

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“TANQUE BAFFLED PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DE  
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AGRICOLA**

**LUCIANA PATRICIA OYARCE ALVAREZ**

**LIMA – PERÚ**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**

**“TANQUE BAFFLED PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DE  
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

**INGENIERA AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. LUCIANA PATRICIA OYARCE ALVAREZ**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. JOSÉ LUIS CALLE MARAVÍ  
Presidente

Mg. Sc. ROSA MARÍA MIGLIO TOLEDO  
Asesor

Ing. CARLOS ALBERTO BRAVO AGUILAR  
Miembro

Dra. ROSEMARY VELA CARDICH  
Miembro

LIMA – PERU

2021

## **DEDICATORIA**

*A mi mami hermosa Ana María, por ser la mujer más fuerte y valiente que he conocido, por ser siempre tu prioridad, por alentarme y levantarme de los malos momentos, por esos valiosos consejos y sobre todo por el inmenso amor que nos tienes.*

*A mi papi hermoso Néstor, por el apoyo constante que siempre me ha brindado, por incentivar en mí el amor a la ingeniería, por forjarme valores de respeto hacia los demás y honestidad, por el cariño que siempre me brindas.*

*A mi hermana mayor Dianita, por brindarme amor hasta mis cinco añitos, por enseñarme que la vida se debe disfrutar con alegría, siempre estarás en mi corazón, un beso al cielo.*

*A mi hermana mayor Mili, por siempre consentirme y ser tu consentida, por los buenos momentos que disfrutamos juntas, por animarme a culminar mi tesis.*

*A mis hermosas gatas: Yeni, por acompañarme en las amanecidas de la universidad y llenar mis días de alegrías; Luna, por enseñarme a respetar tu espacio y la recién adoptada Misha, por tus travesuras.*

*A mis terribles y malcriados perros, Canela, Blanca y Mocho, por ser tan engreídos, por siempre sacarme sonrisas y desestresarme.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, porque gracias a él hasta el momento cuento con salud, lo cual ha permitido llegar a este momento tan importante de mi formación profesional y a mis padres que gracias a su sacrificio y esfuerzo he tenido lo esencial para mi crecimiento.

A mi asesora, MSc. Rosa María Miglio Toledo, por sus consejos y asesoramiento en todo el proceso de la elaboración tanto en la parte experimental como en el documento final de la tesis.

A Evelyn Milagros Portilla Benavente, por el apoyo brindado en la parte experimental y que gracias a ello he conocido a una gran persona y profesional.

A mis amigos de la Universidad Sole, Gaby, Mariel, Henry (Michi) y Daniel (Yachis) por siempre animarme a no abandonar la tesis y animarme a continuar y no desfallecer. Gracias por todo este tiempo de amistad.

A mi amigo Jesús Saavedra, por ayudarme en la traducción de inglés de mi abstract. Gracias por tenerme paciencia.

A mi querida y amada Alma Máter, mi Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), gracias por cultivar en mí el amor hacia el campo y el hombre rural, por mi formación profesional.

## ÍNDICE

I. INTRODUCCION .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo principal.....	3
1.1.2. Objetivos Secundarios .....	3
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA .....	4
2.1.1. Caracterización del agua residual doméstica.....	4
2.2. TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA.....	6
2.2.1. Procesos para el tratamiento de aguas residuales .....	11
2.2.2. Tratamiento Anaerobio.....	12
2.3. TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS Y TECNOLOGÍAS .....	14
2.3.1. Tanque de agitación constante (CSTR- siglas en Ingles).....	14
2.3.2. Filtro anaerobio .....	15
2.3.3. Reactor anaerobio de lecho fijo de flujo ascendente (UASB) .....	15
2.3.4. Reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB) .....	15
2.3.5. Reactor anaerobio de membranas.....	16
2.3.6. Reactor baffled anaerobio .....	16
2.4. ANAEROBIC BAFFLED REACTOR – TANQUE BAFFLED; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
2.4.1. Consideraciones de diseño .....	17
2.4.2. Operación y mantenimiento .....	20
2.4.3. Países que emplearon el Tanque Baffled como tratamiento primario parata tratar aguas residuales domésticas .....	21
2.5. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO .....	22
2.5.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH) .....	23

2.5.2. Trazador .....	24
2.5.3. Modelos de Flujos en reactores .....	26
2.5.4. Modelo simplificado de la teoría de Wolf Resnick .....	27
2.5.5. Curva de concentración del trazador o método de curva de tendencia .....	30
2.5.6. Corto circuito.....	31
2.5.7. Zonas muertas .....	32
2.6. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas de la UNALM.....	32
2.6.1. Tratamiento primario.....	34
2.6.2. Tratamiento secundario .....	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
3.1. UBICACIÓN.....	39
3.2. DESCRIPCION DEL ESTADO GENERAL DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA .....	39
3.2.1. Buzón de derivación.....	39
3.2.2. Caseta de bombeo.....	39
3.2.3. Tanque baffled.....	39
3.3. PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	39
3.3.1. Caudal de ingreso .....	39
3.3.2. Tiempo de retención y tipo de flujo .....	40
3.3.3. Tasa de acumulación de lodos.....	43
3.4. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA .....	43
3.4.1. Parámetros de campo.....	43
3.4.2. Parámetros de laboratorio.....	44
3.5. ESTADÍSTICA .....	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO GENERAL DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA .....	48
4.1.1. Buzón de derivación.....	48
4.1.2. Caseta de bombeo.....	48
4.1.3. Tanque baffled.....	49
4.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	51
4.2.1. Caudal de ingreso .....	51
4.2.2. Tiempo de retención y tipo de flujo .....	52
4.2.3. Tasa de acumulación de lodos.....	56
4.3. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA .....	57
4.3.1. Parámetros de campo.....	59
4.3.2. Parámetros de laboratorio.....	64
V. CONCLUSIONES.....	72
VI. RECOMENDACIONES .....	73
VII. BIBLIOGRAFÍA .....	74
VIII. ANEXOS.....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición típica del agua residual doméstica .....	6
Tabla 2: Ventajas y desventajas de algunas tecnologías existentes .....	9
Tabla 3: Concentraciones típicas encontradas en aguas residuales pre-tradas.....	11
Tabla 4: Rangos recomendados y ecuaciones para parámetros en el diseño de un Tanque Baffled para el tratamiento de aguas residuales domésticas. ....	19
Tabla 5: Dimensiones del tanque baffled .....	35
Tabla 6: Dimensiones de la celda francesa .....	36
Tabla 7: Dimensiones de los humedales horizontales.....	37
Tabla 8: Dimensiones de los humedales sub superficiales de flujo vertical .....	38
Tabla 9. Criterio de interpretación del método de la curva de tendencia. ....	43
Tabla 10: Instrumentos utilizados en la investigación .....	46
Tabla 11. Total de muestras de campo y laboratorio .....	47
Tabla 12. Caudal medido en campo .....	52
Tabla 13. Parámetros principales para el análisis de la curva de tendencia.....	55
Tabla 14. Criterio a partir del análisis de la curva de tendencia .....	56
Tabla 15: Caracterización del agua residual doméstica .....	58
Tabla 16: Medida de caudal in-situ .....	81
Tabla 17: Medición del tiempo de retención.....	81
Tabla 18: Altura de lodos en cm en cada una de las cámaras de tanque baffled .....	83
Tabla 19: Temperatura medida por la Estación Von Humbolt .....	84
Tabla 20: Temperatura medida en campo en el afluente y efluente del tanque baffled.....	84
Tabla 21: Temperatura tomada en campo para cada una de las cámaras del tanque baffled... ..	84
Tabla 22: Conductividad medida en el afluente y efluente del tanque baffled .....	85
Tabla 23: Conductividad medida en las cámaras del tanque baffled .....	85
Tabla 24: Potencial de hidrógeno medido en el afluente y efluente del tanque baffled.....	86
Tabla 25: Potencial de hidrógeno medido en cada una de las cámaras del tanque baffled .....	86
Tabla 26: Turbiedad medida en el afluente y efluente del tanque baffled .....	87
Tabla 27: Turbiedad medida en cada una de las cámaras de tanque baffled en NTU.....	87
Tabla 28: Medida de sólidos sedimentables en el afluente y efluente del tanque baffled .....	88
Tabla 29: Medida de sólidos sedimentables en cada una de las cámaras el tanque baffled.....	88
Tabla 30: Medida de sólidos suspendidos en el afluente y efluente del tanque baffled.....	89



Tabla 31: Medida de sólidos suspendidos en cada una de las cámaras el tanque baffled.....	89
Tabla 32: Medida de DBO5 en el afluente y efluente del tanque baffled .....	90
Tabla 33: Medida de DQO en el afluente y efluente del tanque baffled.....	90
Tabla 34: Conteo de unidades formadoras de colonias en el efluente y afluente del tanque baffled.....	91

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales.....	7
Figura 2. Tecnologías para el tratamiento de agua residual.....	8
Figura 3. Tipos de reactores anaerobios.....	14
Figura 4. Sección longitudinal del tanque baffled (ABR).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5. Tanque baffled o reactor baffled anaeróbico.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 6. Deflector fijo y colgante.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 7. Curvas típicas de concentración del trazador en el efluente de reactores con diferentes características hidráulicas.....	27
Figura 8. Curva de cantidad de trazador que permanece en el reactor.....	29
Figura 9. Curva de concentración del trazador en el efluente de un reactor.....	31
Figura 10. Distribución de los Sistemas de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales.....	33
Figura 11. Tanque séptico-vista en planta.....	34
Figura 12. Tanque séptico-vista en corte.....	35
Figura 13. Curva 1-F(t) cantidad de trazador que permanece en el reactor.....	42
Figura 14. Distribución de puntos de muestreo.....	45
Figura 15. Rejilla anterior.....	48
Figura 16. Rejilla actual.....	48
Figura 17. Tubería de entrada al tanque baffled.....	50
Figura 18. Tubería actual de entrada al tanque baffled.....	50
Figura 19. Salida de agua de la cámara 3 hacia la cámara 4.....	51
Figura 20. Tubería de salida de la cámara 3 hacia la cámara 4.....	51
Figura 21. Tanque baffled mejorado.....	51
Figura 22. Aplicación del método matemático de Wolf y Resnick.....	54
Figura 23. Curva de tendencia de concentración.....	55
Figura 24. Tasa de acumulación de lodos.....	56
Figura 25. Variación de la temperatura en el periodo de muestreo.....	59
Figura 26. Variación de la temperatura dentro de las cámaras del tanque baffled.....	60
Figura 27. Variación de la conductividad en el periodo de muestreo.....	61

Figura 28. Variación de la conductividad eléctrica en cada una de las cámaras del tanque baffled.....	61
Figura 29. Variación del potencial de hidrógeno (pH).....	62
Figura 30. Variación del pH en las cámaras del tanque baffled.....	63
Figura 31. Variación de la demanda bioquímica de oxígeno .....	64
Figura 32. Variación de la demanda química de oxígeno .....	65
Figura 33. Variación de la turbiedad.....	66
Figura 34. Variación de la turbiedad en cada una de las cámaras del tanque baffled.....	67
Figura 35. Variación sólidos suspendidos del afluente y efluente .....	67
Figura 36. Variación de sólidos suspendidos totales en cada una de las cámaras del tanque baffled.....	68
Figura 37. Variación de solido sedimentable del afluente y el efluente.....	69
Figura 38. Valores de variación de los sólidos sedimentables en cada una de las cámaras del tanque baffled.....	70
Figura 39. Valores de coliformes totales del afluente vs el efluente del tanque baffled.....	71
Figura 40. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas.....	91
Figura 41. Limpieza del buzón de derivación .....	92
Figura 42. Interior del buzón de derivación .....	92
Figura 43. Caseta de bombeo .....	92
Figura 44. Interior de la caseta de bombeo .....	93
Figura 45. Pozo de almacenamiento de aguas residuales domésticas .....	93
Figura 46. Bombas de captación de aguas residuales domésticas.....	94
Figura 47. Limpieza de la bomba de captación.....	94
Figura 48. Extracción de material no deseado de las bombas de captación.....	95
Figura 49. Tablero de control .....	95
Figura 50. Elaboración de la regla medidora de lodos .....	96
Figura 51. Regla medidora de lodos.....	96
Figura 52. Vista de perfil del tanque baffled.....	97
Figura 53. Cámaras del tanque baffled.....	97
Figura 54. Toma de muestra y medición in situ .....	98
Figura 55. Pesado de NaCl.....	98
Figura 56. Dilución de ClNa en agua destilada.....	99

Figura 57. Medición de sólidos sedimentables .....	99
Figura 58. Medición de DQO.....	100
Figura 59. Medición de DBO.....	100
Figura 60. Medición de turbiedad .....	101
Figura 61. Medición solidos suspendidos .....	101
Figura 62. Lectura de coliformes totales .....	102
Figura 63. Proceso del tratamiento del agua residual doméstica en cada una de las cámaras del tanque baffled.....	102

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Datos medidos para el cálculo del caudal de ingreso .....	81
ANEXO 2. Datos medidos para el cálculo del tiempo de retención .....	81
ANEXO 3. Datos medidos para la tasa de acumulación de lodos .....	83
ANEXO 4. Datos de temperatura.....	84
ANEXO 5. Datos medidos de los parámetros de campo .....	85
ANEXO 6. Datos medidos de los parámetros de laboratorio.....	87
ANEXO 7. Panel fotográfico .....	91

## RESÚMEN

El tanque baffled es un reactor anaerobio diseñado para ser empleado en zonas peri urbanas o rurales, aunque existe evidencia de que se ha utilizado para tratar aguas residuales domésticas pertenecientes a un municipio en África. En la presente investigación se evaluó la operación y eficiencia de un tanque baffled ubicado en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Nacional Agraria la Molina; el tanque baffled consta de 3 cámaras o compartimentos y ha sido diseñado para tratar 6 m<sup>3</sup>/d de agua residual doméstica. Se monitoreó la eficiencia del tratamiento durante un período de 8 semanas, con muestreos semanales; considerando 2 puntos de muestreo: ingreso y salida del agua residual. Se midieron parámetros físico-químico y microbiológicos, alcanzándose eficiencias de remoción de 70% para DBO<sub>5</sub>, 78% para DQO, 73% para turbiedad, 92% para SST, 99% para sólidos sedimentables y 2 unidades logarítmicas para coliformes totales. Hidráulicamente el tanque operó con un caudal promedio de 2.82 m<sup>3</sup>/d, con un tiempo de retención real de 13 horas, aproximadamente. Las eficiencias alcanzadas muestran un desempeño muy prometedor para que el sistema sea instalado en poblaciones rurales y pequeños municipios a nivel nacional, donde mayoritariamente se emplean tanques sépticos con eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> entre 30 y 40% y tanques imhoff, con eficiencia de remoción en DQO entre 25 y 50%. (Tilley et.al., 2014)

Palabras claves: Tanque baffled, DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, sólidos sedimentables, coliformes fecales, sistemas descentralizados.

## **ABSTRACT**

The baffled tank is an anaerobic reactor designed to be used in peri-urban or rural areas, although there is evidence that it has been used to treat domestic wastewater belonging to a municipality in Africa. In this research, the operation and efficiency of a baffled tank located in the Pilot Plant for Wastewater Treatment of the “Universidad Nacional Agraria la Molina” was evaluated; the baffled tank consists of 3 chambers or compartments and has been designed to treat 6 m<sup>3</sup>/d of domestic wastewater. Treatment efficiency was monitored over a period of 8 weeks, with weekly samplings; considering 2 sampling points: entry and exit of wastewater. Physical-chemical and microbiological parameters were measured, reaching removal efficiencies of 70% for BOD<sub>5</sub>, 78% for COD, 73% for turbidity, 92% for TSS, 99% for settleable solids and 2 logarithmic units for total coliforms. Hydraulically, the tank operated with an average flow of 2.82 m<sup>3</sup>/d, with a real retention time of approximately 13 hours. The efficiencies achieved show a very promising performance for the system to be installed in rural populations and small municipalities nationwide, where mostly septic tanks are used with BOD<sub>5</sub> removal efficiency between 30 and 40% and imhoff tanks, with removal efficiency in COD between 25 and 50%. (Tilley et.al., 2014)

Keywords: baffled tank, BOD<sub>5</sub>, COD, TSS, settleable solids, fecal coliforms, decentralized systems.

## I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la Encuesta Nacional de Programas Estratégicos (Enapres) del 2016, la cobertura nacional respecto a los servicios de alcantarillado y otras formas de disposición de excretas en el Perú es de 73.7 %, distribuidos en 88.3 % en el ámbito urbano y el 24.6 % en el ámbito rural. Respecto al tratamiento de aguas residuales, se ha registrado que en el área urbana solo se trata el 68 % de estas aguas (**Decreto Supremo N°018-2017-Vivienda**), con un total de 204 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) pertenecientes a 32 Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) de las cuales 163 están operativas, 32 en construcción y 9 paralizadas (**Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [SUNASS], 2016**).

En el sector rural, la cobertura en alcantarillado y tratamiento de aguas residuales es baja, no existen cifras exactas que indiquen el porcentaje de zonas que tratan el agua residual doméstica. “Debido a la topografía y a que las viviendas se encuentran dispersas no es posible construir sistemas centralizados y convencionales para el tratamiento de las aguas residuales” (**Valencia et al, 2010**). “La mayoría de localidades pertenecientes a esta área, carecen de sistemas de saneamiento y aún defecan al aire libre, con un porcentaje del 20 % para el 2015” (**Organización Mundial de la Salud [OMS], 2016**). Esta situación genera focos de contaminación y, como consecuencia, trae enfermedades en niños y adultos mayores que son más vulnerables. El avance de obras de saneamiento en el área rural no es tan acelerado como en el área urbana debido a la dispersión de viviendas, topografía variable y factor económico.



Los tratamientos de aguas residuales descentralizados son sistemas que tratan las aguas residuales domésticas cerca de la fuente de origen, “en zonas rurales y pequeñas comunidades ubicadas a la periferia de los grandes asentamientos humanos (zonas periurbanas), necesitan menores costos de inversión, bajos costos de operación y mantenimiento y bajo consumo de energía” (Galbán, 2009). En lo concerniente a la sostenibilidad, Massoud (citado en Avendaño 2015) señala que estos sistemas “permiten la implementación de tecnologías simples y su manejo es altamente flexible, motivo por el cual se convierten en una solución fiable a largo plazo y rentable para comunidades pequeñas”.

El Tanque Baffled o Anaerobic Baffled Reactor (ABR) está considerado para operar en comunidades de menor escala o de poca densidad, zonas periurbanas, industrias o instituciones. “Se le considera como una tecnología no convencional y es utilizado como un sistema descentralizado para el tratamiento primario de aguas residuales tanto domésticas como industriales; fue desarrollado por McCarty y colaboradores en 1981 para tratar aguas residuales industriales” (Sarathai et.al, 2010). Este tanque consta de varias cámaras y, por su diseño, permite el contacto de las aguas residuales con la biomasa que se genera (lodos), y a la vez se producen dos tipos de tratamiento, uno de sedimentación y otro de digestión anaerobia. La digestión consiste en la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno. “Teóricamente la eficiencia del tratamiento oscila en intervalos del 65 al 90 por ciento para DQO y 70 al 90 por ciento de DBO, de eliminación”. (Gutterer, B. et al., 2009). Estos porcentajes demuestran una mayor eficiencia frente a sistemas convencionales ampliamente usados en el país como el tanque séptico.

