PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

“EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN A BASE DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN, DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE, PROVINCIA DE MANABÍ.”

KAROLL ANNAHI MACIAS PUGA

DIRECTOR: ING. JORGE AMÉRICO CISNEROS GALLEGOS

QUITO, MAYO 2023

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, que siempre están en cada paso de mi vida.

Gracias por tener fe en mí.

Gracias a mi director de tesis, por guiarme en este proceso con sus comentarios y recomendaciones.

Y a mis amigos por sus palabras de aliento.

DEDICATORIA

A mi padre, mi madre y mis abuelas que han sido mis ejemplos de perseverancia y dedicación durante toda mi vida.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO....ii
DEDICATORIA....iii
ÍNDICE....iv
1. INTRODUCCIÓN.... 1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.... 1
1.2. JUSTIFICACIÓN.... 1
1.3. OBJETIVO.... 2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.... 2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.... 2
1.4. ALCANCE.... 2
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO EN ROCAFUERTE.... 3
2.1. DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ZONA.... 3
2.1.2. Ubicación geográfica, límites y elevación.... 4
2.1.3. Ocupación del suelo urbano.... 4
2.1.4. Clima.... 4
2.1.5. Recursos hídricos.... 5
2.2.1. Descripción demográfica.... 6
2.2.2. Descripción económica.... 7
Comercial y servicios.... 7
Industrial.... 7
Actividades agrícolas.... 8
2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE.... 8
2.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO.... 9
2.4.1. Sistema de alcantarillado sanitario.... 9
2.4.1.1. Tuberías.... 9
2.4.2. Sistema de tratamiento de aguas residuales.... 11
2.4.2.1. Laguna anaerobia.... 12
2.4.2.2. Laguna facultativa.... 13
2.4.2.3. Laguna de maduración.... 14
3. REVISIÓN DE LITERATURA.... 16
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.... 16
3.1.1. Agua residual.... 16

3.1.2. Origen de las aguas residuales 17
3.1.2.1. Aguas residuales domésticas 17
3.1.2.2. Aguas residuales industriales 17
3.1.2.3. Aguas pluviales 17
3.1.2.4. Infiltración y aportaciones incontroladas 17
3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE AGUAS RESIDUALES 18
3.2.1. Características físicas 18
3.2.2. Características químicas 20
3.2.2.1 Materia orgánica 20
3.2.2.2. Demanda bioquímica de oxígeno 21
3.2.2.3. Demanda química de oxígeno 22
3.2.2.4. pH 22
3.2.3. Características biológicas 22
3.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS 25
3.3.1. Tipos de tratamiento 25
3.4. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN 34
3.4.1. Factores que influyen en el proceso depurativo 35
3.4.2. Tipos de lagunas de estabilización 40
3.4.2.1. Lagunas anaerobias 40
3.5. PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN. 49
3.5.1. Reactor de flujo pistón 50
3.5.2. Mezcla completa 51
3.5.3. Flujo disperso 52
3.5.4. Estimación de la constante de reacción de primer orden para remoción de DBO_5 y coliformes fecales 53
3.5.5. Reutilización de aguas residuales 54
3.5.6. Normativa ecuatoriana para el uso de aguas residuales tratadas. 55
4. EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE. 59
4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ROCAFUERTE. 59
4.1.1. Estructura de entrada y tratamiento preliminar 59
4.1.2. Laguna anaerobia 59
4.1.3. Laguna facultativa 63

4.1.4. Laguna de maduración 67
4.1.5. Estructura de descarga y cuerpo receptor 70
4.2. METODOLOGÍA 72
4.3. REALIZACIÓN DE AFOROS 77
4.4. TOMA DE MUESTRAS 82
4.5. ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL. MÉTODOS UTILIZADOS. 87
4.5.1. DBO_5 87
4.5.2. Coliformes fecales 88
4.5.3. Sólidos suspendidos 89
4.5.4. Temperatura 90
5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN 91
5.1. RESULTADOS DE AFOROS. 91
5.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO. 92
5.3. CÁLCULO DE CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE CADA LAGUNA. 94
5.3.1. Eficiencia de remoción de DBO_5, coliformes fecales y sólidos suspendidos de las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración. 94
5.3.2. Tiempo de retención 97
5.3.3. Carga orgánica superficial 100
5.3.4. Carga orgánica volumétrica 101
5.3.5. Estimación de la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente 102
5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CAMPO VERSUS PREDICCIÓN CON MODELACIÓN MATEMÁTICA DE CALIDAD DEL EFLUENTE. 116
5.5. VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA DE DESCARGAS Y USOS DEL AGUA. 118
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 119
6.1. CONCLUSIONES 119
6.2. RECOMENDACIONES 121
BIBLIOGRAFÍA 123
ANEXO 1. LOCALIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE Y LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN. 126
ANEXO 2. LEVANTAMIENTO PLANIMÉTRICO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE 131
ANEXO 3. COBERTURA DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE 133

ANEXO 4. ESQUEMA DE UBICACIÓN DE TOMA DE MUESTRAS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE. 138

ANEXO 5. RESULTADOS DE AFOROS REALIZADOS EN LA SALIDA DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA Y SALIDA DE LA LAGUNA DE MADURACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE. 140

ANEXO 6. TABLA PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN NUMERO MAS PROBABLE (NMP) POR CADA 100 ml DE MUESTRA 149

ANEXO 7. DIMENSIONES MEDIDAS EN SITIO, CÁLCULO DE AREAS Y VOLUMEN DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE..... 153

ANEXO 8. CARTA DE CERTIFICACIÓN EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO EMITIDO POR EL LABORATORIO DE SANEAMIENTO DE PORTOAGUAS EP Y RESULTADOS DE LABORATORIO PARA LOS PARÁMETRO DE DBO_5, SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y COLIFORMES FECALES 156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de retención para el diseño de lagunas anaerobias recomendados (Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán, 2004, pág. 278). 42
Tabla 2. Carga superficial recomendada en función de la densidad poblacional y condiciones ambientales (Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán, 2004, pág. 281) 46
Tabla 3. Factores de dispersión recomendado por la norma (INEN, 1992, pág. 241) 52
Tabla 4. Límites de descarga en cuerpos de agua dulce (Ministerio del Ambiente, 2015, pág. 21). 56
Tabla 5. Criterios de calidad para riego de cultivos (Ministerio del Ambiente, 2015, pág. 15) 58
Tabla 6. Dimensiones del espejo de agua de las lagunas de estabilización de Rocafuerte 73
Tabla 7. Cronograma y localización de toma de muestras para análisis del sistema de tratamiento de aguas residuales de Rocafuerte. 76
Tabla 8. Resultados de medición de caudales del sistema de lagunas de estabilización en serie de la ciudad de Rocafuerte 91
Tabla 9. Resultados de DBO_5 de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte. 92
Tabla 10. Resultados de coliformes fecales de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte. 92
Tabla 11. Resultados de temperatura y sólidos suspendidos de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte. 93
Tabla 12. Resumen de remoción de los parámetros DBO_5, coliformes fecales y sólidos suspendidos de las lagunas de estabilización de Rocafuerte. 96
Tabla 13. Tiempo de retención calculado para laguna anaerobia 98
Tabla 14. Tiempo de retención calculado para laguna facultativa 98
Tabla 15. Tiempo de retención calculado para laguna de maduración 99
Tabla 16. Tiempo de retención calculado para cada laguna y del sistema de lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte 99
Tabla 17. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna anaerobia con reactor tipo pistón. 103
Tabla 18. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna facultativa con reactor tipo pistón. 103
Tabla 19. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna de maduración con reactor tipo pistón 104
Tabla 20. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna anaerobia con reactor tipo pistón 105
Tabla 21. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna facultativa con reactor tipo pistón 105
Tabla 22. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna de maduración con reactor tipo pistón 106
Tabla 23. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna anaerobia con reactor completamente mezclado. 107

Tabla 24. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna facultativa con reactor completamente mezclado. 107
Tabla 25. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna de maduración con reactor completamente mezclado. 108
Tabla 26. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna anaerobia con reactor completamente mezclado..... 109
Tabla 27. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna facultativa con reactor completamente mezclado..... 109
Tabla 28. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna de maduración con reactor completamente mezclado 110
Tabla 29. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna anaerobia con reactor de flujo disperso. 112
Tabla 30. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna facultativa con reactor de flujo disperso. 113
Tabla 31. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna de maduración con reactor de flujo disperso. 113
Tabla 32. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna anaerobia con reactor de flujo disperso. 115
Tabla 33. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna facultativa con reactor de flujo disperso. 115
Tabla 34. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna de maduración con reactor de flujo disperso..... 116
Tabla 35. Tabla de resumen y comparación de la concentración de DBO_5 calculado en el efluente con los resultados obtenidos en laboratorio..... 116
Tabla 36. Tabla de resumen y comparación de la predicción de coliformes fecales calculados en el efluente con los resultados obtenidos en laboratorio. 117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa base del cantón Rocafuerte (GADM de Rocafuerte, 2016, pág. 10). 3
Figura 2. Número de habitantes en el cantón Rocafuerte según censos de 1990, 2001 y 2010 (GADM de Rocafuerte, 2016, pág. 99). 6
Figura 3. Área de influencia de las estaciones de bombeo en el cantón de Rocafuerte (Google Earth. Recuperado el 10 de diciembre de 2021)..... 11
Figura 4. Vista en planta de las lagunas de estabilización de Rocafuerte (Google Earth. Recuperado el 11 de diciembre de 2021). 12
Figura 5. Dimensiones de laguna anaerobia (GADM de Rocafuerte, 2016).... 13
Figura 6. Dimensiones de laguna facultativa (GADM de Rocafuerte, 2016). .. 14
Figura 7. Dimensiones de laguna de maduración (GADM de Rocafuerte, 2016). 15
Figura 8. Esquema de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte (GADM de Rocafuerte, 2016). 15
Figura 9. Esquema de reactor de flujo pistón (Romero, 1999, pág. 267). 50
Figura 10. Esquema de reactor de mezcla completa (Romero, 1999, pág. 263). 51
Figura 11. Esquema de laguna anaerobia de la ciudad de Rocafuerte. 60
Figura 12. Corte de estructuras de entrada y salida de la laguna anaerobia de la ciudad de Rocafuerte. 60
Figura 13. Vista en planta de estructuras de entrada y salida de la laguna anaerobia de la ciudad de Rocafuerte..... 61
Figura 14. Esquema de laguna facultativa de la ciudad de Rocafuerte. 63
Figura 15. Corte de estructuras de entrada y salida de la laguna facultativa .. 65
Figura 16. Vista en planta de entrada y salida de la laguna facultativa 65
Figura 17. Esquema de laguna de maduración 67
Figura 18. Corte de estructuras de entrada y salida de la laguna de maduración..... 67
Figura 19. Entrada y salida de la laguna de maduración vista en planta. 68
Figura 20. Recorrido del efluente de la laguna de maduración hasta el canal Mina de Oro (Google Earth. Recuperado el 21 de agosto de 2022). 71
Figura 21. Descarga del canal Mina de Oro en el estero Bachillero (Google Earth. Recuperado el 21 de agosto de 2022)..... 71
Figura 22. Esquema explicativo de las mediciones de la superficie del agua. 73
Figura 23 - Ubicación de los puntos de toma de muestras en lagunas de estabilización.(Google Earth. Recuperado el 10 de diciembre de 2021). 75
Figura 24. Esquema de toma de la primera muestra en la entrada de la laguna anaerobia. 83
Figura 25. Esquema de toma de la primera muestra en la salida de la laguna anaerobia. 84
Figura 26. Esquema de la toma de muestra en la salida de la laguna facultativa. 85
Figura 27. Esquema de la toma de muestra en la salida de la laguna de maduración..... 86

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Reconocimiento de laguna anaerobia del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte. 61
Fotografía 2. Estado actual de taludes y terraplenes de laguna anaerobia 62
Fotografía 3. Entrada de laguna facultativa..... 64
Fotografía 4. Estructura de entrada de la laguna facultativa 64
Fotografía 5. Reconocimiento de laguna facultativa del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte. 66
Fotografía 6. Estado actual de taludes y terraplenes de la laguna facultativa. 66
Fotografía 7. Estructura de entrada de la laguna de maduración. 68
Fotografía 8. Reconocimiento de laguna de maduración del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte. 69
Fotografía 9. Estado actual de taludes y terraplenes de la laguna de maduración..... 70
Fotografía 10. Cuerpo receptor del efluente de las lagunas de estabilización (canal Mina de Oro)..... 72
Fotografía 11. Medición de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte..... 74
Fotografía 12. Cronómetro utilizado para la medición de tiempo en los aforos 78
Fotografía 13. Realización de aforo en el efluente de la laguna anaerobia del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte 78
Fotografía 14. Medición del caudal por aforo volumétrico en el efluente del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte. 79
Fotografía 15. Tercer aforo volumétrico en el efluente de la laguna de maduración y el efluente de la laguna anaerobia 80
Fotografía 16. Cuarto aforo volumétrico realizados en los efluentes de las lagunas anaerobia y de maduración. 80
Fotografía 17. Quinto aforo de velocidad realizado el 14 y 15 de mayo en el efluente de la laguna anaerobia. 81
Fotografía 18. Quinto aforo de velocidad realizado el 14 y 15 de mayo en el efluente de la laguna de maduración. 81
Fotografía 19. Toma de muestras en la entrada de la laguna anaerobia..... 82
Fotografía 20. Toma de muestras en salida de la laguna anaerobia 83
Fotografía 21. Toma de muestras en la salida de la laguna facultativa 84
Fotografía 22. Toma de muestras salida de la laguna de maduración..... 85
Fotografía 23. Identificación y almacenamiento de las muestras recolectadas 86
Fotografía 24. Respirométrico DBOTrak II utilizado en el análisis de DBO_5 ... 87
Fotografía 25. Cultivo de muestras para análisis de coliformes fecales..... 89
Fotografía 26. Medición de sólidos suspendidos por el espectrofotómetro DR3900 89
Fotografía 27. Medición de temperatura del sistema de lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte. 90

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La ciudad de Rocafuerte, como muchas otras ciudades del país, tiene un crecimiento demográfico e industrial que se ha visto en aumento recientemente. Como consecuencia, las necesidades de la zona por parte de la población también aumentan, por ejemplo, los servicios básicos como el agua potable, alcantarillado y la depuración de aguas residuales. Una de las principales fuentes de contaminación de cuerpos de agua son las aguas residuales debido a la concentración de microorganismos patógenos que generan enfermedades que afectan a la salud humana. En vista de ello, se requiere un sistema de tratamiento que garantice a la población una buena calidad ambiental.

El sistema actual de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Rocafuerte lo componen tres lagunas de estabilización, las cuales se encargan de disminuir las concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y coliformes fecales para descargar el agua tratada al estero Bachillero, ubicado en el margen derecho de la vía Rocafuerte-Tosagua. La presente disertación consiste en evaluar el funcionamiento de estas lagunas mediante la toma de muestras antes y después de cada laguna y realizar aforos que permitan cuantificar los caudales de agua residual. De esta manera se determinará la eficiencia del sistema de lagunas.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

Debido a que anteriormente se descargaban las aguas servidas de la ciudad de Rocafuerte directamente al estero Bachillero o se usaban pozos sépticos, lo que producía impactos ambientales, el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal (GADM) del cantón Rocafuerte, en el año 2000, implementó el actual sistema de alcantarillado y depuración de aguas residuales. Dicho sistema está compuesto por tres lagunas de estabilización en serie, de las cuales, una es anaerobia, una facultativa y otra de maduración. En vista del crecimiento poblacional y el tiempo en el que se han utilizado dichas lagunas, es interesante y necesario realizar una evaluación de las mismas que permita determinar las

características y eficiencia del sistema actual de depuración, a fin de establecer las mejoras que sean necesarias para mejorar la calidad del efluente.

1.3. OBJETIVO.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar de manera preliminar la eficiencia de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte de la provincia de Manabí.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las principales características técnicas del sistema de agua potable y alcantarillado de la ciudad de Rocafuerte.
- Describir las características del tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización.
- Realizar la toma de muestras in situ y aforos para determinar la calidad del agua residual de la ciudad de Rocafuerte.
- Valorar los resultados obtenidos para determinar la eficiencia de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

1.4. ALCANCE

Se efectuará la evaluación preliminar de la operación del sistema de lagunas de estabilización mediante aforos de caudales a la entrada y salida de todas las lagunas del sistema y se tomarán muestras antes y después de la laguna primaria y después de las lagunas secundaria y terciaria. Se tomarán muestras para medición en laboratorio de DBO_5, coliformes fecales, sólidos suspendidos y temperatura.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO EN ROCAFUERTE.

2.1. DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ZONA.

2.1.1. Ubicación y extensión

El cantón Rocafuerte se encuentra ubicado en la costa ecuatoriana, en la provincia de Manabí zona centro norte, a 15 km de su capital provincial (Portoviejo) y 33 km próximo al puerto de la ciudad de Manta. En conjunto con el cantón Tosagua, se halla en el distrito 13D12 (GADM de Rocafuerte, 2016). Se ubica entre las ciudades de Manta, Portoviejo y Chone y posee acceso vehicular mediante vías de primer y segundo orden que conectan a estas ciudades con el resto del país.

Según GADM de Rocafuerte (2016) la extensión actual del cantón Rocafuerte es de 27.808,37 ha, lo que equivale a una superficie de 278,08 km^2, así mismo, la zona rural de este cantón representa un aproximado de 99% del total del territorio, abarcando un total de 56 comunidades rurales y una superficie de 27.528,88 ha; la zona urbana, por otro lado, representa apenas el 1% del territorio con una extensión de 279,49 ha.

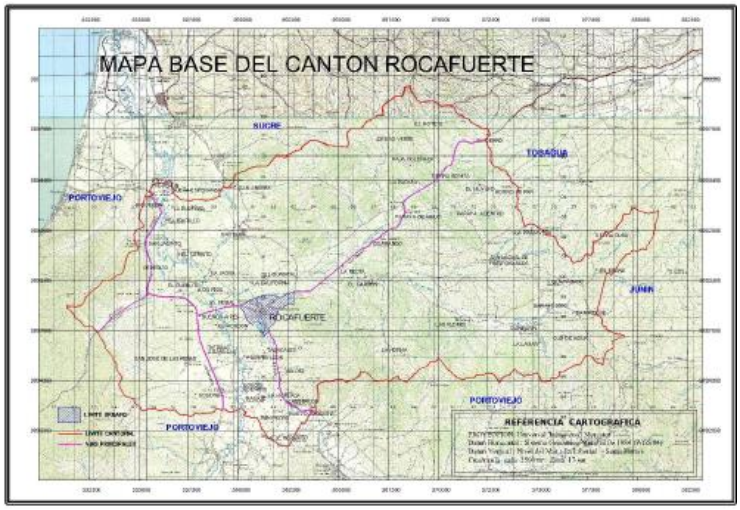


Figura 1. Mapa base del cantón Rocafuerte (GADM de Rocafuerte, 2016, pág. 10).

2.1.2. Ubicación geográfica, límites y elevación

Rocafuerte está limitado en la región norte con los cantones Sucre y Portoviejo, al este con Tosagua y Junín y al oeste con Portoviejo (GADM de Rocafuerte, 2016).

El cantón Rocafuerte es un extenso valle de poco relieve; dentro de sus elevaciones el cerro La Tebalda es el mayor, con una altura promedio de 500 msnm; el resto de sus cerros tiene una altura promedio de entre 100 a 300 msnm y se encuentran dispersos alrededor de todo el cantón (GADM de Rocafuerte, 2016). En el anexo 1 se observa el mapa con la ubicación de Rocafuerte en la provincia de Manabí y la ciudad con sus principales calles.

2.1.3. Ocupación del suelo urbano

Según el GADM de Rocafuerte (2016) la superficie que ocupa el sector urbano del cantón Rocafuerte es de 279,49 ha, en la cual habita una población aproximada de 15.820 habitantes según la proyección al año 2020.

Aunque en la zona central se concentran las viviendas residenciales que poseen todos los servicios básicos, en la periferia de la ciudad se encuentran residencias mucho más sencillas y dispersas debido a la ausencia de servicios básicos e infraestructura; actualmente dichos servicios se encuentran en expansión, por lo que se ve la posibilidad de que el suelo urbano se consolide cada vez más (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.1.4. Clima

Dada la ubicación de la ciudad el clima en Rocafuerte generalmente es cálido, por lo que su temperatura se encuentra en un promedio de 23°C a 26°C y su precipitación promedio anual es de 397,4 mm (GADM de Rocafuerte, 2016).

La nubosidad de esta zona es alta. Según la estación meteorológica INAMHI-Portoviejo y gracias a su bajo relieve, posee dos tipos de climas: tropical mega térmico semiárido y tropical mega térmico seco; tiene una precipitación no mayor a 500 mm/año en las zonas bajas de clima semiárido y precipitaciones de 500 a 1.000 mm/año en zonas altas de clima seco, esto se da durante los meses de enero a abril que corresponden a los meses de invierno (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.1.5. Recursos hídricos

La ciudad de Rocafuerte cuenta con dos ríos muy próximos, el río Portoviejo y Río Chico que brindan al sector agua para uso humano durante todo el año (sobre todo el río Portoviejo), sin embargo, la calidad que tiene el agua es mala provocada por la contaminación de ambos ríos (GADM de Rocafuerte, 2016).

Se tiene registro de dos estudios previos del estado ambiental realizados a la cuenca del río Portoviejo: el primero se realizó en el año 2002 por la consultora "CEMAPRIMES CIA LTDA Y ASOCIADOS" para el proyecto PATRA y el segundo en el año 2009 por "Ecobiotec" contratado por la SENAGUA (GADM de Rocafuerte, 2016).

Estos estudios revelan que el agua del río Portoviejo no es apta para consumo humano, por su parte, Ecobiotec reveló que la mayor porción de la contaminación se debe a la presencia de coliformes fecales en las zonas bajas de la cuenca, que es donde se concentra la población. Estaciones cercanas como las de Picoazá, Santa Ana, 4 Esquinas, Río Chico, El Ceibal y Correagua presentan un alto grado de coliformes fecales, dentro de las cuales Picoazá en el 2007 mostró una concentración de 244.000 CFU/100ml (GADM de Rocafuerte, 2016).

Además, se hallaron otros agentes contaminantes como el plomo y pesticidas organoclorados y organofosforados en pequeñas cantidades a lo largo del río, que probablemente se deben a un mal manejo en la disposición de desechos como las baterías y aceites usados y una mala praxis por parte de los agricultores de la zona al usar agroquímicos y desechar sus envases en el río (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.2. DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS DE LA ZONA.

2.2.1. Descripción demográfica

2.2.1.1. Crecimiento poblacional

Desde el 2001 al 2010 se ha tenido constancia del crecimiento poblacional del cantón en un 1,47% promedio anual. Por otro lado, con el censo realizado en el año 2010 se determinó que la población total del cantón Rocafuerte era de 33.469 habitantes (GADM de Rocafuerte, 2016). Según el INEC (2010), la proyección poblacional del cantón Rocafuerte prevista para el año 2020 es de 37.312 habitantes.

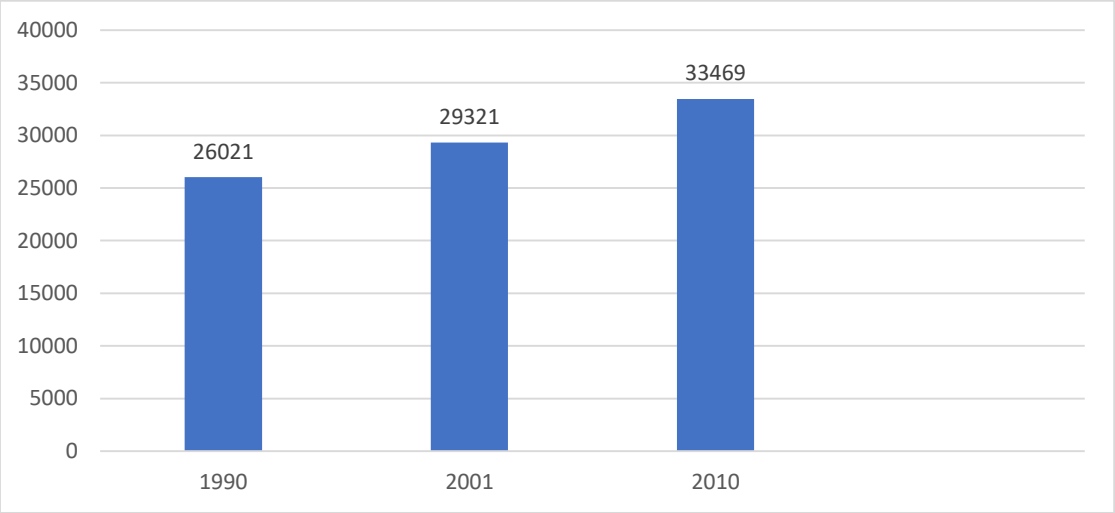


Figura 2. Número de habitantes en el cantón Rocafuerte según censos de 1990, 2001 y 2010 (GADM de Rocafuerte, 2016, pág. 99).

Según los datos del censo en 2010, proyectados al año 2020 se estima que el 42,4% de los habitantes del cantón se ubican en la zona urbana del cantón y el restante es población rural (GADM de Rocafuerte, 2016).

Ante la vista de estos datos se llega a la conclusión de que una parte significativa de la población se concentra en el área urbana, ya sea por estrategia comercial, acceso a servicios básicos, infraestructura de educación, salud o por la presencia de suelos agrícolas en la periferia de la ciudad que permiten el sustento económico de muchas familias (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.2.2. Descripción económica

2.2.2.1. Trabajo y productividad

Según INEC 2010 (citado por GADM ROCAFUERTE, 2016) se determina que en el área urbana del cantón Rocafuerte el 92,91% de la población es económicamente activa, y el 7,09% no tiene empleo o está en búsqueda de uno.

Entre el porcentaje de la población económicamente activa se determinó que las actividades económicas en el sector urbano de mayor ocupación (53,75%) corresponden a actividades de comercio al por mayor y menor, transporte y almacenamiento, actividades inmobiliarias, administración pública y defensa, enseñanza, etc. (GADM de Rocafuerte, 2016).

El 17,22% lo representan actividades como la construcción, industrias manufactureras, suministro de electricidad, gas, distribución de agua, alcantarillado y gestión de desechos, mientras que las actividades de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca, ocupan el 14,31% de la población (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.2.2.2. Principales actividades económicas

Comercial y servicios

El comercio es por lo general la actividad de mayor demanda dentro de la ciudad de Rocafuerte, según las estadísticas del INEC 2010 (citado por GADM ROCAFUERTE, 2016), el 29,63% de la población urbana se dedica a esta actividad directa o indirectamente y el cantón cuenta con un aproximado de 644 microempresas comerciales relacionadas a la manufactura, agricultura, servicios, etc.

Industrial

El GADM de Rocafuerte (2016) detalla que, esta actividad no tiene gran porcentaje de ocupación, ya que solo el 9,85% de la población se relaciona con ella. Dentro de la actividad industrial únicamente se cuenta con el establecimiento de piladoras comunitarias que almacenan productos provenientes de agricultores del cantón.

Actividades agrícolas

Según el GADM de Rocafuerte (2016), la actividad económica de mayor relevancia en el cantón es la agricultura ya que las condiciones climatológicas del sector y el tipo de suelo que posee favorecen dicha actividad. Las actividades agrícolas y ganaderas de la ciudad representan apenas un 14,31% de la población, contrario al área rural que emplea un 55,63% y a pesar de ello, entre los productos agrícolas generados en el casco urbano se hallan el cultivo de arroz, maíz, cacao y coco.

2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE

El GADM de Rocafuerte (2016) señala que la red de distribución del sistema de agua potable proviene de la planta de tratamiento de agua potable ubicada en el sector Valdez , cuya fuente es el río Portoviejo, y es administrada por la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado del cantón Rocafuerte (EPAPAR); cuenta con un acueducto de hierro dúctil de 400 mm de diámetro, dos macromedidores, dos tanques de 800 m^3 y 1.000 m^3 en el sector urbano y tuberías para la red de distribución de PVC con 1MPa de presión y 110 mm y 63 mm de diámetro; mensualmente se dota a la población del área urbana 44.000 m^3 de agua potable y 5.000 m^3 a los sectores rurales.

Además, el GADM de Rocafuerte (2016) determina que la EPAPAR dota el servicio de agua potable a 2.491 viviendas que se encuentran en el casco urbano, eso representa el 96,52% de cobertura para este servicio.

Por otra parte, el GADM de Rocafuerte (2016) detalla que, con respecto a la continuidad del suministro, la principal causa de la suspensión del servicio se debe a las altas turbiedades presentadas durante las épocas lluviosas, ya que se provoca la creciente del río que arrastra desperdicios sólidos que afectan la calidad del agua.

2.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO

2.4.1. Sistema de alcantarillado sanitario

Según GADM de Rocafuerte (2016) a base de los datos proporcionados por el Censo de Población de Vivienda INEC 2010, los valores de cobertura para el sistema de alcantarillado sanitario en la ciudad de Rocafuerte son del 95% para el alcantarillado sanitario y 90% para alcantarillado pluvial. En el anexo 3 se aprecia la cobertura que tiene el sistema de alcantarillado sanitario en el mapa de la ciudad de Rocafuerte.

El GADM de Rocafuerte (2016) determina que el diseño de la red de alcantarillado se calculó una aportación de aguas residuales de 120 L/hab*día al inicio y 250 L/hab*día en el futuro. Se estima que aproximadamente entre el 70% y 80% de las aguas proporcionadas por el sistema de agua potable llega a la red de alcantarillado sanitario.

La construcción de la red actual de alcantarillado sanitario culminó en el año 2004, sin embargo, con el paso del tiempo el funcionamiento del mismo se ha visto afectado por azolvamientos en las tuberías de hormigón simple y obstrucciones en pozos sanitarios pertenecientes a dicha red, por lo que, actualmente el GADM de Rocafuerte se ha visto en la necesidad de sustituir algunas redes de alcantarillado sanitario con tuberías corrugadas de doble pared de PVC de diámetro 200 mm y pozos de hormigón de 600 mm de diámetro como parte del plan de regeneración urbana que se encuentra en curso (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.4.1.1. Tuberías

Según Macías (2016) las tuberías utilizadas en la construcción de la red de alcantarillado son de hormigón simple, con juntas de neopreno, de 200 mm de diámetro; se utiliza este tipo de tuberías debido a la presencia de suelos arcillosos de alta expansividad y la necesidad de un material que sea rígido y soporte esfuerzos mayores a 2 kg/cm^2.

2.4.1.2. Estación de bombeo

Según Macías (2016) debido a la topografía del lugar, las estaciones de bombeo fueron colocadas estratégicamente con el objetivo de elevar las aguas residuales desde las tuberías de recolección hasta el sistema de tratamiento de aguas; el número de estaciones son tres, por lo que se dividió a la ciudad en 3 áreas de aporte de las estaciones.

Además, Macías (2016) explica que el tipo de estación que se implementó es el de “pozo húmedo”; esto significa que las aguas residuales son conducidas mediante un sistema de tuberías subterráneas por gravedad hasta un pozo húmedo, a través de ello se determina el nivel máximo del agua almacenada y las conduce a través de un sistema de bombas centrifugas verticales sumergidas de eje vertical hacia el siguiente punto de elevación hasta llegar al sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para Macías (2016) las estaciones de bombeo, por lo general, no se ven afectadas con mucha frecuencia, ya que una de las pocas causas que puede llevar a su mal funcionamiento es la suspensión de la energía eléctrica, sin embargo, se cuenta con un generador que se activa automáticamente ante dicha situación; aunque los caudales que llegan al pozo de succión varían en función de la hora en la que se encuentre, el tiempo de retención de las aguas servidas no es mayor a dos horas, pues si esto sucede se genera el proceso de descomposición, generando malos olores y posibles daños en el sistema.

Por otra parte, Macías (2016) detalla que también se cuenta con una bomba auxiliar que controla el nivel de las aguas en los cárcamos en caso de que la bomba sumergible sufra daños, esta bomba auxiliar tiene la función de activarse automáticamente y descargar el agua hacia las lagunas.

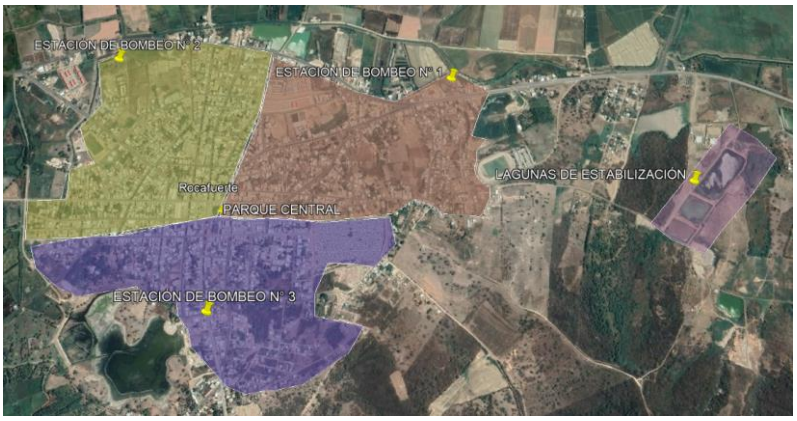


Figura 3. Área de influencia de las estaciones de bombeo en el cantón de Rocafuerte (Google Earth. Recuperado el 10 de diciembre de 2021)

En la figura 3, la zona roja es el área de influencia de la estación de bombeo No. 1, la zona amarilla corresponde a la estación de bombeo No. 2, la azul pertenece a la estación No. 3 y la rosada corresponde a las lagunas de estabilización. Adicionalmente en el anexo 3 se encuentran las áreas de influencia de cada estación de bombeo en el mapa de la ciudad de forma más detallada.

2.4.2. Sistema de tratamiento de aguas residuales

El sistema de tratamiento de aguas mediante lagunas de estabilización es uno de los más usados en países en vías de desarrollo; consisten en excavaciones superficiales de forma rectangular rodeados por bermas o taludes de tierra que proporciona a las aguas servidas un proceso de autodepuración mediante fenómenos físicos y químicos (Peña y Mara, 2004).

El tratamiento de aguas residuales de la ciudad está compuesto por tres lagunas de estabilización. El área ocupada por las lagunas de estabilización es de aproximadamente 10 hectáreas con un volumen total promedio de 80.000 m^3 de almacenamiento y un caudal afluente promedio de 1.500 m^3/día. El sistema tiene su inicio en la estación de bombeo Nº 2 como se muestra en la figura 3, donde el agua residual es conducida hasta las estaciones restantes terminando su recorrido en la primera laguna de estabilización anaerobia, una vez retenida en este lugar pasa a la siguiente laguna facultativa y por último a la de maduración donde será conducida hacia el lugar de descarga (figura 4) (Macías, 2016). En el anexo 1 se encuentra la ubicación de las lagunas de estabilización y su canal

de descarga en los alrededores de la ciudad de Rocafuerte, por otro lado, en el anexo 2 se halla el levantamiento planimétrico proporcionado por el GADM Rocafuerte.

