

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DEL BARRIO CATEDRAL DE LA
PROVINCIA CERCADO DEL DEPARTAMENTO DE TARIJA”**

por:

RODRIGUEZ ARAMAYO SAUL JOSE

Tesis presentada a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE- II- 2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me ha enseñado a valorarlo cada día más, a mis padres quienes siempre han sido mi fuente inagotable de amor apoyo y aliento incondicional. Gracias por ser mi mayor inspiración y por creer en mí en cada paso del camino. Su sacrificio y dedición han sido la fuerza impulsora detrás de este logro.

A mi hermana quien me ha acompañado con su aliento y palabra de ánimo y sus buenos deseos, ha sido mi motivación para superar cualquier obstáculo que se presentaba.

A los docentes que fueron parte de este recorrido académico quienes se dieron el tiempo para escucharme y transmitirme sus conocimientos para culminar cada reto con la mejor actitud y pasión.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.2.1. Descripción del problema	2
1.2.2. Formulación del problema	3
1.3. Objetivos Generales y Específicos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcances y limitaciones	4
1.4.1. Alcances	4
1.4.2. Limitaciones	4
1.5. Justificación	5
1.6. Hipótesis	6
CAPÍTULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Aguas residuales	7
2.2. Tipos de aguas residuales	7
2.3. Caracterización de las aguas residuales	8
2.3.1. Características físicas.	9
2.3.2. Características químicas	10
2.3.3. Las características Biológicas de las aguas residuales:	12
2.4. Parámetros de control para el tratamiento de aguas residuales	13
2.5. Características cuantitativas y cualitativas	16
2.6. Tratamiento de las aguas residuales	16
2.7. Métodos de tratamiento de las aguas residuales	17
2.7.1. Tratamiento preliminar o pretratamiento	18
2.7.2. Tratamientos primarios	22
2.8. Tratamientos secundarios.	27
2.9. Tratamientos terciarios	32
2.12. Situación actual de PTAR en Bolivia (mayo 2010-octubre 2013)	36

2.13. Eficiencia de remoción	40
2.14. Producción de lodos	42
2.15. La digestión anaerobia.....	43
2.16. La digestión aerobia.....	44
2.17. Parámetros básicos de diseño de plantas de tratamientos de aguas residuales.....	44
2.18. Medición de caudal.....	44
2.19. Estudios de caracterización del agua residual	45
2.20. Operación y mantenimiento de sistemas de tratamientos de aguas residuales.....	45
2.20.1. Operación	45
2.20.2. Mantenimiento.....	46
2.21. Reusó de aguas residuales tratadas.....	47
2.21.1. Panorama del reúso.....	47
2.21.2. Tipos de reúso.....	47
2.21.3. Beneficios y riesgos del reúso de las aguas tratadas	49
2.22.4. Pautas y normativas sobre el reúso de las aguas tratadas	52
CAPÍTULO III	58
3. MARCO LEGAL	58
3.1. Leyes y normativas vigentes.....	58
3.2. Límites máximos admisibles en cuerpos receptores.....	60
3.3. Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso (4 Clases)	61
3.4. Marco Institucional.....	63
3.4.1 Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)	63
3.4.2 Viceministerio de Recursos Hídricos y de Riego (VRHR)	64
3.4.3 Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico (VAPSB).....	64
3.4.4 Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS).....	64
3.4.5 Servicio Nacional para la Sostenibilidad de los Servicios en Saneamiento Básico	64
3.4.6 Gobiernos Autónomos Departamentales (GAD).....	65
3.4.7. Entidades prestadoras de servicios de agua potable y saneamiento (EPSA).....	65
3.4.8. La Cooperativa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Tarija Limitada (COSAALT RL.).....	66
3.4.9. Marco Normativo	67

