modified MBBR sludge and bio-membrane coupling integrated process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 804(4), Article 4. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/804/4/042060/pdf>. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/804/4/042060>

## **ANEXOS**

ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

ANEXO B: PARÁMETROS FÍSICO – QUÍMICO – MICROBIOLÓGICO DEL  
AGUA RESIDUAL

ANEXO C: PLANO DE UBICACIÓN DEL PROYECTO

ANEXO D: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

ANEXO E: MEMORIA DE CALCULO HIDRÁULICO

ANEXO F: CATÁLOGO DE BOMBAS HIDRÁULICAS

## ANEXO A: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TESIS: " ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS COMPACTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MBBR EN COMUNIDADES PEQUEÑAS"						
PROBLEMA PRINCIPAL	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA	
INTERROGANTE PRINCIPAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE GENERAL		Tipo de investigación:	RECOMENDACIONES
¿Es viable técnica y económicamente la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR en centros poblados rurales?	Evaluar la viabilidad técnica y económica de una planta tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR en centros poblados rurales.	La evaluación técnica y económica permite determinar la viabilidad de implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR en centros poblados rurales.	<b>Variable Independiente:</b> Sistema de tratamiento de aguas residuales MBBR para el centro poblado rural de Ticapampa <b>Variable Dependiente:</b> Viabilidad técnica y económica.	*Diseño de la planta compacta de aguas residuales MBBR. *Viabilidad técnica y económica,	Tipo aplicada y descriptiva. <b>Diseño de investigación:</b> Diseño no experimental. Enfoque cualitativo. <b>Ámbito de estudio:</b> PTAR Ticapampa.	Metodología de viabilidad técnica y económica.
INTERROGANTES ESPECÍFICAS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES ESPECÍFICAS		PTAR Ticapampa.	RECOMENDACIONES
¿Como es el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para el centro poblado rural Ticapampa, en condiciones de espacio reducido, y de fácil operación y mantenimiento?	Diseñar el sistema de tratamiento de aguas residuales para el centro poblado rural Ticapampa, con condiciones de espacio reducido, y de fácil operación y mantenimiento.	El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR en centros poblados rurales, cumple con las condiciones de espacio reducido, y de fácil operación y mantenimiento.	<b>Variable Independiente:</b> Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales. <b>Variable Dependiente:</b> Carga orgánica, espacio físico.	* Carga orgánica removida *Área disponible. *Costos de operación y mantenimiento.	<b>Población y muestra:</b> - Recopilación de información de textos especializados y reportes de PTAR de similares.	Diseño PTAR MBBR
¿Cuál es el costo de inversión inicial, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBBR?	Determinar los costos de inversión inicial, costos de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento con tecnología MBBR.	Según el análisis se realiza el cálculo de costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales MBBR.	<b>Variable Independiente:</b> PTAR compacta MBBR <b>Variable Dependiente:</b> Costos de inversión, operación y mantenimiento.	*Costos de inversión, operación y mantenimiento.	<b>Instrumento</b> - Estadísticas de PTAR MBBR existentes y hojas de cálculo.	Estimación de costos de inversión CAPEX, y de operación y mantenimiento OPEX
¿Cuáles son las ventajas y desventajas del sistema MBBR en centros poblados rurales en comparación con otros sistemas de tratamiento convencionales?	Identificar las ventajas y desventajas del sistema MBBR en centros poblados rurales en comparación con otros sistemas convencionales.	Según el análisis realizado la tecnología MBBR requiere menor intervención operativa y mínimo mantenimiento en comparación con otros sistemas convencionales.	<b>Variable Independiente:</b> PTAR compacta MBBR <b>Variable Dependiente:</b> Comparativo de eficiencia, costos y operación.	* Eficiencia, costos y operación	<b>Técnica de recolección de datos</b> - Recopilación de información de proveedores y tecnología estado del arte.	Cuadro comparativo multicriterio.

