

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DPTO. DE OBRAS HIDRÁULICAS Y SANITARIAS**



**"CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LODOS
RESIDUALES EN LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO SAN LUIS DE TARIJA"**

Por:

JOSE ROGER VACA GURNIAK

CRISTHIAN MONTAÑO HOYOS

*Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
JUAN MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico
de Licenciatura de Ingeniería Civil*

Semestre I – 2019

Tarija – Bolivia

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DPTO. DE OBRAS HIDRÁULICAS Y SANITARIAS**

**“CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LODOS
RESIDUALES EN LAS LAGUNAS ANAERÓBICAS DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO SAN LUIS DE TARIJA”**

Por:

JOSE ROGER VACA GURNIAK

CRISTHIAN MONTAÑO HOYOS

PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA CIV-502

Semestre I – 2019

Tarija – Bolivia

.....

M. Sc. Ing. Jaime Orlando Zenteno Benítez

VºBº DOCENTE GUÍA CIV-502

.....

M. Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez

DECANO

FACULTAD DE CIENCIAS

Y TECNOLOGÍA

.....

M. Sc. Ing. Elizabeth Castro Figueroa

VICEDECANA

FACULTAD DE CIENCIAS

Y TECNOLOGÍA

TRIBUNAL:

.....

M. Sc. Ing. Ilsen Copa Almazán

.....

M. Sc. Ing. Oscar Ricaldi Torrez

.....

M. Sc. Ing. Nelzon Rodríguez Lezana

El docente y tribunal evaluador del presente trabajo no se solidariza con los términos, la forma, los modos y las expresiones empleadas en la elaboración del presente trabajo, siendo la misma únicamente responsabilidad de los autores.

DEDICATORIA

A Dios creador de los cielos y la Tierra, por su amor infinito y darnos la sabiduría en nuestro caminar.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos aquellos que de algún modo u otro han hecho posible la realización de este trabajo.

No existen palabras de agradecimiento hacia los seres maravillosos que Dios me puso en mi camino, estoy eternamente agradecido con mi madre: Liliana quien me dio todo su amor, dedicación y velar siempre por mi bienestar; a mi tío Dante a quien tengo la dicha de llamar papa, quien me puso el hombro para continuar después de la partida de mi padre: Roger (Patito).

A mi tío Güimar por brindarme su apoyo y a toda mi familia por siempre estar ahí.

Por: Jose Roger Vaca Gurniak

A mis padres Gonzalo y Beatriz por apoyarme en mi bienestar y en mis estudios, y a toda mi familia por brindarme su amor incondicional.

A la familia Pinheiro por brindar su ayuda y consejos durante el tiempo que nos conocemos.

Por: Cristhian Montaña Hoyos

Agradecemos también:

Al Ing. Jaime Zenteno por guiarnos y colaborarnos en la elaboración de este trabajo.

A la Ing. Ilsen Copa por brindarnos sus conocimientos y orientarnos para lograr este trabajo.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1.	INTRODUCCIÓN	1
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3.	HIPÓTESIS.....	3
1.4.	OBJETIVOS	3
1.4.1.	OBJETIVO GENERAL	3
1.4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5.	JUSTIFICACIÓN	4
1.5.1.	JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA.....	4
1.5.2.	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	4
1.5.3.	JUSTIFICACIÓN SOCIAL	4
1.5.4.	JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	5
1.6.	DELIMITACIÓN	5
1.6.1.	LÍMITE SUSTANTIVO.....	5
1.6.2.	LÍMITE TEMPORAL	5
1.6.3.	LÍMITE GEOGRÁFICO	5
1.7.	ALCANCE DEL TRABAJO.....	7

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1.	LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN	9
2.1.1.	DEFINICIÓN	9
2.1.2.	CLASIFICACIÓN.....	9
2.2.	ECUACIONES DE APLICACIÓN.....	13
2.2.1.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS POR CAUDALES, CONCENTRACIONES, Y AÑOS DE OPERACIÓN	13

2.2.2.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA-QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LODOS 15	
2.3.	BASES CONCEPTUALES DE LOS PARÁMETROS A USAR.....	17
2.3.1.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	17
2.3.2.	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)	18
2.3.3.	POTENCIAL HIDRÓGENO (pH).....	19
2.3.4.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).....	21
2.3.5.	NITRÓGENO (N)	21
2.3.6.	FÓSFORO (P)	22
2.3.7.	METALES PESADOS	23
2.3.8.	COLIFORMES FECALES.....	23
2.3.9.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (C)	23
2.4.	DESCRIPCIÓN DE MATLAB.	24
2.5.	BATIMETRÍA.....	25