En Keingsburgh, Sudáfrica, mediante una investigación identificaron al Tanque Baffled como un sistema rentable de fácil mantenimiento, que no requiere electricidad ni mano de obra altamente calificada. Lo colocaron a escala piloto con un volumen total del tanque de 3200 L, en las plantas de tratamiento de aguas residuales de Keingsburgh. Durante su operación demostró ser estable y consistente en su desempeño; operó con un tiempo de retención hidráulica de 22.5 h; con respecto a los sólidos tuvo una eficiencia de retención entre 60 a 90 por ciento, y una remoción de 60 por ciento de DQO. (Zama, 2005).

A nivel nacional, SUNAT (2015) reporta un % de tratamiento de aguas residuales del orden de 65.2 %, la mayor parte de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se localizan en zonas urbanas en la costa del país, y utilizan algún tipo de laguna de estabilización para el tratamiento; sin embargo, la cobertura de tratamiento de aguas residuales en pequeños

municipios y centros poblados no es reportada, pero según datos de DIGESA (2009) existen más de 1700 sistemas con tanque séptico e infiltración en el terreno.

En el año 2012 la Universidad Nacional Agraria La Molina construye una planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante el proyecto “Programa de educación para la población infanto-juvenil del Perú”, financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y con la colaboración de la Universidad Ramón Llull. Esta planta cuenta con varias líneas de tratamiento, que incluyen tratamientos primarios (tanque séptico, tanque baffled, celda francesa) combinados con humedales construidos como tratamientos secundarios. El propósito de esta planta piloto es evaluar el comportamiento de diferentes tecnologías aplicadas a pequeños municipios y sistemas descentralizados.

Este trabajo de investigación se enfoca en la evaluación del comportamiento del tanque baffled como opción alternativa al empleo de tanques sépticos e imhoff en el país.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo principal**

Evaluar la operación y eficiencia de un Tanque Baffled como tratamiento primario para aguas residuales domésticas en condiciones de costa peruana.

### **1.1.2. Objetivos Secundarios**

- Evaluar el comportamiento hidráulico del Tanque Baffled.
- Monitorear la calidad de agua residual del afluente y efluente del Tanque Baffled.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

**Seoanez (1995)** define a las aguas residuales domésticas como “todos aquellos líquidos que provienen de las actividades humanas y que llevan en su composición un gran porcentaje de agua y que en su gran mayoría son vertidos a cursos o masas de aguas continentales o marinas”.

Las aguas residuales también pueden estar constituidas por desechos químicos, aguas de lluvias e infiltraciones de agua del terreno, estas aguas son conducidas por el alcantarillado, las cuales muchas veces son descargadas a fuentes de agua sin ningún tratamiento.

#### 2.1.1. Caracterización del agua residual doméstica

La caracterización de un agua residual doméstica es la “determinación de un conjunto de parámetros que pueden ser necesarios para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales o para su control” (**Trapote, 2016**). A continuación, se describen las características de las aguas residuales domésticas.

##### a. Características físicas

Entre las características físicas se tiene a la temperatura, densidad, turbidez, color, olor, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, entre otros.

##### b. Características químicas

Entre las características químicas se tienen:

- **Compuestos inorgánicos:** “Están compuestos por sales (medidas con el conductivímetro), nutrientes, trazas de elementos, alcalinidad y basicidad (medidas con el pHmetro) y compuestos tóxicos que se pueden encontrar en aguas residuales (**Noriega R, (s.f)**)

- **Gases:** “Producidos por la descomposición biológica de la materia orgánica y de la transferencia desde la atmósfera. Los gases que se pueden encontrar en las aguas residuales son el oxígeno disuelto, dióxido de carbono, metano, amoníaco y ácido sulfhídrico”. (Noriega R, s.f).
- **Compuestos Orgánicos:** “está representada por hidratos de carbono, (azúcares, almidones), proteínas, grasas, celulosa, etc. Se han ideado métodos para medir la materia orgánica en conjunto en base a la demanda de oxígeno para su oxidación o el contenido total de carbono”. (Noriega R, s.f)

Dentro de los compuestos orgánicos se tienen los biodegradables, los cuales originan una disminución del oxígeno disuelto si son descargados a ríos, lagos, lagunas y mares.

Para medir los compuestos orgánicos se usan:

- **DQO:** Demanda Química de Oxígeno, “es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar contaminantes (orgánicos e inorgánicos) por reacciones puramente químicas, se mide mediante análisis químicos. Hay compuestos orgánicos que no son oxidados en la prueba de la DQO”. (Cubillos A, 1981).
- **DBO<sub>5</sub>:** Demanda Bioquímica de Oxígeno, “es la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación biológica de la materia orgánica carbonácea en los desechos, a 20°C durante un período de tiempo específicos”. (Cubillos A 1981).

### c. Características biológicas

La materia orgánica que se encuentra en las aguas residuales es degradada por microorganismos los cuales pueden o no utilizar oxígeno disuelto y microorganismos patógenos que mueren rápidamente al encontrarse en un hábitat extraño. Es claro que el componente orgánico de las aguas residuales es un medio de cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos que cierran los ciclos biogeoquímicos de elementos como el azufre, carbono, nitrógeno o fósforo. (Seoanez M, 1995)

La presencia de virus en las aguas residuales proviene de las excretas intestinales del ser humano y los animales, los cuales pueden causar cuadros de infección en el ser vivo si es que se consume agua contaminada.

La **Tabla 1** muestra la composición típica del agua residual doméstica.

**Tabla 1: Composición típica del agua residual doméstica**

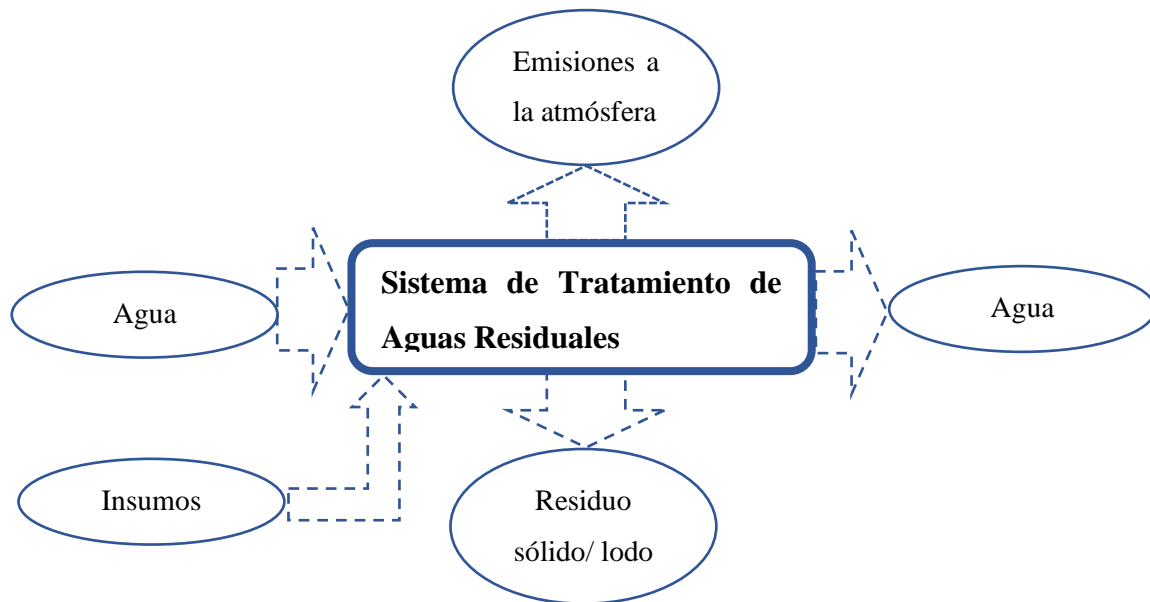
CONTAMINANTES	CONCENTRACION		
	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST) (mg/l)	350	720	1200
Sólidos disueltos totales (ST) (mg/l)	250	500	850
Sólidos en suspensión (SS) (mg/l)	100	220	350
Sólidos sedimentables (ml/l)	5	10	20
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	110	220	440
DQO (mg/l)	250	500	1000
Carbono orgánico total (COT) (mg/l)	80	160	290
Nitrógeno total (mg/l)	20	40	85
Fósforo total (mg/l)	4	8	15
Cloruros (mg/l)	30	50	100
Sulfato (mg/l)	20	30	50
Alcalinidad (mg/l)	50	100	200
Grasa (mg/l)	50	100	150
Coliformes totales (UFC/100 ml)	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
Compuestos orgánicos volátiles (µg/l)	<100	100-400	>400

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995)

## 2.2. TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Con el tratamiento de las aguas residuales se busca remover material contaminante tanto orgánico como inorgánico, con el objeto de alcanzar la calidad del agua tratada requerida en la normativa para descarga a cuerpos naturales o por el tipo de reuso a la que se le pueda destinar. “Los procesos en el tratamiento de aguas residuales son variados, se puede emplear insumos como energía eléctrica o reactivos químicos; esto dependerá de la tecnología seleccionada y la zona (ciudad o campo) y a esto se suma costos de operación”. (Noyola et al, 2013).

La **figura 1** muestra de manera conceptual un sistema de tratamiento de aguas residuales.



**Figura 1. Esquema conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales**  
Fuente: Noyola et al., 2013

La **figura 2** muestra tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas residuales, de acuerdo al tipo de proceso.

Como se aprecia en la **figura 2**, cada una de las tecnologías ofrece capacidades para eliminar ciertos contaminantes; y presentan ventajas y desventajas al momento de su elección; en la **tabla 2** se observan estas características.

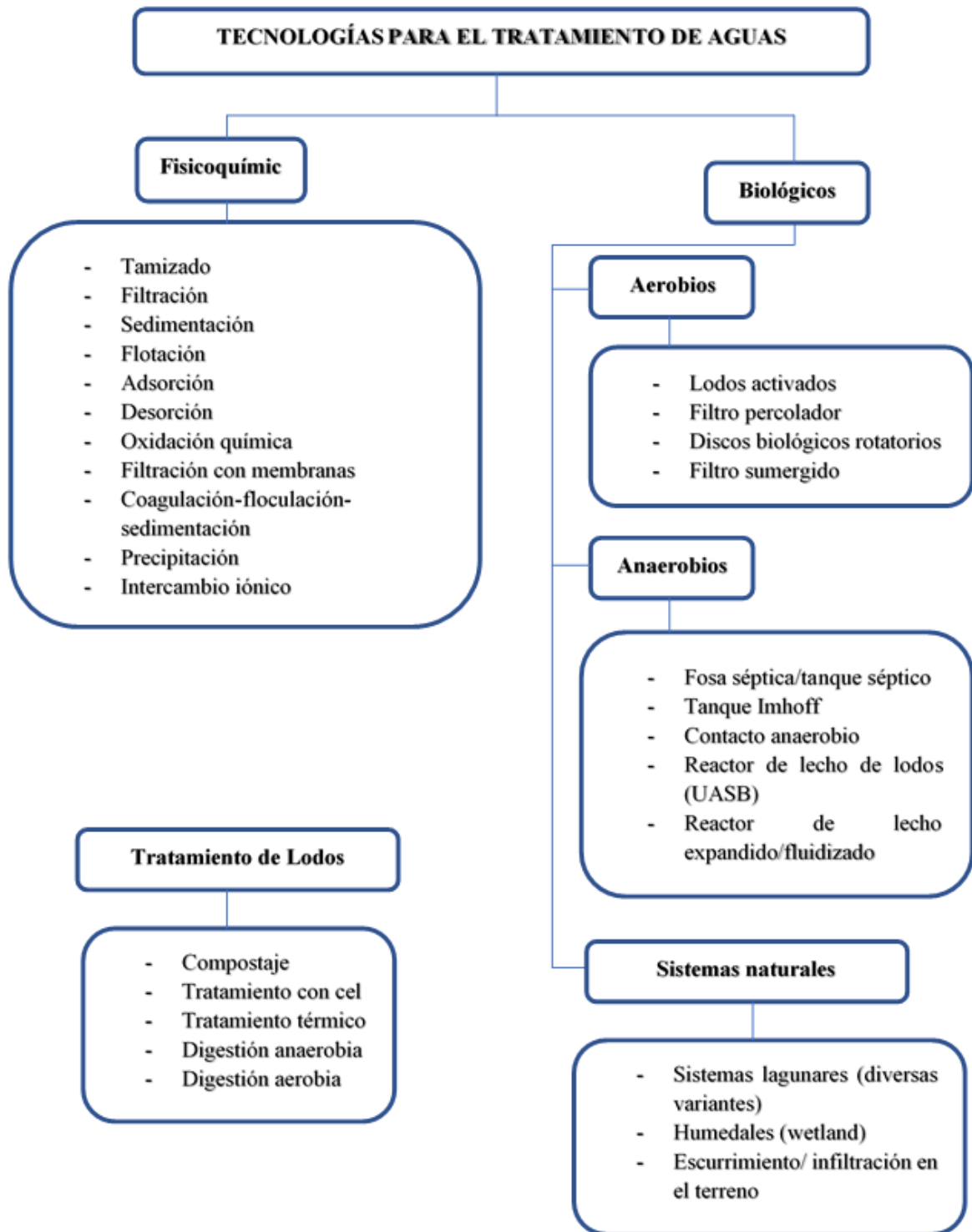


Figura 2. Tecnologías para el tratamiento de agua residual  
Fuente: Noyola et al., 2013

**Tabla 2: Ventajas y desventajas de algunas tecnologías existentes**

<b>Tipo</b>	<b>Naturaleza de las Aguas Residuales</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Componentes eliminados</b>
<b>Sistemas Sépticos</b>	Aguas residuales domésticas	Simple, duradero, de fácil mantenimiento, requiere un espacio pequeño	Eficiencia de tratamiento baja; necesita tratamiento secundario; efluente no inodoro; limpieza del tanque a intervalos frecuentes	DQO, DBO, TSS; grasa
<b>Sanitarios de Compostaje</b>	Heces de humano, papel higiénico, cenizas de carbón, aserrín, cal, entre otros	Reducir el consumo de desechos y apoyar el reciclaje de nutrientes	Diseño y mantenimiento adecuado, para evitar malos olores y propagación de moscas	Volumen reducido de 10 a 30%; patógenos
<b>Filtro Anaeróbico</b>	Aguas residuales domésticas e industriales depositadas previamente de relación DQO/DBO estrecha	Simple y duradero, si está bien construido y las aguas residuales debe haber sido tratadas previamente; alta eficiencia de tratamiento; se requiere poca superficie	El material de construcción del filtro puede ser costoso; el material del filtro se puede obstruir generando malos olores	DBO, total de sólidos disueltos, TSS
<b>Tratamiento Anaeróbico (ejem. Biodigestor, RAFA)</b>	Excrementos humanos, desechos animales y agrícolas	Transformación del recurso; el gas producido se puede utilizar para generación de energía, cocina e iluminación	Operación y mantenimiento difícil, puede existir fuga de gas o merma de la producción y del biodigestor con sólidos; el tratamiento anaeróbico a menudo proporciona poca eliminación de nutrientes	DQO, DBO, TSS; grasa
<b>Lagunas de estabilización / Lagunas anaeróbicas facultativas y de maduración Lagunas de estabilización de aguas residuales a base de lentejas de agua</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas; buenas para ciudades pequeñas y medianas	Las lagunas de maduración pueden lograr buena eliminación bacteriana; se debe remover los lodos de manera regular –no hacerlo puede tener consecuencias graves–; el biogás se puede recuperar como fuente de energía.	Ocupan una extensión mayor del terreno; a veces DBO y SS altos en efluentes de algas, pero esto no afecta el tratamiento; trabaja mejor en climas cálidos, pero puede trabajar en climas moderados	DBO, SS, TN, TP.
	Aguas residuales domésticas y agrícolas	No hay riesgo de obstrucción; altas tasas de eliminación de nutrientes	Ocupan una extensión mayor del terreno; necesidad de cosecha constante; inadecuado en regiones muy ventosas	DBO, SS, TN, TP, metales

Continuación



<b>Tipo</b>	<b>Naturaleza de las Aguas Residuales</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Componentes eliminados</b>
<b>Humedales artificiales</b>	Aguas residuales domésticas y agrícolas; pequeñas comunidades; tratamiento terciario para industrias	Baja o ninguna necesidad de energía; bajos costos de mantenimiento; proporciona valor estético, comercial y para el hábitat	Se debe cavar y usar grandes terrenos; se puede obstruir el sistema si no existe un adecuado mantenimiento	TSS, DQO, TN, TP.
<b>Tratamiento biológico aeróbico (es decir, lodos residuales activados) aguas domésticas industriales Sistema de membrana microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, RO (Osmosis Inversa)</b>	Los aireadores de acero inoxidable son resistentes a las aguas residuales corrosivas y las hacen adecuadas para las plantas Industriales de pulpa y papel, la industria química y otros entornos extremos. Buena eliminación de la DBO y la planta se puede operar para facilitar la eliminación de nitrógeno y fósforo	Rápido, económico comparado con otros métodos, libre de olores. Requisitos de mantenimiento altos; ineficaces en aguas profundas (por lo tanto, son de poco profundas) y en condiciones climáticas de congelación	Poca eliminación de cargas bacterianas y alta producción de lodos	DBO, SS, TN, TP.
	Aguas residuales depositadas previamente; pueden utilizarse en combinación con procesos biológicos (MBR, MBBR)	Procesos que cierran el ciclo del agua y producen agua de alta pureza para su reutilización	costos más altos y mayores requisitos en funcionamiento, mantenimiento y consumo de energía	La Microfiltración y la ultrafiltración eliminan todos los agentes biológicos y las Macromoléculas; la nanofiltración elimina las moléculas orgánicas simples; la ósmosis inversa elimina los iones inorgánicos

Fuente: Informe mundial de las Naciones sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017

-**DBO** Demanda biológica de oxígeno - **DQO** Demanda química de oxígeno - **MBBR** (por sus siglas en inglés) Reactor de lecho móvil con biofilm - **MBR** (por sus siglas en inglés) reactores biológicos de membrana -**RO** (por sus siglas en inglés) Osmosis inversa - **SS** Sólidos en suspensión -

**TDS** (por sus siglas en inglés) Total de sólidos disueltos - **TN** (por sus siglas en inglés) Nitrógeno total - **TP** (por sus siglas en inglés) fósforo total - **TSS** Total de sólidos en suspensión -**RAFA** Reactor anaerobio de flujo ascendente.

### 2.2.1. Procesos para el tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales deben ser sometidas a procesos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos, para mejorar la calidad; para no contaminar los cuerpos receptores naturales o un reúso para riego de áreas verdes.

Los procesos para el tratamiento de las aguas residuales incluyen los pre-tratamientos, tratamientos primarios y secundarios; si fuera necesario se recurrirá a un tratamiento terciario.

#### a. Pre-Tratamiento

Los pretratamientos de aguas residuales implican reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga; bien en los cuerpos receptores o para pasar a otra unidad de tratamiento. (Ramalho, 2003).