Adicionalmente en la sección 4.1 se realizará una descripción más detallada del sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Rocafuerte.



Figura 4. Vista en planta de las lagunas de estabilización de Rocafuerte (Google Earth. Recuperado el 11 de diciembre de 2021).

2.4.2.1. Laguna anaerobia

Estas lagunas son ideales para climas cálidos como lo es el de Rocafuerte. Son diseñadas para el tratamiento de aguas servidas de alto contenido orgánico ya que un tanque anaeróbico cuando es correctamente diseñado logra eliminar alrededor de un 60% de DBO_5 a 20ºC o más; este tipo de lagunas son fuente de malos olores a causa del sulfuro de hidrógeno, por lo que se encuentra en zonas alejadas a los pobladores para evitar incomodidades (Peña y Mara, 2004).

Es la laguna de menor dimensión y tiene un área de 704,46m^2 y tres metros de profundidad; el agua bombeada hasta ella es controlada mediante el manejo de compuertas que regulan los niveles del agua para que se logre su retención por un periodo aproximado de 15 días; adicionalmente se aplica la presencia de lodos putrefactos para mejorar el proceso de depuración (Macías, 2016)

La geometría y dimensiones de la laguna anaerobia se encuentran en la figura 5, donde se indica también su superficie expresada en hectáreas.

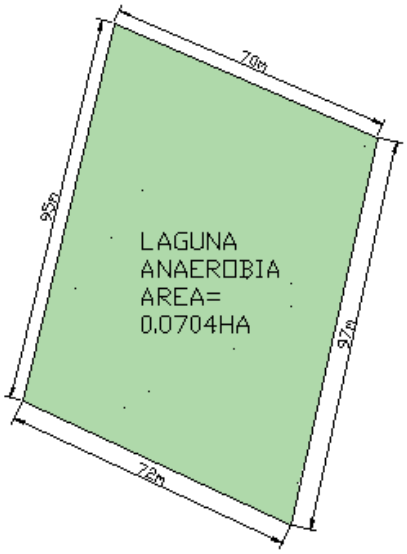


Figura 5. Dimensiones de laguna anaerobia (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.4.2.2. Laguna facultativa

Peña y Mara (2004) describen que la función de la laguna facultativa es la de la eliminación de la DBO_5 en función de su carga orgánica superficial, esto se refiere a la cantidad de material orgánico aplicada por cada hectárea de superficie de la laguna (kg DBO_5/ha*d).

La presencia de algas es importante en este tipo de lagunas ya que generan el oxígeno necesario para que las bacterias eliminen la DBO_5, dándole por lo general un color verde oscuro; el rango de concentración de algas en estas lagunas es de 500 a 1.000 µg clorofila-a por litro (Peña y Mara, 2004).

La superficie de esta laguna es de 12.002,5 m^2 y tiene una profundidad de 3 metros; el tiempo de retención de las aguas servidas dentro de esta laguna es de 15 días para luego trasladarse hacia la laguna de maduración (Macías, 2016). La geometría y dimensiones de la laguna facultativa se encuentran en la figura 6.

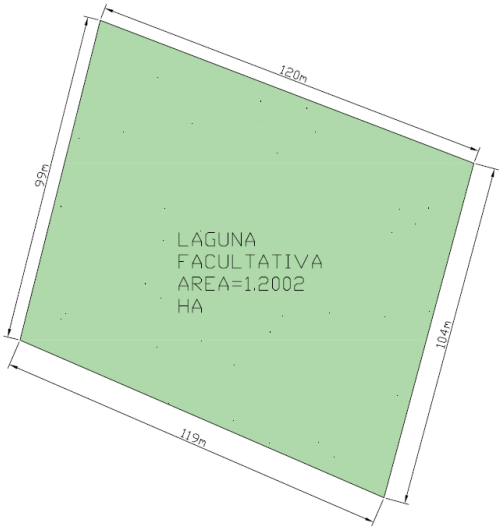


Figura 6. Dimensiones de laguna facultativa (GADM de Rocafuerte, 2016).

2.4.2.3. Laguna de maduración

Según Peña y Mara (2004) este tipo de lagunas reciben el efluente de las lagunas facultativas y debido a que las aguas residuales han pasado por un proceso previo de depuración, la carga orgánica de estas lagunas es menor por lo que solo se logra una baja eliminación adicional de DBO_5, sin embargo, aportan significativamente a la supresión de nitrógeno y fósforo.

La superficie de esta laguna es de 24.391,08 m^2 con una profundidad de 1,5 m, su efluente es destinado hacia el canal Mina de Oro hasta llegar al estero Bachillero aguas abajo en el sector Las Ardillas, donde dicha agua se destina al riego forestal (Macías, 2016).

Las características físicas de la laguna de maduración se detallan en la figura 7.

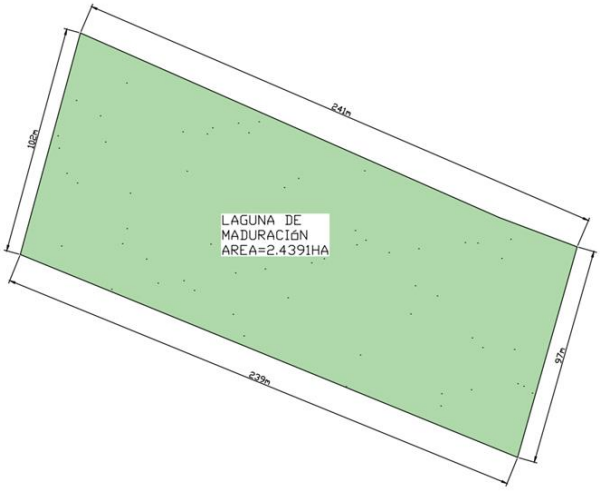


Figura 7. Dimensiones de laguna de maduración (GADM de Rocafuerte, 2016).

En la figura 8 se puede observar un esquema de las tres lagunas con sus dimensiones.

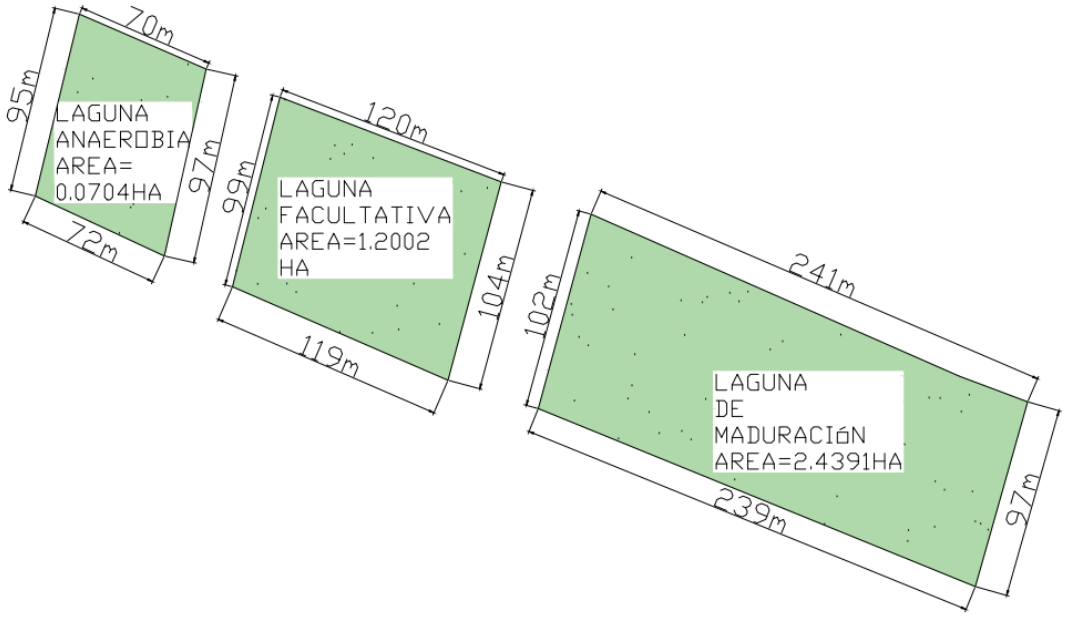


Figura 8. Esquema de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte (GADM de Rocafuerte, 2016).

3. REVISIÓN DE LITERATURA.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.

3.1.1. Agua residual

Para Metcalf y Eddy (1995) las aguas residuales son aquellas aguas que han pasado por un proceso de contaminación una vez que se emplean para determinada tarea. Estas aguas son el producto de una combinación de aguas servidas que pueden ser de origen doméstico, industrial o comercial.

Según Orozco (2005) la contaminación del agua se obtiene como consecuencia de la descarga de elementos (disueltos o suspendidos) en las fuentes de agua que sobrepasen la concentración máxima que puede tener para determinado objetivo, ya sea consumo humano, agropecuario, industrial u otras actividades; aunque las fuentes naturales de agua tengan la capacidad de autodepuración, a lo largo de los años la sobrepoblación y la poca conciencia de las limitaciones de los recursos hídricos han provocado que las cargas contaminantes que se depositan en estas fuentes sean cada vez mayores, impidiendo el uso de este líquido y deteriorándolo a una velocidad alarmante.

Ramalho (1996) indica que la definición de aguas residuales cobró relevancia a partir de la década de los 60’s, donde se tomó conciencia de lo serio que puede ser la contaminación del agua, además de plantear la inclusión de varias disciplinas como las ciencias aplicadas en la ingeniería, ciencias biológicas, ciencias de la tierra y ciencias económicas y sociales como una posible solución ante este problema de contaminación.

Por su parte Romero (1999) afirma que las aguas residuales son el resultado de la intervención humana y, por tanto, para una apropiada disposición y tratamiento de las mismas es necesario reconocer su origen, cuáles son sus características físicas, químicas y biológicas, así como las consecuencias que traen dichas aguas a sus fuentes receptoras.

3.1.2. Origen de las aguas residuales

3.1.2.1. Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas provienen de las residencias, edificios, centros comerciales e institucionales; por lo general es el tipo de agua residual más común ya que contiene aguas grises, procedentes de duchas, lavadoras, lavamanos, etc. y aguas negras que transportan desechos humanos, las cuales aportan sólidos suspendidos, nitrógeno, coliformes fecales, grasas, fósforo y DBO_5 (Romero, 1999).

3.1.2.2. Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales, como su nombre lo indica, son el producto de las descargas provenientes de las industrias de manufactura; la cantidad de contaminantes que se encuentran dentro de estas aguas es muy alta, por lo que las consecuencias que pueden traer al medio ambiente son múltiples, ya que provoca cambios en el desarrollo de los ecosistemas y cambia las condiciones físicas y químicas del agua (Forero, Ortiz, y Ríos, 2005).

3.1.2.3. Aguas pluviales

Es el agua proveniente de la escorrentía superficial; estas aguas contienen cargas contaminantes ya que las arrastran desde las superficies donde esta circula, como los techos y calles; en las zonas urbanas, el agua pluvial es recolectada en alcantarillas separadas y es descargada a su medio receptor sin tratamiento previo; algunas ciudades emplean sistemas de alcantarillado combinado, sin embargo, esto se vuelve un problema en temporadas de lluvia ya que el caudal se incrementa y excede la capacidad de la planta de tratamiento, provocando que parte del agua se descargue directamente a su medio receptor y en consecuencia se provoquen efectos negativos de contaminación en el agua (Romero, 1999).

3.1.2.4. Infiltración y aportaciones incontroladas

La infiltración se produce en aquellas aguas que descargan de manera directa o indirecta a la red de alcantarillado, ya sea mediante juntas defectuosas, grietas, fisuras o paredes porosas de las tuberías; dentro de la infiltración también se suele incluir las aportaciones permanentes de agua provenientes de drenajes de sótanos, cimentaciones, circuitos de refrigeración, etc. (Metcalf y Eddy, 1995).

Las aportaciones incontroladas incluyen las aguas provenientes de las aguas lluvias que se aportan directamente a la red sanitaria mediante bajantes de edificios, drenes, tapas de pozos de registro, alcantarillas pluviales y conexiones mal colocadas entre alcantarillado pluvial y sanitario, desbordamientos y bypass de estaciones de bombeo, etc. (Metcalf y Eddy, 1995).

3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE AGUAS RESIDUALES

3.2.1. Características físicas

3.2.1.1. Sólidos totales

Este parámetro se obtiene después de someter al agua a evaporación, con temperaturas entre 103 y 105°C; se determina como todo el material sólido residual en el fondo del recipiente cónico (cono de Imhoff) una vez pasados 60 minutos (Metcalf y Eddy, 1995).

Los sólidos totales se expresan en mg/L y se emplean para identificar la cantidad probable de lodos obtenidos cuando se produzca la depuración primaria del agua residual; su clasificación la componen los sólidos filtrables, que corresponden a sólidos coloidales y disueltos en los que la sedimentación no es efectiva para su depuración dado el tamaño de sus partículas, y los sólidos no filtrables o sólidos en suspensión (Metcalf y Eddy, 1995).

Según Crites y Tchobanoglous (2000) los valores aproximados de sólidos totales para agua residual doméstica cruda se encuentran entre los 350 a 1.200 mg/L.

3.2.1.2. Olores

El olor de las aguas residuales depende de varios factores como el tiempo, ya que las aguas residuales recientes tienen un olor un tanto desagradable, mientras que aquellas aguas que se han convertido en sépticas poseen un olor penetrante, esto debido al ácido sulfhídrico derivado de la descomposición anaerobia de sulfatos (Romero, 1999).

El origen de las aguas servidas también influye en el olor de las mismas, pues las aguas residuales industriales por lo general tienen un olor característico correspondiente al proceso por el cual fueron sometidas; cabe recalcar que estos

olores provocan un efecto negativo en el medio ambiente, ya que resulta perjudicial para la salud y bienestar de los individuos que se encuentren próximos a las aguas residuales (Romero, 1999).

3.2.1.3. Temperatura

Metcalf y Eddy (1995) detalla que normalmente la temperatura del agua residual es mayor a la del agua potable; esto se debe al uso de agua caliente que se le da en los domicilios y los procesos industriales a los que es sometida; el rango de temperatura del agua residual puede variar entre 10 y 21°C, dependiendo de su localidad y la época del año en la que se encuentre.

Puesto que la temperatura es un parámetro influyente en el desarrollo de la vida acuática, la solubilidad del oxígeno, el aumento en la velocidad de las reacciones químicas y de la actividad bacteriana, es importante tener en cuenta las consecuencias que conlleva un aumento de temperatura en el cuerpo receptor, ya que al provocarse cambios bruscos se puede inducir a la propagación de plantas acuáticas indeseadas y la mortalidad de otras especies acuáticas (Metcalf y Eddy, 1995).

3.2.1.4. Color

Según (Romero, 1999) el color del agua residual puede ser un determinante de su envejecimiento, es decir, mientras que las aguas residuales domésticas nuevas tienen un color grisáceo, a medida que pasa el tiempo va adoptando una tonalidad cada vez más oscura hasta convertirse en negra, lo que indica que se han transformado en aguas residuales sépticas producidas por la formación de sulfuros metálicos.

3.2.1.5. Densidad

La densidad del agua residual se representa como la cantidad de masa por unidad de volumen (kg/m^3), de esta característica depende el potencial de formación de fangos utilizados en la depuración; este parámetro depende de la temperatura y la concentración de solidos totales, por lo que se suele emplear el peso específico, el cual es el coeficiente entre la densidad del agua residual y la del agua, como parámetro alterno siendo los valores típicos para aguas residuales domésticas 1,03 con un porcentaje de concentración de sólidos del 4 al 12% (Metcalf y Eddy, 1995).

3.2.1.6. Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos son partículas de varios tamaños que se encuentran en el agua residual y son trasladados a través del movimiento de la misma; se dividen en dos grupos dependiendo de su tamaño, siendo los sólidos sedimentables aquellos que superan los 0,01mm ya que suelen asentarse en menor tiempo y los sólidos no sedimentables aquellos inferiores a 0,01mm (Metcalf y Eddy, 2004). Para Crites y Tchobanoglous (2000) los valores típicos del agua residual de origen doméstico oscilan entre los 100 a 350 mg/L.

3.2.2. Características químicas

3.2.2.1 Materia orgánica

La materia orgánica constituye una gran parte de las aguas residuales. Alrededor de un 70% de los sólidos suspendidos y un 45% de los sólidos filtrables son representados por la materia orgánica; dentro de los elementos principales de dicha materia orgánica se encuentran el Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, ya que están presentes en la mayoría de compuestos orgánicos (Orozco, 2005).

Aunque existen varios grupos de material orgánico, entre los más significativos tenemos:

a) Proteínas

Representan entre el 40 y 60% de las aguas residuales y están presentes en mayor parte en los organismos animales; al ser sustancias asociadas con los aminoácidos proporcionan una gran fuente de nitrógeno a las aguas residuales, que al presentarse en cantidades elevadas puede significar la emanación de malos olores (Orozco, 2005).

b) Aceites y grasas

Según Metcalf y Eddy (1995) las grasas de tipo animal, aceites, cera y otros compuestos llegan al agua residual en forma de productos como la margarina, manteca, aceites vegetales, etc.; productos como el keroseno, lubricantes y otros materiales derivados del petróleo son expulsados hacia la red de alcantarillado, por lo que se mantienen en la superficie del agua residual formando una capa de material flotante que pueden provocar problemas en el sistema de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales ya que obstruye las tuberías e interfiere con los procesos depurativos.

Además, Metcalf y Eddy (1995) indica que la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los aceites y grasas en su proceso de oxidación es elevada ya que por cada kg de grasa que se halle en el agua residual se consumirá entre 2 y 2,5 kg de DQO, lo que puede influir en el proceso de depuración. Crites y Tchobanoglous (2000) indican que los valores típicos de este contaminante presentes en el agua residual se encuentran entre los 50 y 100 mg/L siendo 90 mg/L el más representativo.

c) Pesticidas y productos químicos agrícolas

Los productos químicos como pesticidas, herbicidas y demás son tóxicos para una buena parte de los seres vivos, por lo que su presencia en las aguas residuales significa un gran peligro para la vida marítima y un rápido deterioro en la calidad del agua debido a la contaminación acelerada; es por esta razón que se los cataloga como contaminantes prioritarios (Metcalf y Eddy, 1995).

Usualmente este tipo de productos terminan en el sistema de alcantarillado de aguas servidas ya sea porque son productos de limpieza de uso doméstico como los son los desinfectantes, fungicidas, insecticidas, etc.; o por su aplicación en actividades agrícolas y control de plagas, de entre los más comunes se encuentran los herbicidas, repelentes, desecantes, defoliantes, etc. (Metcalf y Eddy, 1995).

3.2.2.2. Demanda bioquímica de oxígeno

La DBO_5 es causada por la respiración de las bacterias; constituye la cantidad de oxígeno que los microorganismos aerobios necesitan para descomponer la materia orgánica biodegradable; es uno de los parámetros principales que miden la calidad del agua residual, permite evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamientos de agua residual y determina la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica y estipular los límites de las cargas orgánicas que se desecha en las fuentes receptoras (Romero, 1999).

Para Metcalf y Eddy (1995) la DBO_5 es el parámetro empleado en la medición de contaminación orgánica, y consiste en medir el oxígeno disuelto que consumen los microrganismos al producirse la oxidación bioquímica de la materia orgánica por un período de 5 días.

Al determinar la demanda de oxígeno se realizan ensayos de tipo biológicos donde se mide el oxígeno disuelto antes y después de los 5 días con muestras sometidas a temperaturas de 20°C simulando las condiciones normales del agua en el laboratorio; la DBO_5 es expresada en mg/L (Orozco, 2005).

3.2.2.3. Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno o DQO mide la cantidad de oxígeno que consume la materia orgánica al ser sometida a un proceso químico, que consiste en degradar la materia orgánica utilizando agentes químicos como el dicromato de potasio (Romero, 1999).

El ensayo para determinar la DQO en el agua residual suele arrojar resultados de mayor valor en comparación al DBO_5 dado que la oxidación por medios químicos puede incluir compuestos inorgánicos como los sulfuros, sulfitos, nitritos, etc, que no son oxidables biológicamente; generalmente el DQO promedio de las aguas residuales domésticas crudas van desde los 250 a 1.000 mg/L (Romero, 1999).

3.2.2.4. pH

Es una medida que determina la alcalinidad o acidez del agua, calcula la concentración de iones de hidrógeno y se expresa como el logaritmo negativo de la concentración molar del ion hidrógeno; normalmente el valor de pH adecuado para tratamientos de aguas servidas como las lagunas de estabilización se encuentra entre 6,5 a 8,5 ya que un valor inferior al rango establecido favorece el crecimiento de hongos mientras que un pH elevado provoca que el agua sea tóxica por la presencia de nitrógeno amoniacal en forma gaseosa (Romero, 1999).

3.2.3. Características biológicas

3.2.3.1. Coliformes totales

Los coliformes totales son todos aquellos organismos capaces de fermentar lactosa, mediante liberación de gases en un período de 24±2 h a 48±3 h, a una temperatura de 35±0,5 °C (Metcalf y Eddy, 1995).

Los coliformes se clasifican en dos tipologías: las coliformes totales y las coliformes fecales; la primera clasificación incluye el total de los organismos

coliformes, ya sea fecal o no, mientras que la segunda únicamente las fecales; el motivo de esta clasificación es porque anteriormente este proceso se realizaba en dos etapas, primero se determinaba el número de coliformes totales para luego encontrar los organismos fecales dentro de este grupo; actualmente este método no es tan utilizado como lo solía ser ya que para el caso de las aguas residuales las coliformes fecales son los organismos más relevantes (Mara, 2004).

3.2.3.2. Coliformes fecales

Tienen la capacidad de permanecer más tiempo en el agua en comparación con las bacterias patógenas; para su depuración influyen varios factores como la humedad, temperatura, luz ultravioleta y pH, pues al encontrarse en un ambiente inadecuado para su crecimiento, los organismos tienden a su inactivación (Fuccz, Gómez, Cárdenas, y Campos, 2007).

Si bien la mayoría de la clasificación de los E. coli son organismos comensales no patógenos del tracto intestinal del ser humano y otras especies, las cepas E coli diarreicas son en extremo patógenas; dentro de este conjunto se encuentran: E coli enterotoxigénico (o ETEC), E coli enteropatógeno (EPEC), E coli enterohemorrágico (EHEC), E coli enteroagregante (EAEC), E coli enteroinvasivo (EIEC) y E coli difusamente adhesivo (DAEC), siendo ETEC la más común de todas y una de las principales causas de enfermedades gastrointestinales que atacan a los grupos más vulnerables como los niños y ancianos (Mara, 2004).

Aunque el género Escherichia, especie E. coli es la población bacteriana más representativa de las coliformes fecales, también se consideran el género Aerobacter y algunas Escherichia, como indicadores de coliformes, sin embargo, la presencia de estos organismos puede encontrarse en el suelo por lo que no siempre son representativos de la contaminación fecal de origen humano (Romero, 1999).

Los ensayos que permiten la identificación de coliformes fecales se basan en la capacidad de las bacterias E.coli de generar gas a una temperatura de 44,5±0,2°C por un periodo de incubación de 24±2 horas; esto se debe a que, por lo general, las coliformes fecales logran descomponer la lactosa en ácido y gas

a partir de una temperatura de 44°C, sin embargo, algunas bacterias fecales no tienen esta capacidad o existen bacterias no fecales que, si la tienen, por lo que se utiliza la Escherichia coli como indicador, dado que es un coliforme exclusivamente fecal (Romero, 1999).

3.2.3.3. Helmintos

Los helmintos son parásitos resistentes a la contaminación y la falta de oxígeno en el agua, son muy comunes dentro de países en desarrollo, donde la infestación de gusanos es transmitida por el agua, y tienen ciclos de vida largos tanto fuera como dentro del cuerpo humano; se clasifican en nematodos (gusanos redondos), cestodos (gusanos planos) y trematodos, siendo estos últimos de reproducción acelerada, ya que los huevos de parásitos provenientes de una sola persona pueden llegar a infectar a centenares de personas (Mara, 2004).

Las infecciones por nematodos en los humanos son causadas principalmente por los Ascaris lumbricodes; al ser una de las especies más habituales de nematodos en el agua, se estima que aproximadamente un millón de personas en todo el mundo están infectadas por los Ascaris, sobre todo en regiones tropicales y subtropicales; los huevos de este parásito son bastante resistentes a condiciones climáticas frías y agentes depuradores como el cloro, sin embargo, estos son densos por lo que pueden eliminarse mediante sedimentación en aguas residuales (López, Méndez, García, y Cervantes, 2017).

3.2.3.4. Algas

Las micro algas como la Eukarya están presentes en las lagunas de estabilización facultativas y de maduración; su aspecto es de color verde pues tienen una gran cantidad de clorofila en sus hojas, esto capta la luz solar produciendo la fotosíntesis; al realizar la fotosíntesis las microalgas funcionan como principal fuente de oxígeno en las lagunas, lo cual, conduce a que los microorganismos bacterianos actúen en la eliminación de DBO_5, además elevan la cantidad de pH del agua provocando la muerte de las bacterias fecales presentes (Mara, 2004).

3.3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Metcalf y Eddy (2004) indica que los métodos individuales para la remoción de contaminantes en el agua suelen realizarse mediante operaciones físicas y procesos químicos y biológicos; estas técnicas a su vez se complementan para formar los niveles de tratamientos de aguas residuales, como son los pretratamientos y tratamientos primarios, secundarios y terciarios.

Por su parte Rojas (2002) muestra que los métodos de tratamiento son comúnmente clasificados en dos grupos: el primero es el de las operaciones unitarias, las cuales aplican en su mayoría principios físicos, y el segundo que es el de procesos unitarios, en los que predominan las actividades químicas y biológicas.

Zambrano (2019) señala que los tratamientos de aguas residuales domésticas suelen ser congregados en tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios según las condiciones y los procesos que tenga cada uno. Además, en el tratamiento primario y preliminar se concentran las operaciones físicas, en el secundario las químicas y biológicas y en el terciario aquellas acciones capaces de eliminar los residuos que no pudieron ser depurados por los tratamientos anteriores (Ugalde, 2018).

3.3.1. Tipos de tratamiento

3.3.1.1. Pretratamiento

Orozco (2005) muestra el pretratamiento como un proceso preparatorio que tiene el objetivo de acondicionar las aguas residuales regulando el pH y eliminando elementos como sólidos flotantes y otras sustancias contaminantes de las aguas residuales antes de someterse a un tratamiento biológico.

a) Cribado

Según Romero (1999), el cribado consiste en retraer los sólidos de mayor tamaño del agua residual por el paso de una rejilla y puede ser fabricada de varios tamaños y materiales, aunque normalmente se usan las rejillas gruesas de 6 mm a 2,5 cm de apertura, lo que permiten eliminar sólidos grandes; el propósito de este cribado es el de proteger elementos como válvulas y tuberías de las obstrucciones que pueden causar los desperdicios como envases grandes de plástico, trapos, etc.

b) Desarenadores

Su objetivo principal es el de proteger los equipos empleados en la depuración primaria del deterioro generado por materiales arrastrados por las aguas residuales, además de reducir en cierta medida la formación de sedimentos en tuberías y canales; los desarenadores son utilizados para la remoción de sólidos pesados, material granular u otras partículas cuyo peso específico sea de mayor valor en comparación con otros desperdicios sólidos degradables; la implementación de los desarenadores tiene como resultado la reducción de reparaciones o limpieza en caso de obstrucciones por la acumulación de arena en los conductos, además de facilitar el funcionamiento del resto del proceso empleado para la depuración (Romero, 1999).

c) Ecualizadores

Este pretratamiento logra atenuar y homogeneizar el caudal que llega hasta el tratamiento primario mediante un tanque de igualamiento u homogenización, aunque este puede llegar a requerir de una mezcla para evitar sedimentación y malos olores; la profundidad de dicho tanque depende de la magnitud del caudal que se debe igualar y las condiciones a las que se debe someter para evitar los asentamientos de sólidos (Romero, 1999).

3.3.1.2. Tratamiento primario

Según Rojas (2002) el tratamiento primario logra como cometido el remover la mayor cantidad de material sólido sedimentable o flotante, por lo que, también puede reducir parcialmente la carga orgánica del agua residual, logrando como resultado entre un 25% a 40% de la remoción de DBO_5 y aproximadamente un 50% al 65% de sólidos suspendidos. Entre los tratamientos primarios se encuentran:

a) Sedimentación primaria

La sedimentación primaria es la encargada de eliminar la mayor cantidad de sólidos de densidad alta o sedimentables y sólidos flotantes; al realizarse este proceso se aplican partículas floculantes que promueven la velocidad con que se produce la sedimentación; adicionalmente, las sustancias que flotan en la superficie durante la sedimentación primaria como lo son las grasas y aceites que son insolubles en agua residual también son suprimidas, esto gracias a que

parte de las mismas son sedimentadas con los lodos y la otra parte son tratadas con mecanismos desnatadores o desespumantes (Manahan, 2007).

Metcalf y Eddy (2004) indican que la sedimentación primaria es comúnmente conocida como sedimentación floculenta o de tipo II, esto es así debido a que las partículas que se encuentran muy diluidas en el agua residual durante la sedimentación suelen agruparse en grandes conjuntos, es decir floculan, hasta alcanzar la cantidad de masa necesaria para aumentar su velocidad de sedimentación.

Los tanques primarios de sedimentación se encargan de recibir las aguas residuales crudas; anteriormente la sedimentación primaria era utilizada como único método de tratamiento de aguas residuales domésticas, sin embargo, en la actualidad se ha visto desplazada y se utiliza como un tratamiento previo a los procesos biológicos; esto se debe a que una decantación primaria bien ejecutada en un tanque de sedimentación primaria correctamente dimensionado puede llegar a depurar únicamente entre un 50% a 70% de sólidos suspendidos y entre el 25% y 40% de la DBO_5 con tiempos de retención que varían entre 1,5 a 2,5 horas para un caudal medio; adicionalmente, los tanques de sedimentación diseñados para una menor depuración de sólidos suspendidos usados como tratamiento primario a otros tratamientos biológicos tienen un tiempo de retención entre 30 minutos a una hora (Metcalf y Eddy, 2004).

b) Flotación

Este proceso tiene por objetivo la separación entre los sólidos de densidad baja y otras partículas del agua residual, todo esto por medio de la introducción de burbujas de aire u otros gases en las aguas residuales; su procedimiento consiste en someter al líquido a presiones entre 2 y 4 atmósferas; una vez el agua se encuentre saturada se la somete a despresurización formando pequeñas burbujas que se desglosan del líquido separando los sólidos en suspensión o partículas líquidas por medio de burbujas de aire que producen su elevación a la superficie (Ramalho, 1996).

Además de la separación de los sólidos de baja densidad y partículas líquidas, la flotación también se puede aplicar para otros objetivos como el espesado de los lodos aplicados en tratamientos de lodos activos y de lodos floculados

obtenidos en tratamientos químicos; el uso de este tipo de procedimientos puede significar una gran ventaja en lo que respecta a la depuración de aguas residuales, ya que reflejan una mejora en la calidad de los efluentes conteniendo una menor cantidad de sólidos suspendidos en el resultado final de los tratamientos de aguas residuales (Ramalho, 1996).

c) Precipitación química

La precipitación química consiste en la aplicación de productos químicos con el objetivo de eliminar el fósforo y sólidos suspendidos del agua residual, alterando el estado físico de los mismos para mejorar su sedimentación y por consecuencia su depuración (Zacurama, 2019).

Entre los productos químicos que son utilizados para este tratamiento se encuentran: el sulfato de alúmina, cal, cloruro férrico y productos combinados como el sulfato de hierro y cal, cloruro férrico y cal y sulfato férrico y cal (Metcalf y Eddy, 1995), por esta razón dichos productos por lo general provocan reacción con otras sustancias que se encuentran presentes en el agua o se le agregan con el propósito de provocarlas.

La precipitación química llega a alcanzar buenos resultados en la depuración de material orgánico, llegando a ser capaz de eliminar los sólidos totales suspendidos hasta en un 80% y 90%, 40% y 70% de DBO_5, 30% a 60% de la DQO y entre 80 y 90% de microorganismos; estos resultados complementan muy bien la sedimentación simple, ya que esta no es capaz de obtener tan buenos resultados por sí sola (Metcalf y Eddy, 1995).

Aunque la precipitación química puede llegar a arrojar buenos resultados, existen limitaciones que se deben tomar en cuenta para su aplicación como lo es el incremento de los sólidos totales disueltos en el agua, hecho que se debe tener en cuenta si se desea reutilizar el agua residual tratada para otros fines como la agricultura (Metcalf y Eddy, 1995).

d) Coagulación, floculación, sedimentación y decantación

Este tratamiento se distingue en etapas, donde el proceso de coagulación se realiza por medio de productos coagulantes que se agregan al agua para perturbar la dispersión de las partículas disueltas, acelerando la sedimentación de los sólidos al aumentar su volumen; la floculación por su parte, tiene la función de separar los sólidos de baja densidad mediante un proceso de aire disuelto o aire cavitado para lograr la formación de burbujas de aire (Zarzosa y Aragoneses, 2020).

Una vez realizadas la floculación y flotación se procura efectuar la separación de aceites y grasas, los cuales son sustancias no disgregadas por la flotación y que no se mezclan con el agua; al realizar este procedimiento se deben tomar en cuenta ciertas condiciones como las características de los aceites y el caudal del agua (Zarzosa y Aragoneses, 2020).

Por último, se separa mediante sedimentación la materia descartable del agua residual, esta acción se efectúa por la reducción de la velocidad del agua formándose lodos en la parte baja del tanque sedimentador, mientras que los residuos sobrantes que se encuentren en suspensión serán filtrados y retirados en la superficie; este tipo de tratamiento puede tener resultados de hasta un 30% de decantación de DBO_5 (Zarzosa y Aragoneses, 2020).

3.3.1.3. Tratamiento secundario

Según Valles (2018) el tratamiento secundario se encarga de remover la materia orgánica que no se degradó en el tratamiento primario, involucrando procesos biológicos que aceleran la descomposición de la materia orgánica.

Ugalde (2018) determina que en los tratamientos secundarios usualmente se emplean tanques aerobios que proveen de aire a las aguas residuales eliminando la materia orgánica hasta en un 90%.

a) Lodos activados

Wiki (2007) detalla que los lodos activados forman parte de los dos procesos biológicos aerobios existentes para saneamiento de aguas servidas que han pasado previamente por un tratamiento primario en el que se eliminan los sólidos en suspensión más fáciles de sedimentar además de una pequeña parte de la

materia orgánica que contiene; los lodos activados procesan la materia orgánica que va a ser depurada utilizando microorganismos y agua residual como cultivo; estos microorganismos se encargan de degradar la materia orgánica del agua mediante oxidación biológica, es decir, los microorganismos se alimentan de la materia orgánica del agua residual para reproducirse con mayor rapidez produciendo, mientras tanto, flóculos que se agrupan y forman entre si los ya denominados fangos activados.