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	27
3.2.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	27
3.3.	METODOLOGÍA PARA BATIMETRÍA.....	30
3.4.	METODOLOGÍA PARA TOMA DE MUESTRAS DE LODO RESIDUAL.....	31

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LODO RESIDUAL.....	32
4.1.1.	DETERMINACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO	32
4.1.2.	INSTRUMENTOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS	32
4.1.3.	TOMA DE MUESTRAS.....	33
4.1.4.	ENVÍO DE MUESTRAS AL LABORATORIO.	34

4.1.5.	RESULTADOS DE LABORATORIO.....	34
4.2.	MEDICIONES BATIMÉTRICAS	35
4.2.1.	GEORREFERENCIACIÓN DE PUNTOS A MEDIR	35
4.2.2.	ALINEACIÓN (REPRESENTACIÓN) DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES.....	35
4.2.3.	DESPLAZAMIENTO DENTRO DE LAS LAGUNAS	36
4.2.4.	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CAPA DE LODO	36
4.3.	RESUMEN DE DATOS.....	38

CAPÍTULO 5: APLICACIÓN PRÁCTICA

5.1.	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS BATIMÉTRICOS.....	39
5.1.1.	SUPERFICIES Y VOLÚMENES	39
5.1.2.	PROFUNDIDAD MEDIA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN ..	47
5.2.	COMPARACIÓN DE SUPERFICIES DE LA LAGUNA ANAERÓBICA 1	51
5.3.	CUANTIFICACIÓN DE LOS LODOS	54
5.4.	CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.....	54
5.5.	ELABORACIÓN DEL MODELO	60
5.5.1.	COMPORTAMIENTO HORARIO DE LOS PARÁMETROS EN ESTUDIO DE AGUA RESIDUAL.....	60
5.5.2.	RELACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS (SS).....	60
5.5.3.	ECUACIONES DE COMPORTAMIENTO DIARIO DE LOS PARÁMETROS EN ESTUDIO DE AGUA RESIDUAL	64
5.5.4.	COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL DEL AFLUENTE.....	71
5.5.5.	COMPARACIÓN DE CAUDALES DIARIOS EN EL AFLUENTE.....	74
5.5.6.	REMOCIÓN EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	83
5.5.7.	VALIDACIÓN DE ECUACIONES DEL MODELO.....	97

5.5.8. MODELO DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS Y GENERACIÓN DE LODOS RESIDUALES EN MATLAB	97
5.6. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE LODOS EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	102
5.7. TRABAJO Y EFICIENCIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	113
5.8. APLICACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	117

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES	119
6.2. RECOMENDACIONES.....	123
BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA	125

ANEXOS

ANEXO I: PROTOCOLO DE LA CIQ PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE LODO RESIDUAL	128
ANEXO II: NORMA OFICIAL MEXICANA_ NOM-004-SEMARNAT-2002.....	135
ANEXO III: DATOS BATIMÉTRICOS LAGUNA ANAERÓBICA 1	139
ANEXO IV: DATOS BATIMÉTRICOS LAGUNA ANAERÓBICA 2.....	150
ANEXO V: DATOS BATIMÉTRICOS LAGUNA FACULTATIVA	164
ANEXO VI: DATOS BATIMÉTRICOS Y VOLUMEN DE LODO DE LA LAGUNA DE MADURACIÓN	167
ANEXO VII: PLANOS	170
ANEXO VIII: SECCIONES TRANSVERSALES LAGUNA ANAERÓBICA 1	181
ANEXO IX: SECCIONES TRANSVERSALES LAGUNA ANAERÓBICA 2.....	194
ANEXO X: SECCIONES TRANSVERSALES LAGUNA FACULTATIVA	208
ANEXO XI: RESULTADOS DE LABORATORIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS RESIDUALES.....	219
ANEXO XII: AJUSTE DE COMPORTAMIENTO DIARIO	223

ANEXO XIII: MANEJO DE ECUACIONES PARA EL PROGRAMA DEL MODELO EN EL MATLAB	231
ANEXO XIV: DATOS DIARIOS DE PARÁMETROS EN EL PARSHAL.....	242
ANEXO XV: VALIDACIÓN DE MODELO DIARIOS.....	260
ANEXO XVI: DATOS REMOCIÓN	268
ANEXO XVII: VALIDACIÓN REMOCIÓN	279
ANEXO XVIII: FOTOGRAFÍAS.....	285