Utilizan unidades que ayudan a retener los residuos sólidos fácilmente separables, como rejillas y tamices, desgrasadores, desmenuzadores, desarenadores (tratamiento físico); en algunos casos se puede utilizar tanques de homogenización, reguladores de pH, entre otros; todo esto dependerá de la caracterización del agua residual a tratar.

**Tabla 3: Concentraciones típicas encontradas en aguas residuales pre-tradas**

Parámetro	Unidad	Valores promedio
Temperatura	°C	25.9
pH	Und.	7.1-7.18
Conductividad eléctrica	mmhos/cm	1.61
Turbidez	NTU	265.8
Demanda química de oxígeno	mg/l	252.72
Demanda biológica de oxígeno	mg/l	252.72
Sólidos suspendidos totales	mg/l	194.23-194.53
Nitrógeno total	mg/l	-
Amonio	mg/l	-
Fósforo total	mg/l	-
Fosfato	mg/l	-
Coliformes fecales	NMP/100ml	9.3E+07 - 1.00e+08

**Fuente:** Adaptado de Rojas, Vera y Vidal (2013), y Vera, Araya, Andrés, Sáez y Vidal (2014). Citado en Gómez, 2017.

## **b. Tratamiento Primario**

Comprende procesos de sedimentación y tamizado de materiales sólidos. A este nivel es común el empleo de tecnologías tales como tanques de sedimentación o lagunas de estabilización en su fase anaerobia. En este tipo de tratamiento se busca remover los materiales que no han podido ser sedimentados, usando tratamiento físico o fisicoquímico dependiendo de la caracterización del agua residual.

En el tratamiento primario, la velocidad del flujo debe reducirse para permitir el depósito de la mayor cantidad de sólidos. La velocidad del flujo debe reducirse hasta 1 - 2 cm/s en un tanque sedimentador **(Hernan y Comisionado, 1964)**.

## **c. Tratamiento Secundario**

Esta etapa comprende procesos biológicos para tratar la materia orgánica disuelta no sedimentable presente en el agua. Es común el empleo de tanques de aireación, lodos activados, biodiscos, filtros biológicos y lagunas.

## **d. Tratamiento terciario**

En esta etapa se trata de eliminar componentes específicos del agua residual, con el fin de alcanzar la calidad del efluente o estándar requerido antes de que sea descargado al cuerpo receptor. Se busca eliminar nutrientes minerales como el nitrógeno y fósforo; que se pueden tratar a través de humedales artificiales. También se puede eliminar el nitrógeno a través de procesos como nitrificación-desnitrificación y el fósforo mediante tratamiento químico.

### **2.2.2. Tratamiento Anaerobio**

Es el proceso por el cual la degradación de los componentes del agua residual se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas. **(Lorenzo y Obaya, 2005)**. Esta degradación implica la descomposición de las moléculas orgánicas en gas metano y dióxido de carbono en ausencia de oxígeno molecular.

Un aspecto ventajoso es que la generación de lodos es mucho menor en el proceso anaerobio que en el aerobio, por ende, se reducen los costos de tratamiento de los lodos. Por todo esto, es el método más ventajoso en el tratamiento de aguas residuales de mediana y alta carga orgánica. **(Lorenzo y Obaya, 2005)**.

Los procesos bioquímicos involucrados podrían dividirse en cuatro categorías, ya que las bacterias (microorganismos) degradan secuencialmente la materia orgánica: (1) hidrólisis y desintegración; (2) acidogénesis; (3) acetogénesis y (4) metanogénesis. **(Zama, 2005)**.

#### **a. Hidrólisis y desintegración**

“Es el paso inicial para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos”. **(Yaya, 2012)**. “Las moléculas de gran tamaño se transforman en moléculas pequeñas, por enzimas que son producidas por los propios microorganismos”. **(Trapote, 2016)**

“Son las bacterias acidogénicas las encargadas de realizar la hidrólisis, tanto de materia particulada como de la disuelta”. **(Trapote, 2016)**. La hidrólisis se puede ver afectada al momento de degradar la “lignina, la cual es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios, afectando la biodegradabilidad de la celulosa, hemicelulosa y otros hidratos de carbonos”. **(Yaya, 2012)**.

#### **b. Acidogénesis o fermentación**

“Es el proceso por el cual la materia orgánica soluble se transforma en un conjunto de ácidos orgánicos volátiles, gases y nuevas células”. **(Trapote, 2016)**. “Estos compuestos serán utilizados directamente por las bacterias metanogénicas y compuestos orgánicos más reducidos”. **(Yaya, 2012)**

#### **c. Acetogénesis**

“A través de las bacterias acetogénicas, el etanol, ácidos grasos, etc, y algunos compuestos aromáticos son transformados en productos más sencillos, acetato y H<sub>2</sub>”. **(Yaya, 2012)**

#### **d. Metanogénesis**

“Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaerobia, la cual consiste en la conversión, por acción de bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas), de ácidos orgánicos volátiles y el nitrógeno en metano y otros productos finales (CO<sub>2</sub>, agua, amonio, etc)”. **(Trapote, 2016 y Yaya, 2012)**.

## 2.3. TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS Y TECNOLOGÍAS

La retención de la biomasa en los reactores anaerobios es de importancia para un adecuado funcionamiento. Las bacterias involucradas que se forman en el proceso anaerobio tienen la capacidad de adherirse unas a otras formando flocs, lo que facilita su retención en el reactor. (Díaz, 1987).

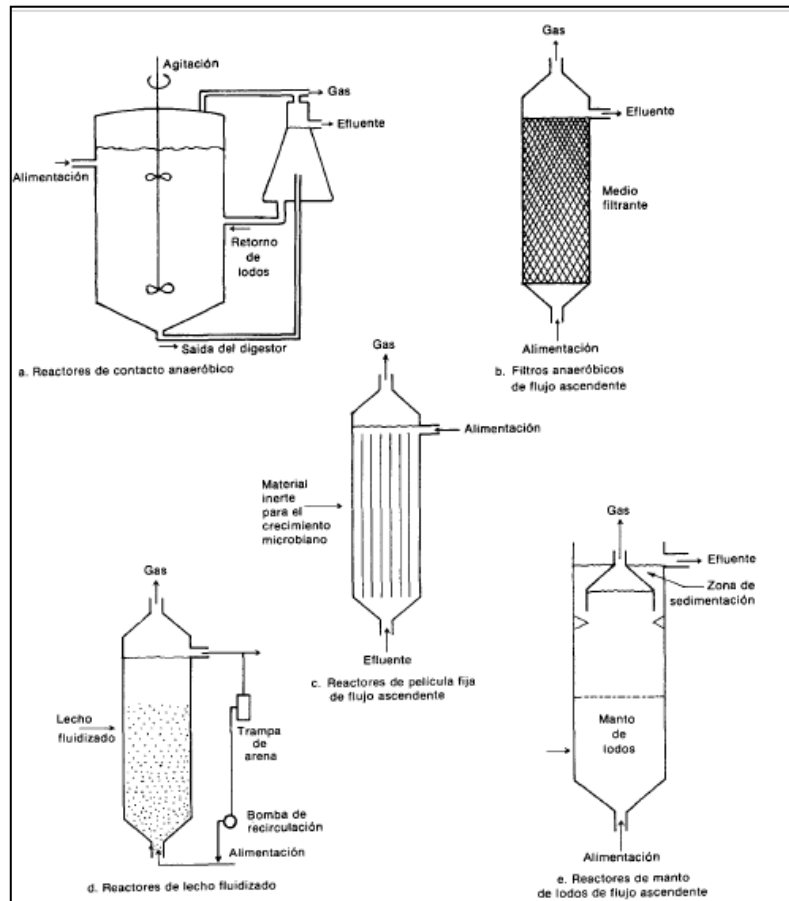


Figura 3. Tipos de reactores anaerobios

Fuente: Díaz, 1987

A continuación, se describe los tipos de reactores anaerobios más conocidos.

### 2.3.1. Tanque de agitación constante (CSTR- siglas en Ingles)

Cuenta con paletas o tornillos para lograr la agitación del agua dentro del tanque. La agitación mecánica se usa frecuentemente en digestores más pequeños. Se ha utilizado con éxito para la estabilización de lodos de aguas residuales y el tratamiento de aguas residuales industriales que contienen alta concentración de sólidos, como residuos de cultivos. Dado que la biomasa no se retiene, la eliminación de DQO tiende a ser limitada. (Zama, 2005)

### **2.3.2. Filtro anaerobio**

Reactor de soporte fijo que consiste en un tanque cuyo interior está ocupado por un material inerte sobre el cual se forma una película de biomasa anaerobia. En aquellas situaciones en las que se produce un crecimiento excesivo de la biomasa, la película se desprende del soporte sólido y se elimina del sistema como fangos en exceso. (**Chiva et al, 2018**).

**Srinivasa Raghavan et al. (2017) citado en Chia et al. (2018)**, define que los principales inconvenientes radican en la necesidad de incorporar medios de soporte para la inmovilización de la biomasa en el sistema, elevados tiempos de puesta en marcha, bajos rendimientos de eliminación de patógenos, formación de caminos preferenciales, y obstrucción y colmatación a causa de los sólidos. **Libhaber & Orozco Jaramillo (2012) citado en Chiva et al, (2018)**, indica que, “su uso es recomendable para tratamiento con poca cantidad de sólidos en suspensión, los bajos costes de operación y mantenimiento favorecen su uso para pequeñas y medianas poblaciones”.

### **2.3.3. Reactor anaerobio de lecho fijo de flujo ascendente (UASB)**

Es el más conocido con mayor investigación y utilizado en distintos tipos de tratamiento. “La formación de lodos se da en el fondo del reactor, producto de la acumulación de los sólidos en suspensión contenidos en el afluente, así como por el crecimiento de los organismos; dando lugar al proceso biológico”. (**Chiva et. al, 2018**). Las bacterias se desarrollan como una masa floculante en una corriente de desechos que fluye hacia arriba. En la parte superior cuenta con unas pantallas, las cuales retienen la masa microbiana, el gas y el efluente se capturan en la parte superior del recipiente. (**Zama, 2005**).

### **2.3.4. Reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB)**

Este reactor es una variante del sistema UASB para el tratamiento anaerobio de aguas residuales. (**Chiva et. al, 2018**). **Fuentes et al. (2011), citado en Chivas et al. (2018)** define al reactor EGSB como el sistema que “combina la recirculación de parte del efluente junto con la relación altura/diámetro, lo que permite establecer elevadas velocidades ascensionales capaces de expandir y fluidizar el lecho granular; promoviendo un mayor contacto entre la biomasa y el agua residual”.

### 2.3.5. Reactor anaerobio de membranas

Al igual que en los sistemas convencionales de tratamiento biológico de aguas residuales, los biorreactores de membranas (MBR, del inglés Membrane BioReactor) pueden ser aerobios o anaerobios. Una ventaja de estos sistemas de membrana es que permiten obtener efluentes de elevada calidad, susceptibles de ser reutilizados con diversos fines (e.g. irrigación agrícola, reutilización urbana e industrial, recarga de acuíferos, etc.). En la actualidad existe poca investigación sobre este tipo de reactor para el tratamiento de aguas residuales domésticas, pero para aguas residuales industriales funciona adecuadamente. (Chiva et. al, 2018).

### 2.3.6. Reactor baffled anaerobio

Es un diseño de reactor que utiliza una serie de deflectores o pantallas para obligar a las aguas residuales que contienen contaminantes orgánicos a fluir por debajo y por encima (o a través de) de los deflectores a medida que pasan de la entrada a la salida (Ver Figura 4). Nachaiyasit y Stuckey, (1997) citado en Zama (2005), indica que “las bacterias dentro del reactor se elevan y se sedimentan suavemente debido a las características del flujo y la producción de gas, pero se desplazan hacia abajo a un ritmo lento”. Polprasert et al., (1992) citado en Zama, (2005), añade que “el objetivo principal del diseño, ha sido mejorar la capacidad de retención de sólidos y tratar las aguas residuales difíciles; el reactor baffled anaerobio es simple y económico de construir porque no hay partes móviles ni mezcla mecánica”.

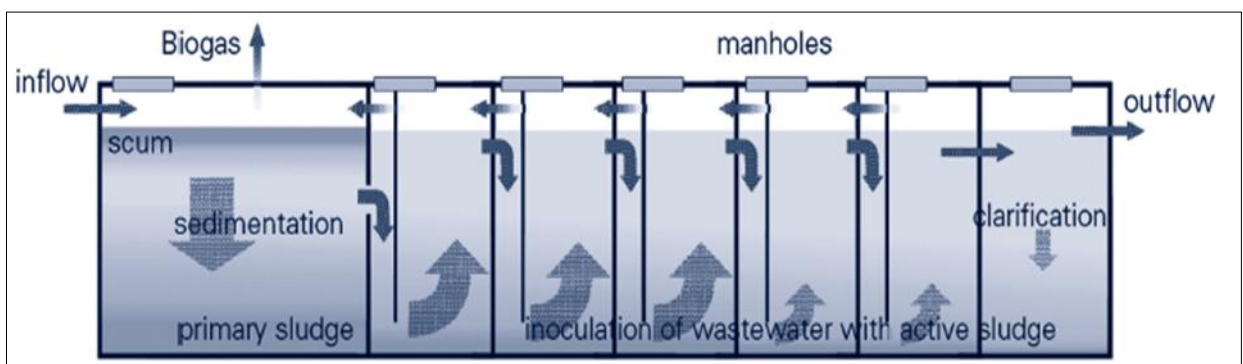


Figura 4. Tanque baffled o reactor baffled anaeróbico

Fuente: (Gutterer, B. et al., 2009).

“La ventaja del Tanque Baffled es su capacidad para separar acidogénesis y metanogénesis a lo largo del reactor, lo que permite que diferentes grupos bacterianos se desarrollen en las condiciones más favorables” (Nguyen, H. et al., 2010). “Esta población

bacteriana, se queda retenida en cada cámara, lo que permite un tratamiento eficiente de las aguas residuales, además han demostrado resistencia a cargas hidráulicas y orgánicas”. (Foxon y Buckley, s.f.)

“El tanque baffled es adecuado para el tratamiento de todo tipo de agua residual; sin embargo, su eficiencia aumenta cuanto mayor sea la carga orgánica. Los resultados del tratamiento permiten la reducción de 65 % a 90 % de DQO; 70 % a 90 % de la DBO”. (Gutterer, B. et al., 2009).

#### **a. Consideraciones de diseño**

Según Foxon y Buckley (s.f.) existe poca literatura disponible sobre el diseño del tanque baffled. Ellos consideran 6 parámetros para el diseño:

- **Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)**

Es el tiempo de contacto del fluido con los lodos que se generan en cada cámara, en el cual ocurre el tratamiento de aguas residuales. También es uno de los parámetros que determina el tamaño del reactor (volumen de trabajo) y, por lo tanto, tiene un efecto significativo en el costo de capital del sistema.

Según resultados obtenidos por Nasr et. al (2008), indican que “mientras mayor sea el TRH en el Tanque Baffled el porcentaje de remoción en DQO, DBO, sólidos totales, serán más favorables. Los rangos de TRH que utilizó fueron entre 8 horas y 24 horas, teniendo un 82 % de remoción en DQO a las 24 horas”.

Foxon y Buckley, (s.f) indican que un adecuado TRH es a partir de las 22 horas, mientras que Stuckey, (2010), describe que el TRH promedio sería de 10 horas para aguas residuales diluidas (500 mg/l DQO) con un porcentaje de remoción entre 80-95 por ciento de DQO.

- **Velocidad Máxima de Flujo Ascendente**

Es el flujo ascendente máximo permitido en el reactor que no causa un arrastre y/o lavado del lodo. La velocidad máxima de flujo ascendente es la velocidad de diseño aumentada por un factor de flujo máximo.

La velocidad del flujo ascendente en el tanque baffled nunca debe ser mayor a 1m/h, ya que limita su diseño. La velocidad superior del flujo se incrementa en relación directa a



la altura del reactor, por lo tanto, no puede ser usada como un parámetro variable para conseguir el TRH requerido. (Gutterer, B. et al., 2009).

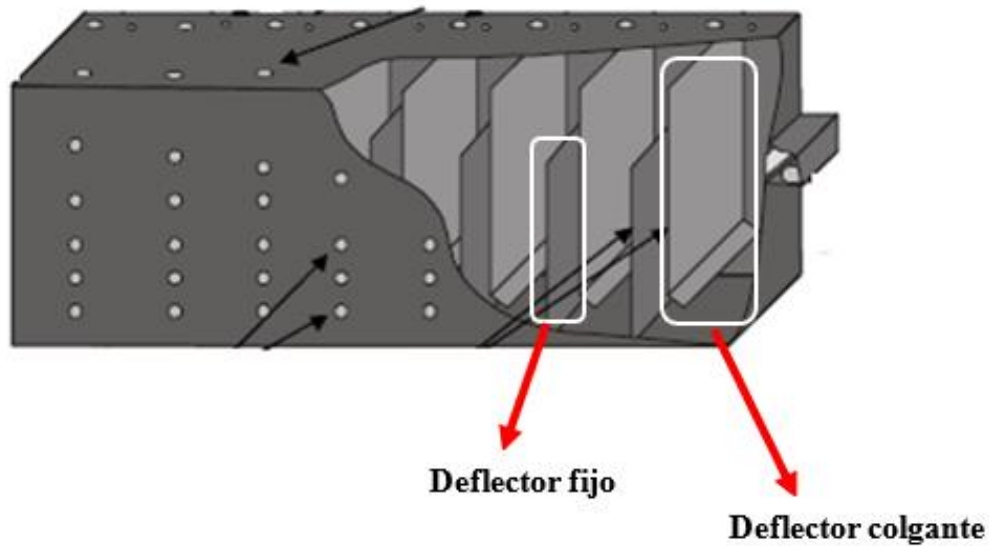
Según Stuckey (2010), “las velocidades de flujo ascendente deberían ser bajas, de modo que se fomente el crecimiento floculante y granular de los lodos”.

- **El Número de compartimentos, profundidad del reactor, relación de área de flujo ascendente a descendente del compartimento**

Definen la velocidad máxima de flujo ascendente dentro del reactor. En el caso de la relación de área de flujo ascendente a descendente, el cambio a la velocidad de flujo ascendente es causada por el alargamiento de la trayectoria general que las aguas residuales tienen que atravesar en el reactor (altura de trabajo del reactor x número de compartimentos x 2 m) y, por lo tanto, una mayor velocidad superficial que las aguas residuales deben alcanzar. El número de compartimentos debe ser seleccionado para que sea igual o mayor que el número de zonas dentro del reactor que pueden desarrollar consorcios microbianos con características significativamente diferentes. Esto implica que los pases repetidos a través del lecho de lodo tienen un mayor efecto beneficioso en la extensión del tratamiento que mantener una baja velocidad de flujo ascendente. Intuitivamente, habrá un punto de cruce donde, al aumentar el número de compartimentos, aumentará la velocidad de flujo ascendente hasta un punto donde se produce el lavado del lodo en detrimento de los procesos biológicos, lo que resulta en un rendimiento de eliminación de DQO menor, que para un menor número de compartimentos. (Foxon y Buckley, s.f)

- **Relación Largo/Ancho**

No tiene un efecto directo sobre la velocidad superficial de flujo ascendente. Sin embargo, un compartimento que es demasiado largo experimentará efectos de canalización y desvío; mayor flujo pasará a través de la manta de lodo cerca del deflector colgante que cerca del siguiente deflector permanente, evitando efectivamente gran parte del lecho de lodo y aprovechando al mínimo el espacio del reactor. (Foxon y Buckley, s.f). (Ver figura 5).