El proceso de lodos activados se divide en dos procedimientos: el primero es la oxidación biológica, en la cual, se mantiene al cultivo biológico constantemente en contacto con el agua por una determinada cantidad de tiempo de retención, produciendo como ya se mencionó, que los microorganismos presentes dentro del cultivo junto con otros nutrientes trasmuten la materia orgánica y se reproduzcan en un ambiente aerobio ya que el oxígeno es fundamental para que los microorganismos sobrevivan y se evite la sedimentación de los flóculos formados durante este procedimiento (Wiki, 2007).

Una vez producida la oxidación biológica se deriva la separación sólido líquido, en este proceso el agua residual tratada se deja en reposo hasta que se genere la sedimentación de los fangos floculados separándolos del agua depurada, la cual, es vertida en el cauce; por otro lado, cierto porcentaje de fangos son reutilizados en un nuevo tratamiento de oxidación para mantener la concentración de microorganismos nivelada, mientras que el resto de fangos son decantados y desechados del sistema (Wiki, 2007).

b) Filtros biológicos

Un filtro biológico o percolador tiene la función de minimizar la materia orgánica que se encuentra en el agua residual ya sea de origen doméstico o industrial, mediante un proceso que mantiene en contacto la biomasa, que se encuentra fija en un lecho, con el agua (Romero, 1999).

El filtro percolador está constituido por un medio permeable, el cual se lo conoce como lecho de filtro, normalmente fabricado con piedra de tamaños variables entre 2,5 y 10 cm, al que se sujetan los microorganismos y por el que el agua residual es percolada; usualmente, la forma del filtro es circular ya que permite distribuir rotatoriamente el agua por lo que la materia orgánica es descompuesta

debido a la biomasa ubicada en el lecho de filtro, tanto en la parte interior donde predominan las condiciones anaerobias, como en la exterior donde las condiciones aerobias son las que destacan; además posee en su base un sistema de drenaje encargado de conducir las aguas residuales tratadas y los sólidos suspendidos separados por el medio filtrante (Romero, 1999).

Los microorganismos que componen la comunidad biológica del filtro principalmente se basan en bacterias aerobias, anaerobias y facultativas, hongos y protozoos, aunque también se encuentran cierto tipo de larvas de insectos, gusanos y caracoles; dependiendo de las condiciones del filtro percolador es posible que determinados microorganismos predominen más que otros, por ejemplo, cuando el pH del agua se encuentra bajo, los hongos tienden a predominar mientras que en la superficie del filtro a causa de la luz solar las algas llegan a crecer a determinado ritmo causando posibles taponamientos y deteriorando la capacidad de infiltración del sistema (Romero, 1999).

Los Ciliata son el grupo de protozoos más utilizados en los filtros debido a su alta capacidad de control en la población bacteriana, por su parte, los gusanos, larvas y caracoles resultan efectivos para mantener a raya el espesor de la capa biológica, fomentar la actividad bacteriana y promover el crecimiento, ya que dichos especímenes se alimentan de los mismos (Romero, 1999).

c) Biodiscos

También conocidos como discos biológicos rotatorios (RBC) es un sistema de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales compuesta por una serie de discos de poca separación ubicados paralelamente, parcialmente sumergidos en las aguas servidas y cubiertos con microorganismos que absorben el material orgánico suspendido y disuelto presentes en las mismas (Nemerow y Dasgupta, 1998).

La operación de los discos rotativos es relativamente simple ya que al trasladar una capa de agua residual a la superficie mediante rotación brindan a la población microbiana el oxígeno suficiente para proliferar su desarrollo, ponen en contacto los fangos biológicos con las aguas residuales y ajustan la capacidad de aireación y de contacto mediante la variación de velocidad de rotación (Nemerow y Dasgupta, 1998).

Ferrer, Seco, y Robles (2018) describen el proceso que realizan los discos biológicos rotativos indicando que la biomasa empleada forma una capa alrededor del área sumergida, es decir el 40% de la superficie del disco, que entra en contacto con el agua residual y posteriormente absorbe el oxígeno presente en el aire una vez que se lleve a cabo la rotación, manteniendo la población microbiana en condiciones aerobias y suprimiendo el exceso de sólidos que se lleguen a formar.

A diferencia de los lechos bacterianos presentes en los filtros percoladores donde la estratificación de biomasa no es homogénea, con bacterias heterótrofas en las capas exteriores y autótrofas en las interiores, los biodiscos presentan una biomasa uniforme gracias a la rotación vertical del biodisco dentro de un solo tanque, sin embargo, el tiempo de sumersión de cada superficie es variable debido al reparto radial cuantitativo, provocando que las áreas próximas a la biomasa sean las más afectadas (Ferrer, Seco, y Robles, 2018).

Una gran concentración de microorganismos junto con una alta velocidad de aireación por el ajuste de su velocidad de rotación permite a los biodiscos representar una opción factible para el saneamiento de aguas residuales con altas concentraciones de material orgánico; esto debido a las múltiples ventajas que ofrece el uso de dicho tratamiento como lo son el bajo nivel de consumo de energía, mínimo requerimiento de personal especializado para su mantenimiento, gran capacidad de sedimentación de la biomasa que reduce significativamente el costo de un tratamiento complementario y el nulo reciclaje de la biomasa (Lazcano, 2016).

d) Reactores UASB

Según López, Méndez, García, y Cervantes (2017) el sistema de lecho de lodos de flujo ascendente o UASB es un tratamiento anaerobio de aguas residuales que consiste en un reactor circular o rectangular en el que el agua residual ingresa por la parte inferior con dirección ascendente atravesando un lecho de lodos activados anaerobios, mismo que ocupa aproximadamente la mitad del tanque, y durante este proceso los sólidos se retienen en el lecho mientras que la materia orgánica al degradarse libera gases (metano y dióxido de carbono) que se elevan hasta la parte superior del reactor llevando consigo partículas sólidas; al entrar en contacto con los deflectores del tanque los sólidos caen en el manto de lodos y el gas se dirige hacia el cono invertido del tanque ubicado

en la parte más alta, mientras que el agua es evacuada hacia una cámara de sedimentación para decantar los sólidos que todavía contenga y una vez que culmina la sedimentación los sólidos son conducidos a la superficie del lecho de lodos y el agua residual tratada es vaciada por los vertedores.

3.3.1.4. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario es mayormente empleado para mejorar la calidad del efluente del tratamiento secundario, sobre todo en casos donde el agua es reutilizada para el riego de cultivos, con fines recreativos o como agua potable; este tipo de tratamientos son efectivos para la eliminación de helmintos y protozoos ya que los tratamientos terciarios más comunes involucran el proceso de filtración llegando a eliminar más del 99% de helmintos y entre un 95% a 99% de protozoos en las aguas residuales tratadas (López, Méndez, García, y Cervantes, 2017).

Según Ramalho (1996) entre los métodos más comunes para tratamiento terciario de aguas residuales tenemos:

a) Eliminación de sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos que no fueron depurados en el tratamiento secundario son suprimidos mediante microtamizado, filtración o coagulación; para el microtamizado se utiliza tambores rotativos donde el flujo de agua es continúo eliminando entre un 70% y 90% de los sólidos suspendidos; por otro lado la filtración consiste en fabricar filtros hechos de materiales como arena, antracita y tierra de diatomeas, este método en particular es el más práctico ya que llega a eliminar hasta un 99% de sólidos en suspensión; finalmente la coagulación se realiza mediante el uso de reactivos químicos como el sulfato de alúmina, poliectrolitos, cal, etc. (Ramalho, 1996).

b) Adsorción en carbón activo

Este método es empleado en plantas de tratamiento de aguas residuales como una forma de eliminar olores indeseados y consiste en una operación continua de columnas que contienen carbón granulado por donde el agua residual pasa adsorbiendo gradualmente los contaminantes y eliminando partículas residuales en el agua (Ramalho, 1996).

c) Cloración y ozonización

La cloración es un proceso muy conocido para el tratamiento terciario de aguas residuales domésticas; consiste en el uso del cloro, el cual es un desinfectante capaz de eliminar o disminuir considerablemente el crecimiento bacteriano y algas, reducir la DBO_5 mediante la oxidación de compuestos orgánicos e inhibir casi por completo los malos olores de las aguas residuales (Ramalho, 1996).

Al igual que el cloro, el ozono funciona muy bien en la depuración de aguas residuales ya que tiene propiedades similares como la oxidación de materia orgánica presente en el agua, sin embargo, tiene otras ventajas como la reducción de espuma en el agua residual una vez tratada y el hecho de que una vez terminado el tratamiento terciario el ozono que se encuentre en el afluente se convierte en oxígeno, cosa que no es posible con el cloro ya que este permanece en el agua convirtiéndose en contaminante (Ramalho, 1996).

3.4. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Según Mara (2004) los países en vías de desarrollo como el nuestro requieren de métodos sustentables para la depuración de aguas residuales, ya que varias industrias como la agrícola demandan grandes cantidades agua para sus actividades comerciales, sin embargo, este recurso es cada vez más escaso, por lo que el uso de las aguas residuales depuradas representa una solución ideal a dicha problemática.

Dentro de las opciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas en países en desarrollo se encuentran las lagunas de estabilización debido a que cumplen con los requisitos que deben incluirse dentro de un tratamiento sostenible como son: el bajo costo de su construcción, simplicidad de funcionamiento y bajo consumo de energía y poco o nulo uso de productos químicos; generalmente los países en vías de desarrollo disponen de un clima cálido y vastos terrenos apropiados para implementar las lagunas de estabilización puesto que son particularidades necesarias para que se cumplan los procesos anaerobios y fotosintéticos (Mara, 2004).

Menéndez y Pérez (2007) indican que las lagunas de estabilización son comúnmente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales que llegan a contener compuestos orgánicos biodegradables; a pesar de tener una estructura

simple, puesto que se instalan en grandes superficies de tierra al aire libre, las lagunas de estabilización son las menos reguladas de todos los sistemas de depuración con respecto a su diseño, ya que al encontrarse en un entorno expuesto dependen de muchos factores que influyen en su resultado final de depuración.

Según Ferrer, Seco, y Robles (2018) las lagunas de estabilización cumplen con cuatro principales características:

- Tiempo de retención superior a otros métodos que soportan variaciones abruptas de la carga orgánica o hidráulica en el afluente.
- La sedimentación primaria y la decantación de la materia orgánica se realizan al mismo tiempo, ya que en un sistema de lagunas que incluyen lagunas anaerobias y facultativas la primera se encarga de sedimentar los sólidos de mayor tamaño y la segunda de depurar la materia orgánica.
- La degradación del material orgánico ya sea por medios aerobios o anaerobios.
- No se necesitan procedimientos mecánicos o que incluyan mantenimiento regular para preservar las condiciones aerobias, lo que traería consigo el bajo mantenimiento del sistema y poco consumo de energía eléctrica.

Mara (2004) indica que este sistema de tratamiento de aguas residuales normalmente se clasifica en tres tipos: lagunas anaerobias, facultativas y de maduración

3.4.1. Factores que influyen en el proceso depurativo

Dentro del proceso de depuración de las lagunas de estabilización existen múltiples operaciones físicas y procesos químicos y biológicos involucrados entre sí de manera compleja; una parte fundamental de estos procesos son los aerobios y anaerobios, procesos en los que múltiples microorganismos realizan actividades simbióticas con el fin de degradar la materia orgánica; en el caso de los procesos anaerobios, microorganismos como las bacterias son los que actúan sin necesidad de la presencia de oxígeno, mientras que los procesos aerobios utilizan el oxígeno generado por las algas producto de la acción

fotosintética para la degradación de la materia por medio del desarrollo bacteriano (Ferrer, Seco, y Robles, 2018).

Muchos factores son los que influyen en el funcionamiento de las lagunas, ya que los microorganismos involucrados no actúan de la misma manera en determinadas horas del día y bajo condiciones diferentes (Ferrer, Seco, y Robles, 2018). Entre los factores más importantes para el funcionamiento de las lagunas de estabilización se encuentran:

Viento

Proporciona condiciones aerobias favorables para las lagunas, especialmente las que poseen una extensa superficie; el viento es un factor fundamental para la mezcla de componentes que se hallan dentro de la laguna, puesto que facilita la distribución uniforme de oxígeno, temperatura y especímenes como las algas; además, mejora la capacidad de transferir y distribuir oxígeno a las aguas residuales en caso de que la fotosíntesis de las algas no proporcione el oxígeno suficiente para realizar la depuración (Lazcano, 2016).

Al realizar el diseño de una laguna de estabilización, el viento forma parte de las consideraciones que se toman al efectuar el dimensionamiento de la misma; como ya se estableció, el viento facilita la mezcla de componentes, por lo que, para obtener condiciones que mejoren esta acción es necesario tener en cuenta ciertas medidas como: una superficie de grandes proporciones para mejorar el abastecimiento de oxígeno en la mezcla, suministrar un espacio libre de obstáculos de 100 y 200 m para mejorar la acción del viento y que la dimensión de mayor magnitud sea posicionada en la misma dirección en que el viento circula (Lazcano, 2016).

Con el fin de evitar incomodidades en la población debido a los malos olores que desprenden las lagunas, se evita que sean construidas en lugares donde el viento avance en dirección a zonas pobladas, generalmente se suele prevenir estas situaciones ubicando las lagunas por lo menos a medio kilómetro de distancia de cualquier comunidad (Lazcano, 2016).

Oxígeno disuelto

Gracias a la estrecha relación entre la actividad fotosintética y la producción de oxígeno disuelto, las concentraciones de OD en una laguna es diferente en determinadas horas del día: durante los horarios diurnos es posible encontrar concentraciones sobresaturadas de oxígeno disuelto que pueden llegar hasta una magnitud de 36 mg/L, mientras que por la noche las concentraciones de OD disminuyen considerablemente debido a la ausencia de la luz solar que afecta directamente la actividad fotosintética, por ello es importante tomar en cuenta el tiempo en el que se realizan los muestreos de una laguna para considerar la variación de oxígeno disuelto (Romero, 2005).

pH

Al igual que el oxígeno disuelto el pH está estrechamente relacionado con la actividad fotosintética, puesto que el gran consumo de CO_2 y la producción de ion OH^- por parte de las algas provoca que el pH presente valores altos en lagunas tanto facultativas como aerobias durante periodos diurnos. Un valor alto de pH puede afectar significativamente la actividad bacteriana, disminuyendo la producción de CO_2 y limitando la simbiosis del proceso (Romero, 2005).

En el caso de las lagunas anaerobias el equilibrio del pH es muy importante para bacterias productoras de ácidos y metano, ya que el valor de este siempre debe ser superior a 6; esto se debe a la sensibilidad de las bacterias metanogénicas ante condiciones ácidas del medio; por lo tanto, preservar una población saludable de bacterias es indispensable y se debe procurar mantener las condiciones necesarias para su desarrollo (Ferrer, Seco, y Robles, 2018).

Radiación solar

La radiación solar es la cantidad de radiación proveniente de la luz solar ya sea directa o indirectamente captada por una superficie al día, su unidad se expresa en langleys/d o calorías por centímetro cuadrado por día (cal/cm^2d); la influencia de la radiación solar es fundamental en las lagunas de estabilización debido a que se relaciona directamente con el proceso de la fotosíntesis efectuada por las algas, y por consecuencia se ve involucrada en la degradación de

microorganismos patógenos, en propiedades físicas como el color de la laguna y la temperatura de la misma (Romero , 2005).

Según Menéndez y Pérez (2007) los países tropicales como Ecuador poseen condiciones óptimas con relación a la radiación solar para el correcto funcionamiento de lagunas aerobias y facultativas y coinciden en que la radiación solar mínima requerida por el agua para que se efectúe una correcta depuración es de 4 a 9 langleys/d por cada g DBQ aplicado/m^2; mientras que los meses con menor radiación en países de climas tropicales sobrepasan por mucho estos valores; a pesar de la cantidad de radiación que recibe el agua, no se llega a utilizar toda la energía ya que las algas tienden a saturarse cuando llegan a determinada intensidad de luz, por lo que el resto de energía únicamente regula la temperatura de la laguna.

Las condiciones del medio no siempre se mantienen de la misma forma conforme pasan las horas, ya que, dependiendo del horario y la época del año, el desarrollo de las algas será variado; en consecuencia, se producen cambios en los valores de oxígeno disuelto y pH del agua que ya se explicaron anteriormente (Menéndez y Pérez, 2007).

Temperatura

Según Romero (2005), la temperatura es uno de los factores más importantes para el funcionamiento de las lagunas de estabilización, ya que incide en procesos fundamentales para la depuración de las aguas residuales como la actividad bacteriana, la cual, aumenta a medida que lo hace la temperatura hasta alcanzar su punto óptimo (35°C a 38°C), en el que se desarrolla la tasa de actividad biológica cumbre, para luego disminuir su actividad a temperaturas mayores; también tiene su efecto en la mortalidad de microorganismos patógenos y coliformes presentes en el agua que incrementa proporcionalmente al aumento de la temperatura.

Por su parte, Lazcano (2016) indica que la temperatura tiene especial relevancia en la fotosíntesis que realizan las algas ya que muchas de ellas tienen una producción óptima de oxígeno al llegar a intervalos de temperatura entre los 20°C a 25°C y disminuye a magnitudes superiores a 35°C, tal y como ocurre con la actividad bacteriana; algunas agrupaciones de algas tienen diferentes

tolerancias de temperatura, siendo las algas verdes las que mejor se adaptan a las variaciones; las diatomeas, por otro lado, requieren menor temperatura para llegar a su punto crítico, mientras que con las cianobacterias se requiere de valores mayores.

Para determinar los modelos de diseño de las lagunas se toma en cuenta la variación de la temperatura del agua de las lagunas con respecto a la temperatura ambiental (2 a 3°C), siendo superior en épocas de invierno e inferior en el verano (Lazcano, 2016).

Mezcla

Según Mendoça (2000) la homogeneidad de la mezcla es fundamental para la distribución de las aguas residuales, ya que mientras más uniforme sea la mezcla el uso eficiente del volumen de la laguna proyectada será mayor y por lo tanto no se tendrían desviaciones con la cantidad de tiempo de retención para la depuración, evitando corrientes preferenciales donde las aguas no tengan ninguna acción; para evitar inconvenientes en la operación de las lagunas facultativas se considera la implementación de cortinas o mamparas plásticas, las cuales mejoran la dirección del flujo del agua y previenen futuras estratificaciones.

Nutrientes

La presencia de nutrientes es indispensable para el crecimiento y desarrollo de las bacterias y algas; elementos como el carbono nitrógeno y fósforo son algunos de los más importantes para el mantenimiento de la población de bacterias y algas, siendo así que la relación carbono/nitrógeno/fósforo común del agua residual doméstica sea de 11,4:3,7:1 mientras que, para el desarrollo poblacional de las algas, dicha relación sea 106:15:1; en el caso de bacterias aerobias la relación cambia por una razón de DBO_5/ nitrógeno/ fósforo cercano a 100:5:1 (Mendoça, 2000).

3.4.2. Tipos de lagunas de estabilización

3.4.2.1. Lagunas anaerobias

Estas lagunas que tienen una profundidad de entre 2 y 5 metros, suelen ser las que reciben directamente las aguas residuales cuando son ubicadas en serie y por lo tanto son las que más carga orgánica reciben; su funcionamiento consiste en la sedimentación de sólidos suspendidos de mayor densidad y eliminación en forma de lodos de los residuos flotantes como la espuma, grasas y aceites. Por lo general, las lagunas anaerobias cumplen una función similar a la de un tanque séptico eliminando gran parte de la DBO_5 hasta en un 60% (Mara, 2004).

Según Mara (2004) una de sus ventajas que trae consigo el uso de estas lagunas es la de su tiempo de retención, ya que es muy corto en comparación a las demás lagunas, además de conseguir una depuración óptima en superficies reducidas y temperaturas aproximadas a 20 °C, las cuales son fácilmente alcanzadas en entornos tropicales como Ecuador; estas lagunas asimismo se emplean para recibir aguas residuales que se generan por la actividad industrial (>1.000 mg/L) porque logran degradar metales pesados y otros elementos tóxicos antes de que el agua residual pase a las lagunas facultativas; otra de sus ventajas es la de requerir poco mantenimiento puesto que sólo se necesita en un período de uno a tres años debido a la acumulación de sólidos en su base; la ubicación de estas lagunas debe realizarse en lugares apartados, esto a causa de la liberación de olores desagradables para el ser humano producidos por la reducción anaeróbica del sulfato.

Según Mendoça (2000) las lagunas anaerobias realizan un proceso de licuefacción y gasificación con el fin de degradar la materia orgánica que se acumula en su base; la licuefacción se compone de la transformación de carbohidratos, proteínas y gases por parte de las bacterias facultativas o acidogénicas mediante hidrólisis en ácidos grasos que se elevan a la superficie de la laguna; una vez terminada la fase de licuefacción tiene la parte de la gasificación donde las bacterias anaerobias o metanogénicas transforman en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) el carbono orgánico (C) reduciendo el valor de la DBO_5.

Con el fin de lograr un rendimiento óptimo en la remoción de DBO_5 en el proceso anaerobio de las lagunas se deben cumplir con ciertas condiciones mínimas como la ausencia de oxígeno disuelto en la parte inferior y las temperaturas mayores a 15 ºC (Mendoça, 2000).

Se requiere que las bacterias utilizadas en los procesos anaerobios cumplan la función de convertir los sulfatos presentes en las aguas residuales a sulfitos mediante reacción catabólica, esto reduce significativamente el grupo de bacterias disponibles dónde el tipo de más usado es el *Desulfovibrio spp*, la cual es el que mejores resultados ofrece. Sin embargo, es necesario proporcionar condiciones favorables para su crecimiento como la limitación de la concentración de oxígeno (≤ 0,16 mg/l) y temperaturas determinadas (>15ºC) (Mendoça, 2000).

El diseño de lagunas anaerobias se realiza en función de tres componentes: la carga orgánica superficial, el período de retención y la carga orgánica volumétrica. Comúnmente, se utilizan factores de diseño preestablecidos que se adaptan a las condiciones climáticas y porcentajes de remoción de DBO_5 objetivos para determinados proyectos con el fin de facilitar el trabajo del ingeniero obteniendo buenos resultados (Crites y Tchobanoglous, 2000).

3.4.2.1.1. Estimación de la calidad del efluente de lagunas anaerobias.

Romero (2005) recomienda el modelo de Vincent como un método empírico, asumiendo condiciones óptimas a una temperatura de 22ºC, para determinar el DBO_5 del efluente de la laguna de estabilización expresado en mg/L:

$$C_1 = \frac{C_o}{\left(\frac{C_1}{C_0}\right)^n K_b t + 1} \qquad (1.\ 1)$$

Donde C_1 es el DBO_5 del efluente (mg/L), C_o es el DBO_5 del afluente, K_b es el coeficiente de remoción de DBO_5 (K_b) (6 días^{-1}), t es el tiempo de retención expresado en días y n es el exponente de valor 4,8 (determinado por ensayo) (Romero, 2005).

3.4.2.1.2. Tiempo de detención

Arceivala (1981) citado por Mendoça (2000) determinó que el período de retención ideal, obtenido por experimentación en lagunas de la India, para el tratamiento de aguas residuales domésticas debe ser entre 2 a 5 días con temperaturas que van de 25ºC a 30ºC dando como resultado una remoción de DBO_5 entre el 60% y el 70 %.

Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán (2004) presentan en la tabla 1 los tiempos de detención en días para el diseño de lagunas anaerobias recomendados por múltiples autores.

Tabla 1. Tiempos de retención para el diseño de lagunas anaerobias recomendados (Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán, 2004, pág. 278).

Autor	Tiempo de diseño (días)
Eckenfelder (1970)	5-50
Mara (1976)	5
Parker y cols. (1959)	2-5
Malina y Rios (1976)	2-5

Para determinar el tiempo de retención y el área superficial de una laguna anaerobia se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{V_a}{Q_{med}} \tag{1. 2}$$

$$A = \frac{Q_{med} t}{h} \tag{1. 3}$$

Donde A es la superficie de la laguna expresada en m^2 y h es la profundidad útil de la laguna (de 3 a 5m).

3.4.2.2. Lagunas facultativas

Este tipo de lagunas se compone de tres secciones, la primera ubicada en la superficie donde se contienen las algas y bacterias aeróbicas, una segunda zona donde las bacterias facultativas se encargan de degradar la materia orgánica en ácidos, alcoholes y otras sustancias, y en su zona más profunda se encuentra la zona anaeróbica donde se hallan los microorganismos anaeróbicos que resultan en la producción de metano y otros gases (Lazcano, 2016).

Normalmente podemos encontrar dos tipos de lagunas facultativas, aquellas que reciben directamente las aguas crudas y las que reciben afluentes de otras lagunas, es decir, que se encuentran dentro de un sistema de lagunas que trabajan en serie; en estos casos, la materia sedimentada proveniente de los desagües crudos que llegan directamente a las lagunas facultativas logra tener un volumen considerable en comparación a las aguas residuales que llegan a las lagunas que trabajan en serie, esto debido a que la carga de material orgánico sedimentable disminuye considerablemente al ser previamente tratada en otra laguna, generalmente anaerobia, teniendo como resultado una menor cantidad de sólidos sedimentados (Lazcano, 2016).

Las lagunas facultativas dentro de un sistema en serie están diseñadas para fomentar la colaboración entre organismos biológicos heterogéneos como las algas y bacterias, ya que estas se complementan por asociación sinérgica y permiten el crecimiento de otros organismos qué ayudan a mantener funcional la depuración de aguas residuales como lo son los cladóceros, rotíferos, peces y microalgas que provocan que el color del efluente de una laguna facultativa llegue a tener una tonalidad verde (Lazcano, 2016).

La oxigenación de la laguna facultativa se presenta, al igual que las lagunas aerobias, por acción fotosintética de algas en su interior; debido a la supresión de nutrientes como nitrógeno y fósforo estas lagunas deben encontrarse en zonas remotas para evitar problemas de malos olores y deben contar con grandes superficies para su ubicación; la temperatura y la profundidad son factores importantes, ya que una laguna poco profunda puede tener resultados negativos, en especial durante temporadas donde el clima de lugar es cálido y seco o cuando se tienen cantidades de sólidos sedimentables elevadas (Jiménez, 2005).

Aunque el rango de profundidad aceptable para una laguna facultativa va de 1 a 1,8 m, la profundidad más común para el diseño es 1,5 m; se toma esta consideración tomando en cuenta que si las profundidades son menores a 1 la vegetación crecería y fomentaría el desarrollo de mosquitos y otros insectos, si por el contrario las profundidades superaran los 1,8 m las condiciones de la laguna serían en su mayoría anaerobias, disminuyendo la eficiencia de la laguna frente a una carga contaminante fuerte (Mara, 2004).

Como ya se dijo previamente la biomasa concentrada de microalgas en lagunas facultativas es alta, siendo las especies más comunes aquellas que poseen de 1.000 a 3.000 µg de clorofila por litro y fácil movilidad que proveen a la laguna de un color verde oscuro; la cuantía de algas se encuentra dentro de los 40 a 30 mg/l produciendo una remoción de DBO_5 entre 60 y 90% en lagunas facultativas, mientras que la digestión anaerobia y la producción de metano y dióxido de carbono logran una remoción de hasta el 30% (Mendoça, 2000).

Además, Crites y Tchobanoglous (2000) revela cuatro diferentes clases de algas comunes presentes en las lagunas las cuales son: el grupo *Chlorella* (algas verdes), *Euglena* (algas verdes móviles) que sirve como indicador de la sobrecarga orgánica de la laguna, *Diatómicas* (algas amarillo-verdosas), *Anabaena, Anacystis y Oscillatoria* (algas azul-verdosas), las cuales presentan problemas de sedimentación cuando estas especies predominan en la laguna.

3.4.2.2.1. Diseño de lagunas facultativas

a) Método de Gloyna

En 1976 Gloyna citado por Crites, Middlebrooks, y Reed (2010) desarrolló la ecuación por método empírico para determinar el volumen de una laguna facultativa:

$$V = 3{,}5x10^{-5} Q_{med} C_0 \left[\theta^{(35-T)}\right] f f' \qquad (1.\ 4)$$

V es el volumen de la laguna (m^3), Θ es el coeficiente de corrección de temperatura (1,085), *f* es el factor de toxicidad de algas (para residual domésticas e industriales se asimila un valor de 1) y *f'* es la demanda de oxígeno por sulfuro

(un valor de 1 para concentraciones de iones equivalentes a sulfato inferior menores que 500 mg/l; la temperatura adoptada para el diseño es la temperatura media de la laguna el mes más frío (Crites, Middlebrooks, y Reed, 2010).

b) Método en función de la carga superficial

Mara (2004) indica que los diseños que se realizan en función de la carga superficial de DBO_5, son los que mejores resultados arrojan, por lo que proporciona una ecuación para definirla en función de la temperatura considerando un factor de seguridad para el diseño:

$$\lambda_s = 350(1{,}107 - 03002T)^{T-25} \qquad (1.\ 5)$$

λ_s es la carga superficial expresada en $kgDBO_5/ha*día$ y T es la temperatura expresada en °C

Mendoça (2000) por su parte recomienda la ecuación presentada por McGarry y Pescod (1970) para determinar la carga superficial máxima permitida aplicable a lagunas facultativas antes de que comience a trabajar como un proceso anaerobio.

$$\lambda_s = 60(1{,}099)^T \qquad (1.\ 6)$$

Cabe recalcar que esta ecuación no es aplicable en el diseño porque no toma en cuenta ciertos factores de seguridad, únicamente se utiliza como referencia.

Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán (2004) recomiendan valores de carga orgánica obtenidos una base de datos experimental en base a la cantidad de habitantes por superficie y las condiciones climáticas del sitio como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Carga superficial recomendada en función de la densidad poblacional y condiciones ambientales (Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán, 2004, pág. 281)

Carga superficial (kg DBO_5/ha*día)	**N° Habitantes por hectárea**	**Tiempo de retención hidráulica (días)**	**Condiciones climáticas**
< 10	< 200	> 200	Zonas frías
10-50	200-1.000	200-100	Climas estacionales (hielo en invierno, templado en verano)
50-150	1.000-3.000	100-33	Clima entre templado y semi-tropical
150-300	3.000-7.000	33-17	Clima cálido o tropical

c) Período de retención

Para una laguna facultativa el tiempo de retención mínima es diferente para cada autor. Arceivala (1973), Silva (1982) y Broome (1986), citados por Mendoça (2000), afirman que el período de retención mínimo de diseño para lagunas facultativas es de 7 días, 6 días y 5 días respectivamente, mientras que el límite de tiempo puede ser de hasta 110 días.

Mara (2004) muestra como determinar el área de la laguna facultativa en función de la carga superficial obtenida por las ecuaciones 1.6 y 1.7 y el tiempo de retención obtenido de la ecuación 1.8:

$$\lambda_s = \frac{CoQ_{med}}{A_f} \quad (1.\ 7)$$

$$t = \frac{A_f D}{Q_{med}} \quad (1.\ 8)$$

A_f es el área de la laguna facultativa (m^2) y D es la profundidad de la laguna (en su mayoría se usa 1,5 m)

3.4.2.3. Lagunas aerobias o de maduración

El uso de estas lagunas se realiza en casos en los que los compuestos biodegradables que se encuentren presentes en el agua, suspendidos o disueltos, puedan ser degradados por bacterias o microorganismos aerobios; son capaces de admitir cargas altas de DBO_5, por lo que son convenientes para aguas residuales domésticas y ciertos tipos de aguas residuales industriales que produzcan de 0,5 a 0,6 kg de biomasa por kilogramo de DBO_5 removido; sin embargo, su desventaja radica en la gran cantidad de área necesaria para su ubicación puesto que tienen una profundidad reducida, lo que limita enormemente su aplicación (Menéndez y Pérez, 2007).

Por lo general, su profundidad debe encontrarse entre 0,8 y 1,2 metros para que la luz solar penetre a través del agua del estanque y llegue hasta las algas ubicadas en su base, las cuales producen parte del oxígeno disuelto utilizado en el metabolismo de las bacterias aerobias; mientras que el porcentaje restante del oxígeno disuelto proviene de la cantidad de oxígeno presente en el aire que se transfiere a la superficie del agua (Jiménez, 2005).

Por su parte, Mara (2004) recomienda que la profundidad de la laguna no exceda de 1m, ya que a menor profundidad la luz solar penetra fácilmente y elimina las bacterias fecales y los virus eficientemente; mientras que las profundidades excedentes de 1 m (con excepción de las lagunas revestidas) manifiestan tendencia al crecimiento de plantas que echan raíces desde la base de la laguna lo que conlleva a un ambiente ideal para la reproducción de mosquitos.

Las lagunas de maduración muestran ciertas diferencias en comparación con las lagunas facultativas, un ejemplo de ello es la diversidad de las algas, ya que posee una gran cantidad de géneros, sin embargo, su biomasa y estratificación son menores debido a sus condiciones aeróbicas que los hacen tener menor volumen (Mara, 2004).

Estas lagunas también se denominan con el término de lagunas de alta tasa, la razón de ello se debe a la velocidad con la que se produce la acción fotosintética que generan las algas produciendo oxígeno permitiendo a los organismos bacterianos degradar la materia orgánica por medio de una descomposición aerobia (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Crites y Tchobanoglous (2000) muestran que el tiempo de retención de las lagunas aerobias por lo general no suelen exceder los cinco días y se obtienen mejores resultados cuando son combinadas con otras lagunas en regiones con climas calurosos. Mientras que Mara (2004) revela que para una laguna de maduración en serie el tiempo de retención es de cinco días o más y en el caso de ser dos o más lagunas este periodo se encuentra entre los tres a diez días.

3.4.2.4. Degradación de organismos patógenos

Crites y Tchobanoglous (2000) indican que un sistema compuesto de varias lagunas con periodos de retención de valores altos obtiene buenos resultados en la remoción de bacterias, parásitos y virus, ya sea por muerte natural, sedimentación o absorción la remoción de un gran porcentaje de estos organismos, lo que suele darse en lagunas anaerobias y facultativas del sistema.

Según Fair, Geyer, y Okun (1990) mediante pruebas empíricas se determinó que un sistema en serie de lagunas correctamente diseñadas puede llegar a eliminar hasta un 99% de bacterias fecales en un período de 50 días y que los quistes de la disentería amebiana y huevos de diferentes parásitos se remueven casi en su totalidad, sin embargo los virus poseen un comportamiento muy diferente, puesto que depende de factores como los largos tiempos de retención que provocan su muerte natural, la exposición a la radiación solar que aumenta la temperatura del agua y la capacidad de absorción de la superficie.