Nota: Elaboración propia

## ANEXO B: CALIDAD DEL EFLUENTE DE DESCARGA AL RIO

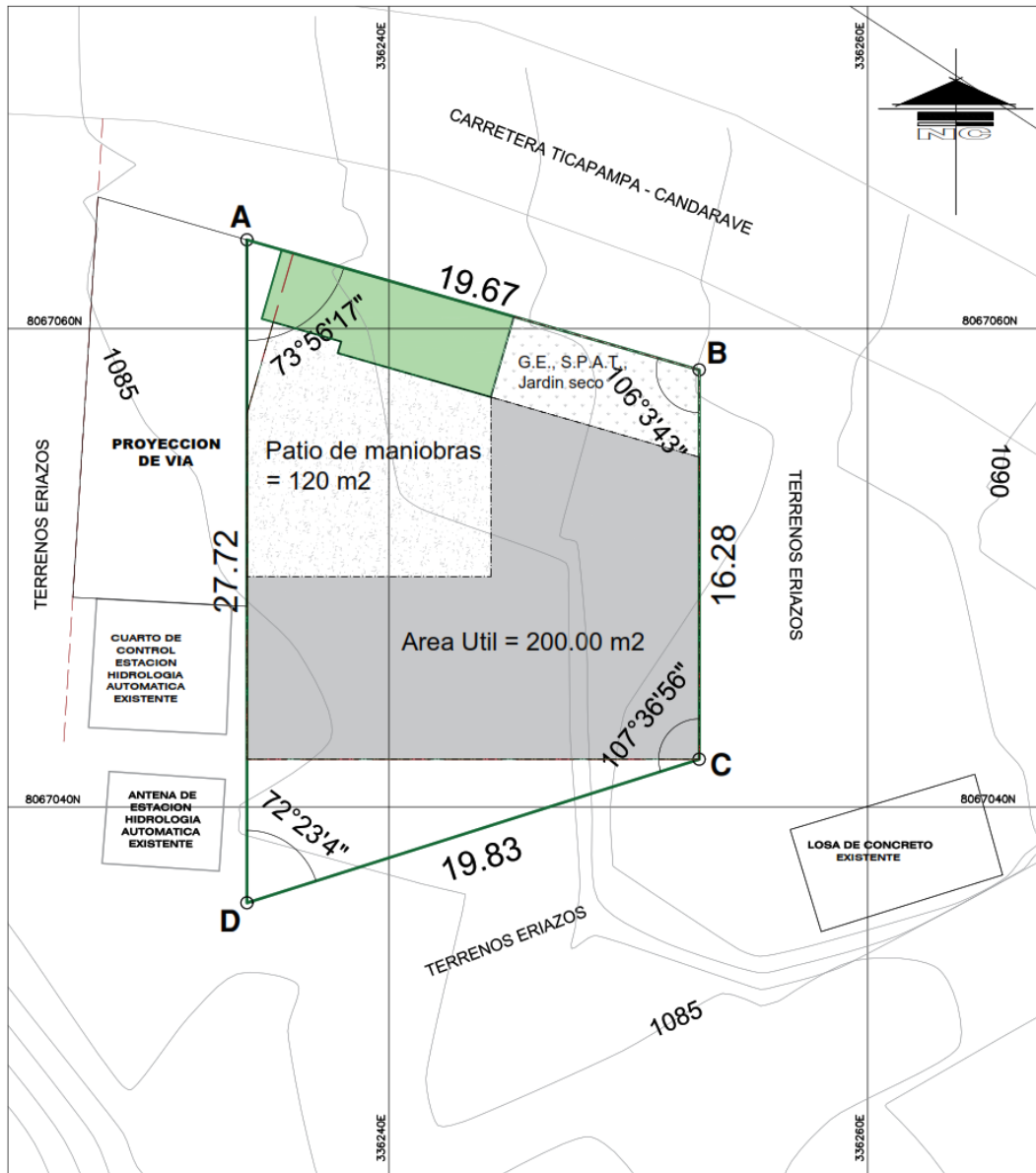
UN SOLO PUNTO DE MUESTREO - 3 TOMAS DE MUESTRA DEL EFLUENTE	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA:	MUESTRA D1		MUESTRA D2		MUESTRA D3		ECA - CATEGORÍA 3		
PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE	RESULTADO	INCERTIDUMBRE	RESULTADO	INCERTIDUMBRE	RIEGO DE VEGETALES	BEBIDA DE ANIMALES	CUMPLE
<b>PARÁMETROS ORGANOLÉPTICOS</b>										
Color Verdadero	UC	30.2	± 6.0	22.5	± 4.5	26.4	± 5.3	100 a	100 a	SI
Turbidez	NTU	6.1	± 0.5	5.0	± 0.4	6.4	± 0.5	**	**	**
Conductividad	uS/cm	2,352.00	± 635.04	2,334.00	± 630.18	2,434.00	± 657.18	2500	5000	SI
Sólidos Totales	mg Sólidos Totales/L	1,540	± 447	1,618	± 469	1,544	± 448	**	**	**
Sólidos Totales Disueltos	mg Sólidos Totales Disueltos/L	1,476	± 339	1,584	± 364	1,494	± 344	**	**	**
Sólidos Totales en Suspensión	mg Sólidos Totales en suspensión/L	60	± 17	28	± 8	46	± 13	1000	**	SI
Potencial de Hidrógeno	pH	7.45	± 0.16	7.40	± 0.16	7.45	± 0.16	6.5-8.5	6.5-8.4	SI
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	169.8	± 2.6	136.3	± 2.6	126.0	± 2.6	15	15	NO
Demanda Química de Oxígeno	mg O2/L	190.8	± 10.0	149.3	± 5.1	139.3	± 4.8	40	40	NO
Aceites y Grasas	mg/L	9.9	± 0.4	12.3	± 0.4	5.4	± 0.3	5	10	NO
Cianuro total	mg/L	0.0044	± 0.0004	0.0036	± 0.0003	0.0066	± 0.0006	0.1	0.1	SI

S.A.A.M.(Detergentes)	mg/L	2.626	± 0.762	1.676	± 0.486	0.675	± 0.196	0.2	0.5	NO
<b>ANIONES</b>										
Cloruro	mg/L	370.590	± 8.778	372.245	± 8.816	375.135	± 8.883	500	**	SI
Nitrito	mg/L	<0.007		<0.007		<0.007		10	10	SI
Nitrato	mg/L	<0.062		<0.062		<0.062		100	100	SI
Sulfato	mg/L	314.025	± 31.245	316.360	± 31.468	311.800	± 31.032	1000	1000	SI
<b>Análisis Microbiológicos</b>										
Numeración de Heterótrofos	UFC/mL	510,000	± 142800	60,500,000		56,000,000		**	**	**
Numeración Coliformes totales	NMP/100 mL	9200000		160000000		92000000		**	**	**
Numeración de Coliformes fecales o termotolerantes	NMP/100 mL	1700000		13000000		4700000		1000	2000	NO
Numeración de Escherichia coli	NMP/100 mL	140000		610000		1400000		1000	**	NO
Larvas de helmintos	Organismo/L	0		0		0		**	**	**
Quistes y Ooquistes de protozoarios Patogenos	Organismo/L	0		0		0		**	**	**
Detección Y/O Cuantificación De Huevos De Helmintos	Huevos/L	0		0		0		1	1	**
Organismos de Vida Libre	Organismo/L	905,643	± 181129	764,744	± 152949	350,745	± 70149	<5x10 <sup>6</sup>		NO
<b>METALES TOTALES</b>										
Aluminio Total	mg/L	0.563	± 0.041	0.436	± 0.031	0.797	± 0.060	5	5	SI
Arsénico Total	mg/L	0.50235	± 0.00932	0.44882	± 0.00635	0.49888	± 0.00911	0.1	0.2	NO
Boro Total	mg/L	7.278	± 1.456	7.306	± 1.461	7.229	± 1.446	1	5	NO

Bario Total	mg/L	0.0326	± 0.0078	0.0323	± 0.0078	0.0487	± 0.0117	0.7	**	SI
Calcio Total	mg/L	116.569	± 29.142	117.135	± 29.284	117.197	± 29.299	**	**	**
Cadmio Total	mg/L	<0.00003		<0.00003		<0.00003		0.01	0.05	SI
Cromo Total	mg/L	<0.0003		<0.0003		<0.0003		0.1	1	SI
Cobre Total	mg/L	0.00277	± 0.00058	0.00273	± 0.00057	0.00686	± 0.00144	0.2	0.5	SI
Hierro Total	mg/L	0.4593	± 0.0965	0.3793	± 0.0797	0.6439	± 0.1352	5	**	SI
Mercurio Total	mg/L	<0.00009		<0.00009		<0.00009		0.001	0.01	SI
Magnesio Total	mg/L	33.458	± 7.026	31.878	± 6.694	32.690	± 6.865	**	250	SI
Manganeso Total	mg/L	0.03057	± 0.00642	0.02549	± 0.00535	0.03202	± 0.00672	0.2	0.2	SI
Sodio Total	mg/L	280.886	± 58.986	270.883	± 56.885	276.726	± 58.112	**	**	**
Niquel Total	mg/L	0.0010	± 0.0002	0.0009	± 0.0002	0.0008	± 0.0002	0.2	1	SI
Plomo Total	mg/L	<0.0006		<0.0006		0.0009	± 0.0006	0.05	0.05	SI
Antimonio Total	mg/L	0.00968	± 0.00203	0.00934	± 0.00196	0.01108	± 0.00233	0.02	0.02	SI
Zinc Total	mg/L	0.0255	± 0.0054	0.0424	± 0.0089	0.0601	± 0.0126	2	24	SI