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Ubicación geográfica de la provincia Cercado Tarija.....	6
Figura N° 2: Zona de influencia afectada por los problemas que presenta las lagunas de estabilización de San Luis	6
Figura N° 3: Ubicación Geográfica Lagunas de Estabilización de San Luis	7
Figura N° 4: Ejemplo diagrama de flujo de un sistema de lagunas de estabilización	9
Figura N° 5: Ejemplo diagrama de flujo de un sistema de lagunas de estabilización	10
Figura N° 6: Proceso de una laguna facultativa.....	12
Figura N° 7: Escala del pH	20
Figura N° 8: Equipo para la determinación de la capa de lodo en lagunas	31
Figura N° 9: Formato de planilla de registro de datos batimétricos	37
Figura N° 10: Alturas respectivas en la mediciones batimétricas.....	37
Figura N° 11: Mallados; secciones transversales y líneas horizontales nombradas en lagunas estabilización	39
Figura N° 12: Nube de puntos introducidos para generación de la superficie del nivel de agua en la laguna anaeróbica 1	40
Figura N° 13: Generación de superficies en la laguna anaeróbica 1	41
Figura N° 14: Configuración del intervalo y suavizado de isolíneas.....	42
Figura N° 15: Superficie suavizada en sus isolíneas	43
Figura N° 16: Superficie del fondo de la laguna anaeróbica 1 vista en 3D	44

Figura N° 17: Procesamiento de cuantificación de volúmenes entre superficies de la laguna anaeróbica 1	45
Figura N° 18: Exportación de tablas de resultados de cuantificaciones de volúmenes entre superficies.....	46
Figura N° 19: Mapa de profundidades de la laguna anaeróbica 1	47
Figura N° 20: Mapa de profundidades de la laguna anaeróbica 2	48
Figura N° 21: Mapa de profundidades de la laguna facultativa.....	49
Figura N° 22: Comparación de superficies generadas de la laguna anaeróbica 1 entre los años 2006 y 2019	51
Figura N° 23: Curva Altura vs Volumen de la laguna anaeróbica 1 en el año 2006 y 2019	52
Figura N° 24: Ubicación de puntos de muestreo de lodo residual.....	57
Figura N° 25: Características de los Sólidos en lodos de las lagunas anaeróbicas.....	57
Figura N° 26: Características del pH en lodos de la lagunas anaeróbicas	58
Figura N° 27: Características de la Conductividad en lodos de las lagunas anaeróbicas	58
Figura N° 28: Características del DBO ₅ y DQO en lodos de las lagunas anaeróbicas.....	58
Figura N° 29: Características del Nitrógeno Total en lodos de las lagunas anaeróbicas.....	59
Figura N° 30: Características del Cromo en lodos de las lagunas anaeróbicas	59
Figura N° 31: Características de la Densidad Aparente en lodos de las lagunas anaeróbicas	59
Figura N° 32: Comportamientos unitarios de los parámetros.....	62
Figura N° 33: Comportamiento diario de los sólidos sedimentables (SSed).....	64
Figura N° 34: Comportamiento diario de la conductividad (C)	65
Figura N° 35: Comportamiento diario del DBO ₅	66
Figura N° 36: Comportamiento diario del DQO.....	67
Figura N° 37: Comportamiento diario de sólidos en suspensión (SS).....	68
Figura N° 38: Comportamiento diario del pH	69
Figura N° 39: Comportamiento diario de la temperatura (T)	70
Figura N° 40: Comportamiento diario del caudal en el afluente (Q diario)	71
Figura N° 41: Comportamiento mensual del caudal en el afluente (Q mensual)	72
Figura N° 42: Comportamiento anual del caudal en el afluente (Q anual).....	73
Figura N° 43: Caudales en el Canal Parshal	76