Hernández (2015) indica que las lagunas de maduración también se utilizan como un sistema de desinfección de aguas residuales y tienen la función de reducir la población de bacterias, virus y otros patógenos; entre los resultados del uso de estas lagunas para la remoción de patógenos se encuentran: la

eliminación de coliformes y estreptococos fecales de hasta un 99%, degradación de la salmonella typhi entre el 99% y 99,5% y la eliminación de enterovirus.

Sastry y Monhanrao (1976) citados por Hernández (2015) detectaron que las lagunas de maduración muestran resultados positivos en la depuración de la bacteria salmonella, quistes de protozoos, huevos de helmintos y hasta el 90% de especies de virus mediante pruebas realizadas en lagunas de la India.

La OMS (1989), entre las directrices sobre la calidad del agua residual tratada para su aprovechamiento en la agricultura, determinó que para el riego de cultivos que se consumen crudos, riego de cereales industriales y forrajeros, campos de deportes y atracciones públicas la calidad microbiológica del agua debe tener una media aritmética del número de huevos de nematodos intestinales por litro ≤1, mientras que la media geométrica del número de coliformes fecales por 100 ml para el riego de cultivos que se consumen crudos, campo deporte y parques de uso público debe ser ≤ 1.000 ml.

3.5. PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.

Según Mendoça (2000), reactor es toda aquella unidad de almacenamiento de agua que es utilizado para tratamiento de aguas servidas, ya sea tanques o lagunas; la forma de un reactor es la que define la condición de la mezcla y a su vez la forma en que el caudal tiene su flujo; la trayectoria del caudal llega a influir en las condiciones de mezcla y el tiempo de retención para el tratamiento de aguas residuales.

Lo más importante al momento de predecir la calidad del efluente es definir el tipo de mezcla que tenga el reactor o en este caso lagunas de estabilización, ya que, estos dependen de factores como la naturaleza del agua residual a tratar, las condiciones ambientales en las que se encuentran, la geometría de la laguna y los principios cinéticos que tenga dicho tratamiento como la velocidad de entrada y salida del caudal (Metcalf y Eddy, 1995).

Los reactores más populares para procesos depurativos son los que actúan como caudal continuo y se clasifican en: reactor de flujo pistón, reactor de mezcla

completa y reactor de flujo disperso (Mendoça, 2000); en el caso de la laguna anaerobia, debido a su geometría normalmente se la considera como un reactor de mezcla completa, la laguna facultativa se la valora como un reactor tipo pistón por su forma, mientras que la laguna de maduración debido a sus condiciones ambientales y de forma se la estima regularmente como un reactor de flujo disperso.

3.5.1. Reactor de flujo pistón

Este reactor de flujo continuo no posee ningún tipo de dispersión ni mezcla. Es conocido como ideal pues el fluido pasa por el reactor del mismo modo en el que entró, sin tener ninguna alteración en la velocidad, cambios en sus partículas y con el mismo tiempo teórico de retención de la laguna (Romero, 1999).

Con el fin de mantener una dispersión casi nula la forma del reactor debe tener una forma alargada, es decir, la relación longitud / ancho debe ser de un valor alto para que se origine el flujo en pistón (Romero, 1999).

Esta afirmación se ve reflejada en el siguiente esquema de la Figura 9

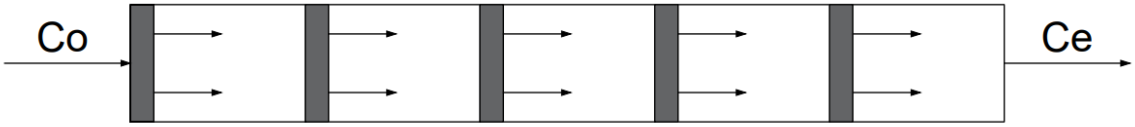


Figura 9. Esquema de reactor de flujo pistón (Romero, 1999, pág. 267).

Mendoça (2000) señala la ecuación de primer orden como método para obtener la cantidad de material orgánico, presente en las aguas residuales que pasa por el reactor, reducido por actividades bioquímicas.

$$C_e = C_0 e^{K_b t} \quad (1.\ 9)$$

$$C_e = C_0 e^{K_T t} \quad (1.\ 10)$$

Donde

C_e= DBO_5 del efluente (mg/l)

C_o= DBO_5 del afluente (mg/l)

K_T= coeficiente de remoción de DBO_5 (d^{-1})

Kb=coeficiente de remoción de coliformes fecales (d^{-1})

Según Crites y Tchobanoglous (2000) el K_T para un flujo pistón ideal es determinado por la ecuación 1.11, en la que Θ=1,04.

$$K_T = K_{20}\Theta^{(T-20)} \quad (1.\ 11)$$

3.5.2. Mezcla completa

Un reactor de mezcla completa es aquel que mezcla el fluido instantáneamente y de forma constante apenas ingrese en el reactor de modo que los elementos contenidos en él formen una composición homogénea en cualquier posición en la que se encuentren, es por esto que la concentración del recipiente y el efluente son considerados iguales (Mendoça, 2000). El esquema de este tipo de reactor se lo encuentra en la figura 10.

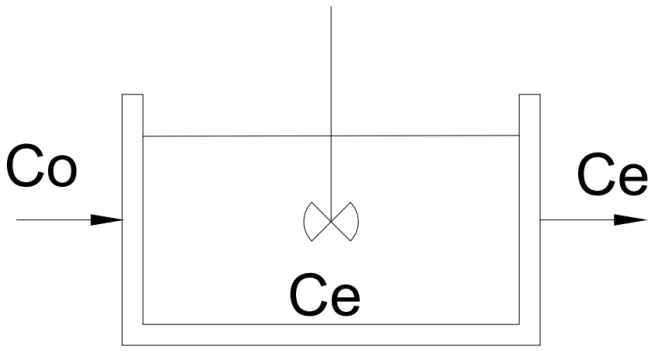


Figura 10. Esquema de reactor de mezcla completa (Romero, 1999, pág. 263).

Romero (1999) señala la ecuación 1.12 como el método de diseño para determinar la remoción de materia orgánica en un reactor con mezcla completa. Además, indica que, aunque en teoría un reactor de mezcla completa es el ideal

para el tratamiento de aguas residuales por sus condiciones de dispersión, estos en la práctica no existen y únicamente se logra una aproximación que cumpla con dichas condiciones.

$$C_e = \frac{C_o}{1 + K_b\theta} \quad (1.\ 12)$$

$$C_e = \frac{C_o}{1 + K_T\theta} \quad (1.\ 13)$$

3.5.3. Flujo disperso

Según Metcalf y Eddy (1995) es una combinación entre mezcla completa y flujo pistón, siendo ambos sus límites. Mendoça (2000) utiliza la ecuación Wehner-Wilhelm simplificada (1.14) para determinar la calidad del efluente de las lagunas de estabilización siempre y cuando el factor de dispersión sea menor que 2.

$$C_e = C_o * \left(\frac{4 * ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2}\right) \quad (1.\ 14)$$

Siendo d el coeficiente de dispersión adimensional y $a = \sqrt{1 + 4K_b td}$;

$a = \sqrt{1 + 4K_t td}$

La norma INEN (1992) recomienda factores de dispersión dependiendo de la relación largo/ancho expresados en la tabla 3.

Tabla 3. Factores de dispersión recomendado por la norma (INEN, 1992, pág. 241)

Relación largo/ancho	Factor de dispersión d
1	1
2	0,5
4	0,25
8	0,12

3.5.4. Estimación de la constante de reacción de primer orden para remoción de DBO_5 y coliformes fecales

Según Romero (1999) la constante K para la remoción de DBO_5 (K_T) depende principalmende de la temperatura siendo la ecuación de Marais (1974) la más utilizada para determinarla.

$$K_T = 1{,}2(1{,}085)^{T-20} \quad (1.\ 15)$$

Mendoça (2000) señala que existen múltiples ecuaciones empíricas que toman en cuenta diferentes parámetros como el tiempo de retención, la biomasa y la intensidad de la luz ultravioleta para determinar el coeficiente de velocidad de remoción de coliformes fecales (K_b) y recomienda la ecuación desarrollada por Yánez (1993) como el método que mejor se adapta a las condiciones reales de las lagunas de estabilización.

Por otro lado, Mara (2004) hace especial hincapié en las ecuaciones desarrolladas por Marais (1974) y Von Sperling (2003), de las cuales indica que el método de Von Sperling es el más adecuado para predecir la eliminación de coliformes fecales en sistemas de lagunas en serie de países tropicales y subtropicales ya que este autor considera que estos sistemas se encuentran o se encontrarán sobrecargados como es el caso de muchos países de América Latina.

Yánez (1993):

$$K_b = 1{,}1(1{,}07)^{T-20} \quad (1.\ 16)$$

Marais (1974):

$$K_b = 2{,}6(1{,}19)^{T-20} \quad (1.\ 17)$$

Von Sperling (2003):

$$K_{b(20)} = 0{,}92D^{-0{,}88}t^{-0{,}33} \quad (1.\ 18)$$

$$K_b = K_{(20)}(1{,}07)^{T-20} \qquad (1.\ 19)$$

Donde:

D= profundidad de la laguna de maduración (m)

t=tiempo de retención (día)

T= temperatura (°C)

K_T= coeficiente de remoción de DBO_5 (d^{-1})

Kb=coeficiente de remoción de coliformes fecales (d^{-1})

3.5.5. Reutilización de aguas residuales

Varios países del mundo reutilizan las aguas residuales para el riego de cultivos; existen varias razones por las que el uso de esta práctica resulta beneficiosa, entre ellas se encuentran: el ahorro de recursos económicos que representa para la industria agrícola y una mejora ante la situación de escasez de agua a nivel mundial que existe por la gran demanda que se ha desarrollado en los últimos años (Mara, 2004).

La OMS (2006) afirma que más del 10% de la población mundial utilizan aguas residuales tratadas y no tratadas para el riego de cultivos, sobre todo en países de climas áridos donde el agua es escasa y son poco industrializados, sin embargo el uso de aguas residuales sin tratamiento en la agricultura puede traer consigo problemas sanitarios y ambientales perjudiciales para la salud del ser humano por lo que es necesario aplicar métodos de depuración de aguas residuales que permitan optimizar el uso de este recurso de forma práctica y económica.

El uso de aguas residuales tratadas en la agricultura provoca cierta incertidumbre con respecto al peligro al que se puede someter la salud pública, dado que se establecería un riesgo potencial en caso de que las aguas residuales tratadas usadas para el cultivo lleguen a formar una dosis infecciosa que se aloje en un

huésped humano y lo contamine, y un riesgo real en caso de que la infección llegue a culminar en una enfermedad transmisible (Mara, 2004).

Para ello se toman precauciones con el uso del riego restringido; esta restricción incluye todo tipo de cultivos con excepción de los productos que puedan consumirse crudos, como las hortalizas, lechugas y otros vegetales (Mara, 2004).

Para el riego restringido debe tomarse en cuenta los jornaleros que trabajan en el campo, ya que tienen contacto directo con el agua y se deben tomar medidas de protección para evitar daños en la salud de estas personas, por otra parte, en el riego sin restricciones además de los trabajadores del campo se toma en cuenta la salud de los consumidores, puesto que son los que adquieren el producto (Mara, 2004).

3.5.6. Normativa ecuatoriana para el uso de aguas residuales tratadas.

3.5.6.1. Descarga de efluentes en cuerpos de agua dulce

El libro VI Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del ambiente (TULSMA) actualizado en el 2018 señala al Acuerdo Ministerial N° 97 del Registro Oficial suplemento 387 (2015) como sustituto del anexo 1 de la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes al Recurso Agua. En el artículo 5.2.4 se enuncian los límites de la calidad del agua de los efluentes que se descargan en los cuerpos de agua dulce (Tabla 4), además de otras normativas de carácter general como la prohibición de descargas de desechos líquidos o aguas residuales que no tengan tratamiento o no cumplan con los parámetros especificados**.**

Tabla 4. Límites de descarga en cuerpos de agua dulce (Ministerio del Ambiente, 2015, pág. 21).

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite permisible máximo
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	30
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2
Boro total	B	mg/l	2
Cadmino	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN^t	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. Carbón cloroformo	mg/l	0,1
Cloruros	Cl^u	mg/l	1.000,00
Cobre	Cu	mg/l	1
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100ml	2.000,00
Color real	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución:1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr^{+6}	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO_5	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5
Fluoruros	F	mg/l	5
Fósforo Total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20
Manganeso total	Mn	mg/l	2

Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjedahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130,0
Sólidos totales	ST	mg/l	1.600,0
Sulfatos	SO_4^{-2}	mg/l	1.000,0
Sulfuros	S^{-2}	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ±3
Tensoactivos	sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

3.5.6.2. Uso agrícola

Según el Acuerdo Ministerial N° 97 (2015) no se permite que las aguas residuales sean empleadas en la agricultura a no ser que las mismas sean sometidas a tratamiento para cumplir los estándares de calidad establecidos en el artículo 5.1.3. (Tabla 5).

Tabla 5. Criterios de calidad para riego de cultivos (Ministerio del Ambiente, 2015, pág. 15)

Parámetro	**Expresado como**	**Unidad**	**Criterio de calidad**
Aceites y grasas	Película Visible		Ausencia
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico	As	mg/l	0,1
Berilio	Be	mg/l	0,1
Boro	B	mg/l	0,75
Cadmio	Cd	mg/l	0,05
Cinc	Zn	mg/l	2,0
Cobalto	Co	mg/l	0,01
Cobre	Cu	mg/l	0,2
Coliformes fecales	NMP	NMP/100ml	1
Cromo	Cr^{+6}	mg/l	0,1
Flúor	F	mg/l	1,0
Hierro	Fe	mg/l	5,0
Huevos de parásitos			Ausencia
Litio	Li	mg/l	2,5
Materia flotante	Visible		Ausencia
Mercurio	Hg	mg/l	0,001
Manganeso	Mn	mg/l	0,2
Molibdeno	Mo	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	0,2
Nitritos	NO_2	mg/l	0,5
Oxígeno Disuelto	OD	mg/l	3
pH	pH		6-9
Plomo	Pb	mg/l	5,0
Selenio	Se	mg/l	0,02
Sulfatos	SO_4^{-2}	mg/l	250
Vanadio	V	mg/l	0,1

4. EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ROCAFUERTE.

Las lagunas de estabilización se encuentran a 1 km de la zona poblada por lo que no genera molestias a los usuarios con respecto a los malos olores, y tiene fácil acceso vehicular para los estanques con un terreno plano, por lo tanto, es de fácil mantenimiento.

Previo a la ejecución del muestreo se realizó el reconocimiento general del sistema de depuración de aguas servidas de la ciudad de Rocafuerte, con la finalidad de determinar las condiciones físicas y ambientales en las que están las lagunas de estabilización.

4.1.1. Estructura de entrada y tratamiento preliminar

Al realizar la visita al sistema de lagunas de estabilización, se observa que no se cuenta con ningún tratamiento preliminar. Por otro lado, gracias a los datos proporcionados por el GADM Rocafuerte se conoce que la estructura de entrada está conformada por una tubería de PVC de doble pared de 300 mm de diámetro que se encuentra a una profundidad de 0,3 m desde el espejo de agua hasta la corona del tubo como se especifica en la sección 4.1.2.

4.1.2. Laguna anaerobia

Esta laguna se encuentra ubicada a la cota 35 msnm; en los bordes se esparce la “paja virgen” (Cynodon dactylon), la cual es una especie de césped utilizado para estabilizar taludes y evitar erosión. Su geometría es de forma rectangular sin variaciones significativas en la relación longitud/ancho, siendo la longitud promedio de 97,55 m y el ancho promedio de 70,35 m en la superficie del espejo de agua. Tiene una pendiente de 3:1 en cada talud, es decir, por cada tres unidades de medida en metros horizontales se tiene una unidad vertical; y, el ancho superior del terraplén de separación es de 3 m. La profundidad de la laguna es de 3 m desde la superficie del agua hasta la base y su francobordo (F) o borde libre, el cual evita que el viento forme olas que sobrepasen el talud de

protección, es de 0,5 m. La figura 11 representa el esquema de la sección de la laguna anaerobia.

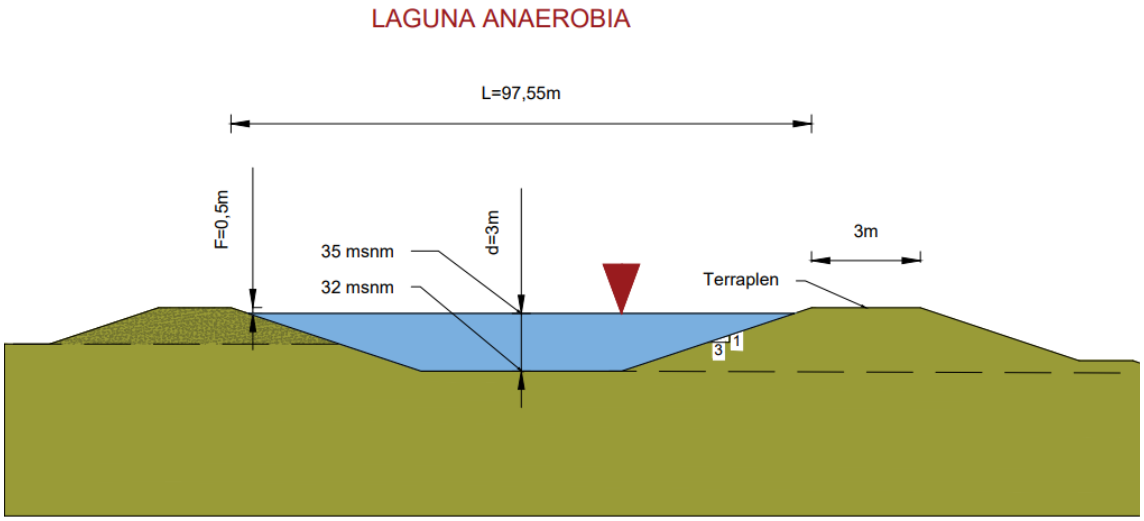


Figura 11. Esquema de laguna anaerobia de la ciudad de Rocafuerte.

Las estructuras de entrada y salida de la laguna de estabilización anaerobia se encuentran sumergidos una profundidad de 0,3 m desde la superficie del agua hasta la corona de la tubería. Los conductos en ambas estructuras son de material PVC de 300 mm de diámetro, reforzadas con una camisa de hormigón de poco espesor. Adicionalmente, la posición de la entrada y salida se localizan en esquinas opuestas de la laguna como lo muestra las figuras 12 y 13.

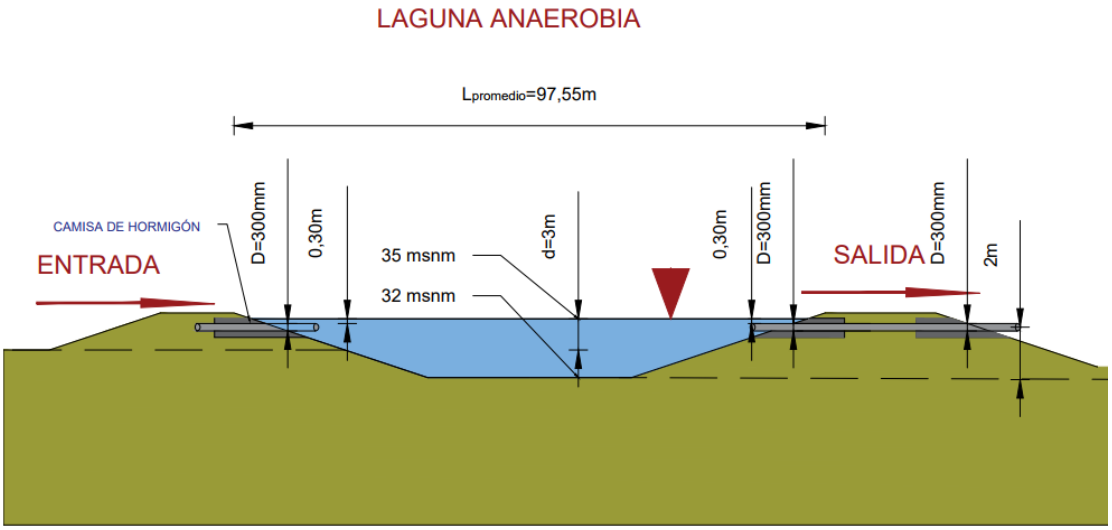


Figura 12. Corte de estructuras de entrada y salida de la laguna anaerobia de la ciudad de Rocafuerte.

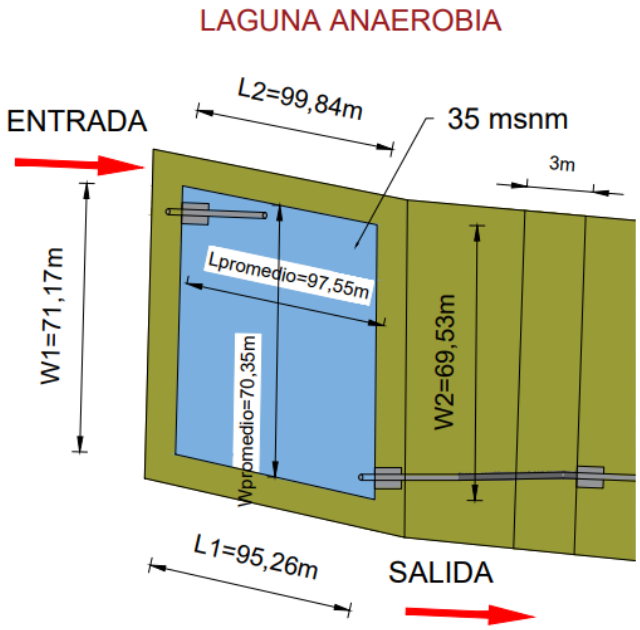


Figura 13. Vista en planta de estructuras de entrada y salida de la laguna anaerobia de la ciudad de Rocafuerte.

En la fotografía 1 se aprecia el estado actual de la laguna. Entre las características físicas encontradas dentro de la imagen se nota el crecimiento de una densa vegetación alrededor de la misma, junto con una marcada combinación de colores café y gris vista en el agua debido al contacto directo con el afluente de las aguas residuales y un fuerte olor fétido, característico en lagunas anaerobias.



Fotografía 1. Reconocimiento de laguna anaerobia del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte.

Tanto los taludes que rodean la laguna como los terraplenes están completamente cubiertos de paja virgen y maleza sobre todo en épocas de lluvia como consecuencia del poco mantenimiento que se realiza a la laguna como se muestra en la fotografía 2. El fondo de la laguna anaerobia se encuentra impermeabilizado por suelos arcillosos propios de la provincia de Manabí, por lo que no es necesario que esté cubierto con materiales impermeabilizantes como el polietileno.



Fotografía 2. Estado actual de taludes y terraplenes de laguna anaerobia

4.1.3. Laguna facultativa

La cota de esta laguna es de 32 msnm en el espejo de agua, tiene forma rectangular con una longitud de 120,64 m y ancho promedio de 100,44 m en la superficie del agua, y su profundidad es de 1,5 m sin incluir el francobordo de protección de 1 m. La pendiente del terraplén, al igual que la anterior es de 3:1 y el ancho de la berma de separación con la siguiente laguna es de 3,5 m, así como se observa en la figura 14.

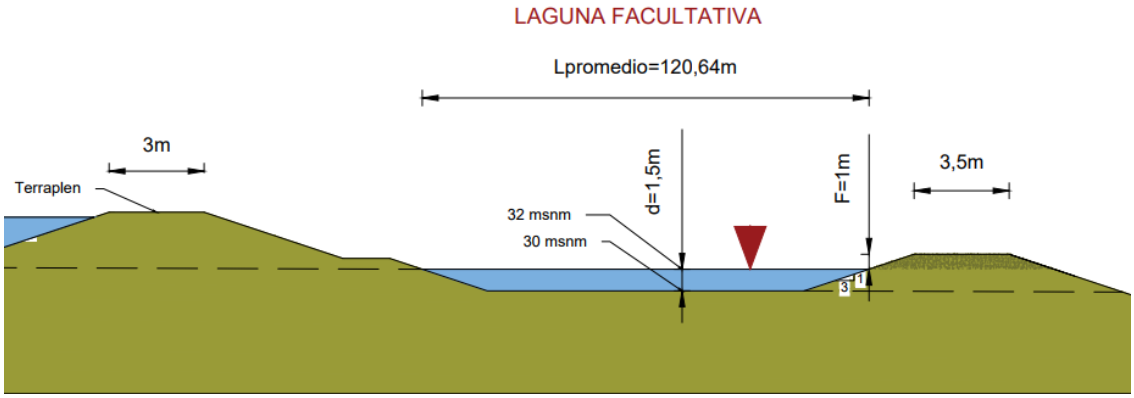


Figura 14. Esquema de laguna facultativa de la ciudad de Rocafuerte.

La estructura de entrada, por otro lado, contiene falencias observadas durante la visita de reconocimiento basadas en las recomendaciones de diseño de lagunas de estabilización de Mara (2004), pues indica que la entrada a los estanques facultativos debe estar sumergidas a poca profundidad desde el espejo de agua para evitar estancamientos de lodo, vegetación u otros residuos. Contrario a lo antes mencionado, la estructura de entrada no se halla dentro de la laguna facultativa, sino a una distancia de 10 m y a 2 m de altura desde la superficie del agua, por lo que se forma un pequeño riachuelo que viaja desde el tubo de entrada hasta el estanque, tal como se observa en las fotografías 3 y 4.



Fotografía 3. Entrada de laguna facultativa.



Fotografía 4. Estructura de entrada de la laguna facultativa

La estructura de salida se encuentra diagonalmente opuesta a la de entrada, a una profundidad de 0,6 m desde el nivel del agua y consta de un tubo de PVC de 300 mm de diámetro al igual que la laguna anterior. La figura 15 indica las dimensiones de las estructuras de entrada y salida, mientras que la figura 16 muestra la ubicación de las mismas.

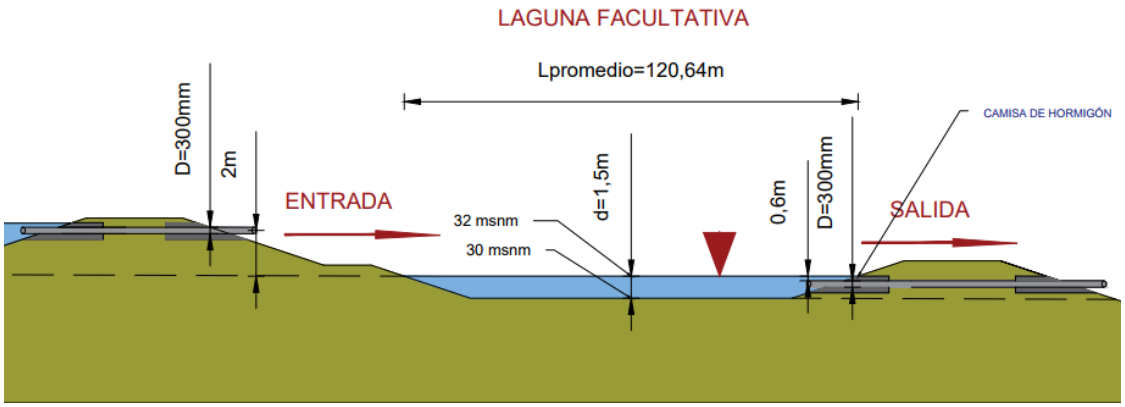


Figura 15. Corte de estructuras de entrada y salida de la laguna facultativa

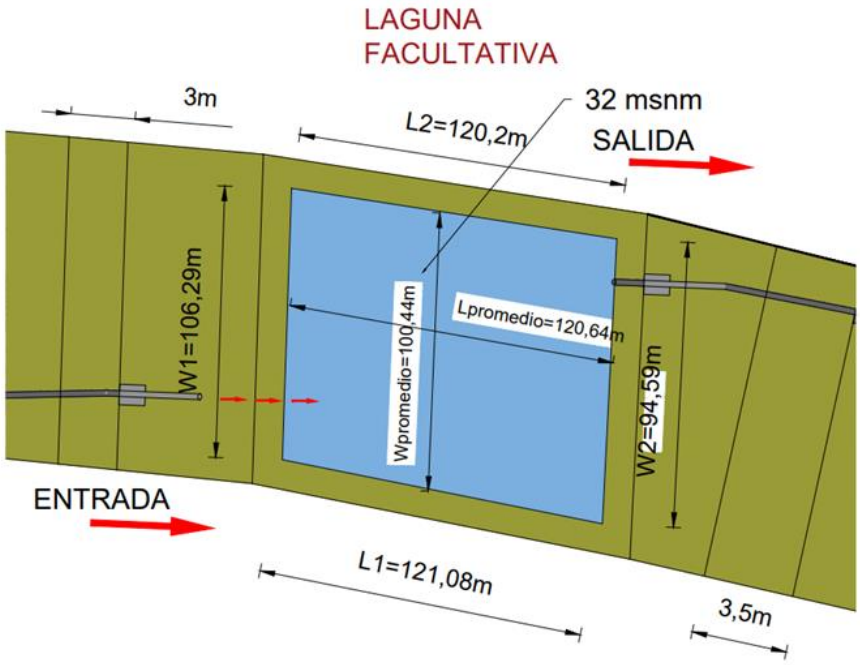
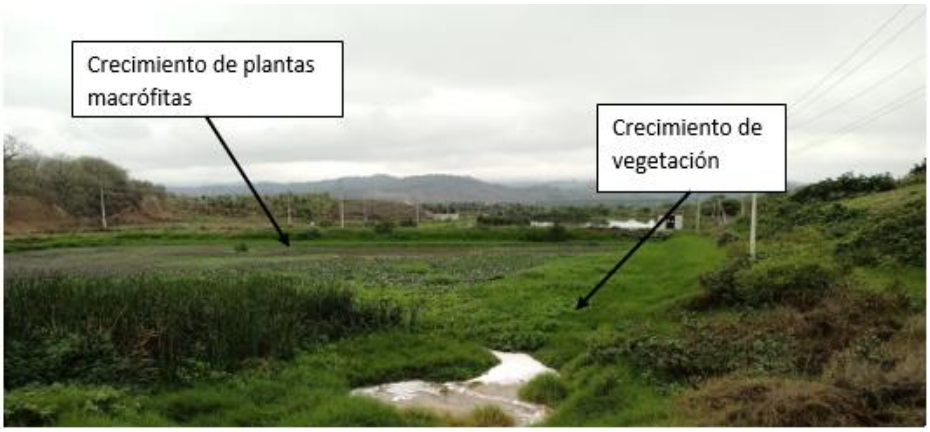


Figura 16. Vista en planta de entrada y salida de la laguna facultativa

La laguna facultativa, como se muestra en la fotografía 5, presenta una alta cantidad de plantas macrófitas que cubren casi por completo la superficie del agua, mientras que en los contornos se observa maleza y arbustos de juncos en constante crecimiento. La coloración del agua es más clara que la laguna anaerobia y los malos olores son casi imperceptibles. Por su parte en la fotografía 6 se logra apreciar el estado de los taludes y terraplenes de la laguna facultativa, los cuales, al igual que su predecesora están revestidos por paja virgen y maleza.



Fotografía 5. Reconocimiento de laguna facultativa del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte



Fotografía 6. Estado actual de taludes y terraplenes de la laguna facultativa.

4.1.4. Laguna de maduración

La laguna de maduración se diferencia de las anaerobia y facultativa por su geometría, ya que esta es ligeramente curvada en una de sus esquinas, siendo la longitud y ancho medios de 200,67 m y 98,12 m en la superficie del espejo de agua, respectivamente. La profundidad del estanque de maduración es de 1 m medido desde el nivel del agua hasta el fondo de la laguna, el francobordo es de 1 m de altura, el ancho de berma de 2,5 m, mientras que la pendiente del terraplén es de 3:1 con una cota de 29 msnm en el espejo de agua, la figura 17 muestra un esquema de esta laguna con sus dimensiones y cotas.

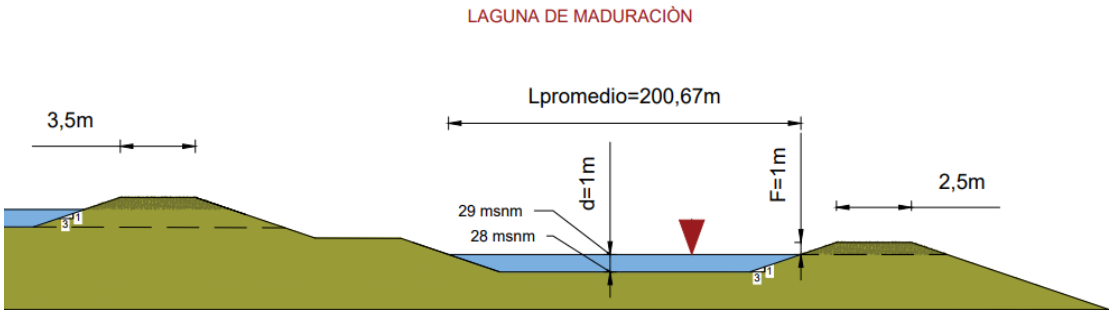


Figura 17. Esquema de laguna de maduración

La estructura de entrada, al igual que la laguna anterior, no se encuentra dentro del propio estanque; ubicándose a una distancia de 7 m y 1,70 m de altura desde la superficie de la laguna. Por su parte la salida del efluente está sumergida a una altura de 0,5 m medida desde el nivel del agua con una tubería de PVC de 300 mm que va desde la laguna de maduración hasta la entrada del canal Mina de Oro. La figura 18 muestra las estructuras de entrada y de salida de la laguna de maduración, y la figura 19 muestra la ubicación de la entrada y salida del agua, así como las dimensiones de la laguna vista en planta.

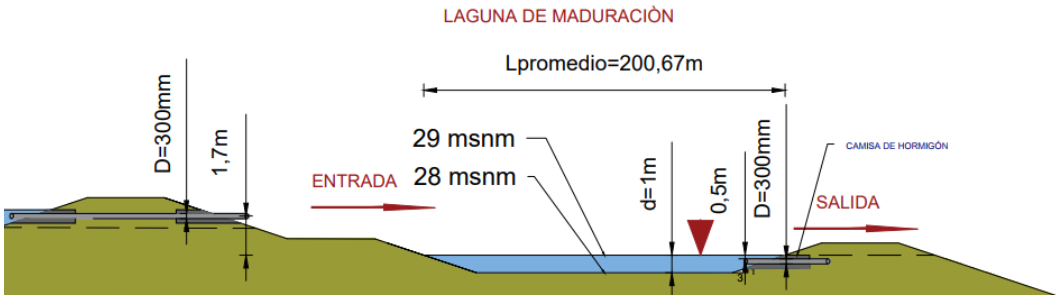


Figura 18. Corte de estructuras de entrada y salida de la laguna de maduración.



Figura 19. Entrada y salida de la laguna de maduración vista en planta.