Nota: Elaboración propia

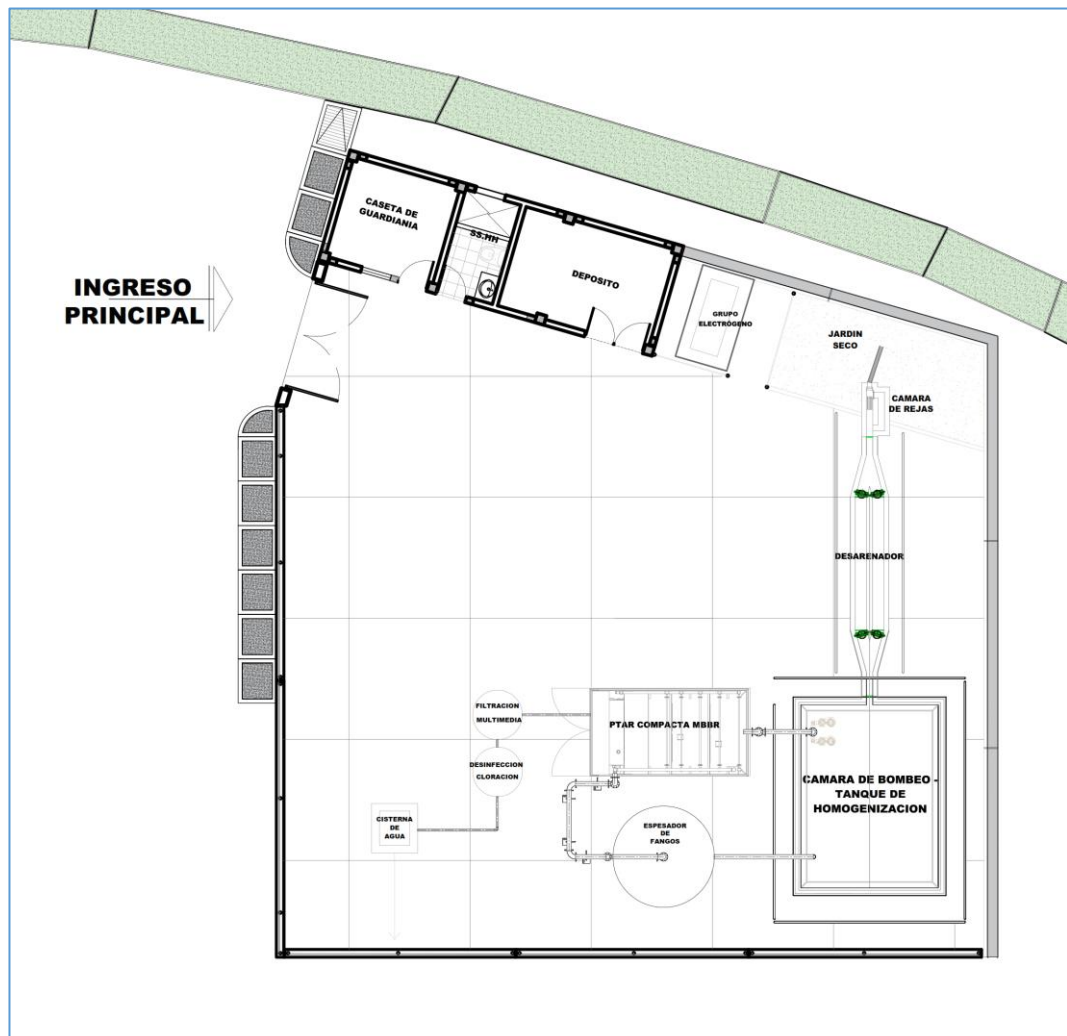
## ANEXO C. PLANO DE UBICACIÓN DEL PROYECTO



**PLANO PERIMETRICO**

ESCALA: 1/200

## ANEXO D. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



**PLANO DE PLANTA**

## ANEXO E. MEMORIA DE CALCULO HIDRÁULICO

### 1) ESTIMACIÓN DE CAUDALES

#### Cálculo del caudal promedio:

Por consumo doméstico (Q ed)	Cant.	Nº	Dotación	Q consumo (L/s)
Población (2045)	1	194 habitantes	220 L/hab./día	0.494
Qed =				<b>0.494</b>

Por consumo no domestico (Q nd)	Cant.	Nº	Dotación	Q consumo (L/s)
Cuna Jardín	1	10 estudiantes	20 L/est./día	0.002
Iglesia	1	20 asistentes	3 L/asist./día	0.001
Losa	1	150 espectadores	1 L/esp./día	0.002
Albergue	1	786.87 m <sup>2</sup>	6 L/m <sup>2</sup> /día	0.055
Mercado	1	50 m <sup>2</sup>	15 L/m <sup>2</sup> /día	0.009
Qnd =				<b>0.068</b>

<b>Caudal promedio (Qed + Qnd)</b>	<b>Qp =</b>	<b>0.562</b>
------------------------------------	-------------	--------------

#### Parámetros de diseño

LOCALIDAD	Sin Proyecto	Con Proyecto	Fuente
Población Actual (Habitantes)	149	149	INEI
Población Flotante (Habitantes)	0	0	RR.HH.
Tasa de Crecimiento Poblacional %	1.30%	1.30%	INEI
Viviendas del Proyecto	91	91	Trabajo en campo - Catastro
Densidad por lote (hab/lote)	1.6	1.6	
Dotación (L/Hab.día)	220	220	OS.100-2006
Porcentaje de perdidas	35%	20%	ANF SUNASS
Aporte de aguas residuales	80%	80%	OS.070
Población actual con conexiones de agua potable (red pública) (Hab.)	144	149	Trabajo en campo
Población actual abastecida con piletas (Hab.)	0	0	Trabajo en campo
Población actual con conexiones de desagüe (Hab.)	144	149	Trabajo en campo

#### Parámetros de diseño

Descripción	Dato	Cantidad	Unidad	Fuente
Periodo de Diseño	P:	20	años	OS.100

Zona de Proyecto	Z:	Urbano	*	OS.100
Dotación	Dot:	220	L/hab/dia.	OS.100
Coefficiente de Qmd	K1:	1.3	*	OS.100
Coefficiente de Qmh	K2:	1.8	*	OS.100

### **De los caudales**

Descripción	Dato	Cantidad	Unidad	Fuente
Caudal promedio	Qp:	0.562	l/s	Cálculo de caudales
Caudal máximo diario (Qmd = Qp x 1.3)	Qmd:	0.731	l/s	Cálculo de caudales
Caudal máximo horario (Qmh = Qp x 2.0)	Qmh:	1.124	l/s	Cálculo de caudales
Caudal por infiltración (Qinf = 0.05 x long de red)	Qinf:	0.034	l/s	Cálculo de caudales
Caudal por conexiones erradas	Qce:	0.000	l/s	Cálculo de caudales
Caudal de diseño (Qdh = Qmh + Qinf + Qce)	Qd:	1.158	l/s	Cálculo de caudales
Caudal de diseño (Qdd = Qmh + Qinf + Qce)	Qd:	66.024	m3/d	Cálculo de caudales
Caudal mínimo (Kmin = 0.5)	Qmin:	0.281	l/s	Cálculo de caudales