3.4.10. Manual de operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales en poblaciones rurales (Viceministerio de saneamientos básicos).....	67
CAPÍTULO IV	69
4. INGENIERÍA DEL PROYECTO	69
4.1. Ubicación Geográfica.....	69
4.2. Descripción de la Red de Alcantarillado Sanitario del Barrio Catedral	71
4.3. Descripción de la PTAR Catedral	72
4.3.1. Antecedentes y generalidades.....	72
4.3.2. Descripción general de los componentes.....	74
4.3.2.1. Estructura de entrada a la planta de tratamiento de agua residual.....	78
4.3.2.2. Tratamiento preliminar	78
4.3.2.3. Tratamiento primario	81
4.3.2.4. Tratamiento secundario	84
4.3.2.5. Tratamiento terciario	85
4.3.3. Personal operador	88
4.3.4. Operación y monitoreo	90
4.3.5. Diagnóstico de la situación actual de la infraestructura	91
4.3.6. Análisis de costo de funcionamiento de la PTAR	92
4.4. Cuerpo receptor	93
4.5. Registro de caudales	98
4.6. Caracterización del agua residual de la PTAR	104
4.6.1. Estudios de caracterización del agua residual	104
4.6.2. Descripción física de las aguas residuales del afluente y efluente de la PTAR.	105
4.6.3. Informes de calidad el agua residual en la PTAR Catedral	106
4.7. Datos de suministro de aire	108
4.8. Evaluación de la planta de tratamiento en base a la información disponible	109
4.8.1. Relación DBO ₅ /DQO	109
4.8.2. Determinación de eficiencias en el sistema de tratamiento	111
4.8.3. Variación del consumo de aire	117
4.8.4. Variación de los parámetros en el tiempo	120
4.8.5. Diagnóstico del cumplimiento con Anexo A-1, del RMCH de la ley 1333 para clase D.....	122

4.8.5.1. Análisis de DBO en la salida de la PTAR	123
4.8.5.2. Análisis de DQO en la salida de la PTAR.....	124
4.8.5.3. Análisis de SST en la salida de la PTAR	125
4.8.5.4. Análisis de pH en la salida de la PTAR	126
4.8.5.5. Análisis de Coliformes Totales en la salida de la PTAR.....	127
4.8.6. Diagnóstico respecto al cumplimiento con el Anexo – 2 del RMCH de la ley 1333.....	127
4.8.6.1. Análisis de DBO en la salida de la PTAR	128
4.8.6.2. Análisis de DQO en la salida de la PTAR.....	129
4.8.6.3. Análisis de SST en la salida de la PTAR	130
4.8.6.4. Análisis del pH en la salida de la PTAR	131
4.8.6.5. Análisis de Coliformes Totales en la salida de la PTAR.....	132
4.8.6.6. Análisis de Fosforo Totales de la PTAR	133
4.8.6.7. Análisis de Nitrógeno Totales de la PTAR	135
4.8.7. Análisis de la posibilidad de reusó	138
4.8.8. Valoración con la Normativa de Bolivia	139
4.8.9. Valoración con las Directrices de la OMS	139
4.8.10. Valoración con la Normativa de la Unión Europea (UE).....	140
4.8.11. Valoración con la Normativa de México.....	143
4.8.12. Valoración con la Normativa de Israel	143
4.8.13. Valoración con la Normativa de Chile	144
CAPITULO V	147
5. Análisis de resultados	147
5.1. Análisis sobre la información disponible.	147
5.2. Análisis de la situación actual de la planta	147
5.3. Análisis de caudal vs caudal de diseño.....	147
5.4. Análisis de la variación de los caudales	148
5.5. Análisis sobre las características de las aguas residuales urbanas.....	149
5.6. Análisis de la relación DBO ₅ /DQO	150
5.7. Análisis y comparación de eficiencias.....	150
5.8. Análisis de la variación del suministro de aire	156

5.9. Análisis sobre el cumplimiento del Anexo A-1, del RMCH de la ley 1333 para clase D.....	163
5.10. Análisis sobre el cumplimiento del Anexo A– 2 del RMCH de la ley 1333.....	163
5.11. Análisis sobre el reúso del agua residual tratada de la PTAR Catedral	163
CAPÍTULO VI	165
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	165
6.1. Conclusiones.....	165
6.2. Recomendaciones	169
ANEXOS	172