**Figura 5. Deflector fijo y colgante**  
**Fuente:** Adaptado de Foxon y Buckley s.f

A continuación, se presenta la **Tabla 4** de rangos recomendados para el diseño de un Tanque Baffled.

**Tabla 4: Rangos recomendados y ecuaciones para parámetros en el diseño de un Tanque Baffled para el tratamiento de aguas residuales domésticas.**

Parámetros	Símbolo	Unidad	Rango de Parámetros recomendados o ecuación
Caudal	Q	m <sup>3</sup> /d	-
Tiempo de Retención Hidráulico	TRH	h	20 a 60, pero de 40 a 60 durante la puesta en marcha
Volumen de trabajo del Tanque	V <sub>w</sub>	m <sup>3</sup>	QxTRH/24
Velocidad Máxima de flujo ascendente	V <sub>p</sub>	m/h	0.54
Velocidad de Diseño de flujo ascendente	V <sub>d</sub>	m/h	V <sub>p</sub> /1.8 = 0.30
Número de Cámaras	N	-	4 a 6
Holgura del Baffled Colgante con la base	d <sub>h</sub>	m	0.15 a 0.20
Área de Flujo ascendente de la cámara	A <sub>u</sub>	m <sup>2</sup>	Q/( V <sub>d</sub> x 24)

<b>Relación de flujo ascendente a flujo descendente</b>	$R_{U:D}$	$m^2/m^2$	2 a 3
<b>Relación ancho-largo</b>	$C_{W:L}$	$m/m$	3 a 4
<b>Área total de las cámaras</b>	$A_C$	$m^2$	$A_U \times (1 + R_{U:D}) / R_{U:D}$
<b>Profundidad del Tanque</b>	$r_D$	$m$	1 a 3 (La profundidad del reactor se regirá en gran medida por el costo de la excavación)
<b>Ancho del Tanque</b>	$r_W$	$m$	$\sqrt{\frac{V_W \times C_{W:L}}{N \times r_D}}$
<b>Largo del Tanque</b>	$r_L$	$m$	$N \times r_W / C_{W:L}$

**Fuente:** (Foxon y Buckley, s.f).

## b. Operación y mantenimiento

Para una adecuada operación y para que este funcione adecuadamente, se requiere de un periodo de puesta en marcha.

Según **Gutterer, B. et al. (2009)** para la puesta en marcha, es recomendable comenzar con solamente un cuarto del flujo diario y con un agua residual ligeramente más fuerte. La tasa de carga debe aumentar lentamente durante 3 meses. Esto permitirá que los microorganismos se puedan multiplicar en un tiempo suficiente antes de que los sólidos en suspensión se laven. El arranque con carga hidráulica alta retrasa la maduración de los lodos activados.

Según **Stuckey (2010)** el objetivo de la puesta en marcha es desarrollar el cultivo microbiano más estable (granular o floculento) en cada cámara. Las tasas iniciales de carga deberían ser bajas para que los microorganismos de crecimiento lento no estén sobrecargados, y, tanto las velocidades de flujo ascendente del gas como las del líquido, deberían ser bajas (<2 m/h) de modo que se fomente el crecimiento floculante y granular. La tasa de carga inicial recomendada es de aproximadamente 1.2 kg-DQO/m<sup>3</sup> / d.

Según **Foxon y Buckley (s.f)** el tiempo de retención hidráulico debería ser entre 40 a 60 horas, hasta lograr estabilizar y generar lodos en el tanque baffled. Este sistema no requiere de energía.

Para el mantenimiento del tanque baffled, según **Gutterer, B. et al. (2009)** es recomendable retirar el lodo que se genera en cada cámara o compartimiento en intervalos regulares, procurando dejar algo de lodo para garantizar la eficiencia de un tratamiento continuo. El lodo que se debe retirar es el lodo viejo del fondo. La remoción de lodos debe ser realizada por personal capacitado, debido que, dentro del tanque, por ser un sistema anaerobio, presenta gas tóxico como metano, para esto es recomendable una adecuada ventilación en las cámaras antes de la remoción.

### **c. Países que emplearon el Tanque Baffled como tratamiento primario para tratar aguas residuales domésticas**

Es sabido y muy estudiado el uso y la eficiencia que presenta el tanque baffled al tratar aguas de alta carga orgánica, como las aguas residuales industriales; sin embargo, se han recopilado casos donde se ha empleado el tanque baffled para tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas semi-urbanas o ubicadas en la periferia.

- **Nepal**

Según **Shirish Singh et.al., (2008)**, en Nepal se ha construido un tanque baffled con un humedal artificial como parte del programa piloto y demostrativo para el agua a una escala comunitaria, gracias a la gestión del Banco Asiático de Desarrollo. La cofinanciación se dio en conjunto con la ONU-Habitat y WaterAid, mientras que la supervisión técnica estuvo a cargo de la Organización de Salud Ambiental y Pública (ENPHO, siglas en inglés). Esta planta trata un promedio de 10 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales provenientes de cerca de 80 viviendas, las que representan 400 habitantes equivalentes en una zona peri-urbana en el Municipio de Thimi.

Las dimensiones del tanque baffled son de 6m x 4m x 2m, siendo su volumen efectivo de 42 m<sup>3</sup>. La tubería de salida se encuentra ligeramente por debajo de la tubería de entrada al tanque (1.75 m, medido desde la parte inferior).

El sistema empezó a operar en julio del 2006 y se evaluó hasta agosto del 2007. Los resultados obtenidos en el tiempo de evaluación para el tanque baffled fueron, con respecto a la remoción en sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub> y DQO de 91%, 78% y 77% respectivamente.

- **Malasia**

**Yulistyorini et.al., (2019)**, realizaron la evaluación sobre el impacto del Programa de Saneamiento para Comunidades (SANIMAS) establecido en 2002, cuyo objetivo fue caracterizar el rendimiento actual de los tanques baffled (89 en total) que se desplegaron en grandes cantidades para el tratamiento de aguas residuales domésticas en áreas urbanas densamente pobladas en Malang (Indonesia).

Se encontró que el 14% de los 89 tanques baffled en Malang tuvo un excelente desempeño estructural, con un 61% que mostró un desempeño medio o bajo. Las unidades de tanques baffled probadas contribuyeron al tratamiento de aguas residuales domésticas, pero su efluente final no cumplió con los criterios indonesios para la descarga de aguas residuales domésticas tratadas en cuerpos de aguas superficiales. Los parámetros analizados dieron con una eficiencia promedio de remoción de DBO, SST,  $\text{NH}_4^+$  y fósforo total de 74%, 66%, 43% y 21%, respectivamente.

De esta experiencia se tiene que el tanque baffled debe ser considerado como un primer tratamiento y no como el tratamiento definitivo; incluso aunque se observa que los valores se encuentran dentro del rango de operación, según literatura de este tipo de tanque.

- **Sudáfrica**

En Keingsburgh, Sudáfrica, mediante una investigación identificaron al Tanque Baffled como un sistema rentable de fácil mantenimiento, que no requiere electricidad ni mano de obra altamente calificada. Lo colocaron a escala piloto (3200l) en las plantas de tratamiento de aguas residuales de Keingsburgh. Durante su operación demostró ser estable y consistente en su desempeño; operó con un tiempo de retención hidráulica de 22.5 h. Con respecto a los sólidos, tuvo una eficiencia de retención entre 60 a 90 por ciento, y una remoción de 60 por ciento de DQO. (**Zama, 2005**).

## **2.4. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO**

El conocimiento del comportamiento hidráulico de un reactor ayuda a realizar un mejor diseño. Según **Pérez (1992)**, la baja eficiencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales, se debe a deficiencias hidráulicas que son ocasionadas por características de flujo en la unidad y que afectan los periodos de retención del agua en los reactores.

### 2.4.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Según **Levenspiel (2004)** el tiempo de retención, es el tiempo promedio en el que el fluido puede estar en el reactor y se asocia con el tiempo necesario para que se lleve a cabo los procesos que garanticen un tratamiento del agua residual. En condiciones de flujo ideal, conocido como tiempo de retención hidráulico nominal ( $t_0$ ), se puede definir por la ecuación (1), mediante la relación entre el volumen de agua útil ( $V$ ), que es el producto de la profundidad ( $h$ ), el ancho ( $w$ ) y la longitud ( $L$ ) del reactor dividido por el caudal de agua que ingresa ( $Q$ ). (**Kadlec y Wallace, 2009, citado en Piedad 2010**).

$$t_0 = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

#### a. Influencia del tiempo de retención

En los reactores de tratamiento de agua residual, ocurren procesos rápidos y también lentos. Por esto es necesario periodos de retención de contacto cortos o largos para que sucedan las reacciones necesarias para el tratamiento. (**Perez, 1992**).

Según **Perez, (1992)**, el periodo de permanencia es variable: segundos en la mezcla rápida y aireación por difusión; un lapso de minutos en la floculación, filtros percoladores y filtros rápidos; unas horas en las unidades de lodos activados; días en el tratamiento natural de aguas superficiales y en lagunas de estabilización; semanas en la digestión anaerobia de lodos de aguas residuales; y meses y posiblemente años en la estabilización de depósitos en lagos y mar.

En los reactores, el tiempo de retención ( $t_0$ ) no es igual para los diferentes volúmenes ( $V$ ) que ingresa en el tiempo  $t = 0$ . Por tanto, es importante estudiar el tiempo de retención en el reactor, para conocer el tipo de flujo que sucede dentro del reactor para un determinado tratamiento. (**Perez, 1992**).

En los reactores de sedimentación, como el tanque baffled o séptico, se producen influencias mayores por variaciones del tiempo de retención esperado, tales como tipo de flujo y espacios muertos, al incidir en la carga superficial que tiene las dimensiones de velocidad. Provocando que, en realidad, se aprecien incrementos en las cargas superficiales o velocidades de asentamiento, lo que reduce la eficiencia de remoción en la unidad. (**Perez,1992**).

### 2.4.2. Trazador

Es una sustancia que en cualquier momento se puede determinar y no debe perturbar ni el tipo de flujo que se presenta en el reactor o unidad, ni cualquier señal de entrada. Permite obtener un cambio que se pueda detectar. (Gallego, 2002).

Una sustancia trazadora ideal se debe poder determinar de manera muy precisa, no reaccionar con la masa líquida, ni decantar o ser interferida por el material suspendido que se encuentra presente en un reactor o unidad. (CEPIS, 1990, citado en Gallego, 2002). Químicamente debe ser inerte y no ser absorbida sobre la superficie del reactor o unidad (Denbigh, 1968, citado en Gallego, 2002) para evitar cambios en las reacciones que suceden dentro de los reactores o que estos cambios sean mínimos.

#### a. Formas de inyectar un trazador para determinar el tiempo de retención

Existen dos formas de aplicar un trazador para poder determinar el tiempo de retención y las características hidráulicas de un reactor o unidad. La forma en que se aplica el trazador puede ser instantánea o continua en un intervalo de tiempo; la primera resulta ser el método más utilizado en evaluaciones de plantas.

- **Instantáneo:** se agrega un volumen conocido de trazador a la entrada del reactor en un punto en el cual se garantiza una buena mezcla, a partir de este momento se colectan las muestras a la salida del sistema o unidad de reacción. La mezcla del trazador en la corriente de entrada debe transcurrir en un periodo de tiempo muy corto en comparación con el tiempo medio de residencia. (Gallego, 2002).
- **Continua:** se aplica a la entrada del reactor de diferentes maneras: (i) manteniendo el suministro del trazador en forma constante durante un periodo, el cual puede ser unas dos o tres veces el tiempo teórico de retención, luego se suspende y a partir de este momento se colectan las muestras en la salida. Este método es conocido como señal por saltos; (ii) inyectando de manera continua y, a partir de ese momento, tomar las muestras en el efluente, extendiendo la experiencia por un periodo de tiempo tal que permita obtener por lo menos en tres medidas consecutivas el valor de la concentración inicial y (iii) el de respuesta de frecuencia, que consiste en inyectar la sustancia trazadora de forma continua, pero variando la concentración (Denbigh, 1968, citado en Gallego 2002).

## **b. Características de un trazador**

Según **Rodríguez (2006)**, un buen trazador será aquel que no altere significativamente la composición del agua residual a tratar. El trazador elegido para cualquier tipo de investigación de tratamiento de aguas residuales domésticas debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe comportarse de la misma forma que el material en estudio en la fase del proceso que se desea investigar.
- Debe poseer una propiedad particular con la cual se pueda distinguir del material en estudio, de tal forma que pueda ser fácilmente detectado en la presencia de otras sustancias y a bajas concentraciones.
- La detección debe ser inequívoca.
- No debe modificar en forma significativa la densidad, viscosidad u otras características propias del material en estudio.
- Los cambios en su concentración no deben afectar el comportamiento del sistema.
- No debe contaminar el sistema por largos periodos de tiempo para permitir la realización de futuras experiencias.
- En experimentos con trazadores no radiactivos se han empleado satisfactoriamente algunas propiedades físicas tales como color, densidad y conductividad.

## **c. Tipos de trazadores**

Las sustancias más recomendadas para ser utilizadas como trazadores son:

- Colorantes como fluoresceína, urarina (fluoresceína de sodio), pontacyl B rosado, rodamina B, rodamina WT, rodamina M, eosina y la pirarina.
- Iones como cloruros, especialmente de sodio, potasio o litio; fluoruros y los nitratos de litio o de sodio.
- Ácidos como el clorhídrico y el benzoico.
- Isótopos radiactivos.

La elección de la sustancia trazadora debe basarse en la disponibilidad de los equipos para su detección, siendo preferible aquella en la cual se requieran las menores o en la que se den las más bajas variaciones (**Gallego, 2002**). Es aconsejable que se evite la presencia de efectos adversos en los estudios hidrodinámicos, como por ejemplo el uso de



cantidades significativas de sales en los trazadores, porque crean corrientes de diferente densidad (CEPIS, 1990, citado en Gallego, 2002).

### 2.4.3. Modelos de Flujos en reactores

Pueden ser de dos tipos, intermitente y continuo.

#### a. Flujo intermitente

Es el menos frecuente y consiste en llenar el reactor y que se quede lleno un tiempo mientras se produce el proceso de tratamiento, puede realizarse con o sin mezcla, luego se vacía el reactor y se vuelve a repetir el proceso. (Pérez, 1992).

Este flujo no es práctico, ya que por lo general en las plantas de tratamiento el flujo es de tipo continuo, salvo que se trate de experiencias piloto o pruebas de laboratorio. (Pérez, 1992).

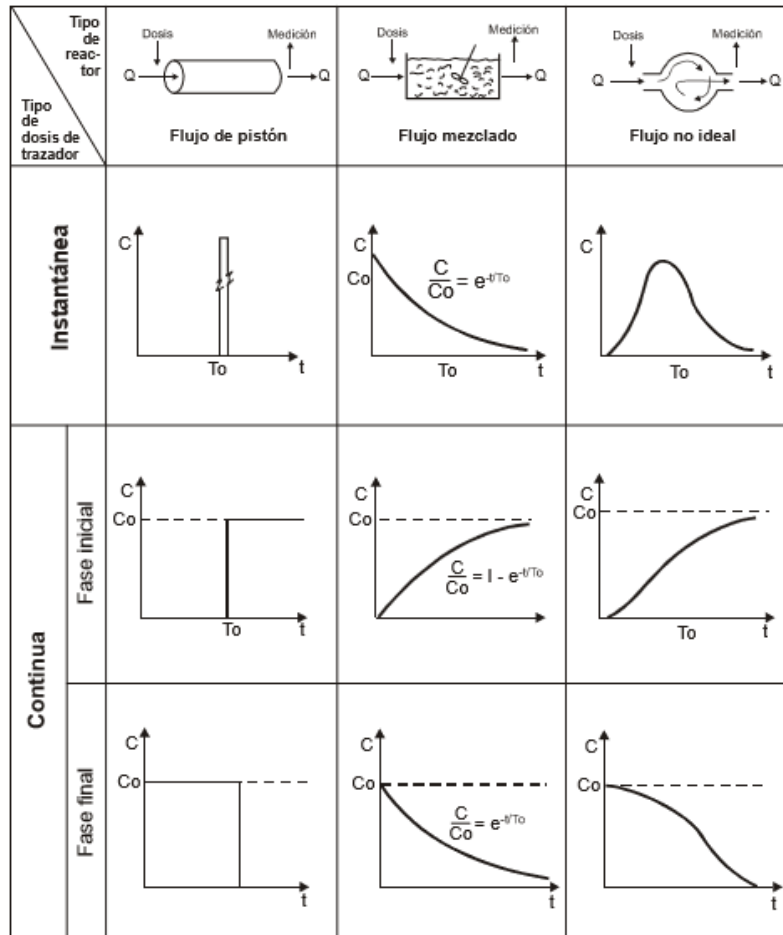
La prueba de jarras es un ejemplo de este tipo de flujo, ya que se llena con un volumen dado, se somete al proceso de tratamiento durante un tiempo de retención y una vez terminado se vacían y se prepara una nueva prueba. (Pérez, 1992).

#### b. Flujo continuo

Es el más común en los reactores de tratamiento de agua. Los reactores pueden ser de tipo (i) pistón; (ii) mezclado y (iii) no ideal. (Pérez, 1992).

- **Flujo de pistón:** Toda partícula de fluido que ingresa al reactor, permanece el mismo tiempo y sale completamente del reactor, con este tipo de flujo no existe mezcla entre el líquido que ingresa y el líquido que se encuentra dentro del reactor. Es poco común encontrar este tipo de flujo; un ejemplo de este tipo de flujo se puede apreciar en los canales tipo Parshall, vertederos, floculadores hidráulicos de pantallas y en decantadores con una relación largo/ancho bastante mayor de 1. (Pérez, 1992).
- **Flujo mezclado:** Toda partícula que ingresa dentro del reactor se dispersa dentro de ella. La concentración del líquido a la salida es la misma que existe dentro del reactor. Es poco común encontrar un flujo de este tipo; un ejemplo de este tipo de flujo se puede apreciar en retro mezcladores o floculadores mecánicos con pocas cámaras en serie. (Pérez, 1992).

- **Flujo no ideal:** Es el grado intermedio entre el flujo pistón y mezcla completa, con posibles alteraciones como presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculación. Este el tipo de flujo que más se encuentra en los reactores de tratamiento de agua. (Pérez, 1992).