## **2) CALCULO DE CÁMARA DE REJAS**

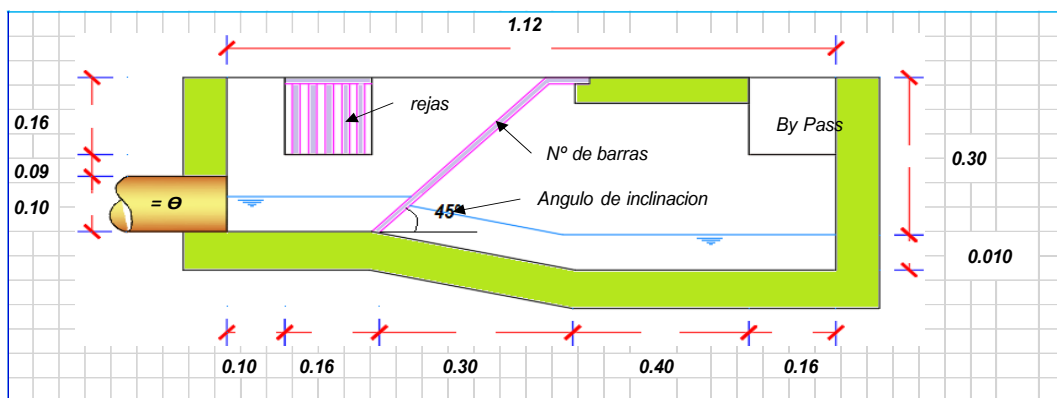
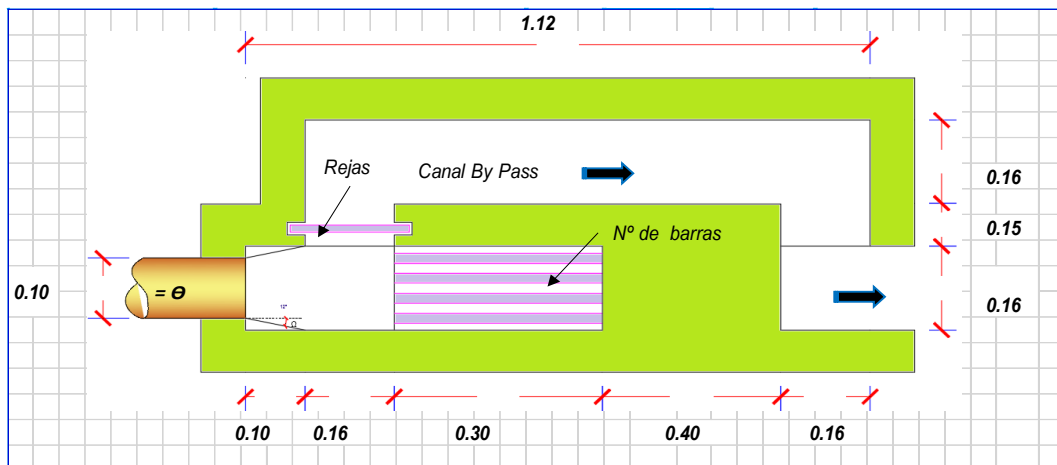
PARÁMETROS DE DISEÑO	DATO	CANTIDAD	UND	FUENTE
Factor de forma para barras rectangulares	K:	2.42	*	Según KISCHMER
Espesor de las barras (5 - 15 mm)	e :	1/2	pulg	RNE OS.090
Separación entre barras (20 - 55 mm)	a :	1	pulg	RNE OS.090
Profundidad de la barra (30 - 75 mm)	b:	1 1/2	l/s	RNE OS.090
Velocidad en las barras (0.60 - 0.75 m/s)	Vr :	0.65	m/s	RNE OS.090
Vel. antes de las barras (0.30 - 0.60 m/s)	Vc :	0.6	m/s	RNE OS.090
Ang. de inclinación de la barra 45 - 60°	θ :	45	°	RNE OS.090
Gravedad	g :	9.81	m/s	Bibliografía
Coefficiente de rugosidad del canal	n:	0.014	*	Bibliografía
Ancho del Canal	B :	0.16	m	A criterio propio
Diámetro de ingreso	Φ :	0.10	m	Del emisor
Borde libre	Bl:	0.20	m	A criterio propio

CALCULO DE BARRAS				
Eficiencia de las barras de criba	$E = \frac{a}{(a+e)}$	E :	66.67%	%
Área util del canal	$Au = \frac{Qmh}{(Vr * 100)}$	Au:	0.0017	m2
Área del canal de criba	$Ac = \frac{Au}{E}$	Ac :	0.0026	m2
CALCULO DEL CANAL DE REJAS / CRIBAS				
Tirante máximo del canal	$Y_{max} = \frac{Ac}{B}$	Ymax :	0.0162	m
Radio hidráulico del canal	$Rh = \frac{Ac}{Pm} = \frac{Ac}{(2Y+B)}$	Rh :	0.0135	m
Pendiente del canal de criba	$S = \left( \frac{Q_{max} * n}{Ac * Rh^{2/3}} \right)^2$	S :	2.35	%
Velocidad en el canal	$Vc = \frac{Q_{max}}{Ac}$	Vc :	0.43	m/s
Radio hidráulico mínimo del canal	$R = \frac{Q_{min} * n}{S^{1/2} * B^{8/3}}$	R:	0.00034	m
Tirante mínimo del canal	$Y_{min} = 0.093 * B$	Ymin :	0.0149	m
Área mínima del canal	$A_{min} = Y_{min} * B$	Amin :	0.0024	m2
Velocidad mínima del canal	$V_{min} = \frac{Q_{min}}{A_{min}}$	Vmin :	0.12	m/s
Numero de barras para el criba	$N = \frac{(B-a)}{(e+a)}$	N :	3.53	und

PERDIDA DE CARGA EN LAS REJAS				
Según Kirshner (Rejas Limpias)				
Perdida de Perdida de energía en la rejilla	$h_v = \frac{V_r^2}{2g}$	Hv :	0.02	m