Figura N° 44: Comparación de caudales brindados por COSAALT y caudales medidos....	77
Figura N° 45: Caudales en Eventos extremos de lluvia.....	78
Figura N° 46: Comportamiento del DQO para eventos extremos	80
Figura N° 47: Comportamiento del DBO ₅ para eventos extremos.....	80
Figura N° 48: Retención de Sólidos Suspendidos acumulados en las lagunas anaeróbicas .	83
Figura N° 49: Retención de Sólidos Suspendidos acumulados hasta la laguna facultativa..	84
Figura N° 50: Retención de Sólidos Suspendidos acumulados hasta laguna de maduración	85
Figura N° 51: Retención del DBO ₅ acumulado en las lagunas anaeróbicas	86
Figura N° 52: Retención del DBO ₅ acumulado hasta la laguna facultativa	87
Figura N° 53: Retención del DBO ₅ acumulado hasta la laguna de maduración	88
Figura N° 54: Retención del DQO acumulado hasta la lagunas anaeróbicas	89
Figura N° 55: Retención del DQO acumulado hasta la laguna facultativa.....	90
Figura N° 56: Retención del DQO acumulado hasta la laguna de maduración	91
Figura N° 57: Retención de la Conductividad (C) acumulada en las lagunas anaeróbicas ..	92
Figura N° 58: Retención de la Conductividad (C) acumulada en la laguna facultativa	93
Figura N° 59: Retención de la Conductividad (C) acumulada en la laguna de maduración	94
Figura N° 60: Retención de sólidos en las lagunas anaeróbicas.....	96
Figura N° 61: Desarrollo de la ventana gráfica del Modelo	97
Figura N° 62: División de la ventana gráfica del Modelo	98
Figura N° 63: Apertura del Modelo.....	98
Figura N° 64: Codificación del modelo	99
Figura N° 65: Aplicación del modelo	101
Figura N° 66: Comparación de comportamientos unitarios de caudal y sólidos en suspensión.....	104
Figura N° 67: Comparación de valores promedios unitarios y reales de SS	108
Figura N° 68: Cronograma aproximado del funcionamiento de las lagunas anaeróbicas y la laguna facultativa.....	113
Figura N° 69: Porcentajes de Remoción de DBO, DQO, Coliformes totales y Coliformes Fecales	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Coordenadas UTM de la poligonal de las lagunas de estabilización de Tarija..	6
Tabla N° 2: Datos típicos sobre las características físicas y cantidades de lodo producido en diversos procesos de tratamiento de aguas residuales	17
Tabla N° 3: Valores característicos de los parámetros más frecuentemente estudiados en lodos.....	19
Tabla N° 4: Clasificación del suelo según su pH.....	21
Tabla N° 5: Composición química típica del fango crudo y digerido	23
Tabla N° 6: Salinidad del suelo mediante la conductividad eléctrica.....	24
Tabla N° 7: Operacionalización de variables.....	27
Tabla N° 8: Profundidad media de las secciones.....	50
Tabla N° 9: Profundidad media de las lagunas de estabilización	51
Tabla N° 10: Altura vs Volumen de la laguna anaeróbica 1 en el año 2006 y 2019	52
Tabla N° 11: Cuantificación de los Lodos Residuales en las Lagunas de Estabilización ...	54
Tabla N° 12: Caracterización de lodos residuales en las lagunas anaeróbicas	55
Tabla N° 13: Comportamiento de parámetros	62
Tabla N° 14: Tirantes en el Canal Parshal	74
Tabla N° 15: Caudales en el Canal Parshal	75
Tabla N° 16: Comparación de caudales brindados por COSAALT Ltda. y caudales medidos.....	77
Tabla N° 17: Factor para eventos extremos.....	79
Tabla N° 18: Días con lluvia Estación Aeropuerto.....	81
Tabla N° 19: Factor mensual y anual para eventos extremos	82
Tabla N° 20: Retención de sólidos en lagunas anaeróbicas.....	95
Tabla N° 21: Resumen de cálculo de gravedad específica de lodos.....	102
Tabla N° 22: Análisis de carga de sólidos	103
Tabla N° 23: Resumen de parámetros de Ecuación 1 para las lagunas de estabilización .	106
Tabla N° 24: Resumen medios anuales de SS	106
Tabla N° 25: Comparación de valores promedios unitarios y reales de SS.....	107
Tabla N° 26: Resumen de SS medios anuales minorados por factor.....	108
Tabla N° 27: Resumen de caudales medios anuales modelados.....	110

Tabla N° 28: Resumen de generación de lodos	111
Tabla N° 29: Volúmenes de lodo estimado en las lagunas de estabilización	112
Tabla N° 30: Porcentaje de remoción y eficiencia.....	115
Tabla N° 31: Verificaciones de rangos de altitudes medias de las Lagunas de Estabilización	120
Tabla N° 32: Comparación de volúmenes de lodos reales y calculados por el Modelo	121
Tabla N° 33: Volumen de lodo generado por el modelo de los años 1990-2005	122