**Figura 6. Curvas típicas de concentración del trazador en el efluente de reactores con diferentes características hidráulicas.**

Fuente: (Pérez, 1992)

#### 2.4.4. Modelo simplificado de la teoría de Wolf Resnick

Según Vargas y Torres (2008), este modelo matemático permite determinar los parámetros hidrodinámicos de un reactor (tanto para el tratamiento de aguas residuales, como de agua potable), evaluando la variación de concentración del trazador elegido a través del tiempo. Nos permite determinar de manera objetiva y sencilla el porcentaje de espacios muertos (m), el porcentaje de flujo pistón (p), el porcentaje de flujo mezclado

(M) y corto circuito que se presenta en la operación normal del reactor a partir de parámetros como  $\theta$  y  $\tan(\alpha)$ .

**Según Pérez (1992)**, para el cálculo del flujo que existe dentro del reactor se aplicarán las siguientes fórmulas:

- Si no existe espacios muertos, la fracción de flujo pistón ( $p$ ) y la de no pistón ( $1-p$ ) deben ser igual a la unidad.

$$p + (1 - p) = 1 \quad (1)$$

- Si existe espacios muertos, ( $m$ ) es la fracción de volumen considerado como espacio muerto, y ( $1-m$ ) es la fracción que no tiene espacios muertos, por lo tanto:

Flujo de pistón + flujo de no pistón + espacios muertos = 1

$$[p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m = 1 \quad (2)$$

- El flujo perfectamente mezclado es igual a:

$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (3)$$

- Si en el reactor se considera una combinación de flujos pistón y mezclado, la ecuación anterior se transforma en:

$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{t-p \times t_0}{(1-p)t_0}} \quad (4)$$

- Considerando que el sistema tenga espacios muertos y no muertos, se tendrá la siguiente ecuación:

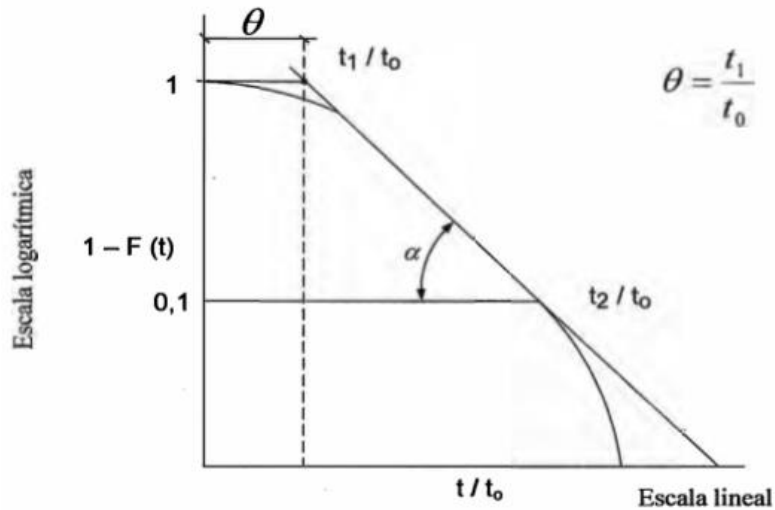
$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{t_0} - p(1-m)\right]} \quad (5)$$

- Con la función  $F(t)$  se trata de analizar la totalidad de la curva generada por la totalidad del trazador que sale del reactor.

$$F(t) = 1 - \frac{c}{c_0} = 1 - e^{-\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left[\frac{t}{t_0} - p(1-m)\right]} \quad (6)$$

- Aplicando logaritmo a ambos términos, se obtiene:

$$\text{Log}[1 - F(t)] = \frac{-\text{Log } e}{(1-p)(1-m)} \left[ \frac{t}{t_0} - p(1-m) \right] \quad (7)$$



**Figura 7. Curva de cantidad de trazador que permanece en el reactor**  
Fuente: (Rodríguez, 2006)

- La ecuación de la recta será:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{\text{Log } e}{(1-m)(1-p)} \quad (8)$$

- Reemplazando la ecuación (8) tenemos:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{0.435p}{p(1-m)(1-p)} \quad (9)$$

- Donde:

$$\theta = p(1-m) \quad (10)$$

- Reemplazando en la ecuación (9), se obtendrá de esta manera el valor del flujo pistón.

$$p = \frac{\theta \text{tan} \alpha}{0.435 + \theta \text{tan} \alpha} \quad (11)$$

- De la ecuación (10) se deduce que el volumen de espacios muertos será igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad (12)$$

- El flujo mezclado M será:

$$M = 1 - p \quad (13)$$

- El valor de  $\theta$  y  $\tan \alpha$  se hallan al trazar una recta pendiente en la curva que se ha generado de  $1-F(t)$  y  $t/t_0$ , donde:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (14)$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2 - t_1}{t_0}} \quad (15)$$

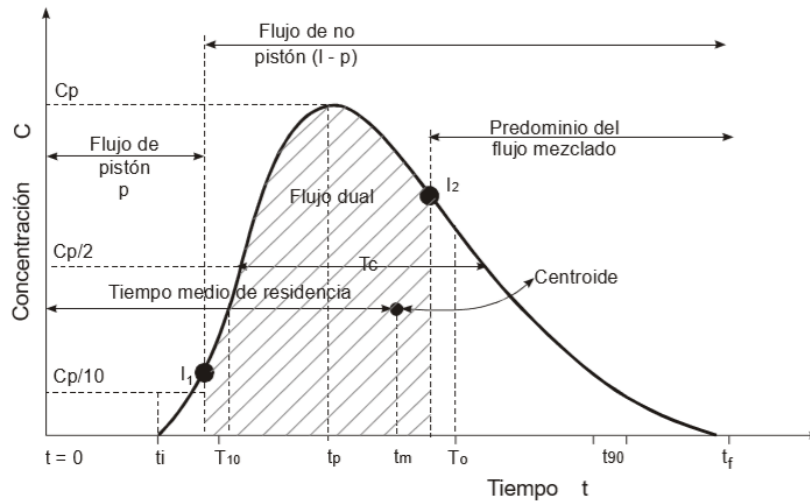
Siendo:

**$t_1/t_0$  y  $t_2/t_0$ :** La división de los tiempos medidos del cálculo de la concentración de salinidad con el tiempo de retención teórico calculado.

**$\theta$ :** Es el valor medido con la intersección de la recta paralela a la abscisa con la recta tangente a la curva.

#### **2.4.5. Curva de concentración del trazador o método de curva de tendencia**

La curva de concentración se origina a partir de analizar la concentración del líquido que sale del reactor. Antes se debe inocular al reactor con un trazador, con una concentración conocida ya sea de NaCl u otro compuesto que se pueda detectar fácilmente y no altere las propiedades del líquido. Del líquido se obtienen valores de concentración que aumentan en el tiempo hasta llegar a un valor máximo y luego disminuye hasta llegar al valor inicial en el que se encontraba el líquido antes de ser inoculado con el trazador. (Pérez, 1992), Ver figura 8.



**Figura 8. Curva de concentración del trazador en el efluente de un reactor**  
 Fuente: (Pérez, 1992)

Según Pérez, 1992, los parámetros principales de la curva son:

$t_i$  = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

$t_{10}$  = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.

$t_p$  = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

$t_m$  = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.

$t_o$  = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención =  $V/Q$ .

$t_{90}$  = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

$t_f$  = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.

$t_c$  = tiempo correspondiente al paso de la mitad de la concentración máxima.

$t_b$  = tiempo correspondiente al paso de la décima parte de la concentración máxima.

$C_o$  = concentración inicial.

$C_p$  = concentración máxima a la salida.

$e$  = excentricidad.

#### 2.4.6. Corto circuito

Dentro del reactor puede producirse corto circuitos, debido a que una parte de la corriente de fluido tiene un tiempo de permanencia más corto que el tiempo medio de retención

hidráulica, hasta aproximarse a un tiempo de retención igual a cero. (**Crittenden, Trussell, Hand, Howe & Tchobanoglous, 2012, citado en Hegg, 2018**)

#### **2.4.7. Zonas muertas**

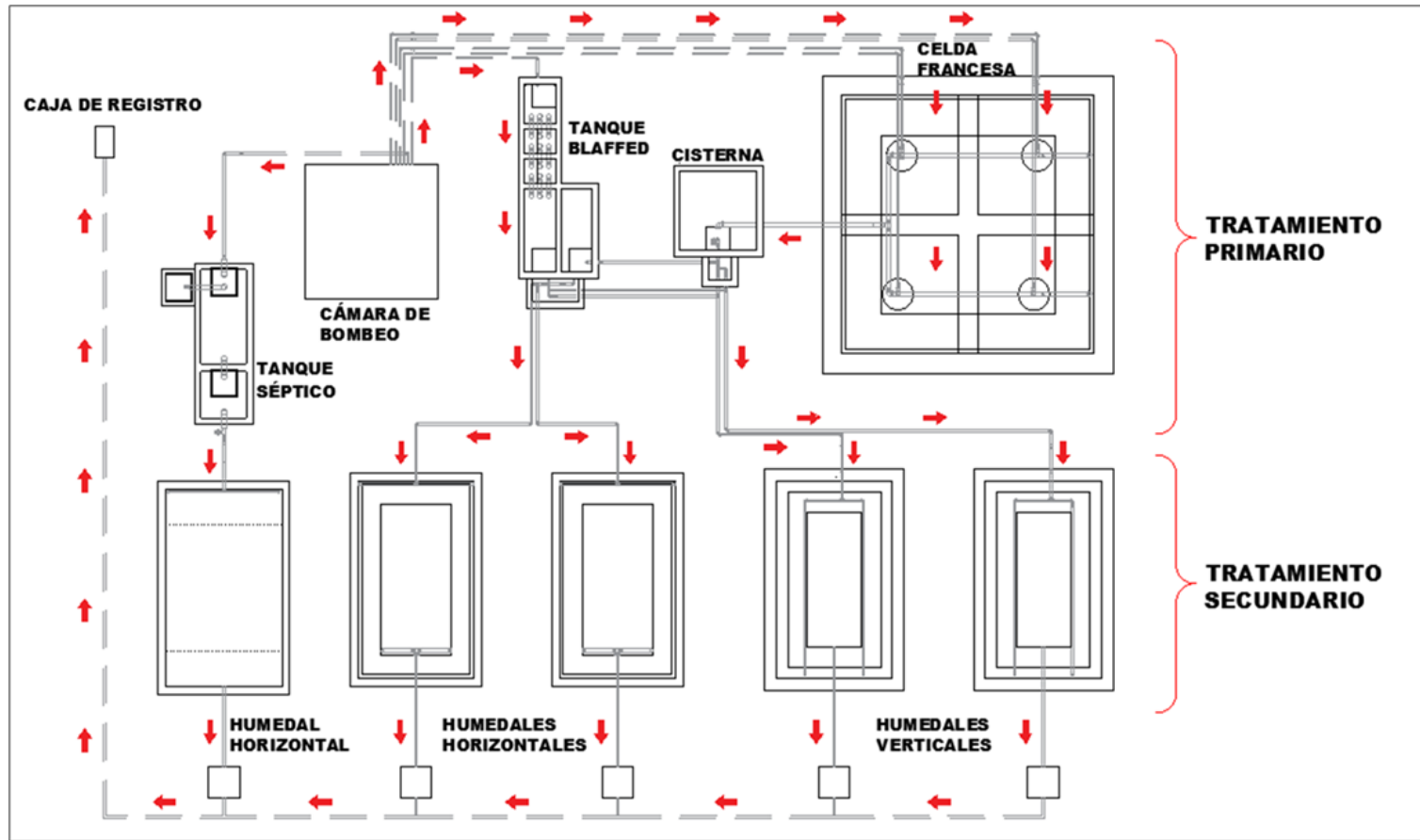
Ocupan un volumen considerable dentro de los reactores y, por lo tanto, el volumen efectivo del sistema disminuye. Debido a esto, las partículas suspendidas no tienen espacio suficiente para la sedimentación (**Tamayol, Firoozabadi & Ahmadi, 2008, citado en Hegg, 2018**).

#### **2.5. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas de la UNALM**

Esta planta está ubicada en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos (CEMTRAR) en un área aproximada de 1000 m<sup>2</sup>. La planta fue construida en el marco del proyecto “Programa de educación para la población infanto-juvenil del Perú”, financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y con la colaboración de la Universidad Ramón Llull. El año de construcción fue 2012 y desde esa fecha no se ha puesto en operación.

La planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales doméstica está compuesta por (ver **figura 9**):

- Caseta de Bombeo
- 3 líneas de tratamiento primario, instaladas en paralelo, que incluyen: Tanque Séptico, Tanque Baffled y Celda Francesa
- 3 líneas de tratamiento secundario, instaladas en paralelo, que incluyen: Humedales Verticales (02 unidades) y Humedales Horizontales (02 unidades, revestidos con geo membrana y 01 unidad de concreto).



**Figura 9. Distribución de los Sistemas de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales**  
 Fuente: Elaborado por Evelyn Portilla Benavente con modificación propia



### 2.5.1. Tratamiento primario

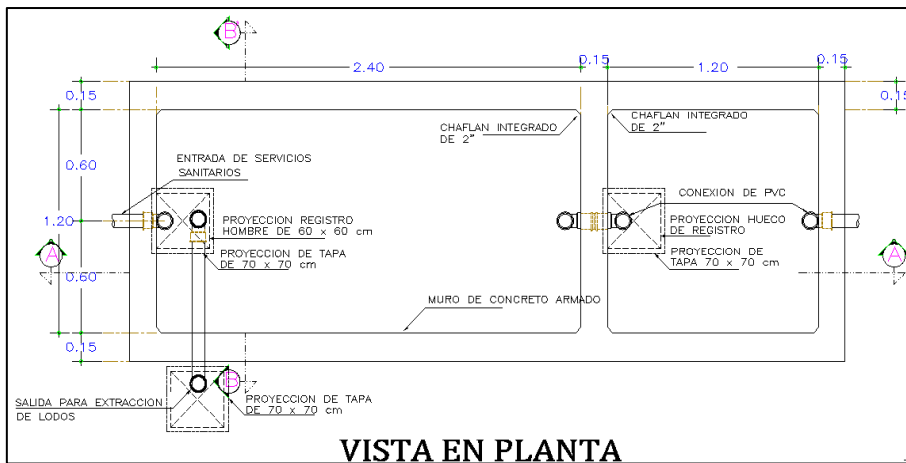
Tiene como objetivo eliminar los sólidos suspendidos, sedimentables, grasas, etc., mediante procesos físicos como filtración y sedimentación. Este primer tratamiento es importante para evitar la obstrucción de los humedales del tratamiento secundario (obstrucción de poros debido a la acumulación de lodos).

A continuación, se describen los tratamientos primarios que se encuentran en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales:

#### a. Tanque séptico

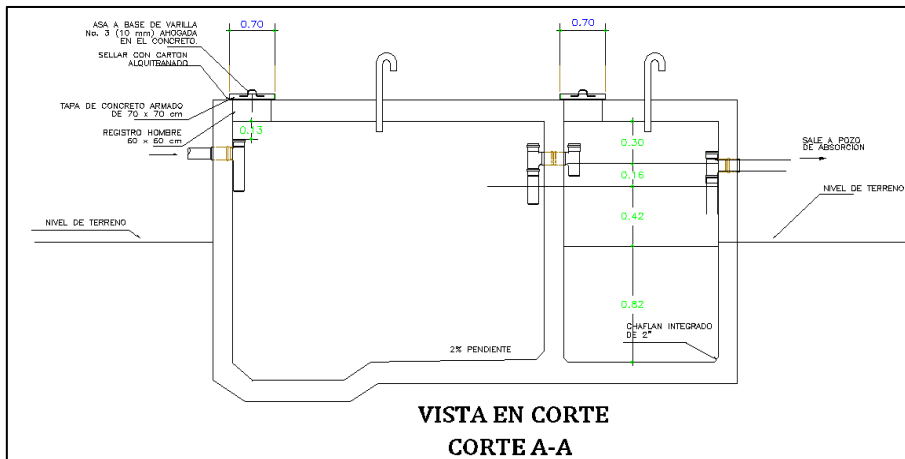
El tanque séptico fue diseñado para un total de 75 personas. El tanque fue elaborado con financiamiento de SENCICO. Cuenta con dos cámaras de sedimentación. La primera cámara tiene una fosa donde se acumula la mayor cantidad de lodos antes de pasar a la segunda cámara. El tanque tiene una dimensión de 3.60 m de largo por 1.20 m de ancho.

El tanque séptico cuenta con una cámara de secado de lodos. Se extrae lodos solo de la primera cámara. El tiempo de retención hidráulico teórico es de 11 horas. El agua tratada del tanque séptico va hacia un humedal horizontal de concreto.



**Figura 10. Tanque séptico-vista en planta**

**Fuente:** Memoria descriptiva PTAR piloto



**Figura 11. Tanque séptico-vista en corte.**  
**Fuente:** Memoria descriptiva PTAR piloto

### b. Tanque baffled

Fue diseñado para 30 personas equivalentes a 6 m<sup>3</sup>/día. Contiene 03 cámaras de sedimentación y 01 cámara final para la distribución del agua pre tratada por gravedad hacia los humedales horizontales, además se construyó 01 cámara paralela a ésta última, de 2 m<sup>3</sup>, donde es posible almacenar el agua proveniente de la celda francesa que es acumulada en una cisterna para que luego por bombeo pueda llenar ésta cámara paralela.

El tanque se llena mediante una bomba, la tubería de ingreso se encuentra ubicada a 130 cm sobre la base interna del tanque, la altura del agua residual dentro de las cámaras es aproximadamente 120 cm. El tiempo de retención de diseño en el tanque es 11 horas en total.

**Tabla 5: Dimensiones del tanque baffled**

Compartimentos	Vol. Útil m <sup>3</sup>	Tiempo Medio	Largo	Ancho	Alt.
		Retención (Horas)	Efectivo (cm)	Efectivo (cm)	Efectiva (cm)
<b>1era Cámara</b>	0.96	5	100	80	120
<b>2da Cámara</b>	0.58	3	60	80	120
<b>3ra Cámara</b>	0.58	3	60	80	120
<b>Cámara de Distribución</b>	2	....	210	80	120

**Fuente:** Memoria descriptiva PTAR piloto

El paso del agua de una cámara a la siguiente se realiza mediante 3 líneas de tuberías de 4 pulgadas de diámetro, que se encuentran empotradas en las paredes internas del tanque y distribuyen el agua hacia las siguientes cámaras. Estas tuberías se encuentran a 120 cm sobre el nivel de la base del tanque, teniendo un desnivel de 10 cm con la tubería de entrada.

Las paredes externas e internas tienen 15 cm de grosor, estas están totalmente pulidas para evitar infiltraciones, además de contener aditivos impermeabilizantes.

### **c. Celda francesa**

Está compuesta por piedra con gravilla, recibe el agua residual cruda y este sistema permite la separación física de los sólidos. Se diseñó para 30 personas equivalentes.

El agua residual se distribuye de manera superficial, a través de 4 tuberías de 3 pulgadas que están colocadas de forma similar a las de una pileta. Este tratamiento funciona con dos de sus cuatro celdas, de manera que cuando dos están en operación, las otras dos están descansando y los sólidos de la superficie se secan y degradan. El fondo de la celda francesa esta impermeabilizada con geomembrana de HDPE de 1 mm de espesor.