Perdida de carga total en la rejilla	$H_t = k \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot h_v \cdot \sin \vartheta$	Ht :	0.02	m
<b>Según Metcalf-Eddy (Rejas Obstruidas)</b>				
Velocidad en las rejas con un t = 50% de obstrucción	$V = \frac{V_r}{t}$	V'r :	1.30	m/s
Perdida de carga total en la rejilla	$H_f = \left(\frac{V^2 - V_r^2}{2g}\right) / 0.70$	Hf :	0.09	m
Perdida de carga elegida entre (Hr , Ht) es el mayor valor		Ht:	0.09	m
<b>CALCULO DE LA ALTURA DE LA REJA</b>				
Perdida de carga total en la rejilla	$H = Y_{max} + BL$	H :	0.22	m
<b>CALCULO DE LA LONGITUD DE LA REJA</b>				
Longitud de la reja	$L = \frac{H}{\text{Sen} \vartheta}$	L :	0.31	m
Proyección Horizontal de la reja	$Ph = \frac{H}{\text{Tan} \vartheta}$	Ph :	0.22	m
<b>ZONA DE TRANSICIÓN</b>				
Longitud de zona de transicion	$L = \frac{(B - \varnothing)}{2 \cdot \text{Tan}(\varphi)}$	L :	0.12	m
<b>MATERIAL CRIBADO</b>				
Material cribado a ser retirado por día	$M_{tc} = Q_m h \cdot M_c \cdot 86400$	Mtc :	2.23	l/d
<b>CALCULO DE VERTEDERO DE SALIDA</b>				
Altura del Vertedero	$H_v = \left(\frac{M_c}{1.838 \cdot B}\right)^{\frac{2}{3}}$	Hv :	0.18	m

Abertura ( mm )	Cantidad (litros de material cribado l/m <sup>3</sup> de agua residual)
20	0,038
25	0,023
35	0,012
40	0,009



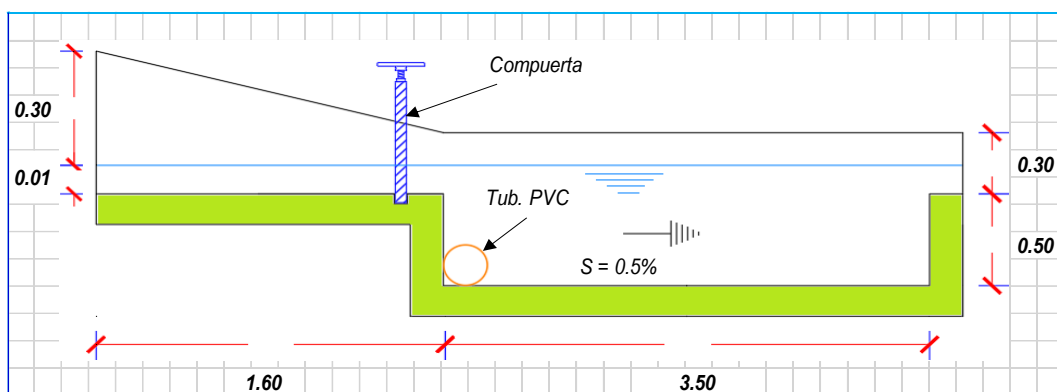
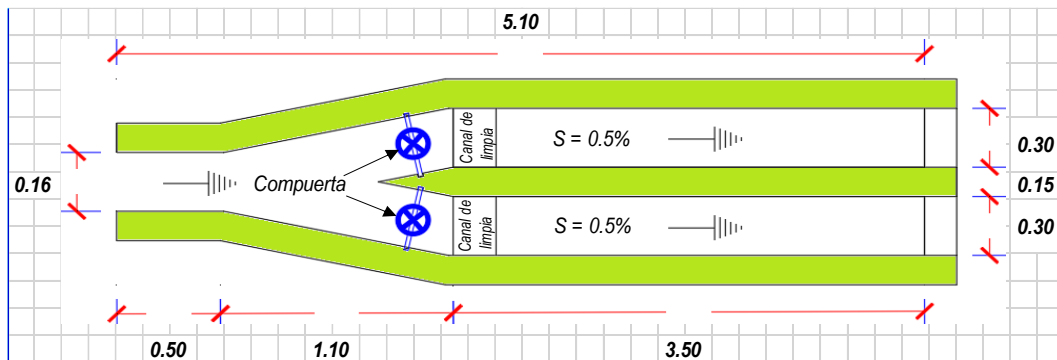
### 3) CALCULO DEL DESARENADOR

PARÁMETROS DEL DISEÑO				
Densidad relativa de la arena	Dr :	2.65	*	CEPIS
Diámetro de la partícula 0.50mm	$\Phi$ :	0.05	cm	RNE OS.090
Viscosidad cinética	b:	0.0101	cm <sup>2</sup> /s	CEPIS
Velocidad horizontal 0.30 + 20%	Vh :	0.30	m/s	RNE OS.090
Velocidad de sedimentación	Vs:	0.053	m/s	CEPIS
Tasa de remoción 40 -70 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h	Gr :	70	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h	RNE OS.090
Coef. De rugosidad del canal	n:	0.014	*	Bibliografía
CRITERIOS DEL DISEÑO				
Ancho del Canal ingreso desarenador	B :	0.16	m	Calculo cámara de rejas
Temperatura de agua	T:	20	°c	Dato del campo

FORMULA	CALCULO DE ANCHO DEL DESARENADOR				
$A = Q_{mh} / V_h$	Caudal máximo horario en m <sup>3</sup> /s	Qmh :	0.0012	m <sup>3</sup> /s	Área del canal del desarenador

	Velocidad horizontal	Vh :	0.30	m/s	
	Area del canal	A :	0.0039	m <sup>2</sup>	
si $A = H * B = 1.5 * B^2$	Ancho del canal	B :	0.05	m	Ancho del canal de desarenador
	Ancho del mínimo de operación	B:	<b>0.30</b>	m	
$H = 1.5 * B$	Altura del canal	H :	<b>0.45</b>	m	Altura util del canal
<b>FORMULA</b>	<b>CALCULO DE LONGITUD DEL DESARENADOR</b>				
$Tr = H / Vs$	Altura del canal	H :	0.45	m	Altura util del canal
	Velocidad de sedimentación	Vs:	0.053	m/s	CEPIS
	Tiempo de retención	Tr :	8.49	seg	Tiempo de retención
$L = Tr * Vh$	Velocidad horizontal	Vh :	0.30	m/s	Longitud teórica del desarenador
	Longitud Teórica	L :	2.55	m	Longitud teórica del desarenador
$Lf = 25\% * L$	Longitud final	Lf:	3.20	m	Segun RNE OS.090