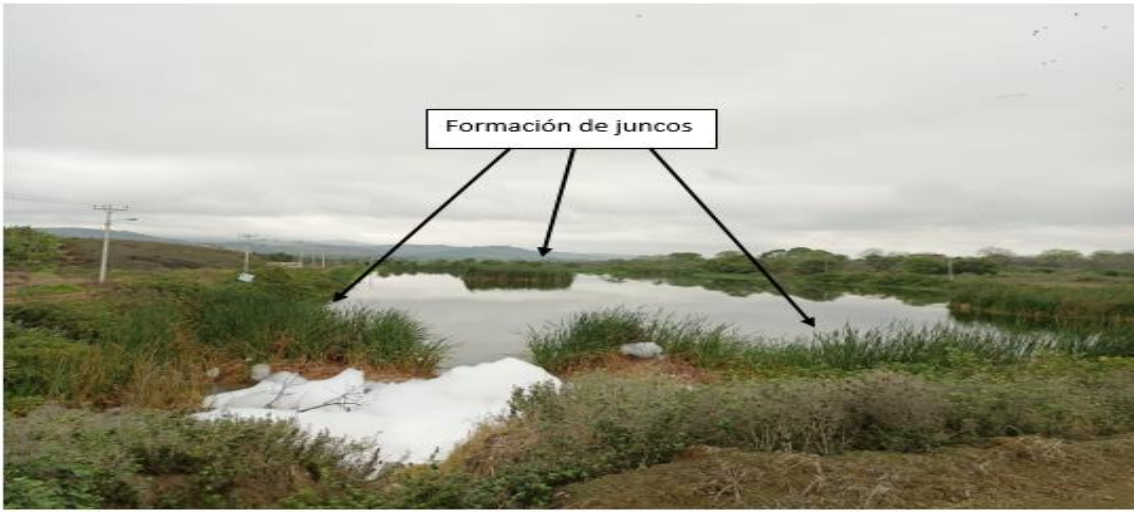
En la fotografía 7 se observa la estructura de entrada de la laguna de maduración, compuesta por dos tuberías de PVC cuyos diámetros se mencionan anteriormente.



Fotografía 7. Estructura de entrada de la laguna de maduración.

La fotografía 8 muestra a la laguna de maduración, la cual, al igual que el resto de lagunas, posee vegetación en sus bordes. La coloración del agua es de tono verdoso, en el centro y las orillas de la misma se desarrollan arbustos de juncos que llegan a medir entre 1 y 2 metros de altura junto con una creciente cantidad

de aves que habitan dentro y fuera de la laguna. La fotografía 9 muestra el estado de los taludes y terraplenes, el cual es estable, ya que están recubiertos de vegetación como la paja virgen que ayuda al suelo arcilloso del que están hechas las tres lagunas a evitar erosión y deslizamientos de tierras al interior de la laguna.



Fotografía 8. Reconocimiento de laguna de maduración del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte.



Fotografía 9. Estado actual de taludes y terraplenes de la laguna de maduración.

En el anexo 1 se encuentra la planimetría de las tres lagunas de estabilización juntas, en la que se observa la ubicación y geometría de cada una.

4.1.5. Estructura de descarga y cuerpo receptor

Como se indicó previamente, la estructura de salida de la laguna de maduración está sumergida a 0,5 m de la superficie del agua, por lo que el efluente recorre una tubería bajo tierra desde la laguna de maduración hasta el canal Mina de Oro (fotografía 10). Gracias a los datos proporcionados por el GADM de Rocafuerte se sabe que la tubería de descarga tiene un diámetro de 300 mm, es de material PVC corrugado de doble pared y el recorrido desde las lagunas de estabilización hasta llegar al canal Mina de Oro es de aproximadamente 600 m como se muestra en la figura 20. Una vez el caudal llega al canal de descarga, el agua transita por otros conductos aguas abajo hasta llegar al estero Bachillero (figura 21). A lo largo del camino el agua residual tratada es reutilizada en el riego de plantaciones agrícolas como plátano, maíz, cacao, coco, entre otros.



Figura 20. Recorrido del efluente de la laguna de maduración hasta el canal Mina de Oro (Google Earth. Recuperado el 21 de agosto de 2022).

En esta figura se muestra el camino del agua residual tratada proveniente de la laguna de maduración hasta el canal Mina de Oro ubicado a un costado de la vía Rocafuerte-Tosagua representada por la línea roja y la extensión del canal Mina de Oro representado por la línea verde.



Figura 21. Descarga del canal Mina de Oro en el estero Bachillero (Google Earth. Recuperado el 21 de agosto de 2022)

La figura 21 muestra el recorrido del canal Mina de Oro representado por la línea verde aguas abajo hasta llegar al estero Bachillero representado por la línea azul.



Fotografía 10. Cuerpo receptor del efluente de las lagunas de estabilización (canal Mina de Oro).

4.2. METODOLOGÍA.

La metodología aplicada en la labor de campo de esta investigación se indica a continuación.

a) Medición de las dimensiones físicas de cada laguna de estabilización.

Se procedió a medir la longitud y el ancho de las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración, tal y como se muestra en la fotografía 11, con el fin de determinar el volumen de las mismas para establecer el tiempo de retención de cada una. Por dificultades relacionadas a la naturaleza del terreno y la extensión de las lagunas, no se tomaron las profundidades respectivas, sin embargo, se tomó en consideración los datos proporcionados por el GAD municipal de Rocafuerte. Por otro lado, la longitud y el ancho del espejo de agua para cada laguna fueron medidas desde los terraplenes por cuestiones de seguridad debido a que algunas zonas de las lagunas son de difícil acceso al realizar las mediciones; en la figura 22 se refleja un esquema explicativo de las medidas tomadas. Estas medidas y el cálculo del área y volumen de cada laguna se muestran en la tabla 6.

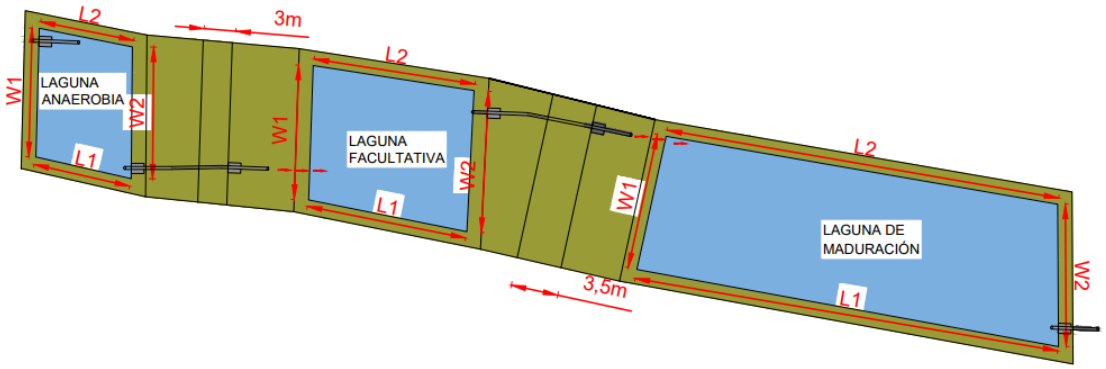


Figura 22. Esquema explicativo de las mediciones de la superficie del agua.

Tabla 6. Dimensiones del espejo de agua de las lagunas de estabilización de Rocafuerte

DIMENSIÓN	UNIDAD	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LAGUNA DE MADURACIÓN
L1	**m**	95,26	121,08	210,5
L2	**m**	99,84	120,2	190,84
W1	**m**	71,17	106,29	97,21
W2	**m**	69,53	94,59	99,03
L PROMEDIO	**m**	97,55	120,64	200,67
W PROMEDIO	**m**	70,35	100,44	98,12
Profundidad (d)	**m**	3	1,5	1
Pendiente (s)	**m/m**	3	3	3



Fotografía 11. Medición de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

b) Aforos en el sistema de lagunas de estabilización.

Para estimar los caudales de entrada y salida del sistema de tratamiento de aguas residuales, se realizaron aforos volumétricos. Las fechas en las que se realizaron las medidas de los caudales fueron del 15 al 17 de noviembre de 2021 entre las 8 de la mañana y las 6 de la tarde en intervalos de una hora, los resultados de estos aforos se encuentran en el anexo 5. El propósito de este procedimiento es el de estimar el horario de los caudales máximos y mínimos para considerar el tiempo ideal de la toma de muestras para realizar los ensayos correspondientes. En el numeral 4.3 se explica en detalle el procedimiento realizado para estimar los caudales.

c) Toma de muestras para realizar los análisis de las lagunas de estabilización.

Se realizó la recolección de muestras desde el 22 de noviembre de 2021 hasta el 20 de diciembre de 2021 y un muestreo adicional el 17 de mayo de 2022, como se refleja en la tabla 7, siendo un total de 24 muestras obtenidas para análisis de DBO_5, sólidos suspendidos, coliformes fecales (E.coli) y temperatura. Para la toma de muestras se consideró el horario de mayor caudal, el cual se presenta alrededor de las 12h00 y las 13h00, ya que un caudal de mayor valor implica menor tiempo de retención en el sistema de lagunas de estabilización y por tanto una evaluación del sistema de tratamiento en su estado más crítico.

La totalidad de las muestras fueron recogidas en las ubicaciones expuestas en la figura 23. Para el muestreo del afluente se realiza la recolección junto a la estructura de entrada a la laguna anaerobia (muestra 1), la cual se encuentra sumergida, ya que el acceso a la misma es limitado por la flora que existe alrededor de los taludes de la laguna. Mientras que, las muestras 2, 3 y 4 son recolectadas en las salidas de la laguna anaerobia, facultativa y de maduración, respectivamente



Figura 23 - Ubicación de los puntos de toma de muestras en lagunas de estabilización. (Google Earth. Recuperado el 10 de diciembre de 2021).

En la figura 23 se observa los puntos en los que se realizó la toma de muestras para cada laguna representados por números de la siguiente manera: 1) Afluente, 2) Efluente laguna anaerobia, 3) Efluente laguna facultativa, 4) Efluente laguna maduración.

Tabla 7. Cronograma y localización de toma de muestras para análisis del sistema de tratamiento de aguas residuales de Rocafuerte.

Día	Muestras	Lugar	Fecha	Horario de muestreo	N° muestras obtenidas
Lunes	Muestra 1	Entrada de laguna anaerobia	22/11/2021	12h45	1
Lunes	Muestra 2	Salida de laguna anaerobia	22/11/2021	13h15	1
Lunes	Muestra 3	Salida de laguna facultativa	22/11/2021	13h40	1
Lunes	Muestra 4	Salida de laguna de maduración	22/11/2021	14h00	1
Lunes	Muestra 1	Entrada de laguna anaerobia	29/11/2021	13h15	1
Lunes	Muestra 2	Salida de laguna anaerobia	29/11/2021	13h30	1
Lunes	Muestra 3	Salida de laguna facultativa	29/11/2021	14h10	1
Lunes	Muestra 4	Salida de laguna de maduración	29/11/2021	14h30	1
Lunes	Muestra 1	Entrada de laguna anaerobia	6/12/2021	12h30	1
Lunes	Muestra 2	Salida de laguna anaerobia	6/12/2021	12h50	1
Lunes	Muestra 3	Salida de laguna facultativa	6/12/2021	13h20	1
Lunes	Muestra 4	Salida de laguna de maduración	6/12/2021	13h40	1
Lunes	Muestra 1	Entrada de laguna anaerobia	13/12/2021	12h00	1
Lunes	Muestra 2	Salida de laguna anaerobia	13/12/2021	12h30	1
Lunes	Muestra 3	Salida de laguna facultativa	13/12/2021	12h55	1
Lunes	Muestra 4	Salida de laguna de maduración	13/12/2021	13h20	1
Lunes	Muestra 1	Entrada de laguna anaerobia	20/12/2021	12h30	1
Lunes	Muestra 2	Salida de laguna anaerobia	20/12/2021	13h00	1
Lunes	Muestra 3	Salida de laguna facultativa	20/12/2021	13h20	1
Lunes	Muestra 4	Salida de laguna de maduración	20/12/2021	13h40	1
Lunes	Muestra 1	Entrada de laguna anaerobia	17/5/2021	12h00	1
Lunes	Muestra 2	Salida de laguna anaerobia	17/5/2021	12h15	1
Lunes	Muestra 3	Salida de laguna facultativa	17/5/2021	12h40	1
Lunes	Muestra 4	Salida de laguna de maduración	17/5/2021	13h00	1
TOTAL DE MUESTRAS					24

En el anexo 4 se encuentra el esquema donde se señala los lugares de recolección de muestras.

4.3. REALIZACIÓN DE AFOROS

En total se realizaron cinco aforos en las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte: cuatro aforos volumétricos y un aforo de velocidad, los cuales se realizaron en el siguiente orden:

- Primer aforo volumétrico (20 L) desde el 15 hasta el 17 de noviembre de 2021, el cual se empleó para determinar las horas en las que se ejecuta el muestreo.
- Segundo aforo volumétrico (20 L) desde el 22 de noviembre del 2021 hasta el 17 de mayo de 2022, estos datos corresponden a los caudales obtenidos en los días de muestreo, al final de cada muestreo.
- Tercer aforo volumétrico desde el 14 hasta el 15 de mayo de 2022, medido con un recipiente de 20 L de capacidad.
- Cuarto aforo volumétrico desde el 14 hasta el 15 de mayo de 2022 realizado con un recipiente de 100 L de capacidad.
- Quinto aforo de velocidad desde el 14 hasta el 15 de mayo de 2022 medido a una distancia de 10 m para la laguna anaerobia y 5 m para la laguna de maduración debido a problemas de accesibilidad.

Los aforos realizados de manera volumétrica se encargan de medir el tiempo que tarda el caudal en llenar un recipiente de volumen conocido; el recipiente utilizado para la medición de caudales de los tres primeros aforos tiene un volumen de 20 litros, adicionalmente para el cuarto se emplea un recipiente de 100 litros de capacidad. Para el quinto y último aforo se realizó un aforo de velocidad, cuyo procedimiento consiste en cronometrar el tiempo que le toma al agua recorrer una distancia determinada en un canal de sección conocida. El cronómetro utilizado para la medida del tiempo es de precisión de 0,01 segundos marca Unisport, como se muestra en la fotografía 12.



Fotografía 12. Cronómetro utilizado para la medición de tiempo en los aforos

Al presentarse dificultades físicas para medir los caudales tanto en la entrada de la laguna anaerobia como en la salida de la laguna facultativa, únicamente se midieron los caudales de salida de las lagunas anaerobia y de maduración. La fotografía 13 muestra el aforo realizado en la salida de la laguna anaerobia y en la fotografía 14 se observa el aforo realizado en la salida del sistema de tratamiento de aguas residuales.



Fotografía 13. Realización de aforo en el efluente de la laguna anaerobia del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte



Fotografía 14. Medición del caudal por aforo volumétrico en el efluente del sistema de tratamiento de agua residual de la ciudad de Rocafuerte.

Los resultados de los caudales medidos de forma volumétrica se obtienen mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t} \qquad (1.\ 20)$$

Donde:

Q= Caudal medido, expresado en L/s

V= Volumen, expresado en litros

t= Tiempo, expresado en segundos

Para los tres últimos aforos realizados el 14 y 15 de mayo de 2022 tanto volumétrico, con recipientes de 20 L (fotografía 15) y de 100 L (fotografía 16), como de velocidad (fotografía 17 y 18) se efectuó una medición cada hora desde las 9h00 hasta las 16h00 y cuyos resultados están adjuntos a los de los procedimientos previos, esto con la finalidad de encontrar el porcentaje de desviación del aforo volumétrico realizado con el recipiente de 20 L de capacidad y mejorar la fiabilidad de las mediciones del primer aforo corrigiendo cualquier margen de error que se haya presentado al comparar el volumen del recipiente utilizado con el caudal medido.

Los resultados de cada aforo junto con el análisis estadístico del mismo se encuentran en el anexo 5 siendo el caudal promedio calculado de 18,07 L/s con una desviación estándar de 2,03 L/s, que representa un 11%.



Fotografía 15. Tercer aforo volumétrico en el efluente de la laguna de maduración y el efluente de la laguna anaerobia

En la fotografía 15 se muestra el tercer aforo volumétrico realizado el 14 y 15 de mayo de 2022 con un recipiente de 20 L de volumen en el efluente de la laguna de maduración (derecha) y el efluente de la laguna anaerobia (izquierda).



Fotografía 16. Cuarto aforo volumétrico realizados en los efluentes de las lagunas anaerobia y de maduración.

En la fotografía 16 se observa el cuarto aforo volumétrico realizado el 14 y 15 de mayo de 2022 con un recipiente de 100 L de volumen en el efluente de la laguna de maduración (derecha) y el efluente de la laguna anaerobia (izquierda)



Fotografía 17. Quinto aforo de velocidad realizado el 14 y 15 de mayo en el efluente de la laguna anaerobia.



Fotografía 18. Quinto aforo de velocidad realizado el 14 y 15 de mayo en el efluente de la laguna de maduración.

4.4. TOMA DE MUESTRAS

Semanalmente, se recolectaron muestras en la entrada de la laguna anaerobia en recipientes esterilizados como se muestra en la fotografía 19 y figura 24, en la salida de la laguna anaerobia (fotografía 20 y figura 25), en la salida de la laguna facultativa (fotografía 21 y figura 26) y en la salida de la laguna de maduración (fotografía 22 y figura 27); cabe recalcar que la totalidad de las muestras fueron recolectadas siempre en los mismos lugares antes descritos. Al culminar con el procedimiento las muestras fueron identificadas y colocadas en un cooler con hielo (fotografía 23) para ser transportadas al laboratorio y continuar con los ensayos respectivos. Para la obtención de muestras y elaboración de los ensayos se contó con la colaboración de la Directora y del personal de Laboratorio de Saneamiento de Portoaguas Empresa Pública (Portoaguas EP) ubicada en la ciudad de Portoviejo.



Fotografía 19. Toma de muestras en la entrada de la laguna anaerobia



Figura 24. Esquema de toma de la primera muestra en la entrada de la laguna anaerobia.



Fotografía 20. Toma de muestras en salida de la laguna anaerobia



Figura 25. Esquema de toma de la primera muestra en la salida de la laguna anaerobia.



Fotografía 21. Toma de muestras en la salida de la laguna facultativa

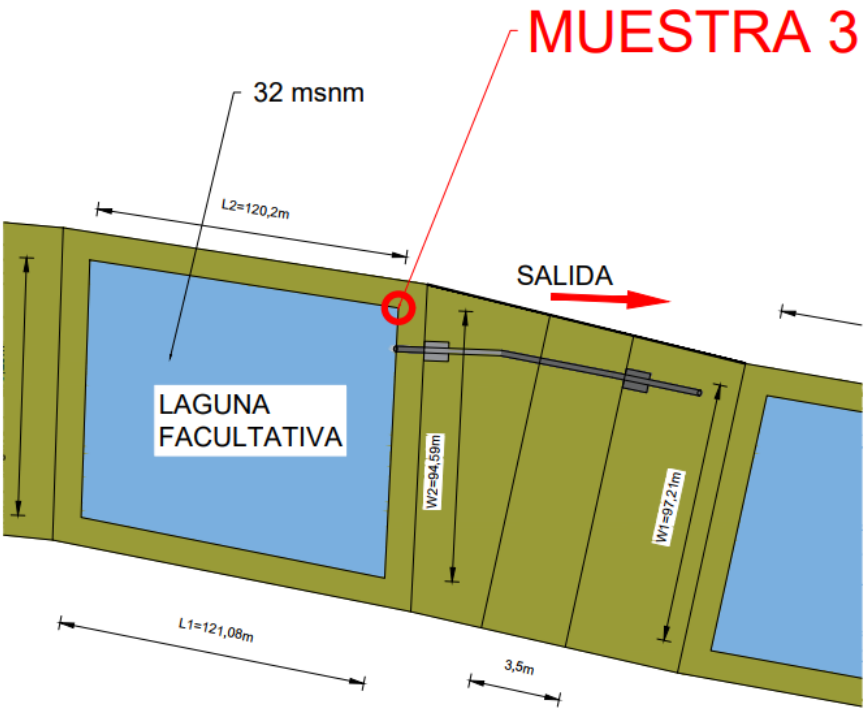


Figura 26. Esquema de la toma de muestra en la salida de la laguna facultativa.



Fotografía 22. Toma de muestras salida de la laguna de maduración.



Figura 27. Esquema de la toma de muestra en la salida de la laguna de maduración



Fotografía 23. Identificación y almacenamiento de las muestras recolectadas

4.5. ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL. MÉTODOS UTILIZADOS.

4.5.1. DBO_5

Para determinar de la demanda bioquímica de oxígeno se emplea el Standard Methods 5210D utilizando un aparato respirométrico DBOTrak II de la marca HACH (fotografía 24); este método consiste en medir el consumo de oxígeno o la producción de CO_2 por parte de las bacterias existentes en la muestra de agua residual mediante un manómetro que comprueba la variación de la presión en una botella estandarizada.

El procedimiento del ensayo consiste en la colocación de 160 ml de la muestra de aguas residuales junto con una cápsula magnética y la solución de nutrientes para el crecimiento de bacterias en una botella ámbar estandarizada de 492 ml de capacidad, posteriormente se coloca el hidróxido de litio dentro del tapón para sellarla herméticamente, esto provoca que el hidróxido entre en contacto con los gases de la botella y absorba el CO_2 permitiendo al manómetro medir el vacío que deja el oxígeno consumido durante un período de 5 días en el que la muestra es constantemente agitada por la capsula magnética y mantenida a una temperatura de 20 ± 1 ºC según la edición N° 21 del método 5210 D respirométrico.



Fotografía 24. Respirométrico DBOTrak II utilizado en el análisis de DBO_5

4.5.2. Coliformes fecales

En este parámetro se utilizaron recipientes esterilizados de 100 ml para el muestreo. El método para determinar la cantidad de coliformes fecales presentes en las muestras de aguas residuales fue el Standard Methods 9223 B o número más probable (NMP).

Este método consiste en sembrar una muestra de agua residual parcial dentro de tubos de ensayos que contienen caldos de cultivo de lactosa y observar si se produce la fermentación que generan los coliformes (fotografía 25); el ensayo se divide en dos etapas: en la primera se toma una porción de muestra y se la diluye en diferentes grados siguiendo una progresión geométrica de 10 divididas en tres series de cinco tubos; una vez que se empieza la inoculación, los recipientes se mantienen a una temperatura de 35± 0,5 °C durante 3 horas; la segunda fase parte de los resultados del cultivo anterior repitiendo el mismo proceso con una variación en la temperatura y el tiempo de incubación de 44,4±0,2 °C y 21 ± 2 horas respectivamente; finalmente, en el caso de que se presente la fermentación de la lactosa en la muestra culminado el tiempo establecido se considera que la presencia de coliformes fecales dentro del tubo es positiva, expresando los resultados en forma de fracción, por ejemplo, si el resultado del ensayo para la muestra es de 4/5 eso quiere decir que de los 5 tubos que fueron sometidos a ensayo cuatro de ellos tienen coliformes fecales (Metcalf y Eddy, 1995).

Una vez culminado el ensayo para cada muestra, se determina la concentración de coliformes fecales por medio de tablas de número más probable de coliformes fecales por cada 100 ml de muestra (presentadas en el anexo 6) a partir de los resultados obtenidos.

.



Fotografía 25. Cultivo de muestras para análisis de coliformes fecales

4.5.3. Sólidos suspendidos

Para este ensayo se requiere una pequeña muestra de 10 ml en el análisis, la cual es vertida en un frasco de vidrio estandarizado y colocada en el espectrofotómetro que se encarga de proyectar por medio de una lámpara halógena un haz de luz monocromática que atraviesa el agua, midiendo la cantidad de luz que fue absorbida por la misma y detectando el total de sólidos suspendidos dentro de la muestra. Los sólidos suspendidos de cada muestra fueron determinados por el espectrofotómetro DR3900 de la marca HACH (fotografía 26), el cual permite definir con gran precisión la cantidad de sólidos suspendidos que se encuentren en el agua residual.



Fotografía 26. Medición de sólidos suspendidos por el espectrofotómetro DR3900

4.5.4. Temperatura

La temperatura de las aguas residuales tratadas fue medida in situ en la entrada y salida de cada laguna al igual que los demás parámetros, para ello se utilizó un termómetro higrómetro digital marca Atenea como se muestra en la fotografía 27.



Fotografía 27. Medición de temperatura del sistema de lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.

5.1. RESULTADOS DE AFOROS.

En la tabla 8 se encuentran los resultados de todos los caudales medidos en los aforos especificados en la sección 4.3 y el caudal medio calculado del efluente de la laguna anaerobia y de maduración, siendo 18,07 L/s el caudal promedio del sistema de lagunas de estabilización determinado a base de los aforos de los efluentes de la laguna anaerobia y de la laguna de maduración, cuyo detalle se presenta en el anexo 8.

Tabla 8. Resultados de medición de caudales del sistema de lagunas de estabilización en serie de la ciudad de Rocafuerte

FECHA	**AFORO VOLUMÉTRICO (20 L) Q promedio L/s**
15/11/2021	15,98
16/11/2021	15,50
17/11/2021	17,09
22/11/2021	18,31
29/11/2021	19,00
6/12/2021	16,18
13/12/2021	17,80
20/12/2021	19,19
14/5/2022	16,66
15/5/2022	15,98
17/5/2022	17,28
	AFORO VOLUMÉTRICO (100 L) Q promedio L/s
14/5/2022	21,87
15/5/2022	21,69
	AFORO DE VELOCIDAD Q promedio L/s
14/5/2022	21,12
15/5/2022	17,45
Q Promedio	18,07

5.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO.

La tabla 9 refleja los resultados del análisis de DBO_5, la tabla 10 indica los coliformes fecales obtenidos de las muestras de cada laguna por ensayo, mientras que la tabla 11 enseña los valores de temperatura y sólidos suspendidos medidos en los días del muestreo junto con el promedio de los parámetros. Debido a dificultades en el laboratorio de saneamiento de Portoaguas EP, el ensayo de DBO_5 para las muestras del día 13 de diciembre de 2021 no pudo efectuarse adecuadamente mostrando resultados parciales; motivo por el cual se descartaron los resultados del día 4 de muestreo y se consideró un día extra únicamente para el parámetro de DBO_5 y temperatura elaborado el día 17 de mayo de 2022. Se debe aclarar que en el procesamiento de datos no se tomaron en cuenta los valores del cuarto día de muestreo.

Tabla 9. Resultados de DBO_5 de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

DÍA	FECHA	DBO_5 mg/L			
		AFLUENTE	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LAGUNA DE MADURACIÓN
1	22/11/2021	258	86	44	59
2	29/11/2021	149	155	87	59
3	6/12/2021	460	102	119	48
4	13/12/2021		103		93
5	20/12/2021	203	127	76	35
6	17/5/2022	423	151	72	132
PROMEDIO		298,6	124,2	79,6	66,6

Tabla 10. Resultados de coliformes fecales de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

DÍA	FECHA	COLIFORMES FECALES (NMP/100ml)			
		AFLUENTE	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LAGUNA DE MADURACIÓN
1	22/11/2021	2,80E+04	2,40E+05	5,40E+04	2,20E+04
2	29/11/2021	2,40E+05	2,20E+04	5,40E+04	1,00E+03
3	6/12/2021	2,40E+05	9,20E+04	2,40E+04	2,00E+03
4	13/12/2021	1,70E+04	7,90E+03	2,20E+04	4,90E+03
5	20/12/2021	2,80E+04	2,40E+05	3,40E+04	1,80E+04
PROMEDIO		1,11E+05	1,20E+05	3,76E+04	9,58E+03

Tabla 11. Resultados de temperatura y sólidos suspendidos de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

DÍA	FECHA	TEMPERATURA °C AFLUENTE	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LAGUNA DE MADURACIÓN
1	22/11/2021	26,6	26,3	26,1	26,6
2	29/11/2021	26,5	26,9	26,7	26,7
3	6/12/2021	27,1	26,8	26,8	26,4
4	13/12/2021	25,7	26,2	26,0	25,9
5	20/12/2021	24,1	24,3	23,7	24,5
6	17/5/2022	24,5	23,4	23,2	24,5
PROMEDIO		25,75	25,65	25,42	25,77
DÍA	**FECHA**	**SÓLIDOS SUSPENDIDOS mg/L AFLUENTE**	**LAGUNA ANAEROBIA**	**LAGUNA FACULTATIVA**	**LAGUNA DE MADURACIÓN**
1	22/11/2021	286	243	55	24
2	29/11/2021	282	399	399	54
3	6/12/2021	1016	295	398	83
4	13/12/2021	430	272	375	156
5	20/12/2021	280	419	460	156
PROMEDIO		458,8	325,6	337,4	94,6

En el anexo 8, se encuentran los resultados de los parámetros DBO_5, coliformes fecales, sólidos suspendidos y temperatura realizados en el laboratorio de saneamiento de la empresa PORTOAGUAS EP.

5.3. CÁLCULO DE CALIDAD ESPERADA DEL EFLUENTE DE CADA LAGUNA.

5.3.1. Eficiencia de remoción de DBO_5, coliformes fecales y sólidos suspendidos de las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración.

Al determinar la eficiencia de remoción de DBO_5 y coliformes fecales de las lagunas se emplea la ecuación 1.21 expresada por Romero (1999).

$$Eficiencia = \frac{concentración\ afluente - concentración\ efluente}{concentración\ afluente} * 100 \qquad (1.\ 21)$$

a) Laguna anaerobia

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = \frac{298{,}6\left(\frac{mg}{L}\right) - 124{,}2(\frac{mg}{L})}{298{,}6(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = 58{,}41\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = \frac{1{,}11x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right) - 1{,}20x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right)}{1{,}11x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right)} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = -8{,}84\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = \frac{458{,}8\left(\frac{mg}{L}\right) - 325{,}6(\frac{mg}{L})}{458{,}8(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = 29{,}03\%$$

b) Laguna facultativa

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = \frac{124{,}2\left(\frac{mg}{L}\right) - 79{,}6(\frac{mg}{L})}{124{,}2(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = 35{,}91\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = \frac{1{,}20x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right) - 3{,}76x10^4\left(\frac{NMP}{100ml}\right)}{1{,}20x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right)} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = 68{,}77\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = \frac{325{,}6\left(\frac{mg}{L}\right) - 337{,}4(\frac{mg}{L})}{325{,}6(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = -3{,}62\%$$

c) Laguna de maduración

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = \frac{79{,}6\left(\frac{mg}{L}\right) - 66{,}6(\frac{mg}{L})}{79{,}6(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = 16{,}33\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = \frac{3{,}76x10^4\left(\frac{NMP}{100ml}\right) - 9{,}58x10^3\left(\frac{NMP}{100ml}\right)}{3{,}76x10^4\left(\frac{NMP}{100ml}\right)} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = 74{,}52\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = \frac{337{,}4\left(\frac{mg}{L}\right) - 94{,}6(\frac{mg}{L})}{337{,}4(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = 71{,}96\%$$

d) Eficiencia de remoción total del sistema en serie de lagunas de estabilización

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = \frac{298{,}6\left(\frac{mg}{L}\right) - 66{,}6(\frac{mg}{L})}{298{,}6(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ DBO_5 = 77{,}70\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = \frac{1{,}11x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right) - 9{,}58x10^3\left(\frac{NMP}{100ml}\right)}{1{,}11x10^5\left(\frac{NMP}{100ml}\right)} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ C.F = 91{,}34\%$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = \frac{458{,}8\left(\frac{mg}{L}\right) - 94{,}6(\frac{mg}{L})}{458{,}8(\frac{mg}{L})} * 100$$

$$Eficiencia\ de\ remoción\ SST = 79{,}38\%$$

Tabla 12. Resumen de remoción de los parámetros DBO_5, coliformes fecales y sólidos suspendidos de las lagunas de estabilización de Rocafuerte.

	Remoción de DBO_5 %	**Remoción de CF %**	**Remoción de SST %**
Laguna anaerobia	58,41%	-8,84%	29,03%
Laguna facultativa	35,91%	68,77%	-3,62%
Laguna de maduración	16,33%	74,52%	71,96%
Sistema de lagunas	77,70%	91,34%	79,38%

La World Health Organization (1987) u OMS por sus siglas en español indica que el porcentaje de remoción de DBO_5 obtenido mediante experimentación en lagunas anaerobias correctamente diseñadas va del 65 al 80% expuestas a temperaturas superiores a 22°C. Por otro lado, Mendoça, (2000) muestra que para las lagunas facultativas la eficiencia típica de remoción de DBO_5 va del 70% al 90%. El porcentaje de remoción de DBO_5 obtenido en las lagunas de estabilización de Rocafuerte es inferior al rango establecido tanto para las lagunas anaerobias como para las facultativas con un resultado de 58,41% y 35,91% respectivamente, por lo que las lagunas de estabilización de Rocafuerte no cumplen con los parámetros determinados por ambos autores. Por su parte Romero (1999) indica que el porcentaje de remoción de DBO_5 recomendado para un sistema de lagunas de estabilización en serie debe ser superior al 90% para que se considere eficiente, esto debido a los múltiples estudios realizados de manera empírica para lagunas con temperaturas entre 20 y 30 °C; por lo que el resultado de remoción del sistema de lagunas de estabilización de Rocafuerte de 77,7% no cumple con las indicaciones del autor y se lo considera un porcentaje por debajo del esperado.

Una posible explicación respecto a la eficiencia de remoción de coliformes fecales negativa calculada en la laguna anaerobia es el poco control que existe en la entrada de las instalaciones, pues suelen ingresar vehículos privados que descargan desechos provenientes de granjas porcinas, bovinas o avícolas en la primera laguna sin ningún tipo de precaución y prácticamente sin control alguno,

afectando el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales y por consiguiente sus resultados.

Por otro lado, se presume que el resultado desfavorable en la remoción de sólidos suspendidos de la laguna facultativa se debe al crecimiento desmesurado de plantas macrófitas y la presencia de varias especies de aves en la superficie de la misma, ya que, tanto las plantas acuáticas como los animales podrían aportar sólidos suspendidos que perjudican el rendimiento de la laguna.

5.3.2. Tiempo de retención

Para el cálculo del tiempo de retención de cada laguna se utilizó la fórmula 1.22 En las tablas 13, 14 y 15 se reflejan los resultados de los tiempos de retención calculados para cada laguna, mientras que la tabla 16 revela el período de retención total correspondiente al sistema de lagunas. En razón de que el volumen del recipiente en los primeros aforos fue de 20 L, se realizaron nuevos aforos, unos, con un recipiente de 100L y, otros, mediante aforos de velocidad, habiéndose determinado un tiempo promedio con un margen de variación de ± 11%, razón por la cual la simulación de la calidad esperada del efluente se realizará considerando esa eventual variación en el tiempo de retención.

$$t = \frac{Volumen\ (m^3)}{Q_{med}\ (\frac{m^3}{s})} * \frac{día}{86.400s} \qquad (1.\ 22)$$

Dónde: Qmed= caudal promedio expresado en m^3/s; t= tiempo hidráulico de retención en días.