**Tabla 6: Dimensiones de la celda francesa**

<b>Dimensiones</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Área efectiva superficial</b>	36	m <sup>2</sup>
<b>Profundidad efectiva</b>	100	cm
<b>Borde libre</b>	50	cm
<b>Grava huso 67</b>	60	cm
<b>Piedra chancada de 1/2"</b>	25	cm
<b>Piedra chanca de 1"</b>	15	cm

**Fuente:** Memoria descriptiva PTAR piloto

A la salida de la celda francesa existe una cámara de bombeo que cuenta con una bomba sumergible de ¾ HP, la cual distribuye el agua residual pretratada hacia dos humedales verticales, o hacia la cámara construida a lado del tanque baffled que alimenta a los humedales horizontales. Esta cámara tiene un volumen de 2 m<sup>3</sup>.

## 2.5.2. Tratamiento secundario

Está diseñado para degradar sustancialmente el contenido de materia orgánica disuelta en el agua residual doméstica, para este piloto se han instalado humedales artificiales.

### a. Humedal sub-superficial de flujo horizontal

Se construyeron 02 humedales de flujo horizontal de iguales características. Cada humedal es alimentado por el agua residual doméstica pretratada proveniente del tanque baffled mediante gravedad. Las dimensiones son de 3 m de ancho por 5 de largo, generando un área superficial efectiva de 15 m<sup>2</sup>. Además, tiene un borde libre de 0.10 m. Cada humedal está diseñado para atender el efluente de 15 personas equivalentes.

El humedal es alimentado con una tubería perforada de 4" de diámetro, la cual se ubica a 60 cm sobre la base del humedal. Una tubería con perforaciones iguales se encuentra ubicada en el fondo del humedal, y está encargada de recepcionar el agua filtrada. Tanto en la entrada como en la salida del humedal se colocó piedra chancada de 1 pulgada, para mejorar el drenaje en la distribución y recolección del agua residual.

**Tabla 7: Dimensiones de los humedales horizontales.**

Dimensiones	Valor	Unidad
Área efectiva superficial	15	m <sup>2</sup>
Profundidad efectiva	70	cm
Borde libre	10	cm
Grava huso 7	60	cm
Piedra chancada de 1 "	100	cm
Piedra chanca de 1 "	15	cm

**Fuente:** Memoria descriptiva PTAR piloto

También se construyó un humedal de flujo sub superficial horizontal a la salida del tanque séptico; este humedal es revestido de concreto con dimensiones de 5.50 m de largo, 3.50 m de ancho y 1m de profundidad.

### b. Humedal sub superficial de flujo vertical

Los humedales verticales tienen un área efectiva de 15 m<sup>2</sup>, la distribución a este humedal puede ser de dos maneras: mediante bomba (proveniente de la celda francesa), o por gravedad (proveniente del tanque Baffled). Cada humedal fue diseñado para 15 personas equivalentes.

El agua residual pre tratada llega a la tubería de alimentación, desde donde se divide mediante un implemento en forma de tee en 02 tuberías perforadas de 2” cada una, las cuales distribuyen uniformemente el agua residual doméstica sobre toda la superficie del humedal. El fondo de cada lecho fue impermeabilizado con geomembrana de HDPE de 1mm de espesor.

El agua residual doméstica es recepcionada en la base de cada humedal, mediante una tubería de 4 pulgadas perforada, lo que permite el drenaje del agua y su salida.

**Tabla 8: Dimensiones de los humedales sub superficiales de flujo vertical**

<b>Dimensiones</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Área efectiva superficial</b>	15	m <sup>2</sup>
<b>Profundidad efectiva</b>	90	cm
<b>Borde libre</b>	20	cm
<b>Grava huso 7</b>	10	cm
<b>Arena</b>	60	cm
<b>Piedra chanca de 7</b>	20	cm

**Fuente:** Memoria descriptiva PTAR piloto

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. UBICACIÓN**

La investigación se realizó en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas, la cual se encuentra en el CEMTRAR (Centro Modelo de Tratamiento de Residuos) perteneciente a la Universidad Nacional Agraria La Molina.

#### **3.2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO GENERAL DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA**

Se realizó la visita de inspección a los componentes de la PTAR piloto, involucrados en esta investigación:

##### **3.2.1. Buzón de derivación**

Se inspeccionó el buzón de derivación, desde donde se capta el agua residual doméstica que ingresa a la PTAR piloto, y se realizaron los trabajos de limpieza y mantenimiento.

##### **3.2.2. Caseta de bombeo**

Se inspeccionó para comprobar el funcionamiento adecuado de la bomba, encargada de abastecer de agua residual doméstica al tanque baffled, y tablero eléctrico.

##### **3.2.3. Tanque baffled**

Se inspeccionó el funcionamiento del tanque baffled antes de empezar con el desarrollo de la investigación, para realizar correcciones.

#### **3.3. PARÁMETROS DE OPERACIÓN**

##### **3.3.1. Caudal de ingreso**

El caudal de ingreso se halló por el método volumétrico, el tiempo se midió con un cronómetro cada vez que la bomba se encontraba en funcionamiento, se consideró medir tres bombeos, con repeticiones de tres medidas por cada bombeo; el volumen del recipiente utilizado fue de 4L. El caudal se determinó según la relación  $Q = \text{Vol}/\text{Tiempo}$ .

### 3.3.2. Tiempo de retención y tipo de flujo

#### a. Tiempo de retención

Para determinar el tiempo de retención teórico, se midió el volumen efectivo del tanque baffled y con ayuda del caudal de ingreso se pudo determinar este valor, según la relación:

$$t = \frac{Vol}{Q} \quad (16)$$

Para determinar el tiempo de retención real se empleó como trazador NaCl y se midió la concentración salina, con un medidor multiparámetro, a la salida del tanque baffled.

El tiempo de retención se midió al finalizar el proceso de toma de muestras, para que estas no se vean perturbadas y/o afectadas por el incremento de sales, producto del trazador utilizado. A continuación, se describen los pasos para hallar el tiempo de retención y el tipo de flujo dentro del tanque baffled.

#### b. Trazador

El trazador se aplicó de manera instantánea, procurando que se mezclara con el agua residual doméstica que entra al tanque baffled. Para la determinación de la cantidad de trazador P (kg); se utilizó la relación:

$$P = \frac{V \times K \times C_o}{I \times 10^3} \quad (17)$$

Donde:

P = peso del trazador por añadir al reactor, kg

V = volumen útil del reactor, m<sup>3</sup>

K = constante de corrección

C<sub>o</sub> = concentración de sal, mg/l o g/m<sup>3</sup>

I = grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

La constante de corrección se determinó mediante la relación:

$$K = \frac{\text{peso Na} + \text{peso Cl}}{\text{Peso Cl}} = \frac{23 + 35.5}{35.5} = 1.65 \quad (18)$$

La cantidad de sal que se obtuvo mediante las fórmulas descritas se diluyó en un litro de agua destilada; esta solución se vertió al tanque baffled en el momento que se accionó la bomba, para lograr una mejor mezcla. Se midió la concentración salina inicial, antes de

aplicar la solución salina al tanque baffled; posteriormente se midió la concentración cada dos minutos a la salida del tanque baffled, y se esperó hasta llegar a la concentración salina inicial.

### c. Tipo de flujo

Para determinar el tipo de flujo que se genera dentro del tanque baffled se utilizó el método matemático de Wolf y Resnick. Para este método se realizó los siguientes pasos:

- Se elaboró la **tabla 17 del anexo 2**, en donde la **columna I**, representa la hora en la que se midió la concentración de salinidad, tanto antes de aplicarle el trazador (NaCl) al tanque baffled, hasta finalizar. En cada bombeo se tomó cinco medidas cada 5 minutos y luego se esperó al siguiente bombeo para realizar las siguientes mediciones.
- En la **columna II**, se colocó el tiempo en minutos, los cuales representan el momento en que se midió la concentración salina.
- La **columna III**, representa la división del tiempo en minutos de la columna II con el tiempo teórico de retención anteriormente calculado.
- La **columna IV**, representa el valor de concentración salina medida en los tiempos mostrados en la columna II,
- La **columna V**, representa la diferencia entre la concentración hallada en los tiempos que se muestra en la columna II y la concentración inicial que corresponde al tiempo igual a 0.
- La **columna VI**, representa la sumatoria de la diferencia de las concentraciones que se muestra en la columna V.
- La **columna VII**, representa el valor de la columna VI multiplicado por 100 y dividido entre el valor final de la columna VI.
- La **columna VIII**, es el resultado de restar 100 menos el valor calculado de la columna VII.

Luego de que se obtiene los valores de la tabla antes descrita, se dibuja en escala logarítmica en la ordenada y aritmética en la abscisa, los valores de la columna VIII ( $1-F(t)$ ) contra los valores de la columna III ( $t/t_0$ ), de la cual se obtiene la gráfica y se traza la línea tangente justo en donde se observe que, con por lo menos tres puntos, se pueda trazar esta tangente y formar un ángulo ( $\alpha$ ), a la intersección con la línea horizontal formada del valor máximo de



la curva (desde la abscisa hasta la intersección) se le asigna el valor de  $\theta = t_1/t_0$  (primer tiempo donde corta la recta) y  $t_2/t_0$  es el segundo tiempo donde corta la recta y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación de la recta (ver **figura 12**). Las ecuaciones que se utilizarán para hallar el porcentaje de flujo pistón, corto circuito y/o espacios muertos y porcentaje de flujo de mezcla son:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \quad (19)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{1}{\frac{t_2 - t_1}{t_0}} \quad (20)$$

- Ecuación para determinar el porcentaje de flujo pistón:

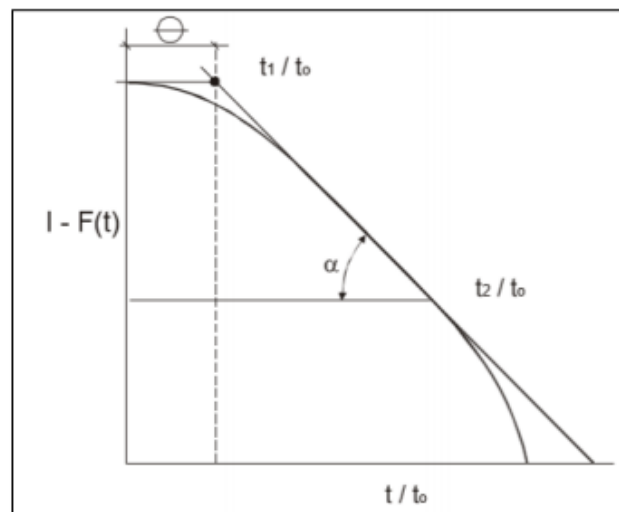
$$P = \frac{\theta \times \tan(\alpha)}{0.435 + \theta} \quad (21)$$

- Ecuación para determinar el porcentaje de flujo mezclado

$$M = (1 - P) \times (1 - m) \quad (22)$$

- Ecuación para determinar el porcentaje de espacios muertos

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} \quad (23)$$



**Figura 12.** Curva  $1-F(t)$  cantidad de trazador que permanece en el reactor  
Fuente: Cepis, 2004, citado en Hegg, 2018

La curva de concentración o método de la curva de tendencia también es utilizada para determinar el tipo de flujo. Este método se calcula empleando los valores de la **tabla 16 del anexo 2** y se consideran los **s** criterios señalados en la **Tabla 9**

**Tabla 9. Criterios de interpretación del método de la curva de tendencia.**

Relaciones	Valor	Interpretación
$t_0$	Tiempo teórico	
	Cercano a 0	Tendencia de flujo de mezcla completa
$t_i / t_0$	Cercano a 1	Tendencia de flujo pistón
	Mayor a 0.3	Presencia de corto circuito
	Menor a 1	Presencia de corto circuito
$t_m / t_0$	Mayor a 1	Presencia de zonas muertas
	Cercano a 0	Tendencia de flujo de mezcla completa
$t_p / t_0$	Cercano a 1 (menor)	Tendencia de flujo pistón
		$t_i / t_0$ cercano a 0: tendencia de flujo de mezcla completa
$t_p / t_0$	Mayor a 1	$t_i / t_0$ cercano a 1: tendencia de flujo pistón
	Igual a 0	Flujo pistón
$e$	Mayor a 2.3	Flujo de mezcla completa

Fuente: Cepis, 2004, citado en Hegg, 2018

### 3.3.3. Acumulación de lodos

Para determinar la acumulación de lodos en cada una de las cámaras se utilizó una regla de madera graduada forrada con tela tipo tul y franela. Esta técnica se elaboró según Méndez et al, 2007; se realizaron medidas puntuales, la primera medida se realizó luego de la extracción de lodos del tanque baffled y se continuó midiendo al finalizar la recolección de muestras, esto con el motivo de evaluar cuánto volumen de lodo se acumuló al terminar la medición. La unidad de medida que se utilizó para la evaluación es el cm.

## 3.4. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA

### 3.4.1. Parámetros de campo

Son parámetros que deben ser medidos in situ, ya que al pasar las horas sus valores se ven alterados. Los parámetros que se tomaron en campo son: Temperatura (°C), Potencial de

Hidrógeno (Ph), conductividad eléctrica (CE) y altura de lodos (cm). Estos parámetros se midieron en los puntos 1,2,3,4 y 5. **Ver tabla 10 y figura 13.**

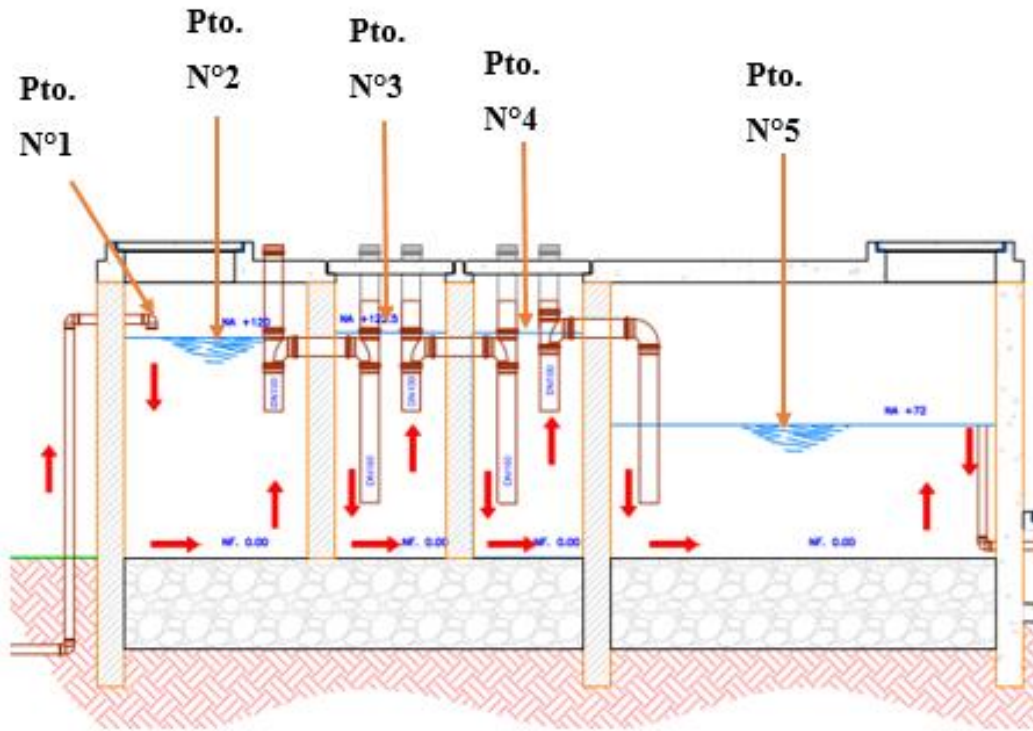
El tipo de muestreo para estos parámetros fue puntual. Se verificó que los equipos estén calibrados. Se emplearon recipientes limpios para la toma de muestra y se limpiaron los sensores con agua destilada. **Ver tabla 10** sobre el número de muestras total.

#### **3.4.2. Parámetros de laboratorio**

Son parámetros que necesitan de la utilización de químicos para su lectura o de equipos que no pueden ser trasladados a campo y que, al pasar cierto tiempo, su lectura no se altera. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Saneamiento y Medioambiente del Departamento de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Rural de la Facultad de Ingeniería Agrícola. Los parámetros que se tomaron en laboratorio son: turbiedad, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, coliformes totales, demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno. Estos parámetros se tomaron en los puntos 1,2,3,4 y 5 a excepción para los parámetros de la demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno, que se tomaron en los puntos 1 y 5. **Ver tabla 10 y tabla 11.**

El tipo de muestreo para estos parámetros fue puntual. Se verificó que los equipos estén calibrados. Se emplearon recipientes limpios para la toma de muestra y se limpiaron los sensores con agua destilada. **Ver figura 13**, para los puntos de muestreo.

Para el transporte de las muestras se empleó un cooler con refrigerantes para garantizar una adecuada conservación y que las muestras no se alterarán hasta el momento de realizar el procedimiento de laboratorio.



**Figura 13. Distribución de puntos de muestreo**  
 Fuente: Memoria descriptiva PTAR

**Tabla 10: Instrumentos utilizados en la investigación**

Lugar de Medición	Parámetro	Unidad	Equipo	Método de Ensayo	Volumen de Muestra	Tipo de envase	Tiempo y Técnica de Preservación
Campo	pH	pH	Multi-Parameter PCSTestr 35 de la marca OAKTON	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+B, 22nd Ed	500 ml	P	Se analiza de inmediato
	Temperatura	°C	Multi-Parameter PCSTestr 35 de la marca OAKTON	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510B, 22nd Ed	500 ml	P	Se analiza de inmediato
	Conductividad eléctrica	µs/cm	HACH HQ 30d con la sonda de la misma marca modelo CDC 401.	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510B, 22nd Ed.	500 ml	P	Se puede analizar hasta dentro de 28 días y se debe refrigerar
	Altura de lodos	cm	Elaboración propia/regla graduada con franela y tul	-	-	-	-
Laboratorio	Sólidos suspendidos totales	mg/l	Filtros fibra de vidrio 47 mm de diámetro de la marca PALL/ Horno 0°-300°C de la marca Nabertherm	Sólidos suspendidos totales secados a 103-105 C° APHA, AWWA, PWPCF 17th ed. 1p992. Método 2540 D pág.2-83	1000 ml	P	Se puede analizar hasta antes 7 días .Se debe refrigerar
	Sólido sedimentable	ml/l	Cono Imhoff	SMEWW.APHA-AWWA-WEF. 21th.ed. 2-59 y 2-60, método 2540 F.	1000 ml	P	
	Demanda Biológica de Oxígeno	mg/l	BODTrak II de la marca HACH utilizado para medir la DBO	Respirometric Method 10099 BODTRAKTMII APPARATUS	1000 ml	P	Se debe refrigera y se puede analizar hasta antes de 6 horas
	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	Digestor para viales de DQO de la marca HACH modelo DRB 200	Usepa Reactor Digestion Dicromate Method	1000 ml	P	Se debe refrigerar y se puede analizar hasta antes de 7 días
	Coliformes Totales	UFC/100 ml	LAB.INCUBATOR-DIGISYSTEM/ Filtro de membrana de 0.45 µm de porosidad y 47 mm de diámetro de la marca PALL	SMEWW 21 st Ed. 2005, Part 9221, APHAAWWA-WEF/ método de filtración por membranas.	100 ml	V	Refrigerar hasta 4°C y se puede analizar hasta las 6 o 24 Horas.
	Turbiedad	NTU	HACH 2100Q Portable Turbidimeter	APHA, AWWA, WPCF 17th Ed. 1992 2130 B. pág. 2-83	1000 ml	P	

P: Recipiente de plástico; V: Recipiente de vidrio

Fuente: APHA, AWWA, WEF, 2005

**Tabla 11. Total de muestras de campo y laboratorio**

Lugar de Medición	PARAMETROS	TOTAL MUESTRAS												TOTAL
		1 °Mes*			2 °Mes					3 °Mes				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<b>Campo</b>	Temperatura	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Conductividad (CE)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Tasa de Lodos	x	x	x	x	x	x	x	x	x				10
	Solidos suspendidos totales	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
<b>Laboratorio</b>	Solidos sedimentables	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Demanda Biológica de Oxígeno	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Demanda Química de Oxígeno	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Coliformes Totales	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
	Turbiedad	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12

\*El primer mes de muestreo solo sirvió como mes de prueba.