<b>FORMULA</b>	<b>CALCULO DEL PENDIENTE DEL CANAL</b>				
$Rh = \frac{Ac}{Pm} = \frac{Ac}{(2Y+B)}$	Área del canal	Ac:	0.0039	m <sup>2</sup>	Radio hidráulico horizontal
	Altura del canal	Y =H:	0.45	m	
	Ancho del canal	B :	0.05	m	
	Radio hidráulico	Rh :	0.0041	m <sup>2</sup> /m	
$Vh = \frac{1}{n} * Rh^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}}$	Coefficiente de rugosidad	n :	0.014	*	Pendiente del canal de desarenador
	Velocidad de horizontal	Vh :	0.30	m/s	
	Pendiente del canal	S :	6.49	%	
<b>FORMULA</b>	<b>CALCULO DE LONGITUD DE ZONA DE TRANSICIÓN</b>				
$Ls = \frac{Bt - B}{Tan \phi}$	Ancho total de desarenador	Bt :	0.75	m	Longitud de zona de transición
	Ancho del canal de ingreso	B :	0.16	m	
	Angulo de inclinación	$\phi$ :	15	°	
	Longitud	Ls :	2.20	m	



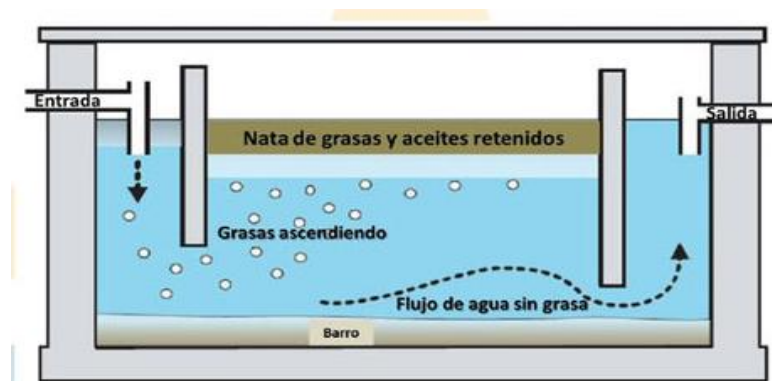
#### 4) CALCULO DEL TRAMPA DE GRASAS

PARÁMETROS DEL DISEÑO				
Caudal de diseño	Qd :	1.16	l/s	*
Tiempo de retención (T): 10 a 20 min	T :	15	min	RNE OS.090
Velocidad de flujo horizontal (V): <0.005 m/s	V :	0.0101	cm <sup>2</sup> /s	CEPIS
Profundidad útil (H): 0.3 a 1.0 m	H :	0.50	m/s	RNE OS.090
Relación largo ancho L : A	relación :	2 : 1		

FORMULA	CALCULO DE VOLUMEN REQUERIDO				
Vol = Qd x T	Caudal de diseño	Qd :	1.16	l/s	Volumen requerido para la trampa de grasas
	Tiempo de retención	T :	15.00	min	
	Volumen requerido	Vol :	1.04	m <sup>3</sup>	
FORMULA	DIMENSIONES DE LA TRAMPA DE GRASAS				
Area = Vol / H	Volumen requerido	Vol :	1.04	m <sup>3</sup>	Área superficial de la trampa de grasas
	Profundidad útil	H :	0.50	m	
	Área superficial	area:	2.08	m <sup>2</sup>	
	Ancho	A :	1.02	m	Ancho

siendo relacion L : A igual a 2 : 1, tenemos Area = L * A = 2 * A^2	Largo	L :	2.04	m	Largo
$V = Q / \text{area}$	Velocidad horizontal	V :	0.0006	m/s	Verificacion de la velocidad horizontal

DIMENSIONES	CANTIDAD	UND
Tipo	Trampa de grasas	
Largo	2.00	m
Ancho	1.00	m
Profundidad util	0.50	m
Borde libre	0.2	m



## 5) TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN

PARÁMETROS DEL DISEÑO			
Caudal de diseño (máximo diario)	Qdd :	0.76	l/s
Variación de caudal:		Fluctuaciones horarias	
Tiempo de retención hidráulica:	Th :	6	horas
Tipo de tanque:		Cuadrado	

FORMULA	CALCULO DE VOLUMEN REQUERIDO			
$\text{Vol} = Qd \times Th$	Caudal de diseño	Qd :	0.76	l/s
	Tiempo de retención hidráulica	Th :	6.00	h
	Volumen requerido	Vol :	16.51	m <sup>3</sup>

FORMULA	DIMENSIONES DE LA TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN			
$\text{Área} = \text{Vol} / H$	Volumen requerido	Vol :	16.51	m <sup>3</sup>

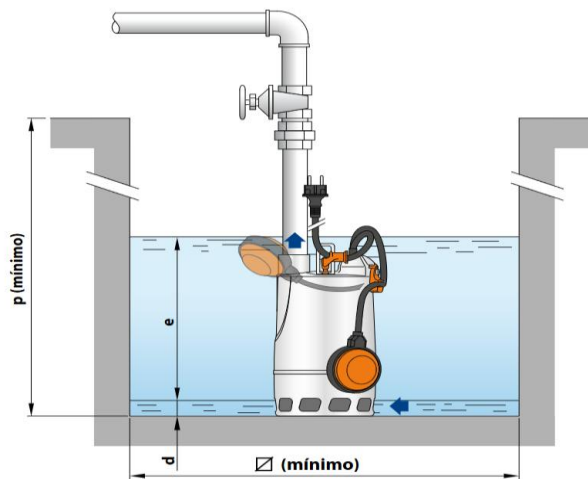
	Profundidad útil	H :	2.05	m	Área superficial de la trampa de grasas
	Área superficial	área:	8.05	m <sup>2</sup>	
relación L : A (1 : 1), tenemos Área = L * A = A <sup>2</sup>	Ancho	A :	<b>2.84</b>	m	Ancho
	Largo	L :	<b>2.84</b>	m	Largo
	Borde libre	Bl :	0.30	m	Borde libre
	Dimensiones finales :	medidas :	3.0 x 3.0 x 2.5	m	V = 22.5 m <sup>3</sup>

FORMULA	SISTEMA DE MEZCLA (Agitador mecánico de baja velocidad (30–50 rpm))				
	Tipo de agitador :		Hélice axial o paletas (para flujo axial suave).		Acero inoxidable AISI 304 o fibra de vidrio para evitar corrosión.
	Velocidad recomendada 30–50 rpm	Vel :	40.00	rpm	Baja velocidad para evitar turbulencia excesiva
	Gradiente de velocidad 50–100 s <sup>-1</sup>	G :	2.05	s <sup>-1</sup>	Suficiente para mezcla suave
$P = N_p * \rho * N^3 * D^5$	Np (hélice axial)	Np :	0.30		Adimensional
	Densidad del agua	$\rho$ :	1000.00	Kg/m <sup>3</sup>	
	Velocidad de rotación	N :	0.67	rev/s	Equivalente a 40 rpm
	Diámetro del agitador (1/3 tanque)	D :	1.00	m	
	Potencia requerida	P :	88.89	W	Seleccionar un agitador comercial de potencia superior