Las dimensiones de las lagunas y los cálculos de área y volumen de cada una se encuentran reflejados en el anexo 7.

Tabla 13. Tiempo de retención calculado para laguna anaerobia

LAGUNA ANAEROBIA							
DÍA	**FECHA**	**Volumen de laguna m3**	**Caudal medio m3/s**	**Tiempo de retención s**	**Tiempo de retención calculado (T promedio) día**	**Tiempo mínimo (T promedio - 11%) día**	**Tiempo máximo (T promedio + 11%) día**
1	22/11/2021	16.378,63	0,0183	894.518,30	10,35	9,21	11,49
2	29/11/2021	16.378,63	0,0190	862.033,16	9,98	8,88	11,08
3	6/12/2021	16.378,63	0,0162	1.012.276,27	11,72	10,43	13,01
4	13/12/2021	16.378,63	0,0178	920.147,75	10,65	9,48	11,82
5	20/12/2021	16.378,63	0,0192	853.498,18	9,88	8,79	10,97
6	17/5/2022	16.378,63	0,0173	947.837,38	10,97	9,76	12,18
PROMEDIO			0,0180	915.051,84	10,59	9,43	11,75
PORCENTAJE DE VARIACIÓN			± 11%				

Tabla 14. Tiempo de retención calculado para laguna facultativa

LAGUNA FACULTATIVA							
DÍA	**FECHA**	**Volumen de laguna m3**	**Caudal medio m3/s**	**Tiempo de retención s**	**Tiempo de retención calculado (T promedio) dia**	**Tiempo mínimo (T promedio - 11%) dia**	**Tiempo máximo (T promedio + 11%) dia**
1	22/11/2021	16.723,83	0,0183	913.371,38	10,57	9,41	11,73
2	29/11/2021	16.723,83	0,0190	880.201,58	10,19	9,07	11,31
3	6/12/2021	16.723,83	0,0162	1.033.611,25	11,96	10,64	13,28
4	13/12/2021	16.723,83	0,0178	939.541,01	10,87	9,67	12,07
5	20/12/2021	16.723,83	0,0192	871.486,71	10,09	8,98	11,2
6	17/5/2022	16.723,83	0,0173	967.814,24	11,20	9,97	12,43
PROMEDIO			0,0180	934.337,70	10,81	9,62	12,00
PORCENTAJE DE VARIACIÓN			± 11%				

Tabla 15. Tiempo de retención calculado para laguna de maduración

LAGUNADE MADURACIÓN							
DÍA	**FECHA**	**Volumen de laguna m3**	**Caudal medio m3/s**	**Tiempo de retención s**	**Tiempo de retención calculado (T promedio) dia**	**Tiempo mínimo (T promedio - 11%) dia**	**Tiempo máximo (T promedio + 11%) dia**
1	22/11/2021	18.805,37	0,0183	1.027.054,61	11,89	10,58	13,2
2	29/11/2021	18.805,37	0,0190	989.756,32	11,46	10,2	12,72
3	6/12/2021	18.805,37	0,0162	1.162.260,20	13,45	11,97	14,93
4	13/12/2021	18.805,37	0,0178	1.056.481,46	12,23	10,88	13,58
5	20/12/2021	18.805,37	0,0192	979.956,75	11,34	10,09	12,59
6	17/5/2022	18.805,37	0,0173	1.088.273,73	12,60	11,21	13,99
PROMEDIO			0,0180	1.050.630,51	12,16	10,82	13,50
PORCENTAJE DE VARIACIÓN			± 11%				

Tabla 16. Tiempo de retención calculado para cada laguna y del sistema de lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte

	Tiempo de retención calculado (t promedio) día	**Tiempo mínimo (t promedio - 11%) día**	**Tiempo máximo (t promedio + 11%) día**
LAGUNA ANAEROBIA	10,59	9,43	11,75
LAGUNA FACULTATIVA	10,81	9,62	12,00
LAGUNA DE MADURACIÓN	12,16	10,82	13,50
SISTEMA DE LAGUNAS	33,56	29,87	37,25

Hernández Muñoz, Hernández Lehmann, y Galán (2004) mencionan tiempos de retención con un rango de 2 a 5 días en lagunas anaerobias para zonas cálidas con temperaturas mayores a 22 °C. Para las lagunas facultativas Mendoça (2000) recomienda entre 5 a 7 días de retención. En el caso de las lagunas de maduración la OMS (1987) sugiere un tiempo de detención igual o mayor a 5 días.

Por otro lado, Romero (2005) muestra un resumen con los valores típicos de lagunas de estabilización basado en distintos criterios de diseño; el rango de tiempo de retención recomendado para lagunas facultativas y de maduración corresponde a 5-30 días y 5-20 días respectivamente. Por su parte la norma CPE

INEN 5 Parte 9-1(1992) establece el tiempo de retención para lagunas anaerobias de alrededor de 5 días, y un período de retención nominal de 10 días como mínimo de todo el sistema de lagunas de estabilización para una adecuada remoción de nematodos.

Tomando en consideración las sugerencias de cada autor y la norma INEN (1992), se concluye que las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración cumplen con los rangos de tiempo de retención establecidos, dado que sus valores estarían entre 9,43-11,75 días, 9,62-12,00 días y 10,82-13,50 días respectivamente; por otro lado, el tiempo de retención de todo el sistema de lagunas estaría entre los 29,87 a 37,25 días por lo que cumple con el tiempo de retención nominal mínimo que recomienda la norma INEN (1992).

5.3.3. Carga orgánica superficial

La carga orgánica superficial es calculada por la ecuación 1.7 establecida por Mara (2004) para cada laguna, utilizando los resultados de DBO_5 del laboratorio y el caudal promedio obtenidos por los aforos.

$$Carga\ org\acute{a}nica\ \left(\frac{kg}{dia}\right) = \frac{Qmed\left(\frac{l}{s}\right) * DBO_5\left(\frac{mg}{l}\right) * \frac{1kg}{10^6 mg} * \frac{86.400s}{dia}}{A\ superficial\ (ha)}$$

Donde Q medio es el caudal promedio, DBO_5 es el promedio de concentración de DBO_5 en el afluente de la laguna y A superficial es el área de la laguna expresada en ha en el espejo de agua.

$$Carga\ Org\acute{a}nica_{anaerobia} = \frac{18{,}07\frac{l}{s} * 298{,}6\frac{mg}{l} * \frac{1kg}{10^6 mg} * \frac{86.400s}{dia}}{0{,}686264ha}$$

$$Carga\ Org\acute{a}nica_{anaerobia} = 679{,}44\frac{kg\ DBO_5}{ha * dia}$$

$$Carga\ Org\acute{a}nica_{facultativa} = \frac{18{,}07\frac{l}{s} * 124{,}20\frac{mg}{l} * \frac{1kg}{10^6 mg} * \frac{86.400s}{dia}}{1{,}211708ha}$$

$$Carga\ Org\acute{a}nica_{facultativa} = 160{,}06\frac{kg\ DBO_5}{ha * dia}$$

$$Carga\ Orgánica_{maduración} = \frac{18{,}07\frac{l}{s} * 79{,}6\frac{mg}{l} * \frac{1kg}{10^6 mg} * \frac{86.400s}{dia}}{1{,}968974ha}$$

$$Carga\ Orgánica_{maduración} = 63{,}13\frac{kg\ DBO_5}{ha * dia}$$

La norma CPE INEN 5 Parte 9-1 (1992) dicta que para una laguna facultativa la máxima carga superficial antes de convertirse en anaerobia es de 360 kgDBO$_5$/ha*día para temperaturas de aproximadamente 20ºC, mientras que las lagunas anaerobias pueden variar de los 400 a 1.400 kgDBO$_5$/ha*día y las de maduración tienen cargas orgánicas bajas cerca de 50 kgDBO$_5$/ha*día.

Teniendo en cuenta los valores mencionados por la norma INEN (1992) todas las lagunas cumplen con los rangos establecidos para las cargas orgánicas superficiales con valores de 679,44 kgDBO$_5$/ha*día en la laguna anaerobia, 160,06 kgDBO$_5$/ha*día en la facultativa y 63,13 kgDBO$_5$/ha*día en la laguna de maduración.

5.3.4. Carga orgánica volumétrica

Según Mara (2004), la carga orgánica volumétrica es calculada mediante la ecuación 1.23 donde C_o es el DBO$_5$ del afluente, Q_{med} es el caudal medio de la laguna y V_a es el volumen de la misma.

$$\lambda_v = \frac{C_o * Q_{med}}{V_a} \qquad (1.\ 23)$$

A continuación, se realiza el cálculo de la carga orgánica volumétrica tomando en cuenta el caudal medio de la laguna anaerobia de 18,07 l/s, volumen de 16.378,63 m^3 y DBO$_5$ de 298,6 mg/l

$$\lambda_v = \frac{18{,}07\frac{l}{s} * 298{,}6\frac{mg}{l} * \frac{1g}{10^3 mg} * \frac{86.400s}{dia}}{16.378{,}63\ \mathrm{m}^3} = 28{,}47\ g\ DBO/(\mathrm{m}^3 * dia)$$

La norma CPE INEN 5 Parte 9-1 (1992) indica que la carga orgánica volumétrica de diseño para las lagunas anaerobias debe ser de 300 g DBO$_5$/(m^3*día) para temperaturas alrededor de 20°C, al compararlo con el resultado de 28,47 g

$DBO_5/(m^3*día)$ se concluye que la laguna anaerobia tiene una carga orgánica muy inferior a aquella carga de diseño establecida por la norma.

5.3.5. Estimación de la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente

Para estimar analíticamente la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente de la laguna anaerobia, facultativa y de maduración, es importante considerar tanto los modelos de reactor tipo pistón, completamente mezclados y de flujo disperso. Adicionalmente se determinan las concentraciones de los efluentes con los tiempos de retención previamente calculados en la sección 5.3.2 con una estimación máxima y una mínima.

5.3.5.1. Predicción de la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente en las lagunas de estabilización considerando reactores tipo pistón.

Para la obtención de estos parámetros se emplea la ecuación 1.10 y 1.11 que consideran los reactores tipo pistón (Mendoça, 2000).

a) Estimación de DBO_5 en el efluente por

$$C_e = C_0 e^{-K_T t}$$

$$K_T = K_{20}\theta^{(T-20)}$$

Donde

C_e= DBO_5 del efluente (mg/l)

C_o= DBO_5 del afluente (mg/l)

K_T= coeficiente de remoción de DBO ($día^{-1}$)

t= tiempo de retención (día)

K_{20}= coeficiente de remoción de DBO_5 a 20°C= 0,6 d^{-1} (INEN, 1992)

θ = 1,07 (INEN, 1992).

Para determinar el DBO_5 del efluente, se debe calcular el coeficiente de remoción de cada laguna, tomando en cuenta la temperatura media diaria medida junto con los valores K_{20} y θ recomendados por la normativa.

Una vez definido el coeficiente se procede a calcular la DBO_5 del efluente aplicando la ecuación 1.10. A continuación se muestra el cálculo de la primera laguna de estabilización en el primer día adoptando la temperatura de 26,4°C.

$$K_{26,4} = 0{,}6d^{-1}(1{,}07)^{26{,}4°C-20°C} = 0{,}92514d^{-1}$$

$$C_e min = 258\frac{mg}{l} * e^{-0{,}92514d^{-1}*9{,}21d} = 0{,}0514\frac{mg}{l}$$

En la tabla 17, 18 y 19 se muestran los resultados de las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración respectivamente para DBO_5 con reactores de tipo pistón.

Tabla 17. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna anaerobia con reactor tipo pistón.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	t máx. día	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 efluente (máx.) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	258	9,21	11,49	5,14E-02	6,24E-03	86
2	29/11/2021	26,7	0,94411	149	8,88	11,08	3,41E-02	4,27E-03	155
3	6/12/2021	26,78	0,94923	460	10,43	13,01	2,31E-02	1,99E-03	102
5	20/12/2021	24,15	0,79450	203	8,79	10,97	1,88E-01	3,33E-02	127
6	17/5/2022	23,9	0,78117	423	9,76	12,18	2,07E-01	3,12E-02	151
PROMEDIO							1,01E-01	1,54E-02	124,20

Tabla 18. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna facultativa con reactor tipo pistón.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	t máx. día	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 efluente (máx.) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	86	9,41	11,73	1,42E-02	1,67E-03	44
2	29/11/2021	26,7	0,94411	155	9,07	11,31	2,96E-02	3,57E-03	87
3	6/12/2021	26,78	0,94923	102	10,64	13,28	4,19E-03	3,42E-04	119
5	20/12/2021	24,15	0,79450	127	8,98	11,20	1,01E-01	1,73E-02	76
6	17/5/2022	23,9	0,78117	151	9,97	12,43	6,26E-02	9,16E-03	72
PROMEDIO							4,24E-02	6,42E-03	79,60

Tabla 19. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna de maduración con reactor tipo pistón

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	t máx. día	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 efluente (máx.) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	44	10,58	13,2	2,47E-03	2,19E-04	59
2	29/11/2021	26,7	0,94411	87	10,20	12,72	5,72E-03	5,30E-04	59
3	6/12/2021	26,78	0,94923	119	11,97	14,93	1,38E-03	8,33E-05	48
5	20/12/2021	24,15	0,79450	76	10,09	12,59	2,51E-02	3,44E-03	35
6	17/5/2022	23,9	0,78117	72	11,21	13,99	1,13E-02	1,29E-03	132
PROMEDIO							9,20E-03	1,11E-03	66,60

b) Cálculo de coliformes fecales en el efluente utilizando las fórmulas 1.9 y 1.11

$$CF_e = CF_0 e^{-K_b t}$$

$$K_b = K_{b20}\Theta^{(T-20)}$$

Donde

C_e= concentración de coliformes fecales del efluente (NMP/100ml)

C_o= concentración de coliformes fecales del afluente (NMP/100ml)

K_b= coeficiente de remoción de coliformes fecales (d^{-1})

t= tiempo de retención (d)

K_{b20}= coeficiente de remoción de coliformes fecales a 20°C= 0,55 d^{-1} para lagunas anaerobias según la carga orgánica superficial calculada en la sección 5.3.3 (INEN, 1992, pág. 237); 1,1 d^{-1} recomendado para lagunas facultativas y de maduración (INEN, 1992, pág. 239).

θ = 1,07 (INEN, 1992).

Para establecer la concentración teórica de coliformes fecales del efluente del sistema se utilizaron las ecuaciones 1.10 y 1.11 aplicando los valores del primer muestreo con una temperatura promedio de 26,4 °C, el valor del afluente de

coliformes fecales para la primera laguna 2,80E+04 NMP/100ml y K_{20} de 0,55 d^{-1}.

$$K_{26,4} = 0{,}55d^{-1}(1{,}07)^{26{,}4°C-20°C} = 0{,}84804d^{-1}$$

$$C_e min = 2{,}80x10^4 \frac{NMP}{100ml} * e^{-0{,}84804d^{-1}*9{,}21d} = 5{,}58\frac{NMP}{100ml}$$

Los resultados de la predicción de coliformes fecales en el afluente junto con los valores reales obtenidos del laboratorio se encuentran en las tablas de resumen 20, 21 y 22 para cada laguna considerando reactores tipo pistón.

Tabla 20. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna anaerobia con reactor tipo pistón

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	T máx. día	CF efluente (min) NMP/100ml	CF efluente (máx.) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	0,84804	2,80E+04	9,21	11,49	1,14E+01	1,64E+00	2,40E+05
2	29/11/2021	26,7	0,86543	2,40E+05	8,88	11,08	1,10E+02	1,64E+01	2,20E+04
3	6/12/2021	26,78	0,87013	2,40E+05	10,43	13,01	2,75E+01	2,91E+00	9,20E+04
4	13/12/2021	25,95	0,82261	1,70E+04	9,48	11,82	6,98E+00	1,02E+00	7,90E+03
5	20/12/2021	24,15	0,72829	2,80E+04	8,79	10,97	4,64E+01	9,49E+00	2,40E+05
PROMEDIO							4,05E+01	6,30E+00	1,20E+05

Tabla 21. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna facultativa con reactor tipo pistón

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	t máx. día	CF efluente (min) NMP/100ml	CF efluente (máx.) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	1,69609	2,40E+05	9,41	11,73	2,81E-02	5,49E-04	5,40E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	2,20E+04	9,07	11,31	3,35E-03	6,93E-05	5,40E+04
3	6/12/2021	26,78	1,74026	9,20E+04	10,64	13,28	8,36E-04	8,45E-06	2,40E+04
4	13/12/2021	25,95	1,64523	7,90E+03	9,67	12,07	9,73E-04	1,88E-05	2,20E+04
5	20/12/2021	24,15	1,45658	2,40E+05	8,98	11,2	5,01E-01	1,97E-02	3,40E+04
PROMEDIO							1,07E-01	4,08E-03	3,76E+04

Tabla 22. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna de maduración con reactor tipo pistón

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	t máx. día	CF efluente (min) NMP/100ml	CF efluente (máx.) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	1,69609	5,40E+04	10,58	13,2	8,69E-04	1,02E-05	2,20E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	5,40E+04	10,2	12,72	1,16E-03	1,48E-05	1,00E+03
3	6/12/2021	26,78	1,74026	2,40E+04	11,97	14,93	2,16E-05	1,25E-07	2,00E+03
4	13/12/2021	25,95	1,64523	2,20E+04	10,88	13,58	3,70E-04	4,36E-06	4,90E+03
5	20/12/2021	24,15	1,45658	3,40E+04	10,09	12,59	1,41E-02	3,69E-04	1,80E+04
PROMEDIO							3,30E-03	7,97E-05	9,58E+03

5.3.5.2. Predicción de la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente en las lagunas de estabilización considerando reactores completamente mezclados.

Al considerar los reactores completamente mezclados se utiliza la ecuación 1.11 y 1.13 según Romero (1999) para estimar tanto la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente de las lagunas.

a) Estimación de DBO_5 en el efluente

$$C_e = \frac{C_0}{1 + K_T * t}$$

$$K_T = K_{20}\theta^{(T-20)}$$

Donde

C_e= DBO_5 del efluente (mg/l)

C_0= DBO_5 del afluente (mg/l)

K_T= coeficiente de remoción de DBO_5 (d^{-1})

t= tiempo de retención (d)

K_{20}= coeficiente de remoción de DBO_5 a 20°C =0,6 d^{-1} (INEN, 1992)

θ = 1,07 (INEN, 1992)

Para el cálculo del DBO_5 en el efluente del primer día de la primera laguna, se calcula la velocidad de remoción de DBO_5 con los valores K_{20} y θ establecidos y la temperatura media del primer día 26,4°C.

$$K_{26,4} = 0{,}6d^{-1}(1{,}07)^{26{,}4°C-20°C} = 0{,}92514\ d^{-1}$$

A continuación, se determina la concentración del efluente teórico con los valores del afluente 258 mg/l y tiempo de retención 9,21 días de la primera laguna.

$$C_e min = \frac{258\frac{mg}{l}}{1 + 0{,}92514d^{-1} * 9{,}21\ d} = 27{,}10\ \frac{mg}{l}$$

Los resultados del DBO_5 del efluente teórico se encuentran en las tablas 23, 24 y 25 para las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración.

Tabla 23. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna anaerobia con reactor completamente mezclado.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	t máx. día	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 efluente (máx.) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	258	9,21	11,49	27,10	22,18	86
2	29/11/2021	26,7	0,94411	149	8,88	11,08	15,88	13,00	155
3	6/12/2021	26,78	0,94923	460	10,43	13,01	42,20	34,46	102
5	20/12/2021	24,15	0,79450	203	8,79	10,97	25,43	20,89	127
6	17/5/2022	23,9	0,78117	423	9,76	12,18	49,05	40,23	151
PROMEDIO							31,93	26,15	124,20

Tabla 24. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna facultativa con reactor completamente mezclado.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	t máx. día	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 efluente (máx.) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	86	9,41	11,73	8,86	7,26	44
2	29/11/2021	26,7	0,94411	155	9,07	11,31	16,21	13,27	87
3	6/12/2021	26,78	0,94923	102	10,64	13,28	9,19	7,50	119
5	20/12/2021	24,15	0,79450	127	8,98	11,20	15,61	12,83	76
6	17/5/2022	23,9	0,78117	151	9,97	12,43	17,18	14,10	72
PROMEDIO							13,41	10,99	79,60

Tabla 25. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna de maduración con reactor completamente mezclado.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	t máx. día	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 efluente (máx.) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	44	10,58	13,2	4,08	3,33	59
2	29/11/2021	26,7	0,94411	87	10,20	12,72	8,18	6,69	59
3	6/12/2021	26,78	0,94923	119	11,97	14,93	9,63	7,84	48
5	20/12/2021	24,15	0,79450	76	10,09	12,59	8,43	6,91	35
6	17/5/2022	23,9	0,78117	72	11,21	13,99	7,38	6,04	132
PROMEDIO							7,54	6,16	66,60

b) Estimación de coliformes fecales en el efluente según Romero (1999) donde se utilizan las ecuaciones 1.11 y 1.12 respectivamente

$$CF_e = \frac{CF_0}{1 + K_b * t}$$

$$K_b = K_{b20}\Theta^{(T-20)}$$

Donde

C_e= concentración de coliformes fecales del efluente (NMP/100ml)

C_o= concentración de coliformes fecales del afluente (NMP/100ml)

K_b= coeficiente de remoción de coliformes fecales (d^{-1})

t= tiempo de retención (d)

K_{20}= coeficiente de remoción de coliformes fecales a 20 ºC= 0,55 d^{-1} para lagunas anaerobias según la carga orgánica superficial calculada en la sección 5.3.3 (INEN, 1992, pág. 237); 1,1 d^{-1} recomendado para lagunas facultativas y de maduración (INEN, 1992, pág. 239).

θ = 1,07 (INEN, 1992)

Al calcular la constante de velocidad de remoción de coliformes fecales se considera una temperatura media diaria de 26,4°C, K_{b20}=0,55 d^{-1} y θ = 1,07 para la primera laguna.

$$K_{26,4} = 0{,}55d^{-1}(1{,}07)^{26{,}4°C-20°C} = 0{,}84804d^{-1}$$

Se evalúa la cantidad de coliformes fecales en el efluente de la primera laguna con la concentración del afluente de 2,80E+04(NMP/100ml) y tiempo de retención 9,21 días

$$CF_e = \frac{2{,}80x10^4 \frac{NMP}{100ml}}{1 + 0{,}84804d^{-1} * 9{,}21\ d} = 3{,}18x10^3 \frac{NMP}{100ml}$$

Las tablas 26, 27 y 28 muestran los resultados de los coliformes fecales de las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración expresadas en NMP/100ml.

Tabla 26. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna anaerobia con reactor completamente mezclado.

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	t máx. día	CF efluente (min) NMP/100ml	CF efluente (máx.) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	0,84804	2,80E+04	9,21	11,49	3,18E+03	2,61E+03	2,40E+05
2	29/11/2021	26,7	0,86543	2,40E+05	8,88	11,08	2,76E+04	2,27E+04	2,20E+04
3	6/12/2021	26,78	0,87013	2,40E+05	10,43	13,01	2,38E+04	1,95E+04	9,20E+04
4	13/12/2021	25,95	0,82261	1,70E+04	9,48	11,82	1,93E+03	1,59E+03	7,90E+03
5	20/12/2021	24,15	0,72829	2,80E+04	8,79	10,97	3,78E+03	3,11E+03	2,40E+05
PROMEDIO							1,21E+04	9,89E+03	1,20E+05

Tabla 27. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna facultativa con reactor completamente mezclado.

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	t máx. día	CF efluente (min) NMP/100ml	CF efluente (máx.) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	1,69609	2,40E+05	9,41	11,73	1,42E+04	1,15E+04	5,40E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	2,20E+04	9,07	11,31	1,32E+03	1,07E+03	5,40E+04
3	6/12/2021	26,78	1,74026	9,20E+04	10,64	13,28	4,71E+03	3,82E+03	2,40E+04
4	13/12/2021	25,95	1,64523	7,90E+03	9,67	12,07	4,67E+02	3,79E+02	2,20E+04
5	20/12/2021	24,15	1,45658	2,40E+05	8,98	11,2	1,70E+04	1,39E+04	3,40E+04
PROMEDIO							7,54E+03	6,12E+03	3,76E+04

Tabla 28. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna de maduración con reactor completamente mezclado

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	t máx. día	CF efluente (min) NMP/100ml	CF efluente (máx.) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	1,69609	5,40E+04	10,58	13,2	2,85E+03	2,31E+03	2,20E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	5,40E+04	10,2	12,72	2,89E+03	2,35E+03	1,00E+03
3	6/12/2021	26,78	1,74026	2,40E+04	11,97	14,93	1,10E+03	8,89E+02	2,00E+03
4	13/12/2021	25,95	1,64523	2,20E+04	10,88	13,58	1,16E+03	9,42E+02	4,90E+03
5	20/12/2021	24,15	1,45658	3,40E+04	10,09	12,59	2,17E+03	1,76E+03	1,80E+04
PROMEDIO							2,03E+03	1,65E+03	9,58E+03

5.3.5.3. Predicción de la concentración de DBO_5 y coliformes fecales en el efluente en las lagunas de estabilización considerando reactores con flujo disperso.

La predicción de la calidad del efluente considerando flujo disperso se determina con la ecuación 1.24 según Mendoça (2000):

a) Estimación de DBO_5 en el efluente:

$$C_e = C_o * \left(\frac{4 * ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} \right) \qquad (1.\ 24)$$

$$K_{T,b} = K_{20}\theta^{(T-20)}$$

C_e= DBO_5 del efluente (mg/l)

C_o= DBO_5 del afluente (mg/l

K_T= coeficiente de remoción de DBO (d^{-1})

t= tiempo de retención (d)

K_{20}= coeficiente de remoción de DBO_5 a 20°C =0,6 d^{-1} (INEN, 1992)

θ = 1,07 (INEN, 1992)

d= coeficiente de dispersión

a= $\sqrt{1 + 4K_t td}$

El coeficiente de dispersión es seleccionado según la relación largo/ancho de cada laguna como lo indica la norma INEN (1992) representado en la tabla 3 de la sección 3.5.3. El cálculo de la relación largo/ancho promedio de cada laguna se presenta a continuación determinando el coeficiente seleccionado para las lagunas anaerobia, facultativa y de maduración

a) Laguna anaerobia

$$\frac{Lpromedio}{Wpromedio} = \frac{97{,}55\ m}{70{,}35\ m} = 1{,}387$$

b) Laguna facultativa

$$\frac{Lpromedio}{Wpromedio} = \frac{120{,}64\ m}{100{,}44\ m} = 1{,}201$$

c) Laguna de maduración

$$\frac{Lpromedio}{Wpromedio} = \frac{200{,}67\ m}{98{,}12\ m} = 2{,}045$$

Dados los resultados de los cálculos se determina que el coeficiente de dispersión correspondientes a la laguna anaerobia y facultativa es de 1, mientras que para laguna de maduración es de 0,5.

A continuación, se determina la DBO_5 y coliformes fecales del efluente para flujo disperso con K_{20}=0,6 d^{-1} y los valores de tiempo de retención, DBO_5 y coliformes fecales del afluente para la primera laguna durante el primer día de muestreo.

$$K_{26,4} = 0{,}6d^{-1} * 1{,}07^{(26{,}4-20)}$$

$$K_{26,4} = 0{,}92514\ d^{-1}$$

Cálculo de a:

$$a = \sqrt{1 + 4 * 0{,}92514\ d^{-1} * 9{,}21d * 1}$$

$$a = 5{,}92302$$

Estimación de DBO_5 en el efluente para la laguna anaerobia:

$$C_e min = 258\ \frac{mg}{l} * \left(\frac{4 * 5{,}92302 * e^{(1-5{,}92302)/2*1}}{(1+5{,}92302)^2}\right)$$

$$C_e min = 10{,}88 \frac{mg}{l}$$

Los resultados del DBO_5 del efluente para las lagunas de estabilización calculado se encuentran en las tablas 29, 30 y 31.

Tabla 29. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna anaerobia con reactor de flujo disperso.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	a	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	258	9,21	5,92302	10,88	86
2	29/11/2021	26,7	0,94411	149	8,88	5,87663	6,47	155
3	6/12/2021	26,78	0,94923	460	10,43	6,37197	14,70	102
5	20/12/2021	24,15	0,79450	203	8,79	5,37909	12,02	127
6	17/5/2022	23,9	0,78117	423	9,76	5,61222	21,64	151
PROMEDIO							13,14	124,20
Día	**Fecha**	**Temperatura media °C**	**KT 1/día**	**DBO_5 afluente mg/l**	**t máx. día**	**a**	**DBO_5 efluente (máx.) mg/l**	**DBO_5 laboratorio mg/l**
1	22/11/2021	26,4	0,92514	258	11,49	6,59693	7,18	86
2	29/11/2021	26,7	0,94411	149	11,08	6,54545	4,28	155
3	6/12/2021	26,78	0,94923	460	13,01	7,09916	9,43	102
5	20/12/2021	24,15	0,79450	203	10,97	5,98854	8,22	127
6	17/5/2022	23,9	0,78117	423	12,18	6,24971	14,58	151
PROMEDIO							8,74	124,20

Tabla 30. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna facultativa con reactor de flujo disperso.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	a	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	86	9,41	5,98517	3,49	44
2	29/11/2021	26,7	0,94411	155	9,07	5,93737	6,48	87
3	6/12/2021	26,78	0,94923	102	10,64	6,43424	3,14	119
5	20/12/2021	24,15	0,79450	127	8,98	5,43493	7,26	76
6	17/5/2022	23,9	0,78117	151	9,97	5,67038	7,45	72
PROMEDIO							5,56	79,60
Día	**Fecha**	**Temperatura media °C**	**KT 1/día**	**DBO_5 afluente mg/l**	**t máx. día**	**a**	**DBO_5 efluente (máx.) mg/l**	**DBO_5 laboratorio mg/l**
1	22/11/2021	26,4	0,92514	86	11,73	6,66390	2,30	44
2	29/11/2021	26,7	0,94411	155	11,31	6,61147	4,28	87
3	6/12/2021	26,78	0,94923	102	13,28	7,17100	2,00	119
5	20/12/2021	24,15	0,79450	127	11,2	6,04926	4,95	76
6	17/5/2022	23,9	0,78117	151	12,43	6,31189	5,01	72
PROMEDIO							3,71	79,60

Tabla 31. Predicción de DBO_5 del efluente para laguna de maduración con reactor de flujo disperso.

Día	Fecha	Temperatura media °C	KT 1/día	DBO_5 afluente mg/l	t min día	a	DBO_5 efluente (min) mg/l	DBO_5 laboratorio mg/l
1	22/11/2021	26,4	0,92514	44	10,58	4,53607	10,76	59
2	29/11/2021	26,7	0,94411	87	10,20	4,50109	21,57	59
3	6/12/2021	26,78	0,94923	119	11,97	4,87080	25,56	48
5	20/12/2021	24,15	0,79450	76	10,09	4,12711	21,84	35
6	17/5/2022	23,9	0,78117	72	11,21	4,30278	19,30	132
PROMEDIO							19,81	66,60
Día	**Fecha**	**Temperatura media °C**	**KT 1/día**	**DBO_5 afluente mg/l**	**t máx. día**	**a**	**DBO_5 efluente (máx.) mg/l**	**DBO_5 laboratorio mg/l**
1	22/11/2021	26,4	0,92514	44	13,20	5,04219	8,85	59
2	29/11/2021	26,7	0,94411	87	12,72	5,00182	17,77	59
3	6/12/2021	26,78	0,94923	119	14,93	5,41702	20,76	48
5	20/12/2021	24,15	0,79450	76	12,59	4,58318	18,25	35
6	17/5/2022	23,9	0,79450	72	13,99	4,81976	15,77	132
PROMEDIO							16,28	66,60

b) Predicción de coliformes fecales en el efluente mediante la siguiente ecuación:

$$C_e = C_o * \left(\frac{4 * ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} \right) \quad (1.\ 25)$$

$$K_b = K_{20}\theta^{(T-20)}$$

C_e= concentración de coliformes fecales del efluente (NMP/100ml)

C_o= concentración de coliformes fecales del afluente (NMP/100ml)

K_b= coliformes fecales (d^{-1})

t= tiempo de retención (d)

K_{20}= coeficiente de remoción de coliformes fecales a 20°C =0,55 d^{-1} para lagunas anaerobias según la carga orgánica superficial calculada en la sección 5.3.3 (INEN, 1992, pág. 237); 1,1 d^{-1} recomendado para lagunas facultativas y de maduración (INEN, 1992, pág. 239).

θ = 1,07 (INEN, 1992)

d= coeficiente de dispersión

a= $\sqrt{1 + 4K_t td}$

Cálculo de

$$K_{26,4} = 0{,}55d^{-1} * 1{,}07^{(26,4-20)}$$

$$K_{26,4} = 0{,}92514\ d^{-1}$$

Cálculo de a:

$$a = \sqrt{1 + 4 * 0{,}92514\ d^{-1} * 9{,}21d * 1}$$

$$a = 5{,}92302$$

Estimación de coliformes fecales en el efluente:

$$C_e = 2{,}80x10^4 \frac{NMP}{100\ ml} * \left(\frac{4 * 5{,}92302 * e^{(1-5,92302)/2*1}}{(1+5{,}92302)^2} \right)$$

$$C_e = 1{,}18x10^3 \frac{NMP}{100\ ml}$$

Tabla 32. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna anaerobia con reactor de flujo disperso.

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	a	CF efluente (min) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	0,84804	2,80E+04	9,21	5,67820	1,37E+03	2,40E+05
2	29/11/2021	26,7	0,86543	2,40E+05	8,88	5,63385	1,21E+04	2,20E+04
3	6/12/2021	26,78	0,87013	2,40E+05	10,43	6,10753	9,03E+03	9,20E+04
4	13/12/2021	25,95	0,82261	1,70E+04	9,48	5,67393	8,37E+02	7,90E+03
5	20/12/2021	24,15	0,72829	2,80E+04	8,79	5,15817	1,90E+03	2,40E+05
PROMEDIO							5,05E+03	1,20E+05
Día	**Fecha**	**Temperatura media °C**	**Kb 1/día**	**CF afluente NMP/100ml**	**t máx. día**	**a**	**CF efluente (máx.) NMP/100ml**	**CF laboratorio NMP/100ml**
1	22/11/2021	26,4	0,84804	2,80E+04	11,49	6,32267	9,23E+02	2,40E+05
2	29/11/2021	26,7	0,86543	2,40E+05	11,08	6,27344	8,15E+03	2,20E+04
3	6/12/2021	26,78	0,87013	2,40E+05	13,01	6,80306	5,89E+03	9,20E+04
4	13/12/2021	25,95	0,82261	1,70E+04	11,82	6,31611	5,62E+02	7,90E+03
5	20/12/2021	24,15	0,72829	2,80E+04	10,97	5,74086	1,32E+03	2,40E+05
PROMEDIO							3,37E+03	1,20E+05

Tabla 33. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna facultativa con reactor de flujo disperso.