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1.	Biodegradabilidad del agua residual urbana según la relación DBO ₅ /DQO	11
Tabla2.	Ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento	37
Tabla3.	Eficiencia de remoción según diferentes autores	41
Tabla4.	Usos más frecuentes del agua regenerada	48
Tabla5.	Organismos indicadores para patógenos humanos aguas residuales (adaptado de WHO, 2006 en internacional wáter manogement institute (IWMI 2016).....	50
Tabla6.	Agentes químicos en agua tratada y sus efectos adversos (EPA, 2004; EPHC, NRMMC, AHMC, 2006)	51
Tabla7.	Contaminantes en aguas y sus efectos adversos (EPA, 2024; EPHC, NRMMC, AHMC, 2006).....	51
Tabla8.	objetivos basados en la salud y objetivos de reducción de helmintos para el uso de agua residuales tratadas en la agricultura	53
Tabla9.	Requisitos de calidad del agua reusada para riego agrícola	54
Tabla10.	Grupos de calidad en función de los límites bacteriológicos	54
Tabla11.	NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permitidos de contaminantes. Promedio mensual	55
Tabla12.	Valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación	57
Tabla13.	Características de las aguas residuales urbanas.....	61
Tabla14.	Valores máximos admisibles de parámetros indicadores de contaminación.	62
Tabla15.	Valores máximos admisibles (CLASE D) según Cuadro N° A-1 del RMCH. ..	62
Tabla16.	Límites permisibles para descargas líquidas según el Anexo A-2 del RMCH. .	63
Tabla17.	Parámetros básicos de diseño de la PTAR.	72
Tabla18.	Observaciones del estado físico actual de los elementos de la PTAR	91
Tabla19.	Resultados del estado operacional de la planta mediante los indicadores visuales	92
Tabla20.	Resultados fisicoquímicos del afluente y efluente	107
Tabla21.	Biodegradabilidad del agua residual	109
Tabla22.	Relación DBO ₅ /DQO Afluente PTAR Catedral	110
Tabla23.	Eficiencia de remoción de DBO ₅ en todo el sistema	112
Tabla24.	Eficiencia de remoción de DQO en todo el sistema.....	113
Tabla25.	Eficiencia de remoción de SST en todo el sistema.....	114
Tabla26.	Variación de pH en todo el sistema.....	115
Tabla27.	Eficiencia de remoción de COLIFORMES TOTALES en todo el sistema	116

Tabla28.	CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 DQO en salida de PTAR	129
Tabla29.	CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 SST en salida de PTAR	130
Tabla30.	pH en salida de PTAR CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333	131
Tabla31.	CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 COLIFORMES TOTALES en salida de PTAR.....	132
Tabla32.	resultados de las muestras de Fósforo Total (P Total) del afluente y efluente.	133
Tabla33.	Eficiencia de remoción de Fósforo Total	133
Tabla34.	CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 Fósforo Total en salida de PTAR.....	134
Tabla35.	resultados de las muestras de Nitrógeno Total (P Total) del afluente y efluente.....	135
Tabla36.	Eficiencia de remoción de Nitrógeno Total	135
Tabla37.	CUMPLIMIENTO ANEXO A-2 LEY 1333 Nitrógeno Total en salida de PTAR.....	136
Tabla38.	Objetivos basados en la salud y objetivos de reducción de helmintos para el uso de agua residuales tratadas en la agricultura	140
Tabla39.	Requisitos de calidad del agua residual para riego agrícola.....	140
Tabla40.	grupos de calidad en función de los límites bacteriológicos establecidos en el R.D. 1620/2007.	142
Tabla41.	NOM-003-SEMARNAT- 1997. Límites máximos permitidos de contaminantes promedio mensual	143
Tabla42.	Usos urbanos	145
Tabla43.	Usos recreativos	145
Tabla44.	Ornamentales.....	145
Tabla45.	Usos silvoagropecuarios.....	146
Tabla46.	Eficiencia de la PTAR del Barrio Catedral	152
Tabla47.	Eficiencia de remoción según diferentes autores	153
Tabla48.	Eficiencia de la PTAR del Barrio Catedral	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de los sólidos presentes en un agua.....	15
Figura 2.	Diagrama de la constitución del agua residual domestico	16
Figura 3.	Secuencia de tratamientos de aguas residuales domésticas	17
Figura 4.	Tratamiento de aguas residuales	18
Figura 5.	Tratamiento preliminar.....	19
Figura 6.	Esquema del tanque ecualizador	20
Figura 7.	Cámara de rejas	21
Figura 8.	Diagrama General del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales.	23
Figura 9.	Reactor anóxico.....	24
Figura 10.	Reactor anaeróbico	25
Figura 11.	Reactor aeróbico	26
Figura 12.	Medios	27
Figura 13.	Biodegradación microbiana.....	28
Figura 14.	Reactor SBR	30
Figura 15.	Tanque Ras	32
Figura 16.	Tratamiento terciario	33
Figura 17.	Tratamiento terciario	34
Figura 18.	Tratamiento terciario	35
Figura 19.	Humedal artificial de flujo libre o superficial (HFL)	36
Figura 20.	Flujo de producción de lodos primarios y secundarios	42
Figura 21.	Reutilización global del agua después del tratamiento avanzado (terciario): cuota de mercado por aplicación.	48
Figura 22.	Marco Institucional.....	66
Figura 23.	Ubicación del departamento de Tarija.....	69
Figura 24.	Ubicación de la provincia Cercado del departamento de Tarija.....	70
Figura 25.	Ubicación geográfica de la ciudad de Tarija	70
Figura 26.	Esquema del tratamiento	77
Figura 27.	Componentes del sistema de tratamiento	111
Figura 28.	Variación de la inyección de aire respecto al caudal de aguas residuales....	117
Figura 29.	Variación de la inyección de aire respecto al caudal de aguas residuales....	117
Figura 30.	El suministro de aire ha tenido un leve aumento respecto al incremento de la DBO.....	118