Dimensiones	Cantidad	Und
Tipo	Cuadrado	Concreto
Largo	3.00	m
Ancho	3.00	m
Profundidad util	2.05	m
Medidas finales	3.0 x 3.0 x 2.5	m

FORMULA	SISTEMA DE BOMBEO A REACTOR MBBR				
$HDT = 1.2 * (H_e + H_f + H_a)$	Altura estática	H <sub>e</sub> :	4.50	m	calculado
	Perdidas por fricción	H <sub>f</sub> :	1.00	m	estimado
	Perdidas por accesorios	H <sub>a</sub> :	0.50	m	estimado
	Altura dinámica total	HDT :	7.20	m	con 20% margen
$Q_b = Q_{md} / Hr$	Caudal máximo diario	Q <sub>md</sub> :	66.02	m <sup>3</sup> /d	Caudal estimado

	Horas de funcionamiento	Hr :	15.00	h	
	Caudal requerido bombas	Qb :	4.40	m <sup>3</sup> /h	
Selección de la bomba	Sólidos máximos esperados	D :	< 500	mg/L	Se recomienda filtro de 3–5 mm para proteger la bomba.
	Selección de la bomba	P :	Bomba Pedrollo RX 3/20	*	(0.75 HP, Q = 6.0 m <sup>3</sup> /h, H = 8.7 m) salida 1 1/4"
At = pi() * (D/2) <sup>2</sup>	Diámetro de tuberías	D :	32.00	mm	diametro = 1.5", 0.80 m/s < velocidad < 1.5 m/s
	Área de la tubería de succión	At :	0.0008	m <sup>2</sup>	
v = Qd / At	Velocidad del fluido	v :	1.52	m/s	



## 6) REACTOR MBBR

PARÁMETROS DEL DISEÑO				
DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
DBO5 ingreso:	DBO5 in :	169.80	mg DBO5/l	según analítica de contaminantes del efluente
DBO5 salida:	DBO5 out :	15.00	mg DBO5/l	según requerimiento para cumplimiento de ECA categoría 3
Eficiencia de remoción de DBO5 :	Ef :	91.17%	*	
Eficiencia de remoción de DBO5 elegida:	Ef :	95.00%	*	
Carga orgánica para remoción de DBO5 al 95%	So :	161.31	mg DBO5/l	

Caudal de diseño (máxima diario) :	Qdd :	0.76	l/s	
Tiempo de retención hidráulica :	TRH :	6	horas	tiempo de retención recomendada
Geometría del tanque:		Rectangular (en dos etapas)		

CALCULO DE VOLUMEN REQUERIDO					
FORMULA	DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
Vol = Qdd x Th	Caudal de diseño	Qdd :	0.76	l/s	Volumen requerido, para un TRH recomendado.
	Tiempo de retención hidráulica	TRH :	6.00	h	
	Volumen requerido	Vol :	16.51	m3	

CARGA ORGÁNICA Y CARRIER					
FORMULA	DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
Carga orgánica en Reactor = Qd * So	Caudal de diseño m3/d	Qd :	66.02	m3/d	carga orgánica en reactor
	Concentración de remoción DBO5	So :	161.31	g DBO5/m3	
	Carga orgánica en reactor	CO :	10.65	Kg DBO5/d	
Área total requerida del Reactor = Ac = CO / J	Carga superficial típica	J :	5.00	g DBO5/m2.d	flujo de remoción para 95% de eliminación de DBO5
	Área total requerida	Ac :	2130.07	m2	área superficial total de Carrier
Volumen de Carrier en cada etapa. Vol carrier = % Carriers * Área total / Se	Superficie especifica (carriers)	Se :	500.00	m2/m3	superficie especifica unitaria
	Etapa 1 (70% del área)		0.70	*	volumen de carriers requerido en etapa 1
	Volumen de etapa 1	Vol carr 1 :	2.98	m3	
	Etapa 2 (30% del área)		0.30	*	volumen de carriers requerido en etapa 2
	Volumen de etapa 2 :	Vol carr 2 :	1.28	m3	
% carriers = Ac / (V * Se)	% llenado de carriers	% carriers :	25.81%	*	verificación del % de llenado de carriers

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE					
FORMULA	DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
	Tipo de geometría del tanque :		Rectangular		Para facilitar la instalación de difusores y rejillas.

	Profundidad útil	H :	3.00	m	(incluye 0.5 m de resguardo).
Área superficial = Vol / H	Etapa 1 (70% del área) :		0.70		
	Área superficial en cada etapa	A sup E1 :	4.62	m2	Área
Área superficial = Vol / H	Etapa 2 (30% del área) :		0.30		
	Área superficial en cada etapa	A sup E2 :	1.98	m2	Área
	Área superficial del tanque	A :	6.60	m2	Relación 2 : 1

REQUERIMIENTO DE AIREACIÓN					
FORMULA	DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
	Demanda de oxígeno (DO) :	DO :	1.00	kg O <sub>2</sub> /kg DBO <sub>5</sub> removida.	
DBO <sub>5</sub> removida = CO * % remoción	DBO <sub>5</sub> removida :	DBO <sub>5</sub> removida :	10.12	Kg DBO5/d	Al 95% de remoción.
DO total = DBO <sub>5</sub> removida * Demanda de oxígeno (DO)	DO total :	DO total :	0.42	kg O <sub>2</sub> /h	
Aire requerido = DO total / ( OTE * % O2 * p air)	Eficiencia de transferencia de oxígeno (OTE)	OTE :	10%	*	Difusores de burbuja gruesa
	% peso de O2 en el aire	% O2 :	23%	*	% de peso de O2 en aire
	Densidad del aire	p air :	1.20	kg/m <sup>3</sup>	
	Aire requerido	Aire total:	15.27	m <sup>3</sup> /h	
Contribución de aire por etapas	en Etapa 1 : 70%	Aire e1 :	10.69	m <sup>3</sup> /h	
	en Etapa 2 : 30%	Aire e2 :	4.58	m <sup>3</sup> /h	

Dimensiones	Cantidad	Und
Tipo	Rectangular	2 etapas
Área superficial del tanque	6.60	m2
Profundidad útil del tanque	3.00	m
Dimensiones de etapa 1	2.0 x 3.5	m
Dimensiones de etapa 1	2.0 x 1.5	m
Superficie específica (carriers)	500.00	m2/m3
DBO ingreso	169.80	mg DBO5/l
DBO salida	< 15	mg DBO5/l
Difusores	burbuja gruesa	*
Aire requerido	15.27	m3/h