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	a	CF efluente (min) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	1,69609	2,40E+05	9,41	8,05238	2,78E+03	5,40E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	2,20E+04	9,07	7,98723	2,64E+02	5,40E+04
3	6/12/2021	26,78	1,74026	9,20E+04	10,64	8,66404	7,40E+02	2,40E+04
4	13/12/2021	25,95	1,64523	7,90E+03	9,67	8,03974	9,20E+01	2,20E+04
5	20/12/2021	24,15	1,45658	2,40E+05	8,98	7,30209	4,35E+03	3,40E+04
PROMEDIO							1,64E+03	3,76E+04
Día	**Fecha**	**Temperatura media °C**	**Kb 1/día**	**CF afluente NMP/100ml**	**t máx. día**	**a**	**CF efluente (máx.) NMP/100ml**	**CF laboratorio NMP/100ml**
1	22/11/2021	26,4	1,69609	2,40E+05	11,73	8,97667	1,60E+03	5,40E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	2,20E+04	11,31	8,90531	1,53E+02	5,40E+04
3	6/12/2021	26,78	1,74026	9,20E+04	13,28	9,66658	4,10E+02	2,40E+04
4	13/12/2021	25,95	1,64523	7,90E+03	12,07	8,96837	5,31E+01	2,20E+04
5	20/12/2021	24,15	1,45658	2,40E+05	11,2	8,13971	2,63E+03	3,40E+04
PROMEDIO							9,71E+02	3,76E+04

Tabla 34. Predicción de coliformes fecales del efluente para laguna de maduración con reactor de flujo disperso.

Día	Fecha	Temperatura media °C	Kb 1/día	CF afluente NMP/100ml	t min día	a	CF efluente (min) NMP/100ml	CF laboratorio NMP/100ml
1	22/11/2021	26,4	1,69609	5,40E+04	10,58	6,07365	7,37E+03	2,20E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	5,40E+04	10,2	6,02575	7,51E+03	1,00E+03
3	6/12/2021	26,78	1,74026	2,40E+04	11,97	6,53161	2,77E+03	2,00E+03
4	13/12/2021	25,95	1,64523	2,20E+04	10,88	6,06631	3,01E+03	4,90E+03
5	20/12/2021	24,15	1,45658	3,40E+04	10,09	5,51306	5,72E+03	1,80E+04
PROMEDIO							5,28E+03	9,58E+03
Día	**Fecha**	**Temperatura media °C**	**Kb 1/día**	**CF afluente NMP/100ml**	**t min día**	**a**	**CF efluente (máx.) NMP/100ml**	**CF laboratorio NMP/100ml**
1	22/11/2021	26,4	1,69609	5,40E+04	13,2	6,76585	5,73E+03	2,20E+04
2	29/11/2021	26,7	1,73087	5,40E+04	12,72	6,71068	1,40E+03	1,00E+03
3	6/12/2021	26,78	1,74026	2,40E+04	14,93	7,27765	4,42E+02	2,00E+03
4	13/12/2021	25,95	1,64523	2,20E+04	13,58	6,75902	5,55E+02	4,90E+03
5	20/12/2021	24,15	1,45658	3,40E+04	12,59	6,13814	1,26E+03	1,80E+04
PROMEDIO							1,88E+03	9,58E+03

5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CAMPO VERSUS PREDICCIÓN CON MODELACIÓN MATEMÁTICA DE CALIDAD DEL EFLUENTE.

Las tablas 35 y 36 muestran los resultados de laboratorio promedio y la predicción de la calidad del efluente tanto de DBO_5 como de coliformes fecales para las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte considerando reactores con flujo pistón, completamente mezclado y flujo disperso.

Tabla 35. Tabla de resumen y comparación de la concentración de DBO_5 calculado en el efluente con los resultados obtenidos en laboratorio

LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	Flujo pistón		Completamente mezclado		Flujo disperso		Efluente de laboratorio mg/l
	Efluente calculado mg/l		Efluente calculado mg/l		Efluente calculado mg/l		
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
ANAEROBIA	1,01E-01	1,54E-02	31,93	26,15	13,14	8,74	124,2
FACULTATIVA	4,24E-02	6,42E-03	13,41	10,99	5,56	3,71	79,6
MADURACIÓN	9,20E-03	1,11E-03	7,54	6,16	19,81	16,28	66,6

Tabla 36. Tabla de resumen y comparación de la predicción de coliformes fecales calculados en el efluente con los resultados obtenidos en laboratorio.

LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	Flujo pistón		Completamente mezclado		Flujo disperso		Efluente de laboratorio NMP/1000ml
	Efluente calculado NMP/1000ml		Efluente calculado NMP/1000ml		Efluente calculado NMP/1000ml		
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
ANAEROBIA	4,05E+01	6,30E+00	1,21E+04	9,89E+03	5,05E+03	3,37E+03	1,20E+05
FACULTATIVA	1,07E-01	4,08E-03	7,54E+03	6,12E+03	1,64E+03	9,71E+02	3,76E+04
MADURACIÓN	3,30E-03	7,97E-05	2,03E+03	1,65E+03	5,28E+03	1,88E+03	9,58E+03

Tal y como se muestra en las tablas, los valores promedio obtenidos del laboratorio para cada laguna son significativamente mayores a las predicciones calculadas. Existen múltiples razones que explican esta diferencia de valores, una de ellas puede ser la velocidad teórica a la que el reactor remueve los coliformes fecales y la DBO_5, pues en el cálculo esta velocidad se la considera como una constante, mientras que en el campo esta velocidad varía en función de las condiciones ambientales a las que se someten las lagunas.

Además, en los reactores ideales de flujo pistón no se considera dispersión y en el de mezcla completa se considera que el reactor tiene una mezcla homogénea en todos las partes de la laguna, es decir, para el cálculo de los efluentes las condiciones de dispersión y mezcla son ideales, lo cual, dista mucho de las circunstancias reales en las que se encuentran las lagunas de estabilización; por otro lado, el flujo disperso es difícil de predecir dado que cada segmento de las lagunas de estabilización están sometidas a condiciones diferentes, la velocidad del flujo es variada y el tiempo de retención hidráulica también, es por esto que la calidad del efluente calculada difiere de la calidad obtenida por ensayos de laboratorio.

Por otro lado, se observa también que las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte se alejan mucho a lo que deben ser los reactores ideales, ya que el poco mantenimiento ha cambiado el funcionamiento de las mismas y los valores teóricos de k utilizados no responden a las condiciones de campo actuales, pues estos se aplican en condiciones ideales.

5.5. VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA DE DESCARGAS Y USOS DEL AGUA.

Los resultados de laboratorio fueron comparados con el Acuerdo Ministerial No. 097-A publicado en el Registro Oficial de la República del Ecuador N°387 en 2015, con el objetivo de determinar si el efluente del sistema de lagunas en serie de la ciudad de Rocafuerte es apto para diferentes usos.

Para el uso de aguas residuales tratadas en actividades agrícolas o de riego, el Anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente sustituido por el Acuerdo Ministerial No. 097 indica en el artículo 5.1.3 que los valores de coliformes fecales expresados en NMP/100ml debe ser menor que 1.000. El efluente del sistema de lagunas de estabilización arroja un resultado promedio de 9.580 NMP/100ml por lo que no logra cumplir con el criterio de calidad objetivo.

El artículo 5.2.4 del Acuerdo Ministerial No. 097 detalla que el límite máximo permisible de DBO_5 y de coliformes fecales para las descargas en cuerpos de agua dulce es de 100 mg/l y 2.000 NMP/100ml, respectivamente. Aunque el valor de DBO_5 del efluente de la laguna de maduración del sistema de tratamiento de aguas residuales de Rocafuerte sea de 66,6 mg/l y cumple con lo que dicta la normativa, los resultados de coliformes fecales de 9.580 NMP/100ml sobrepasan lo recomendado, por lo tanto, según los resultados, tendría que mejorarse la calidad microbiológica del efluente para descargarlo en los cuerpos de agua dulce cercanos.

En el caso de los sólidos suspendidos, el artículo 5.2.4 del Acuerdo Ministerial No. 097 indica que el límite de descarga en cuerpos de agua dulce para los sólidos suspendidos es de 130 mg/l. Dado que los resultados de laboratorio muestran un valor promedio de 94,6 mg/l se considera que el efluente del sistema de depuración si cumple con lo que dicta la norma para este parámetro.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Al realizar los aforos en el efluente de la laguna anaerobia y de maduración se determinó que el caudal promedio del sistema de lagunas de estabilización fue de 18,07 L/s. Los resultados de los análisis de laboratorio de DBO_5 manifiestan que la carga orgánica superficial de la laguna anaerobia, facultativa y de maduración del sistema de depuración de aguas residuales es de 679,44 kg DBO_5/ha*día, 160,06 kg DBO_5/ha*día y 63,13 kg DBO_5/ha*día respectivamente. La carga orgánica volumétrica por otro lado arrojó un resultado de 28,47 g DBO_5/día*m^3 en la laguna anaerobia.
- Los tiempos de retención promedio estimados para cada laguna de estabilización dieron como resultado de 10,59 días para la laguna anaerobia, 10,81 días para laguna facultativa y 12,16 días para la laguna de maduración.
- La eficiencia media de remoción total del sistema de lagunas de estabilización en serie de la ciudad de Rocafuerte para DBO_5, coliformes fecales y sólidos suspendidos es de 77,7%, 91,3% y 79,4% respectivamente.
- En la laguna anaerobia se observa escaso mantenimiento y por el poco control en el ingreso de las instalaciones, algunos criaderos de bovinos, porcinos y avícolas descargan sus desechos en esa laguna.
- La eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos se ha visto afectada en la laguna facultativa debido al poco mantenimiento que se le da al sistema de depuración de aguas residuales en general y al crecimiento de plantas macrófitas y especies de aves como patos que dejan sus desechos en la superficie de la laguna.
- Los resultados promedio de coliformes fecales, DBO_5 y sólidos suspendidos en el efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales fueron de $9,58x10^3$ NMP/100ml, 66,6 mg/l y 94,6 mg/l, respectivamente. En la modelación matemática de la calidad del efluente y con los valores de constantes cinéticas adoptados no se reprodujeron los valores medidos en campo.

- Al comparar los resultados del efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales, se determina que las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte en la provincia de Manabí no cumplen los límites máximos permisibles de coliformes fecales tanto para la descarga en cuerpos de agua dulce como para uso agrícola establecidos por la normativa vigente; sin embargo, el valor de DBO_5 y sólidos suspendidos si se encuentran dentro del rango establecido por el Acuerdo Ministerial N°97. Registro oficial N°387 para descarga en cuerpos de agua dulce.

6.2. RECOMENDACIONES

- Al realizar las visitas de campo a las lagunas de estabilización se observó que es necesario aumentar la seguridad y el control en el ingreso a las instalaciones del sistema de lagunas para evitar inconvenientes en el funcionamiento de las lagunas debido a las descargas indiscriminadas de aguas servidas provenientes de granjas avícolas, bovinas y porcinas realizado por personas externas a la entidad encargada del funcionamiento de las lagunas de estabilización.
- Las sistema para tratamiento de aguas residuales empleado en la ciudad de Rocafuerte, provincia de Manabí, consiste en tres lagunas que trabajan en serie, una anaerobia, una facultativa y una de maduración, sin embargo, no cuenta con tratamiento preliminar por lo que es necesario agregar dicho tratamiento al sistema de lagunas para mejorar su eficiencia, una buena alternativa a esto es colocar rejillas en la entrada a la laguna anaerobia que separen los sólidos de mayor tamaño del agua residual cruda y prevengan futuras obstrucciones en las tuberías.
- Al inspeccionar el estado de las lagunas de estabilización se observó que las mismas no reciben mantenimiento regularmente por lo que se recomienda realizar con regularidad actividades de mantenimiento relacionadas con el tratamiento de aguas residuales como la remoción anual de lodos acumulados en la laguna anaerobia, control de plantas macrófitas (laguna facultativa y de maduración), estabilización de taludes para mejorar el rendimiento de las mismas, reducir la cantidad de maleza en los alrededores y recolección de basura para disminuir el número de plagas (mosquitos, moscas, etc.).
- Una vez realizados los ensayos de laboratorio y de constatar que el sistema de lagunas de estabilización no cumple con los parámetros impuestos por la normativa ecuatoriana para la descarga de aguas residuales tratadas en cuerpos de agua y el riego de cultivos se debe considerar la posibilidad de implementar una cuarta laguna de estabilización o segunda laguna de maduración, con el objetivo de mejorar la eficacia del sistema en serie de lagunas y cumplir con los valores límites que requiere la norma vigente.

- Al realizar los aforos volumétricos en las lagunas de estabilización no fue posible recolectar información de los caudales en la entrada de todos los estanques por lo que se recomienda instalar vertederos tanto en la entrada como la salida del mismo para realizar los aforos con mayor precisión.
- Al examinar los elementos de cada laguna se observó que las entradas de las lagunas facultativa y de maduración tienen desperfectos que se deben cambiar ya que las tuberías que conducen el agua de una laguna a otra se encuentran muy lejos del espejo de agua, esto puede provocar acumulación de lodos, vegetación u otros residuos que obstruyen el paso del agua residual hacia el estanque, por lo que es necesario que las tuberías por donde pasa el caudal de entrada se encuentren sumergidas a poca profundidad con respecto la superficie del agua para que funcionen correctamente.
- Es recomendable efectuar controles de calidad del agua residual tratada periódicamente de los parámetros DBO_5, CF, SS, para monitorear la eficacia de las lagunas de estabilización como método de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Rocafuerte.

BIBLIOGRAFÍA

Crites, R. W., y Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones.* Santa fe de Bogota: McGraw-hill Interamericana S.A.

Crites, R. W., Middlebrooks, J., y Reed, S. C. (2010). *Natural Wastewater Treatment Systems.* Boca Raton: Taylor & Francis.

Crites, R., y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados* (Vol. II). Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A.

Fair, G. M., Geyer, J. C., y Okun, D. A. (1990). *Ingenieria Sanitaria y de aguas residuales* (Segunda ed.). México D.F., México: Editorial LIMUSA, S.A.

Ferrer, J., Seco, A., y Robles, Á. (2018). *Tratamientos biológicos de aguas residuales* (Tercera ed.). Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de https://elibro.puce.elogim.com/es/ereader/puce/57448?page=155

Forero, E., Ortiz, O., y Rios, F. (2005). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinerÍa.* Santander,Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Fuccz, J., Gómez, R., Cárdenas, M., y Campos, C. (2007). *COMPORTAMIENTO DE COLIFORMES FECALES COMO INDICADORES BACTERIANOS DE CONTAMINACIÓN FECAL EN DIFERENTES MEZCLAS DE BIOSÓLIDO Y ESTÉRILES UTILIZADOS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LA CANTERA SORATAMA, BOGOTÁ.* SORATAMA, BOGOTÁ: UNIVERSITAS SCIENTIARUM.

GADM de Rocafuerte. (2016). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Actualizacion 2016.* Rocafuerte, Manabí.

Google Earth. (2022).

Hernández Muñoz, A., Hernández Lehmann, A., y Galán, P. (2004). *Manual de depuración Uralita. Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20000 habitantes* (Segunda ed.). Madrid: International Thomson Editores Spain Parainfo, S.A.

Hernández, A. (2015). *Depuración y desinfección de aguas residuales* (Sexta ed.). Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES, S.L.

INEC. (2010). *PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN ECUATORIANA, POR AÑOS CALENDARIO, SEGÚN CANTONES.* Obtenido de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/

INEN. (1992). *NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES.* Quito.

Jiménez, B. (2005). *La Contaminación Ambiental en México.* Mexico, D.F: Editorial Limusa.

Lazcano, C. (2016). *Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales* (Segunda ed.). Ecoe Ediciones.

López, C., Méndez, G., García, H., y Cervantes, F. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño.* Londres: IWA Publishing.

Macías, T. (2016). *Sistema de alcantarillado y Tratamiento de aguas de la ciudad de Rocafuerte.* Rocafuerte.

Manahan, S. (2007). *Introducción a la química ambiental .* Mexico, D.F: Reverté.

Mara, D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries.* Londres: Sterling, VA.

Mendoça, S. (2000). *Sistemas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío.* Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.

Menéndez, C., y Pérez, J. (2007). *Procesos para el tratamieto biológico de aguas residuales industriales.* Editorial Félix Varela.

Metcalf y Eddy. (1995). *INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES: TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACION.* Madrid: McGraw-Hill.

Metcalf y Eddy. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (Cuarta ed., Vol. I). New York, United States: Mc GrawHill.

Ministerio del Ambiente . (2018). *LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA.*

Ministerio del Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial N°97.* Registro oficial N°387, Quito.

Nemerow, N. L., y Dasgupta, A. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos.* Madrid: Ediciones Díaz de Santos. Obtenido de https://elibro.puce.elogim.com/es/ereader/puce/52941?page=210

OMS. (1989). *Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura.* (O. P. Salud, Trad.) Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

OMS. (2006). *WHO GUIDELINES FOR THE SAFE USE OF WASTEWATER, EXCRETA AND GREYWATER* (Vol. I).

Orozco, A. (2005). *Bioingenieria de Aguas Residuales.* Colombia: Acodal.

Peña, M., y Mara, D. (2004). Waste Stabilisation Ponds. *International Water and Sanitation Centre* , 2-7.

Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales.* Quebec: Reverté.

Rigola, M. (1990). *TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES : AGUAS DE PROCESO Y RESIDUALES.* Barcelona : Marcombo.

Rojas, R. (2002). GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Romero, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales: Teoria y principios de diseño.* Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero, J. (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales* (Primera ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Suárez, G. (enero de 2018). *folleto informativo Oxígeno Disuelto.* Obtenido de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3110sp.pdf

Ugalde, M. (enero de 2018). Obtenido de Tratamiento de Aguas Residuales: https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf

Valles, A. (junio de 2018). *TRATAMIENTO SECUNDARIO.* Obtenido de Reactores biológicos: http://tssinternacional.com/tratamiento-secundario/#:~:text=El%20tratamiento%20secundario%20es%20utilizado,principalmente%20toda%20aquella%20materia%20disuelta.

Wiki. (2007). *Ingeniería de aguas residuales.* Wiki. Obtenido de https://elibro.puce.elogim.com/es/ereader/puce/35813?page=68

World Health Organization. (1987). *Watewater Stabilization Ponds principles of planing & practice.* Alexandria: WHO Regional office for the Eastern Mediterranean.

Zacurama, L. (2019). Obtenido de ¿Qué es la precipitación química?: https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-precipitacion-quimica.html

Zambrano, L. (julio de 2019). Obtenido de Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo I): https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-modulo-i

Zarzosa, H. J., y Aragoneses, S. (2020). *Fundamentos de Ingeniería ambiental y del agua.* Dextra Editorial.

ANEXO 1. LOCALIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE Y LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.

Ubicación de la ciudad de Rocafuerte, provincia de Manabí (Google Earth. Recuperado del 22 de septiembre de 2022)



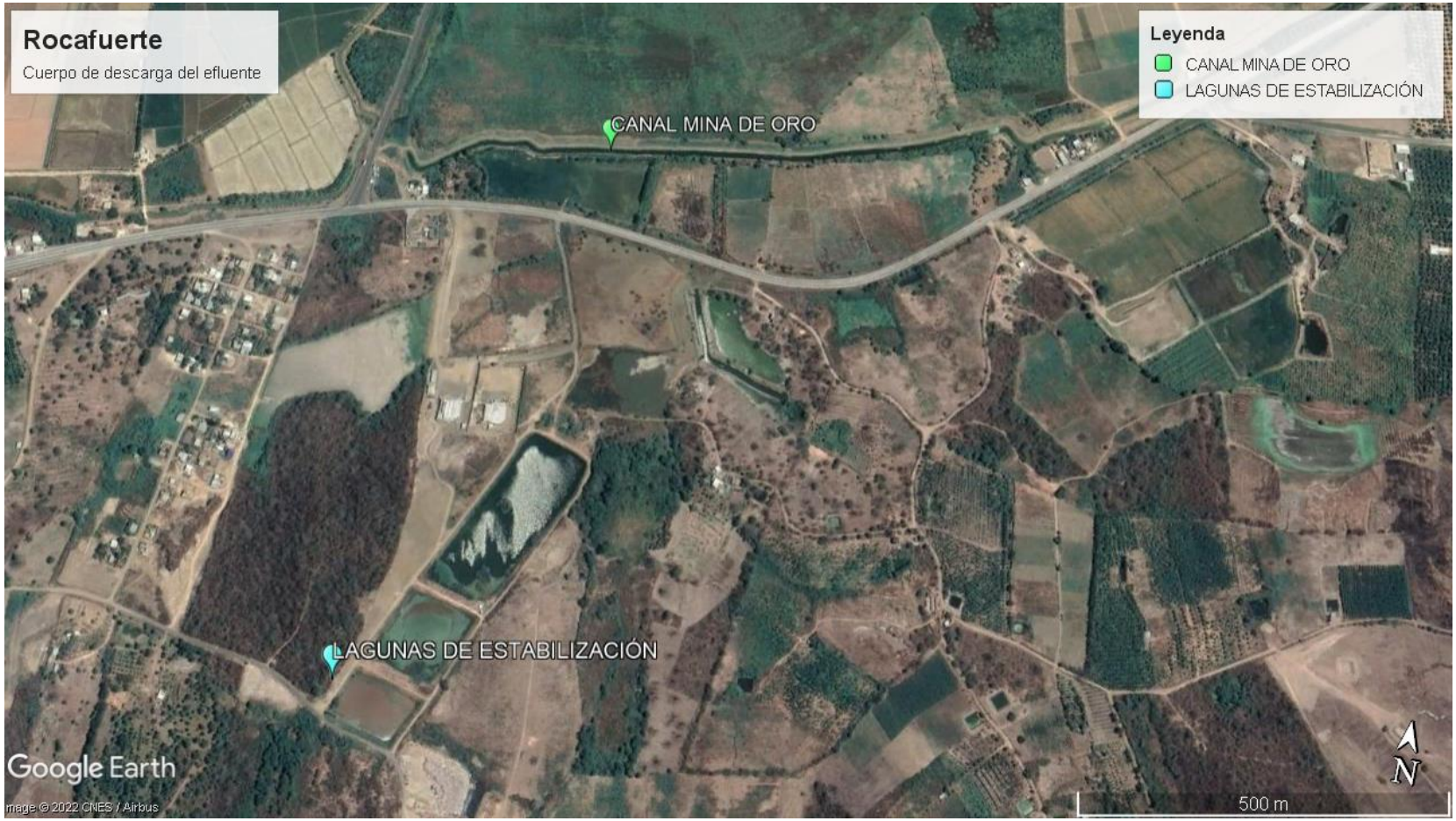
Mapa de la ciudad de Rocafuerte y sus calles principales (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).



Localización de las lagunas de estabilización con respecto al centro de la ciudad de Rocafuerte (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).

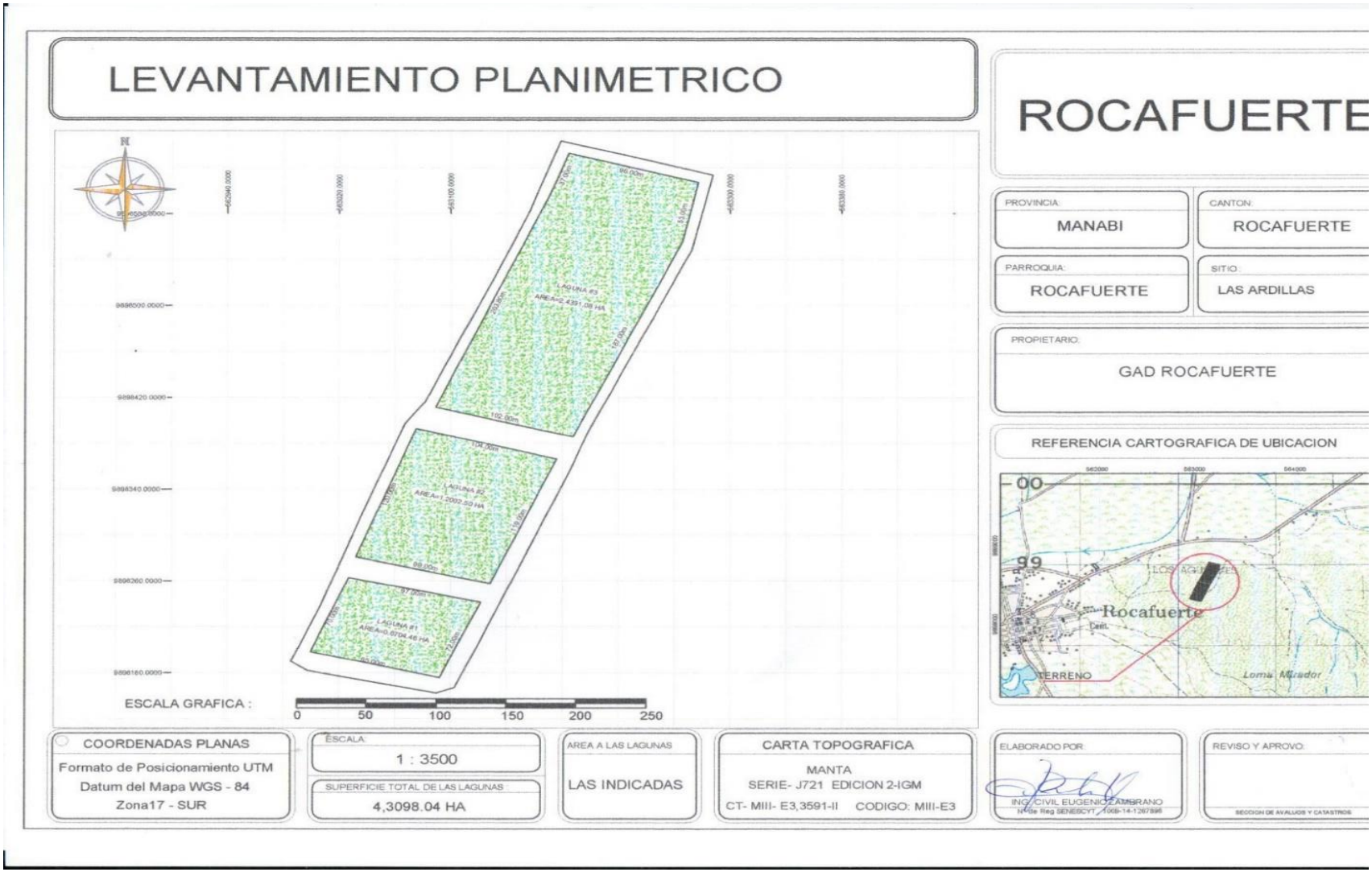


Localización del cuerpo receptor (Canal Mina de Oro) respecto de las lagunas de estabilización (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).



ANEXO 2. LEVANTAMIENTO PLANIMÉTRICO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE

Levantamiento planimétrico de las lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte (GADM de Rocafuerte, 2016).

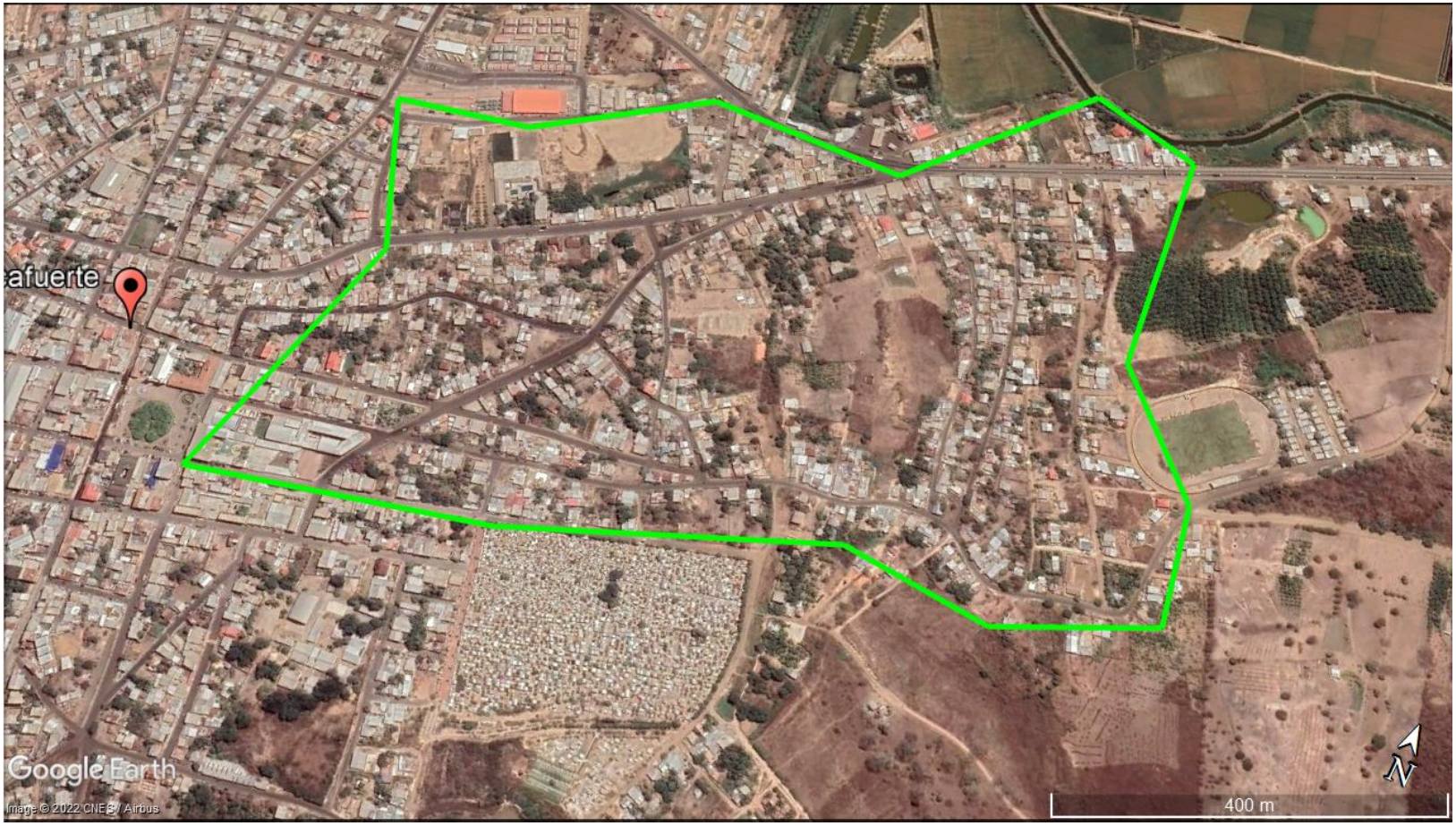


ANEXO 3. COBERTURA DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE

Delimitación de la cobertura de alcantarillado sanitario de la ciudad de Rocafuerte (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).



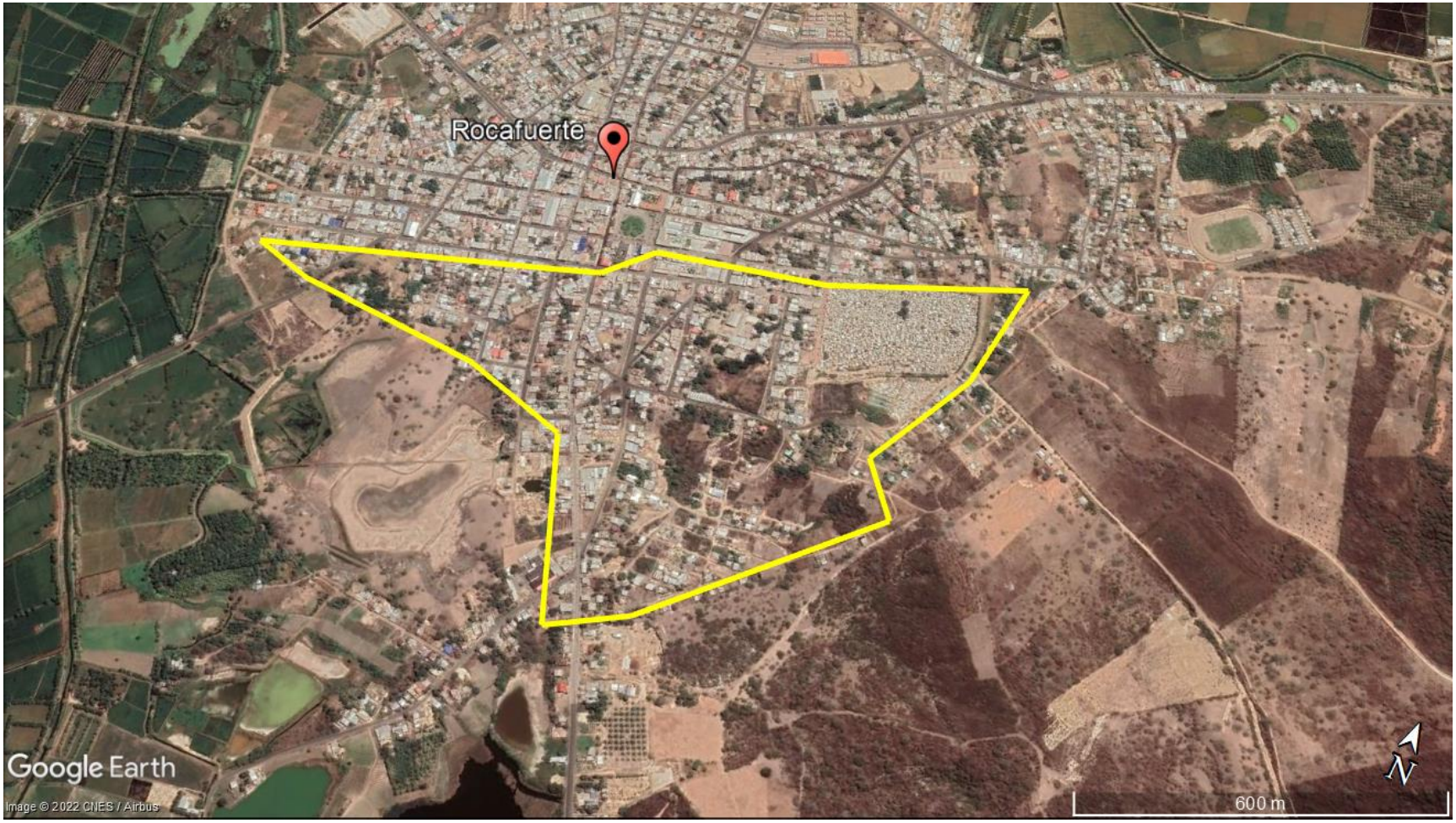
Delimitación del área de influencia para la estación de bombeo No. 1 (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).



Delimitación del área de influencia para la estación de bombeo No. 2 (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).