Figura 31.	Variación de la inyección de aire respecto a la DQO.....	118
Figura 32.	Variación de la inyección de aire respecto a los SST.....	119
Figura 33.	Variación de la inyección de aire respecto a los Coliformes - fecales.....	119
Figura 34.	Variación de la DBO	120
Figura 35.	Variación de la DBO	120
Figura 36.	Variación de la SST.....	121
Figura 37.	Variación del pH.....	121
Figura 38.	Variación de los coliformes fecales.....	122
Figura 39.	Variación del caudal en el tiempo	148
Figura 40.	Variación de la inyección de aire respecto al caudal de aguas residuales....	156
Figura 41.	Análisis de la variación de la inyección de aire respecto al tiempo.	157
Figura 42.	Variación del consumo de aire	158
Figura 43.	Análisis de la variación de la inyección de aire respecto a la DBO ₅ , DQO, SST y coliformes fecales.....	158
Figura 44.	Variación de la DBO	160
Figura 45.	Variación de la DBO	160
Figura 46.	Variación de la SST.....	161
Figura 47.	Variación del pH.....	162
Figura 48.	Variación de los coliformes fecales.....	162

ÍNDICE DE FOTOGRÁFICO

Fotografía 1.	Localización satelital del proyecto	71
Fotografía 2.	Cerco perimetral de malla olímpica.....	73
Fotografía 3.	Estructura de ingreso a la PTAR.....	78
Fotografía 4.	Tanque Ecualización	79
Fotografía 5.	Rejillas	80
Fotografía 6.	Tanque anóxico	81
Fotografía 7.	Tanque anaeróbico	82
Fotografía 8.	Tanque Aeróbico.....	83
Fotografía 9.	Tanque SBR1	84
Fotografía 10.	Tanque SBR2	84
Fotografía 11.	Tanque RAS	85
Fotografía 12.	Tanque de almacenamiento de lodos y almacenamiento de efluente.....	86
Fotografía 13.	Panel de control	87
Fotografía 14.	Sistema de monitoreo central	88
Fotografía 15.	Seguridad industrial del personal de operación.....	89
Fotografía 16.	Seguridad industrial del personal de operación.....	89
Fotografía 17.	Fotografía satelital descriptiva de la PTAR.	94
Fotografía 18.	Quebrada Sagredo desde la PTAR hasta el Río Guadalquivir	95
Fotografía 19.	Efluente de la PTAR Catedral	96
Fotografía 20.	Terreno de cultivo	96
Fotografía 21.	Fotografías de agua contaminada de diferentes orígenes.....	97
Fotografía 22.	Confluencia de la quebrada Sagredo con el río Guadalquivir.....	98
Fotografía 23.	Comparación visual entre el afluente y efluente de la PTAR	106

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Reportaje fotográfico

ANEXO 2. Informe de ensayos de laboratorio

ANEXO 3. Plano de la PTAR