### 3.5. ESTADÍSTICA

El tipo de estadística que se ha empleado es de tipo descriptiva. Se compararon las medias de la entrada y salida de cada uno de los parámetros descritos, la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO GENERAL DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

#### 4.1.1. Buzón de derivación

En la inspección se percibió que el buzón de derivación contaba con una rejilla para impedir el ingreso de sólidos de mayor tamaño, pero esta se encontraba deteriorada y, al tratarse de una rejilla de fierro corrugado, se encontraba expuesta a una fácil oxidación. Además, por el diseño que tenía no permitía realizar una adecuada limpieza de la misma, como se puede observar en la **figura 14**; por lo que se vio necesario conseguir una nueva rejilla que resista la corrosión y con un diseño que permita una adecuada limpieza, ver **figura 15**.



**Figura 14. Rejilla anterior**



**Figura 15. Rejilla actual**

La limpieza de la rejilla se realizó de manera semanal para extraer los sólidos de mayor tamaño y, de esta manera, se logró un ingreso continuo del agua residual hacia la cámara de bombeo.

#### 4.1.2. Caseta de bombeo

La caseta de bombeo cuenta con los siguientes componentes en los cuales se observó:

### **a. Cámara de Bombeo**

Debido al tiempo que no estuvo funcionando la planta piloto de tratamiento de aguas residuales, se observó que se había acumulado lodo en el fondo de la cámara de bombeo, por lo que se procedió a realizar la limpieza, encontrándose residuos como cabellos y otros sólidos que no pudieron ser retenidos por la reja ubicada en el buzón de derivación. Se estableció que el procedimiento de limpieza sería de manera trimestral.

### **b. Bombas**

En la cámara de bombeo se encuentran instaladas cuatro bombas que se encargan de abastecer a cada uno de los tratamientos primarios que se encuentran en la planta piloto. La bomba identificada como número cuatro, se encarga de bombear el agua residual hacia el tanque baffled, en ese sentido se evaluó su estado actual. Se identificó que la bomba se encontraba funcionando adecuadamente, solo se le dio mantenimiento de limpieza. Al igual que en la cámara de bombeo se estableció que se limpiaría las bombas trimestralmente.

Se evaluaron los tiempos de bombeo y se coordinó con los técnicos que operan el sistema de automatización para programar el tiempo de bombeo. Para esta investigación el tiempo de bombeo para abastecer el tanque baffled es de un minuto cada hora, para simular un ingreso continuo al sistema.

### **c. Tablero eléctrico**

El tablero fue programado para que regule el encendido y apagado automático de las bombas que abastecen cada línea de tratamiento de la PTAR. Se determinó que la bomba N°4 que abastece al tanque baffled opera un minuto cada hora, dando como resultado un total de 24 bombeos al día. El tablero tiene instalado un scada que permite ver el funcionamiento de las bombas desde un ordenador y/o celular; de esta manera se controló la operación continua.

#### **4.1.3. Tanque baffled**

De la inspección del tanque baffled se determinó lo siguiente:

- El tanque baffled se instaló sobre el terreno y no cuenta con escalera externa para acceder a las cámaras, lo que dificultó levemente la inspección continua.
- Se observó que la fuerza de la descarga era potente; debido a ello no se retenía en mayor cantidad los sólidos en la primera cámara. Se decidió cortar la tubería de ingreso al tanque (parte interna del tanque), para que pueda romper presión sobre la



superficie del agua que se queda retenida en ella y también se decidió cerrar parcialmente la válvula de la tubería que va desde la bomba N° 4 hacia el tanque baffled para evitar que entre el total del volumen de agua residual; de esa manera se buscó disminuir la potencia de ingreso y lograr aumentar la pérdida de carga para disminuir la velocidad del flujo. **Ver figuras 16 y 17** que representan el antes y después, respectivamente.



**Figura 16. Tubería de entrada al tanque baffled**



**Figura 17. Tubería actual de entrada al tanque baffled**

- En la última cámara, para evitar que los sólidos pasen hacia los humedales verticales, se decidió instalar tres tuberías de 4 pulgadas de diámetro con un largo de 80 cm y tres codos, para aumentar la pérdida de carga y evitar que el agua que cae de la cámara anterior levante los sólidos. De la misma manera se decidió incrementar la altura de la tubería interna de salida del agua hacia los humedales, esta tubería tiene un diámetro de 2 pulgadas y la altura final es de 72 cm. **Ver figuras 18 y 19** que representan el antes y después, respectivamente.

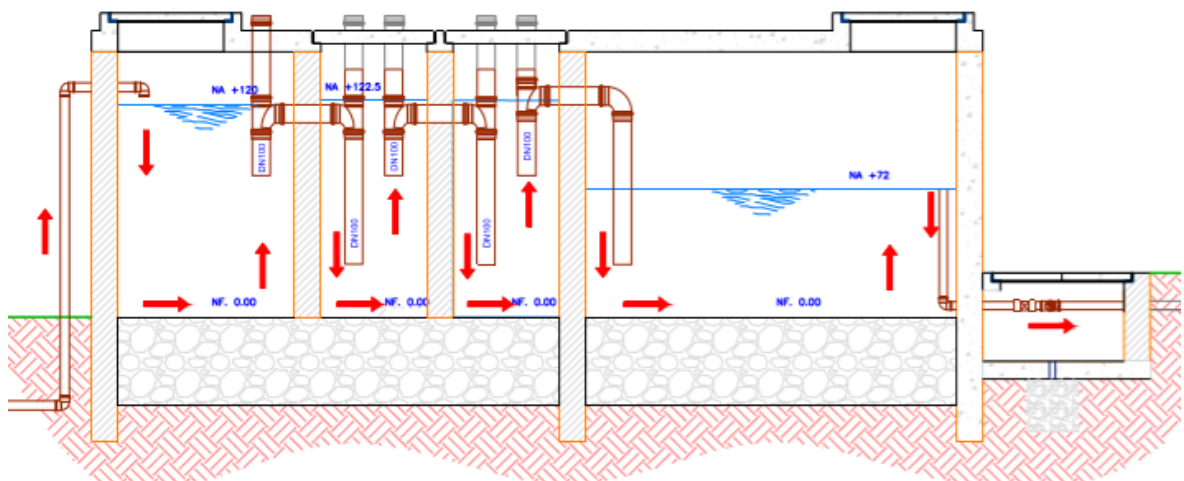


**Figura 18.** Salida de agua de la cámara 3 hacia la cámara 4



**Figura 19.** Tubería de salida de la cámara 3 hacia la cámara 4

Se realizó la extracción de lodos de las cámaras C1, C2, C3 y C4, dejando en cada una de estas cámaras una altura de 0.6 cm, 19 cm, 11.3 cm y 0 cm, respectivamente. Se dejó lodo para mantener activa la biomasa de bacterias que permita la continuidad del tratamiento en el tanque baffled.



**Figura 20.** Tanque baffled mejorado

## 4.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN

### 4.2.1. Caudal de ingreso

En la **tabla 12** se muestra el caudal instantáneo promedio medido a la entrada del tanque baffled. (Ver detalle en el **anexo N°1**). Para el cálculo del caudal se determinó el caudal en

m<sup>3</sup>/min y se multiplicó por 24 (que corresponde al número de bombeos que realiza la bomba) para determinar el caudal en m<sup>3</sup>/d.

**Tabla 12. Caudal medido en campo**

Item	Caudal (m <sup>3</sup> /d)
1	3.27
2	2.39
3	2.81
<b>Promedio</b>	<b>2.82</b>

Este caudal fue inferior al caudal de diseño, el cual, según la memoria descriptiva del proyecto, se estimó en 6m<sup>3</sup>/d.

#### 4.2.2. Tiempo de retención y tipo de flujo

##### a. Cálculo del tiempo de retención teórico y real

De acuerdo a la memoria descriptiva del proyecto, “Plantas modelo para el tratamiento de aguas residuales domésticas por medio de humedales artificiales – Sistemas de tratamiento con fines de investigación en la Universidad Nacional Agraria la Molina”, el tiempo de retención de diseño del tanque baffled es de 11 horas con un caudal de operación de 6m<sup>3</sup>/d.

El tiempo de retención teórico resultó:

$$t_o = \frac{Vol. \text{tanque baffled}}{Q_{prom}} = \frac{3.32}{2.82} = \mathbf{1.18 \text{ días} = 28.28 \text{ horas}}$$

Teóricamente el tiempo de retención del tanque baffled fue de 28 horas aproximadamente.

En el diseño original se consideraron 3 cámaras para el tanque baffled, más una cámara de almacenamiento, desde donde se distribuiría el agua pre-tratada hacia los humedales horizontales. Durante la operación del sistema se tomó la decisión de: (i) cortar la tubería de ingreso (interna al tanque baffled), (ii) añadir a la entrada de la cámara de almacenamiento tres tuberías de 4 pulgadas, con una longitud de 0.8 m con la finalidad de reducir la turbulencia que ocasionaba el incremento de turbiedad del agua y, debido a esto, se ha considerado la cámara de almacenamiento como una cuarta cámara del tanque baffled, y (iii) se elevó la altura del tirante de agua en la última cámara, adicionando un codo y una tubería, teniendo un tirante de agua final de 0.72m. Debido a que se ha considerado la cámara de

almacenamiento como la cuarta cámara del tanque baffled, el tiempo teórico de retención resulto 28 horas, aproximadamente.

En campo se determinó que el tiempo de retención real del tanque baffled fue de 13 horas aproximadamente (**anexo 2.**), considerando las 4 cámaras del tanque baffled. El tiempo de retención teórico es superior al real, esto se debe a que el tiempo de retención teórico es el tiempo ideal en el que demoraría una partícula en salir del sistema. Esta diferencia entre ambos tiempos de retención podría deberse a la predominancia del flujo pistón determinado mediante el método matemático de Wolf y Resnick y al cortocircuito, este último genera dentro del tanque un tiempo de retención que llega a ser cero, esto indica que una fracción importante que entra al sistema se dirige directamente a la salida sin dispersarse en el interior del sistema.

### **b. Cálculo de la cantidad del trazador**

Para el cálculo de la cantidad de trazador se consideró el volumen efectivo del tanque baffled, el cual es de  $3.32 \text{ m}^3$ . Se ha considerado también una concentración salina de  $50\text{mg}/\text{m}^3$  con estos dos valores se ha calculado la cantidad en kg de NaCl que se debe aplicar en el tanque baffled. Por lo tanto, se ha aplicado la ecuación (17), de la cual se extrae el siguiente resultado:

$$P = \frac{3.32 \times 1.65 \times 50}{0.9 \times 1000} = 0.3048 \text{ kg}$$

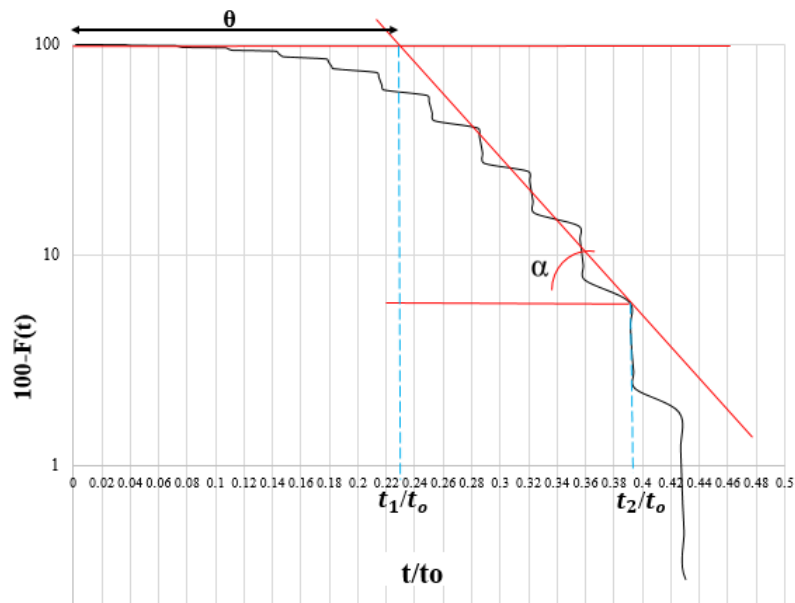
La cantidad de sal que se aplicó al tanque baffled, fue de 0.3048 kg. Con este valor se pudo determinar el tiempo en que tarda en salir la concentración de sales del sistema.

### **c. Determinación del tipo de flujo**

$$\theta = \frac{t_1}{t_o} = 0.23$$

$$\frac{t_2}{t_o} = 0.39$$

$$\tan\alpha = \frac{1}{0.39 - 0.23} = 6.25$$



**Figura 21. Aplicación del método matemático de Wolf y Resnick**

Cálculo del flujo pistón

$$p = \frac{0.23 \times 6.25}{0.435 + 0.23 \times 6.25} = 0.768$$

$$p = 76.8\%$$

Cálculo de los espacios muertos:

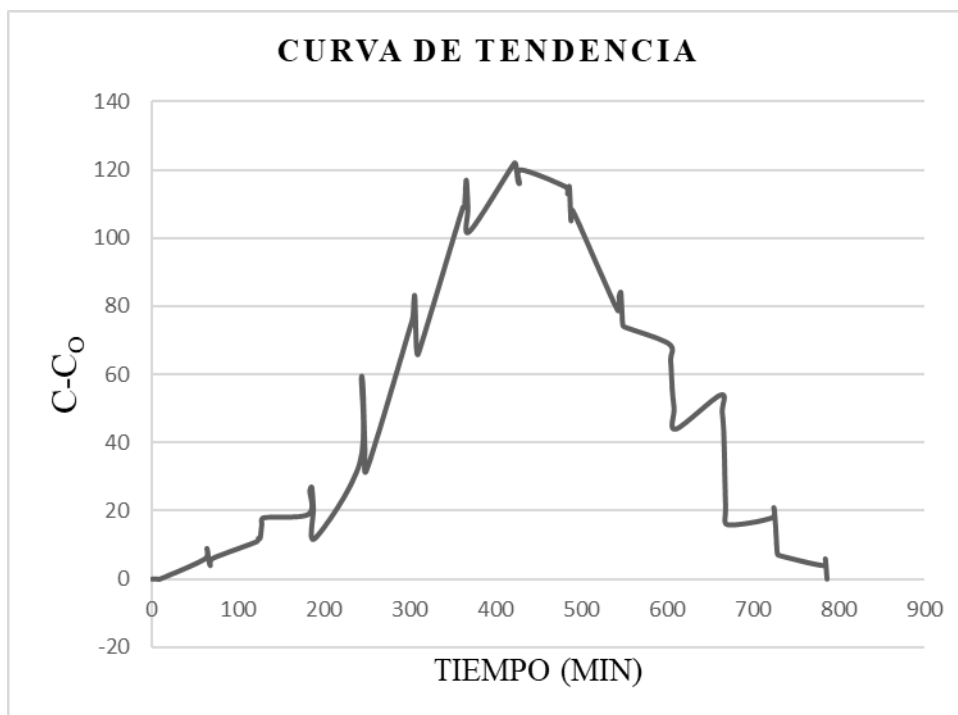
$$m = 1 - \frac{0.23}{0.768} = 0.713 = 70.1\%$$

Cálculo de flujo mezclado será:

$$M = 1 - 0.768 = 0.212 = 23.2\%$$

Para el tipo de flujo se encontró que presenta una predominancia de flujo pistón con 76.8% pero también se presenta flujo mezclado en un 23.2%; también se determinó el porcentaje de cortos circuitos dentro del tanque baffled, dando como resultado 70.1%.

Para completar la evaluación del comportamiento hidráulico dentro del reactor, se realizó una curva de tendencia, donde se muestra la variación de la concentración del trazador. Para esto se utilizaron los datos de las columnas II y IV.



**Figura 22. Curva de tendencia de concentración.**

Como se observa en la **figura 23**, desde el momento que aparece el trazador en el efluente, la concentración va aumentando progresivamente con el tiempo hasta llegar a una concentración máxima para luego ir disminuyendo progresivamente. También se observa que la curva presenta picos, lo que significa la presencia de corto circuito dentro del tanque baffled, asimismo el lado izquierdo tiene una cola más pronunciada, lo que significa la predominancia del flujo pistón.

**Tabla 13. Parámetros principales para el análisis de la curva de tendencia**

Parámetro	Tiempo (min)	Descripción
$t_i$	62	Tiempo inicial donde aparece el trazador
$t_{10}$	78.6	Tiempo correspondiente al paso del 10% del trazador
$t_p$	422	Tiempo modal, corresponde a la máxima concentración
$t_m$	426.28	Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de trazador
$t_o$	1696.5447	Tiempo teórico de retención
$t_{90}$	606.52	Tiempo que corresponde al paso del 90% del trazador
$t_f$	786	Tiempo total transcurrido hasta que atraviere por totalidad el trazador
$t_b$	42.2	Tiempo correspondiente al paso de la décima parte de la concentración máxima
$t_c$	211	Tiempo que corresponde al paso de la mitad de la concentración máxima

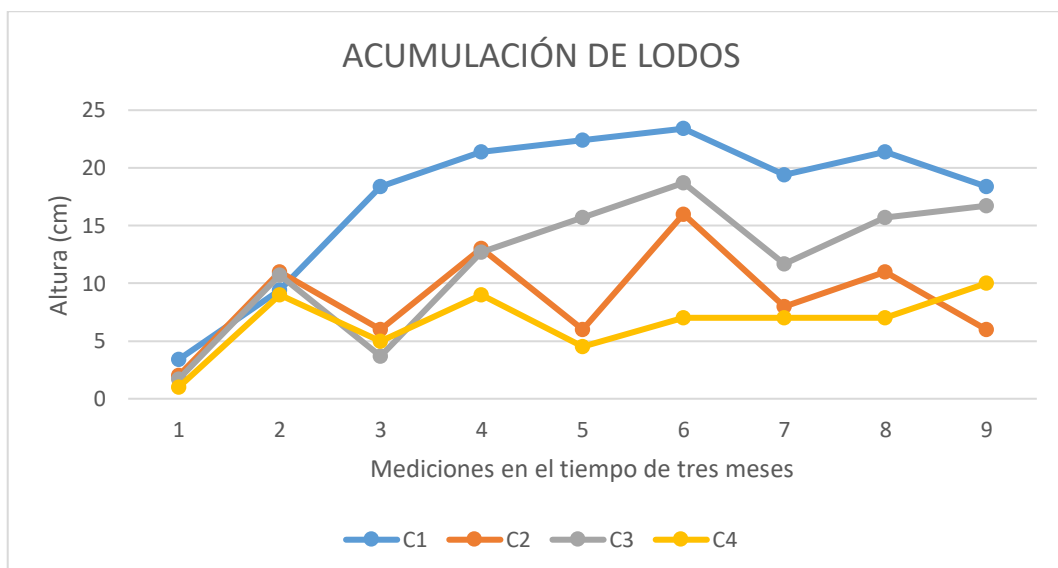
**Tabla 14. Criterio a partir del análisis de la curva de tendencia**

CRITERIO		CONSECUENCIA
$t_i/t_o$	0.03654487	Este valor es menor a 0.3, por lo que existe cortocircuito en el sistema
$t_m/t_o$	0.25126364	Como el valor es menor a la unidad, hay existencia de corto circuito
$t_p/t_o$	0.24874087	Existencia de flujo mezclado
$t_c/t_o$	0.12437044	Existencia de flujo mezclado
$t_b/t_o$	0.02487409	Existencia de flujo mezclado
e	0.00235773	Como su valor se aproxima a cero, existencia de flujo pistón.