CALCULO DEL SEDIMENTADOR LAMELAR					
FORMULA	DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
	Caudal de diseño (horario)	Qdh :	2.75	m3/h	Volumen requerido, para un TRH recomendado.
	Carga hidráulica superficial	CHS :	3.00	m3/m2*h	2 – 5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h para aguas residuales municipales
	Ángulo de inclinación de las placas	Vol :	60.00	°	respecto a la horizontal
	Longitud útil de las placas	Lp :	1	m	medida comercial
	Separación entre placas	Sp :	50	mm	mínimo
	Ancho del módulo	Ap :	1	m	medida comercial
	Eficiencia deseada de remoción de SST	Ef SST :	> 80 %	*	considerar uso de coagulante y floculantes

FORMULA	DESCRIPCIÓN	DATO	CANT	UND	OBSERVACIÓN
Au = Qh / CHS	Caudal de diseño (horario)	Qh :	2.75	m3/h	Cálculo del área útil necesaria
	Carga hidráulica superficial	CHS :	3.00	m3/m2*h	
	Área útil necesaria	Au :	0.92	m2	
Aplaca = Lp * cos(inclinación)	Longitud útil de las placas	Lp :	1	m	Área proyectada por placa
	Ángulo de inclinación de las placas	ang :	60.00	°	
	Área proyectada por placa	Aplaca :	0.50	m2	
	Número de placas por metro de ancho		20.00	placas/m	
	Área modulo	Amodulo :	10.00	m2	
Número de módulos lamelares = Au / Am	Cantidad de módulos lamelares 1 x 1m	N° módulos :	0.09	*	requiere menos de un modulo

## 6) TANQUE ESPESADOR

FORMULA	DISEÑO DEL ESPESADOR DE FANGOS				
Tipo de espesador:			Por gravedad		
DBO5 removida = Q * (So - Se)	Caudal tratado	Qdh :	66.02	m3/d	Cálculo de carga removida, para un 95% de remoción
	DBO <sub>5</sub> afluente (S <sub>0</sub> )	So :	169.80	mg/L	
	DBO <sub>5</sub> efluente (S <sub>e</sub> )	Se :	< 15	mg/L	
	DBO5 removida		10.65	kg/d	

P lodos = Y * DBO5 removida	Coefficiente de producción de lodos	Y :	0.40	kg SS/Kg DBO5	Producción de lodos total (0.3 – 0.5 kg SS/kg DBO <sub>5</sub> removida)
	Producción de lodos total diaria	P lodos :	4.26	kg SST/d	
Q lodos in = P lodos / X SST in	Concentración de SS en el lodo de entrada al espesador (sin espesar)	X SST in :	3.5	Kg SS/m3	Volumen de Lodo en Exceso. Caudal de lodos a espesar
	Caudal de lodos de entrada	Q lodos in:	1.22	m3/d	
Asup = SST total / CST	Carga de solidos al espesador	P lodos :	4.26	Kg SST/d	Para espesadores por gravedad se recomienda T : 20 - 40 kg SS/m <sup>2</sup> -día
	Tasa de carga superficial	T :	25.00	kg SS/m <sup>2</sup> *día	
	Área requerida	Asup :	0.17	m <sup>2</sup>	
Q lodos out = P lodos / X SST out	Concentración de SS final	X SST out :	15	Kg SS/m3	Caudal de lodos espesado.
	Caudal de lodos de salida	Q lodos out:	0.28	m3/d	
TRH = Vol / Qlodos	Profundidad del tanque	H :	3.00	m	1 ~ 2% Q, 1.5% Q
	Volumen del tanque	V :	0.51	m <sup>3</sup>	
	Caudal de lodos (ingreso)	Qlodos :	1.22	m3/d	
	Tiempo de retención hidráulico	TRH	10.08	h	
Corrección de dimensión del tanque: Vol = ((D/2) <sup>2</sup> ) * pi()	Diámetro de tanque circular	D :	0.47	m	Asumimos un D = 1 m
	Área requerida final	Asup :	0.79	m <sup>2</sup>	
	Profundidad del tanque	H :	3.00	m	Incluyendo zona de almacenamiento y clarificación. Para favorecer mayor TRH > 12 h
	Volumen del tanque	V :	2.36	m <sup>3</sup>	
	Tiempo de retención hidráulico	TRH	46.46	h	

DIMENSIONES	UND	CANTIDAD
Tipo (D x H)	Cilíndrico	1.0 x 3.0
Tiempo de retención hidráulico	TRH :	16.00 horas
Volumen del tanque	V :	2.36 m <sup>3</sup>
Producción de lodos diaria	P lodos :	4.26 kg SST/d
Caudal de lodos de entrada	Q lodos in:	1.22 m <sup>3</sup> /d
Caudal de lodos de salida	Q lodos out:	0.28 m <sup>3</sup> /d

## 5) FILTRO DE DISCOS Y CLORACIÓN

FORMULA	DISEÑO DE FILTRO MULTIMEDIA				
$Ar = Qdh / Vf$	Caudal de entrada diario	Qd :	2.75	m <sup>3</sup> /h	Tasa de filtración 5–10 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *h (típico para filtros rápidos)
	Velocidad de filtración	Vf :	7	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *h	
	Área requerida	Ar :	0.39	m <sup>2</sup>	
Material filtrante:	Capa superior:	Antracita (0.8–1.2 mm, profundidad 0.3–0.5 m).			
	Capa inferior:	Arena sílice (0.4–0.8 mm, profundidad 0.3–0.5 m).			
	Grava soporte:	3–5 capas (tamaño graduado de 2–32 mm)			
	Diámetro del filtro	D :	0.71	m	cilíndrico vertical
Lavado con aire + agua:	Agua: 30–40 m/h durante 5–10 min.				
	Aire: 50–60 m/h durante 2–5 min.				

FORMULA	DISEÑO DE DESINFECCIÓN				
	Caudal de entrada diario	Qd :	2.75	m <sup>3</sup> /h	
	Efluente a desinfectar	Agua tratada post-filtro (DBO <sub>5</sub> < 20 mg/L, SST < 10 mg/L).			
	Reducción de coliformes fecales	< 1000 UFC/100 mL			
	Dosis de cloro	D :	8.00	mg/L	5–10 mg/L (dependiendo de demanda de cloro residual).
$C = Qd \times D$	Consumo diario	C :	0.53	kg/d	
$Vd = C / (.12 \times 1.2)$	Volumen diario	Vd :	3.67	L/d	Solución de NaClO al 12%
Diseño del tanque de contacto $Vol = Q \times t$	Tiempo de contacto	t :	30	min	≥ 30 min (en un tanque de contacto)
	Volumen	Vol :	1.38	m <sup>3</sup>	Dimensiones propuestas: 1.0 x 1.0 x 1.5 m
Bomba dosificadora	Caudal dosificación hora		0.15	L/h	0.2–0.5 mg/L (máximo 1 mg/L para reúso).
	Caudal dosificación 30 días		110.04	L/mes	
	Cloro residual libre :	Clr :	0.40	mg/L	