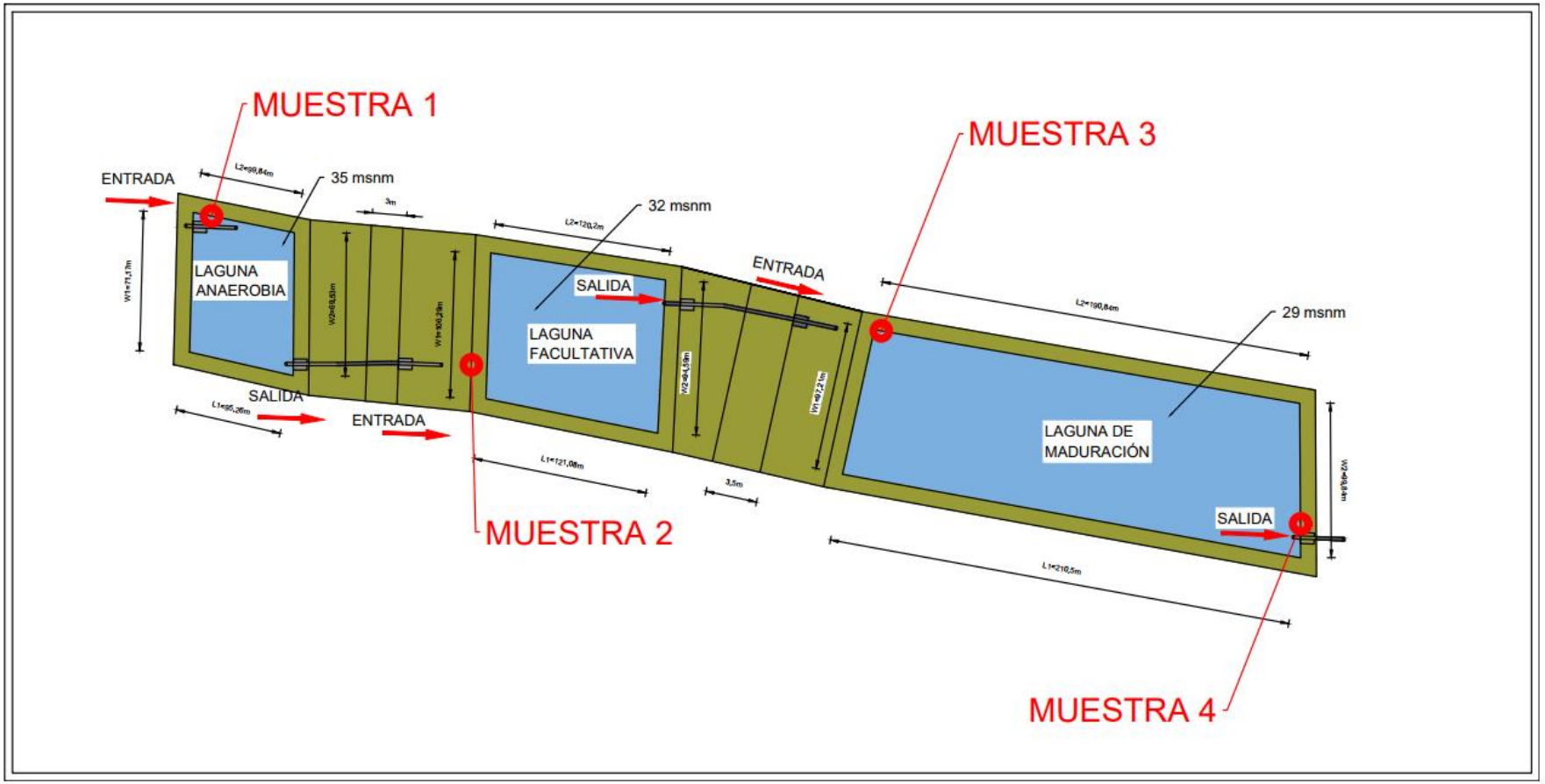


Delimitación del área de influencia para la estación de bombeo No. 3 (Google Earth. Recuperado el 19 de junio de 2022).



ANEXO 4. ESQUEMA DE UBICACIÓN DE TOMA DE MUESTRAS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE.

Esquema de lagunas de estabilización y ubicación de la toma de muestras para cada laguna de estabilización de la ciudad de Rocafuerte



ANEXO 5. RESULTADOS DE AFOROS REALIZADOS EN LA SALIDA DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA Y SALIDA DE LA LAGUNA DE MADURACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE.

Primer aforo volumétrico (20L) desde el 15 al 17 de noviembre de 2021 para determinar las horas de muestreo.

DÍA	FECHA	HORA	VOLUMEN	TIEMPO CRONOMETRADO	MPO CRONOMETRA	Q salida	Q salida	Q promedio
				s	s	guna anaerobia de maduración		
			L	alida de laguna anaerob	de laguna de mad	L/s	L/s	L/s
1	15/11/2021	08H00	20	1,12	1,32	17,86	15,15	16,51
1	15/11/2021	09H00	20	1,19	1,3	16,81	15,38	16,1
1	15/11/2021	10H00	20	1,24	1,19	16,13	16,81	16,47
1	15/11/2021	11H00	20	1,11	1,38	18,02	14,49	16,26
1	15/11/2021	12H00	20	1,22	1,3	16,39	15,38	15,89
1	15/11/2021	13H00	20	1,38	1,34	14,49	14,93	14,71
1	15/11/2021	14H00	20	1,22	1,16	16,39	17,24	16,82
1	15/11/2021	15H00	20	1,25	1,21	16	16,53	16,27
1	15/11/2021	16H00	20	1,15	1,38	17,39	14,49	15,94
1	15/11/2021	17H00	20	1,33	1,37	15,04	14,6	14,82
2	16/11/2021	08H00	20	1,18	1,22	16,95	16,39	16,67
2	16/11/2021	09H00	20	1,18	1,34	16,95	14,93	15,94
2	16/11/2021	10H00	20	1,29	1,38	15,5	14,49	15
2	16/11/2021	11H00	20	1,35	1,23	14,81	16,26	15,54
2	16/11/2021	12H00	20	1,34	1,15	14,93	17,39	16,16
2	16/11/2021	13H00	20	1,39	1,36	14,39	14,71	14,55
2	16/11/2021	14H00	20	1,27	1,39	15,75	14,39	15,07
2	16/11/2021	15H00	20	1,23	1,36	16,26	14,71	15,49
2	16/11/2021	16H00	20	1,32	1,41	15,15	14,18	14,67
2	16/11/2021	17H00	20	1,35	1,18	14,81	16,95	15,88
3	17/11/2021	08H00	20	1,32	1,52	15,15	13,16	14,16
3	17/11/2021	09H00	20	1,2	1,41	16,67	14,18	15,43
3	17/11/2021	10H00	20	1,25	1,16	16	17,24	16,62
3	17/11/2021	11H00	20	1,11	1,37	18,02	14,6	16,31
3	17/11/2021	12H00	20	0,92	0,95	21,74	21,05	21,4
3	17/11/2021	13H00	20	1	0,95	20	21,05	20,53
3	17/11/2021	14H00	20	1,12	1,41	17,86	14,18	16,02
3	17/11/2021	15H00	20	1,34	1,13	14,93	17,7	16,32
3	17/11/2021	16H00	20	1,22	1,02	16,39	19,61	18
3	17/11/2021	17H00	20	1,19	1,3	16,81	15,38	16,1

Segundo aforo volumétrico (20 L) desde el 22 de noviembre de 2021 al 17 de mayo de 2022 (estos caudales fueron tomados los días de cada muestreo)

DÍA	FECHA	**VOLUMEN** **L**	**TIEMPO CRONOMETRADOS** **Salida de laguna anaerobia**	**TIEMPO CRONOMETRADOS** **Salida de laguna de maduración**	**Efluente laguna anaerobia**	**Efluente laguna de maduración**	**Q medio**
					L/s	**L/s**	**L/s**
1	22/11/2021	20	0,97	1,25	20,62	16	18,31
2	29/11/2021	20	0,92	1,23	21,74	16,26	19
3	6/12/2021	20	1,14	1,35	17,54	14,81	16,18
4	13/12/2021	20	1,16	1,09	17,24	18,35	17,8
5	20/12/2021	20	0,94	1,17	21,28	17,09	19,19
6	17/5/2022	20	1,21	1,11	16,53	18,02	17,28

Tercer aforo volumétrico (20 L) desde el 14 al 15 de mayo de 2022

DÍA	FECHA	HORA	VOLUMEN L	TIEMPO CRONOMETRADOS Salida de laguna anaerobia	TIEMPO CRONOMETRADOS Salida de laguna de maduración	Caudal salida laguna anaerobia L/s	Caudal salida laguna de maduración L/s	Caudal promedio L/s
1	14/5/2022	09H00	20	1,2	1,23	16,67	16,26	16,47
1	14/5/2022	10H00	20	1,34	1,31	14,93	15,27	15,1
1	14/5/2022	11H00	20	1,24	1,14	16,13	17,54	16,84
1	14/5/2022	12H00	20	1,14	0,99	17,54	20,2	18,87
1	14/5/2022	13H00	20	1,08	1,18	18,52	16,95	17,74
1	14/5/2022	14H00	20	1,16	1,16	17,24	17,24	17,24
1	14/5/2022	15H00	20	1,3	1,42	15,38	14,08	14,73
1	14/5/2022	16H00	20	1,35	1,13	14,81	17,7	16,26
2	15/5/2022	09H00	20	1,34	1,39	14,93	14,39	14,66
2	15/5/2022	10H00	20	1,20	1,22	16,67	16,39	16,53
2	15/5/2022	11H00	20	1,29	1,24	15,5	16,13	15,82
2	15/5/2022	12H00	20	1,22	1,13	16,39	17,7	17,05
2	15/5/2022	13H00	20	1,25	1,1	16	18,18	17,09
2	15/5/2022	14H00	20	1,36	1,35	14,71	14,81	14,76
2	15/5/2022	15H00	20	1,23	1,22	16,26	16,39	16,33
2	15/5/2022	16H00	20	1,24	1,32	16,13	15,15	15,64

Cuarto aforo volumétrico (100 L) desde el 14 al 15 de mayo de 2022

DÍA	FECHA	HORA	VOLUMEN L	TIEMPO CRONOMETRADOS Salida de laguna anaerobia	TIEMPO CRONOMETRADOS Salida de laguna de maduración	Caudal salida laguna anaerobia L/s	Caudal salida laguna de maduración L/s	Caudal promedio L/s
1	14/5/2022	09H00	100	4,59	4,99	21,79	20,04	20,92
1	14/5/2022	10H00	100	4,24	4,69	23,58	21,32	22,45
1	14/5/2022	11H00	100	5,41	4,66	18,48	21,46	19,97
1	14/5/2022	12H00	100	4,01	4,3	24,94	23,26	24,1
1	14/5/2022	13H00	100	3,99	4,9	25,06	20,41	22,74
1	14/5/2022	14H00	100	4,46	5,84	22,42	17,12	19,77
1	14/5/2022	15H00	100	4,61	4,44	21,69	22,52	22,11
1	14/5/2022	16H00	100	4,17	4,57	23,98	21,88	22,93
2	15/5/2022	09H00	100	4,54	4,43	22,03	22,57	22,3
2	15/5/2022	10H00	100	4,40	5,39	22,73	18,55	20,64
2	15/5/2022	11H00	100	4,78	4,81	20,92	20,79	20,86
2	15/5/2022	12H00	100	4,42	5,14	22,62	19,46	21,04
2	15/5/2022	13H00	100	3,93	4,31	25,45	23,2	24,33
2	15/5/2022	14H00	100	4,6	5,04	21,74	19,84	20,79
2	15/5/2022	15H00	100	4,5	4,6	22,22	21,74	21,98
2	15/5/2022	16H00	100	4,6	4,67	21,74	21,41	21,58

Quinto aforo de velocidad desde el 14 al 15 de mayo de 2022

LAGUNA ANAEROBIA

DÍA	FECHA	HORA	Distancia	Tiempo cronometrado	Velocidad (D/t)	W media	H media	Sección transversal (W*H)	Q salida	Q salida
			m	s	m/s	m	m	m^2	Laguna anaerobia (Q=V*A)	laguna anaerobia
									m3/s	L/s
1	14/5/2022	09H00	10	94,00	0,106382979	0,7	0,3	0,21	0,022340426	22,34
1	14/5/2022	10H00	10	107,20	0,093283582	0,7	0,3	0,21	0,019589552	19,59
1	14/5/2022	11H00	10	100,30	0,099700897	0,7	0,3	0,21	0,020937188	20,94
1	14/5/2022	12H00	10	87,40	0,114416476	0,7	0,3	0,21	0,02402746	24,03
1	14/5/2022	13H00	10	94,90	0,105374078	0,7	0,3	0,21	0,022128556	22,13
1	14/5/2022	14H00	10	115,50	0,086580087	0,7	0,3	0,21	0,018181818	18,18
1	14/5/2022	15H00	10	93,20	0,107296137	0,7	0,3	0,21	0,022532189	22,53
1	14/5/2022	16H00	10	113,10	0,08841733	0,7	0,3	0,21	0,018567639	18,57
2	15/5/2022	09H00	10	143,30	0,069783671	0,7	0,3	0,21	0,014654571	14,65
2	15/5/2022	10H00	10	135,00	0,074074074	0,7	0,3	0,21	0,015555556	15,56
2	15/5/2022	11H00	10	130,20	0,076804916	0,7	0,3	0,21	0,016129032	16,13
2	15/5/2022	12H00	10	108,60	0,092081031	0,7	0,3	0,21	0,019337017	19,34
2	15/5/2022	13H00	10	105,40	0,09487666	0,7	0,3	0,21	0,019924099	19,92
2	15/5/2022	14H00	10	127,10	0,078678206	0,7	0,3	0,21	0,016522423	16,52
2	15/5/2022	15H00	10	125,80	0,079491256	0,7	0,3	0,21	0,016693164	16,69
2	15/5/2022	16H00	10	109,70	0,091157703	0,7	0,3	0,21	0,019143118	19,14

LAGUNA DE MADURACIÓN

DÍA	FECHA	HORA	Distancia	Tiempo cronometrado	Velocidad (D/t)	W media	H media	Sección transversal (W*H)	Q salida	Q salida
			m	s	m/s	m	m	m^2	Laguna de maduración (Q=V*A)	Laguna de maduración
									m3/s	L/s
1	14/5/2022	09H00	5	253,74	0,01970521	1,9	0,5	0,95	0,01871995	18,72
1	14/5/2022	10H00	5	242,1	0,020652623	1,9	0,5	0,95	0,019619992	19,62
1	14/5/2022	11H00	5	222,36	0,022486059	1,9	0,5	0,95	0,021361756	21,36
1	14/5/2022	12H00	5	201,6	0,024801587	1,9	0,5	0,95	0,023561508	23,56
1	14/5/2022	13H00	5	210,25	0,023781213	1,9	0,5	0,95	0,022592152	22,59
1	14/5/2022	14H00	5	234,98	0,021278407	1,9	0,5	0,95	0,020214486	20,21
1	14/5/2022	15H00	5	220,52	0,02267368	1,9	0,5	0,95	0,021539996	21,54
1	14/5/2022	16H00	5	217,1	0,023030861	1,9	0,5	0,95	0,021879318	21,88
2	15/5/2022	09H00	5	295,5	0,016920474	1,9	0,5	0,95	0,01607445	16,07
2	15/5/2022	10H00	5	300,6	0,0166334	1,9	0,5	0,95	0,01580173	15,80
2	15/5/2022	11H00	5	254,2	0,019669552	1,9	0,5	0,95	0,018686074	18,69
2	15/5/2022	12H00	5	230,38	0,021703273	1,9	0,5	0,95	0,020618109	20,62
2	15/5/2022	13H00	5	220,7	0,022655188	1,9	0,5	0,95	0,021522429	21,52
2	15/5/2022	14H00	5	334,6	0,014943216	1,9	0,5	0,95	0,014196055	14,20
2	15/5/2022	15H00	5	249,33	0,020053744	1,9	0,5	0,95	0,019051057	19,05
2	15/5/2022	16H00	5	311,47	0,01605291	1,9	0,5	0,95	0,015250265	15,25

Resumen de aforo de velocidad

DÍA	FECHA	HORA	Caudal salida Laguna anaerobia	Caudal salida Laguna de maduración	Q medio
			L/s	L/s	L/s
1	14/5/2022	09H00	22,34	18,72	20,53
1	14/5/2022	10H00	19,59	19,62	19,61
1	14/5/2022	11H00	20,94	21,36	21,15
1	14/5/2022	12H00	24,03	23,56	23,8
1	14/5/2022	13H00	22,13	22,59	22,36
1	14/5/2022	14H00	18,18	20,21	19,2
1	14/5/2022	15H00	22,53	21,54	22,04
1	14/5/2022	16H00	18,57	21,88	20,23
2	15/5/2022	09H00	14,65	16,07	15,36
2	15/5/2022	10H00	15,56	15,8	15,68
2	15/5/2022	11H00	16,13	18,69	17,41
2	15/5/2022	12H00	19,34	20,62	19,98
2	15/5/2022	13H00	19,92	21,52	20,72
2	15/5/2022	14H00	16,52	14,2	15,36
2	15/5/2022	15H00	16,69	19,05	17,87
2	15/5/2022	16H00	19,14	15,25	17,2

Resumen de aforos realizados y caudal medio en el sistema de lagunas de estabilización de la ciudad de Rocafuerte.

FECHA	AFORO VOLUMÉTRICO (20 L) Q promedio L/s		LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN Q promedio L/s
	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA DE MADURACIÓN	
15/11/2021	16,45	15,5	15,98
16/11/2021	15,55	15,44	15,50
17/11/2021	17,36	16,82	17,09
22/11/2021	20,62	16,00	18,31
29/11/2021	21,74	16,26	19,00
6/12/2021	17,54	14,81	16,18
13/12/2021	17,24	18,35	17,80
20/12/2021	21,28	17,09	19,19
14/5/2022	16,40	16,91	16,66
15/5/2022	15,82	16,14	15,98
17/5/2022	16,53	18,02	17,28
	AFORO VOLUMÉTRICO (100 L) Qpromedio L/s		
14/5/2022	22,74	21,00	21,87
15/5/2022	22,43	20,95	21,69
	AFORO DE VELOCIDAD Qpromedio L/s		
14/5/2022	21,04	21,19	21,12
15/5/2022	17,24	17,65	17,45
Q promedio	18,67	17,48	18,07
Desviación estándar			2,033
%			11%

ANEXO 6. TABLA PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN NUMERO MAS PROBABLE (NMP) POR CADA 100 ml DE MUESTRA

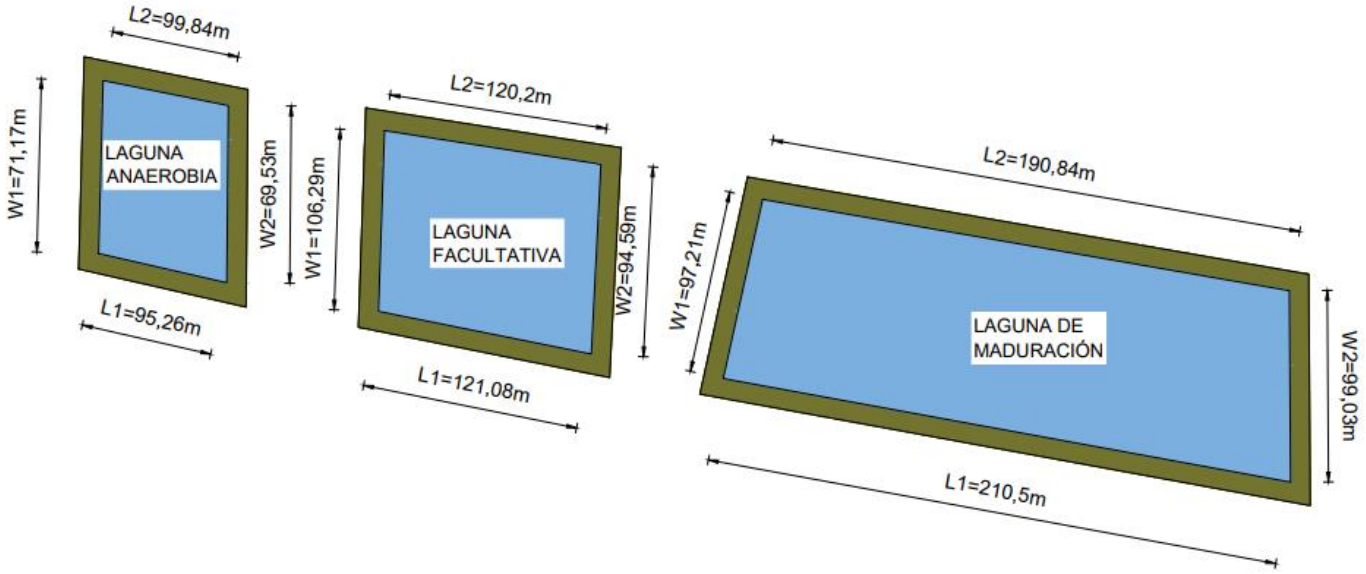
Número más probable (NMP) de coliformes por cada 100ml de muestra																				
Número de tubos positivos				Número de tubos positivos				Número de tubos positivos				Número de tubos positivos				Número de tubos positivos				Número de tubos positivos			
10 ml	1 ml	0,1 ml	NMP	10 ml	1 ml	0,1 ml	NMP	10 ml	1 ml	0,1 ml	NMP	10 ml	1 ml	0,1 ml	NMP	10 ml	1 ml	0,1 ml	NMP	10 ml	1 ml	0,1 ml	NMP
0	0	0		1	0	0	2	2	0	0	4,5	3	0	0	7,8	4	0	0	13	5	0	0	23
0	0	1	1,8	1	0	1	4	2	0	1	6,8	3	0	1	11	4	0	1	17	5	0	1	31
0	0	2	3,6	1	0	2	6	2	0	2	9,1	3	0	2	13	4	0	2	21	5	0	2	43
0	0	3	5,4	1	0	3	8	2	0	3	12	3	0	3	16	4	0	3	25	5	0	3	58
0	0	4	7,2	1	0	4	10	2	0	4	14	3	0	4	20	4	0	4	30	5	0	4	76
0	0	5	9	1	0	5	12	2	0	5	16	3	0	5	23	4	0	5	36	5	0	5	95
0	1	0	1,8	1	1	0	4	2	1	0	6,8	3	1	0	11	4	1	0	17	5	1	0	33
0	1	1	3,6	1	1	1	6,1	2	1	1	9,2	3	1	1	14	4	1	1	21	5	1	1	46
0	1	2	5,5	1	1	2	8,1	2	1	2	12	3	1	2	17	4	1	2	26	5	1	2	64
0	1	3	7,3	1	1	3	10	2	1	3	14	3	1	3	20	4	1	3	31	5	1	3	84
0	1	4	9,1	1	1	4	12	2	1	4	17	3	1	4	23	4	1	4	36	5	1	4	110
0	1	5	11	1	1	5	14	2	1	5	19	3	1	5	27	4	1	5	42	5	1	5	130

0	2	0	3,7	1	2	0	6,1	2	2	0	9,3	3	2	0	14	4	2	0	22	5	2	0	49
0	2	1	5,5	1	2	1	8,2	2	2	1	12	3	2	1	17	4	2	1	26	5	2	1	70
0	2	2	7,4	1	2	2	10	2	2	2	14	3	2	2	20	4	2	2	32	5	2	2	95
0	2	3	9,2	1	2	3	12	2	2	3	17	3	2	3	24	4	2	3	38	5	2	3	120
0	2	4	11	1	2	4	15	2	2	4	19	3	2	4	27	4	2	4	44	5	2	4	150
0	2	5	13	1	2	5	17	2	2	5	22	3	2	5	31	4	2	5	50	5	2	5	180
0	3	0	8,3	1	3	0	5,6	2	3	0	8,3	3	3	0	17	4	3	0	27	5	3	0	79
0	3	1	10	1	3	1	7,4	2	3	1	10	3	3	1	21	4	3	1	33	5	3	1	110
0	3	2	13	1	3	2	9,3	2	3	2	13	3	3	2	24	4	3	2	39	5	3	2	140
0	3	3	15	1	3	3	11	2	3	3	15	3	3	3	28	4	3	3	45	5	3	3	180
0	3	4	17	1	3	4	13	2	3	4	17	3	3	4	31	4	3	4	52	5	3	4	210
0	3	5	19	1	3	5	15	2	3	5	19	3	3	5	35	4	3	5	59	5	3	5	250
0	4	0	11	1	4	0	7,5	2	4	0	11	3	4	0	21	4	4	0	34	5	4	0	130
0	4	1	13	1	4	1	9,4	2	4	1	13	3	4	1	24	4	4	1	40	5	4	1	170
0	4	2	15	1	4	2	11	2	4	2	15	3	4	2	28	4	4	2	47	5	4	2	220
0	4	3	17	1	4	3	13	2	4	3	17	3	4	3	32	4	4	3	54	5	4	3	280
0	4	4	19	1	4	4	15	2	4	4	19	3	4	4	36	4	4	4	62	5	4	4	350

0	4	5	22	1	4	5	17	2	4	5	22	3	4	5	40	4	4	5	69	5	4	5	430
0	5	0	13	1	5	0	9,4	2	5	0	13	3	5	0	25	4	5	0	41	5	5	0	240
0	5	1	15	1	5	1	11	2	5	1	15	3	5	1	29	4	5	1	48	5	5	1	350
0	5	2	17	1	5	2	13	2	5	2	17	3	5	2	32	4	5	2	56	5	5	2	540
0	5	3	19	1	5	3	15	2	5	3	19	3	5	3	37	4	5	3	64	5	5	3	920
0	5	4	22	1	5	4	17	2	5	4	22	3	5	4	41	4	5	4	72	5	5	4	1600
0	5	5	24	1	5	5	19	2	5	5	24	3	5	5	45	4	5	5	81				

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995, pág. 1428)

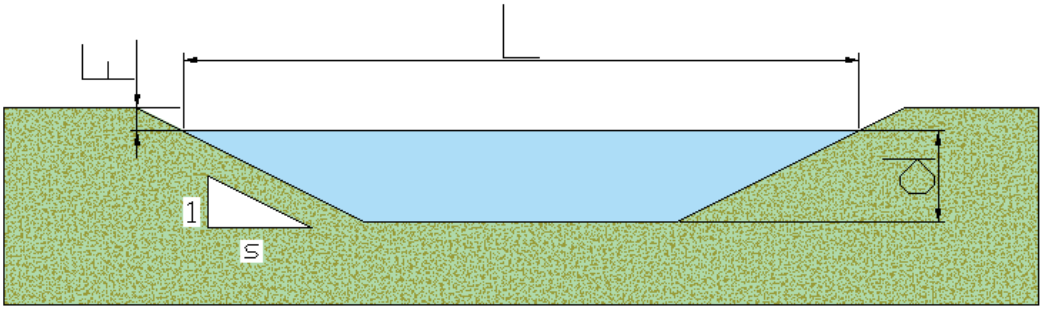
ANEXO 7. DIMENSIONES MEDIDAS EN SITIO, CÁLCULO DE AREAS Y VOLUMEN DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE ROCAFUERTE



Nota. Esquema de lagunas de estabilización con sus dimensiones tomadas en sitio.

	L1 m	**L2 m**	**W1 m**	**W2 m**	**L PROMEDIO m**	**W PROMEDIO m**
Laguna anaerobia	95,26	99,84	71,17	69,53	97,55	70,35
Laguna facultativa	121,08	120,2	106,29	94,59	120,64	100,44
Laguna de maduración	210,5	190,84	97,21	99,03	200,67	98,12

Crites y Tchobanoglous (2000) señala la siguiente ecuación para determinar el volumen de las lagunas de estabilización.



$$V = [LW + (L - 2sd)(W - 2sd) + 4(L - sd)(W - sd)] * d/6$$

Donde L es el largo promedio de la laguna medida desde la superficie del agua (m), W es el ancho promedio de la laguna medida desde la superficie del agua (m), s es la pendiente (s:1) y d es la profundidad media (m)

	L m	**W m**	**d m**	**s m/m**	**ÁREA Espejo de agua m^2**	**VOLUMEN m^3**
Laguna anaerobia	70,35	97,55	3	3	6.862,64	16.378,63
Laguna facultativa	120,64	100,44	1,5	3	12.117,08	16.723,83
Laguna de maduración	200,67	98,12	1	3	19.689,74	18.805,37

ANEXO 8. CARTA DE CERTIFICACIÓN EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO EMITIDO POR EL LABORATORIO DE SANEAMIENTO DE PORTOAGUAS EP Y RESULTADOS DE LABORATORIO PARA LOS PARÁMETRO DE DBO_5, SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y COLIFORMES FECALES

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

Portoviejo,02 de febrero del 2022.

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Química Jefe Control de Calidad, de la EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP, Certifico que la Egresada de la Carrera de Ing Civil de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador **Srta. Karoll Anahí Macías Puga, con # cédula de ciudadanía 1314713411** realizó los ensayos prácticos desde el **22/11/2021 hasta 20/12/2021** en el Laboratorio de Saneamiento de la" Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Portoviejo" PTAR; para su tesis de Pre-Grado cuyo Título es **" EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN A BASE DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN, DE LA CUDAD DE ROCAFUERTE, PROVINCIA DE MANABI"**.

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Álava Naranjo.

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD.

CI: 1305466904

Celular: 0979962453

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

LABORATORIO DE SANEAMIENTO PORTOAGUAS EP.

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Karoll Macías

Fecha de entrega de muestra: 22/11/2021

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	ENTRADA AL SISTEMA	EFLUENTE LAGUNA ANAEROBIA	EFLUENTE LAGUNA FACULTATIVA	EFLUENTE LAGUNA DE MADURACIÓN	METODOLOGÍA DE ENSAYO
TEMPERATURA	°C	Condición natural ± 3	26,6	26,3	26,1	26,6	Medición termómetro higrómetro
DBO5	mg/l	100	258	86	44	59	Standard Methods 5210
COLIFORMES FECALES	N.M.P /100ml	2000	$2,80 \times 10^4$	$2,40 \times 10^5$	$5,40 \times 10^4$	$2,20 \times 10^4$	Standard Methods 9223 B
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/l	130	286	243	55	24	Método Fotométrico (0-75 mg/l)

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Alava Naranjo

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD

CI: 1305466904

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

LABORATORIO DE SANEAMIENTO PORTOAGUAS EP.

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Karoll Macías

Fecha de entrega de muestra: 29/11/2021

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	ENTRADA AL SISTEMA	EFLUENTE LAGUNA ANAEROBIA	EFLUENTE LAGUNA FACULTATIVA	EFLUENTE LAGUNA DE MADURACIÓN	METODOLOGÍA DE ENSAYO
TEMPERATURA	°C	Condición natural ± 3	26,5	26,9	26,7	26,7	Medición termómetro higrómetro
DBO5	mg/l	100	149	155	87	59	Standard Methods 5210
COLIFORMES FECALES	N.M.P /100ml	2000	$2,40 \times 10^5$	$2,20 \times 10^4$	$5,40 \times 10^4$	$1,00 \times 10^3$	Standard Methods 9223 B
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/l	130	282	399	399	54	Método Fotométrico (0-75 mg/l)

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Alava Naranjo

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD

CI: 1305466904

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

LABORATORIO DE SANEAMIENTO PORTOAGUAS EP.

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Karoll Macías

Fecha de entrega de muestra: 06/12/2021

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	ENTRADA AL SISTEMA	EFLUENTE LAGUNA ANAEROBIA	EFLUENTE LAGUNA FACULTATIVA	EFLUENTE LAGUNA DE MADURACIÓN	METODOLOGÍA DE ENSAYO
TEMPERATURA	°C	Condición natural ± 3	27,1	26,8	26,8	26,4	Medición termómetro higrómetro
DBO5	mg/l	100	460	102	119	48	Standard Methods 5210
COLIFORMES FECALES	N.M.P /100ml	2000	$2,40 \times 10^5$	$9,20 \times 10^4$	$2,40 \times 10^4$	$2,00 \times 10^3$	Standard Methods 9223 B
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/l	130	1016	295	398	83	Método Fotométrico (0-75 mg/l)

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Álava Naranjo

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD

CI: 1305466904

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

LABORATORIO DE SANEAMIENTO PORTOAGUAS EP.

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Karoll Macías

Fecha de entrega de muestra: 13/12/2021

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	ENTRADA AL SISTEMA	EFLUENTE LAGUNA ANAEROBIA	EFLUENTE LAGUNA FACULTATIVA	EFLUENTE LAGUNA DE MADURACIÓN	METODOLOGÍA DE ENSAYO
TEMPERATURA	°C	Condición natural ± 3	25,7	26,2	26,0	25,9	Medición termómetro higrómetro
DBO5	mg/l	100		103		93	Standard Methods 5210
COLIFORMES FECALES	N.M.P /100ml	2000	$1{,}70 \times 10^4$	$7{,}90 \times 10^3$	$2{,}20 \times 10^4$	$4{,}90 \times 10^3$	Standard Methods 9223 B
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/l	130	430	272	375	156	Método Fotométrico (0-75 mg/l)

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Álava Naranjo

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD

CI: 1305466904

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

LABORATORIO DE SANEAMIENTO PORTOAGUAS EP.

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Karoll Macías

Fecha de entrega de muestra: 20/12/2021

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	ENTRADA AL SISTEMA	EFLUENTE LAGUNA ANAEROBIA	EFLUENTE LAGUNA FACULTATIVA	EFLUENTE LAGUNA DE MADURACIÓN	METODOLOGÍA DE ENSAYO
TEMPERATURA	°C	Condición natural ± 3	24,1	24,3	23,7	24,5	Medición termómetro higrómetro
DBO5	mg/l	100	203	127	76	35	Standard Methods 5210
COLIFORMES FECALES	N.M.P /100ml	2000	$2,80 \times 10^4$	$2,40 \times 10^5$	$3,40 \times 10^4$	$1,80 \times 10^4$	Standard Methods 9223 B
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/l	130	280	419	460	156	Método Fotométrico (0-75 mg/l)

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Alava Naranjo

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD

CI: 1305466904

PORTOAGUAS
EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO DE PORTOVIEJO EP

LABORATORIO DE SANEAMIENTO PORTOAGUAS EP.

ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES

Solicitante: Karoll Macías

Fecha de entrega de muestra: 17/05/2022

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	ENTRADA AL SISTEMA	EFLUENTE LAGUNA ANAEROBIA	EFLUENTE LAGUNA FACULTATIVA	EFLUENTE LAGUNA DE MADURACIÓN	METODOLOGÍA DE ENSAYO
DBO5	mg/l	100	423	151	72	132	Standard Methods 5210

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
GRACE ARACELY ALAVA NARANJO

Dra. Grace Álava Naranjo

QUIMICA JEFE CONTROL DE CALIDAD

CI: 1305466904