Con este criterio de análisis se corrobora la existencia de flujo pistón y flujo mezclado dentro del tanque baffled hallados también con el método matemático de Wolf y Resnick, así como también la presencia de cortocircuitos.

#### 4.2.3. Tasa de acumulación de lodos

Con ayuda de la regla graduada se midió la altura de lodos en cada una de las cámaras. La medida de la altura fue dificultosa, debido a que, cada vez que se introducía la regla, se levantaba los lodos, lo que ha generado que algunos datos no sean exactos y que en la gráfica se muestren valores menores a los anteriores. A continuación, se muestra la **figura 24**, donde se puede apreciar la tasa de acumulación de lodos en el transcurso del tiempo.



**Figura 23. Tasa de acumulación de lodos**

De la **figura 23**, se puede extraer que en el periodo de muestreo se observa una tendencia de incremento de la acumulación de lodos en la cámara uno. Hay una caída en la cámara dos,

pero en la cámara tres esta acumulación de lodos se hace mayor en comparación con la anterior y, por último, la cámara cuatro representa una altura menor. Esta acumulación de lodos no indica la cantidad absoluta en cada una de las cámaras, ya que la densidad del lodo puede cambiar significativamente según su granulación/dispersión, pH, potencial redox, condiciones de operación y contenido inerte **Sepeece (1996), citado en Foxon et al (2006)**, sin embargo, proporciona información visual de cómo varía la acumulación de lodos en cada cámara con el tiempo.

Lo ideal es que la mayor cantidad de acumulación de lodos sea retenida en la cámara uno, seguida por la cámara dos, tres y por último la cámara cuatro, sin embargo, el aumento en la cámara tres con respecto a la cámara dos se puede deber a que el lodo acumulado en esta cámara tenga una menor densidad (**Foxon et al 2006**).

Es difícil cuantificar la variación temporal de la altura del lecho de lodo debido a la naturaleza imprecisa de la técnica de muestreo, ya que al ingresar y retirar la regla de medición ocasiona que las partículas sólidas y en suspensión se alteren de un estado estacionario a móvil.

#### **4.3. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA**

Con el monitoreo de la calidad del agua se logró la caracterización del agua residual, tanto de entrada al sistema como salida.

En la tabla 15, se observa un valor promedio de 79.58% de remoción de DQO, versus un porcentaje de remoción encontrado en la investigación de 77.85%; ambos valores están muy cercanos, lo que demuestra el gran potencial del tanque baffled en remoción de materia orgánica



**Tabla 15: Caracterización del agua residual doméstica**

Fase	Parámetro	Unidad	Tanque Baffled		D.S. N°03-2010-MINAM (LMP)	Porcentaje de Remoción	Otros Autores (Foxon, 2004**, Hudson, 2010***)		Porcentaje de Remoción
			Valores promedios Afluente	Valores promedios Efluente			Afluente	Efluente	
Campo	Potencial de Hidrógeno	pH	7.69	7.09	6.5-8.5	-	6.9, 7.2	6.5, 6.5	-
	Temperatura	°C	27.81	27.58	< 35	-	-	-	-
	Conductividad eléctrica	µs/cm	1527	1487.63	-	-	-	-	-
Laboratorio	Sólidos suspendidos totales	mg/l	725	47	150	92	480	225	53.13
	*Sólidos sedimentables	ml/l	26.91	0.21	-	98.98	-	-	-
	Demanda Biológica de Oxígeno	mg/l	483.25	134.82	100	70.38	-	-	-
	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	1612.88	260.75	200	77.85	716, 360-930	192, 62-160	73, 82.8
	Coliformes totales	UFC/100 ml	4.01x10 <sup>12</sup>	9.23x10 <sup>10</sup>	10 <sup>4</sup>	86.55	1.3x10 <sup>8</sup> , 2x10 <sup>7</sup> -1x10 <sup>8</sup>	5x10 <sup>7</sup> , 1x10 <sup>6</sup> -2x10 <sup>7</sup>	61.54, 95-80

\*Para el promedio se ha considerado los valores medidos después de una hora de sedimentar la muestra

\*\*Se destaca que para esta investigación se empleó un tiempo de retención de 22 horas

\*\*\*Se destaca que para esta investigación se empleó un tiempo de retención de 42 horas

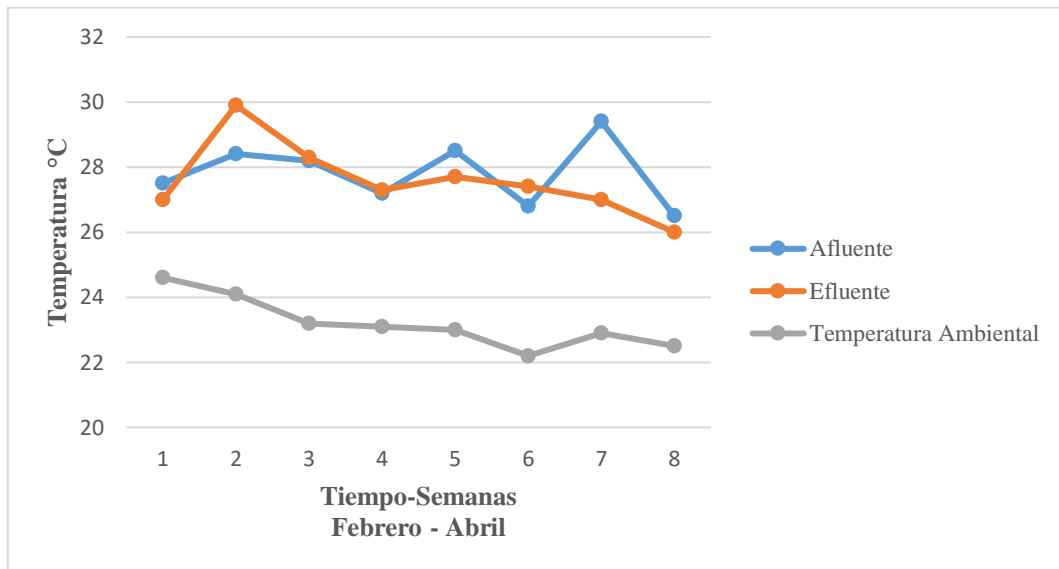
### 4.3.1. Parámetros de campo

#### a. Temperatura (T°C)

La temperatura óptima para que la vida bacteriana se pueda desarrollar en un tratamiento anaerobio es de 25 a 35 °C. (Metcalf & Eddy, 1995).

##### ✓ *Afluente vs efluente vs ambiental*

Las tomas de muestras se realizaron desde mediados de febrero, (siendo enero el mes de prueba) hasta inicios de abril, abarcando las estaciones de verano y otoño. En la **figura 24**, se aprecia los valores que se midieron al momento tomar la muestra. Los valores obtenidos de la temperatura ambiental han sido sacados de la estación Von Humboldt, la cual se encuentra en la Universidad Nacional Agraria La Molina.



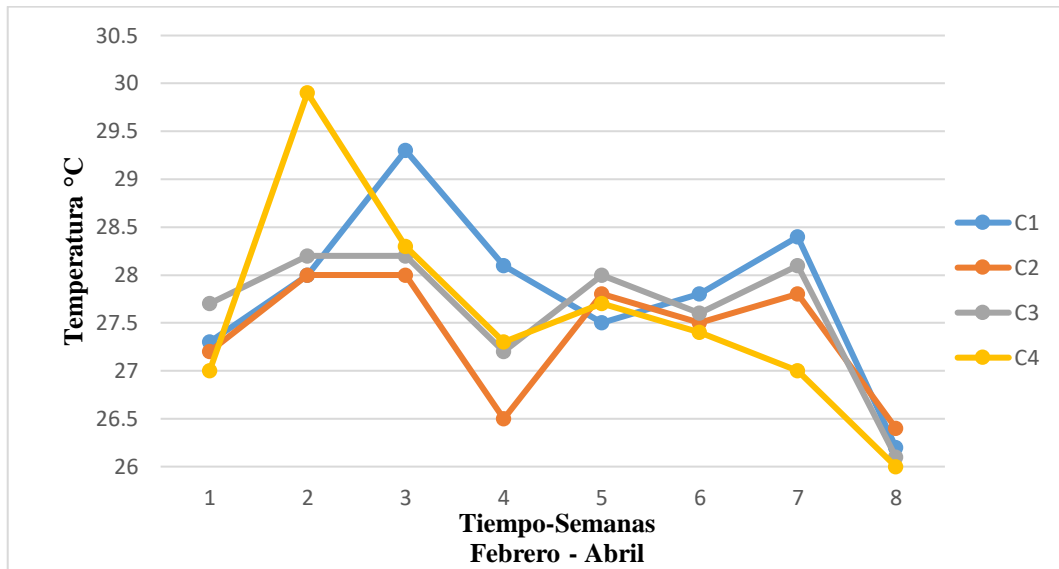
**Figura 24. Variación de la temperatura en el periodo de muestreo**

El valor de la temperatura ambiental promedio fue de 23.2 °C versus el afluente y efluente, que tienen un valor promedio de 27.81°C y 27.58°C, respectivamente. La temperatura de las aguas residuales domésticas es mayor debido a la existencia de reacciones bioquímicas, lo que genera la liberación de energía, y mediante esta, poder degradar la materia orgánica.

Se puede apreciar que en la semana 2 existe un incremento en 1.5°C de la temperatura en el efluente con respecto al afluente, por lo que se podría deducir que ha ocurrido una mayor liberación de energía y degradación de materia orgánica o que la medición no se haya realizado adecuadamente. También se puede apreciar que en la semana 7 existe una

diferencia de 2.4°C entre el afluente y el efluente, donde se podría decir que la degradación de la materia orgánica fue pobre.

Según **Metcalf & Eddy (1995)**, dependiendo de la situación y la época del año, la temperatura del efluente puede ser mayor o menor de las del afluente.



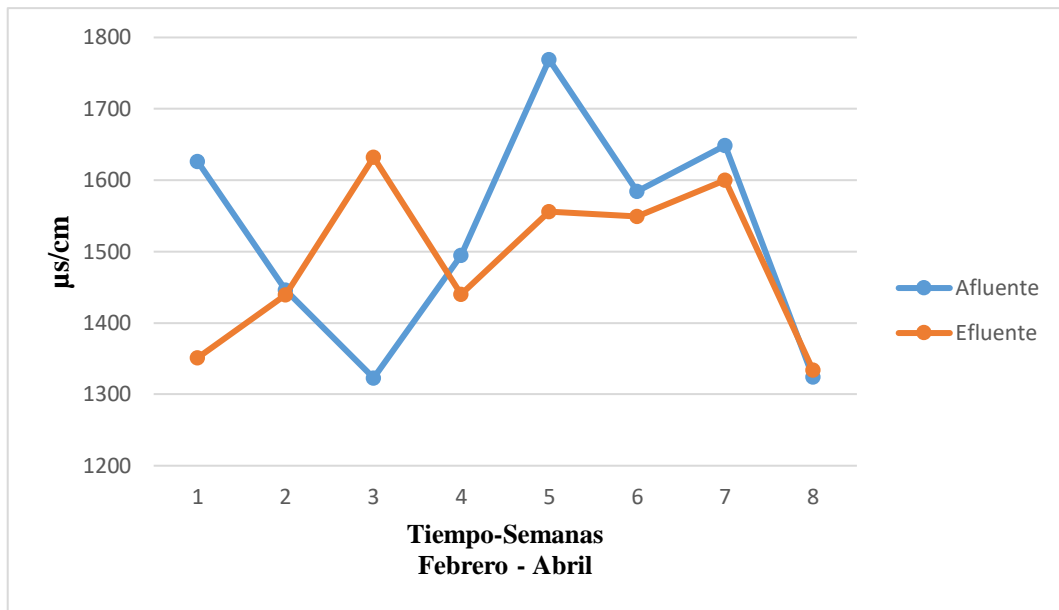
**Figura 25. Variación de la temperatura dentro de las cámaras del tanque baffled**

Se puede apreciar que cada una de las cámaras, C1, C2, C3 y C4 presentan un promedio de 27.83, 27.4, 27.64 y 27.58 °C, respectivamente.

**Lorenzo & Obaya (2005)** definen dos rangos en donde las bacterias anaerobias pueden trabajar satisfactoriamente: (i) mesofílico entre 20 y 45 °C y (ii) termofílico entre 45 y 60 °C. En base a esta información, el rango de temperatura medida durante la investigación se encuentra dentro del rango mesofílico, adecuado para el desarrollo y trabajo de las bacterias anaerobias.

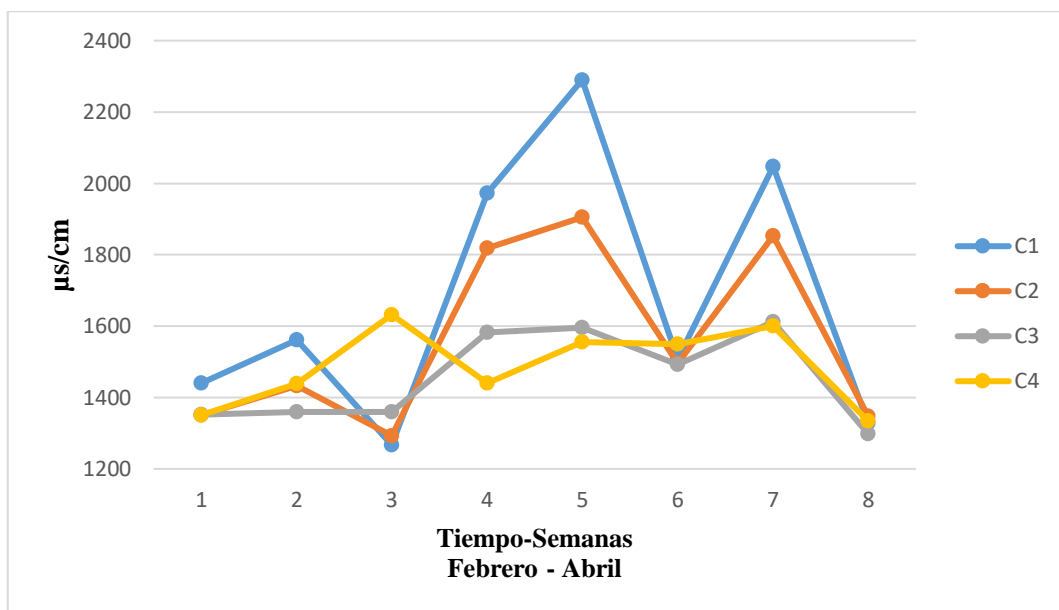
#### **b. Conductividad eléctrica (CE)**

La conductividad eléctrica indica la facilidad con la que la corriente eléctrica pasa a través del agua. Debido a que el agua residual doméstica presenta sales disueltas, su valor será mayor que el agua potable.



**Figura 26. Variación de la conductividad en el periodo de muestreo**

De la **figura 26**, se extrae que en el periodo de muestreo en promedio se ha obtenido valores para el afluente y efluente de 1527 y 1487.63  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , respectivamente.



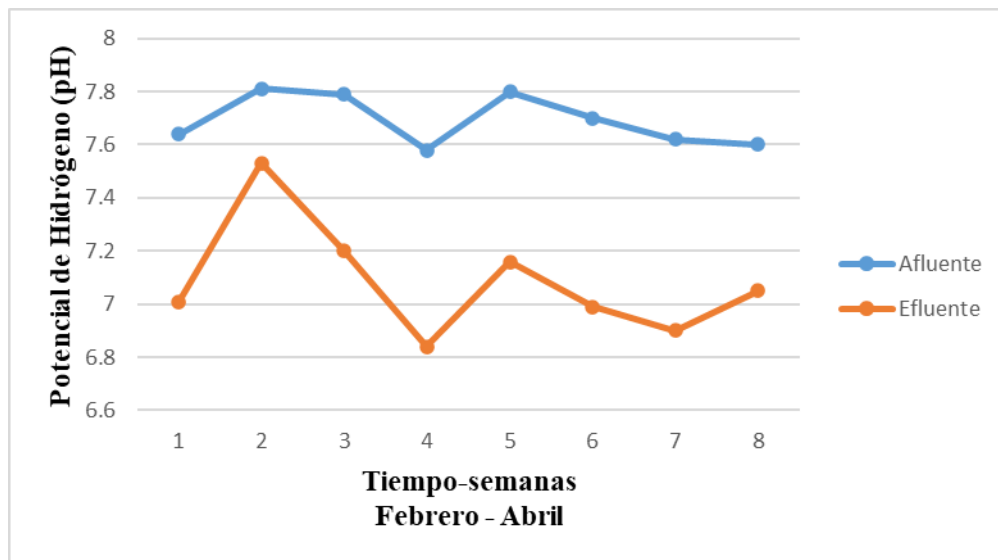
**Figura 27. Variación de la conductividad eléctrica en cada una de las cámaras del tanque baffled.**

De la **figura 27** se puede extraer que, en el periodo de muestreo, los valores obtenidos en las cámaras C1, C2, C3 y C4 fueron de 1676.75, 1562, 1456.38 y 1487.63  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Se aprecia que existe una disminución desde la cámara C1 hasta la C3 para luego incrementar ligeramente en la cámara C4 con respecto a la C3, lo cual no representa una significancia mayor.

También se observa que en la semana tres en la cámara C4 existe un pico elevado, esto se puede deber a que existe una mayor disponibilidad de iones disueltos (sales) o un error en la lectura.

En general los valores obtenidos en el periodo de muestreo permiten un adecuado proceso biológico de depuración, ya que si el valor de conductividad es mayor a 3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  se puede generar un desajuste en la colonia bacteriana, provocando que se debilite la estructura flocular del fango activo, disminuyendo su densidad y por tanto su velocidad de sedimentación. (Torres, A (s.f.))

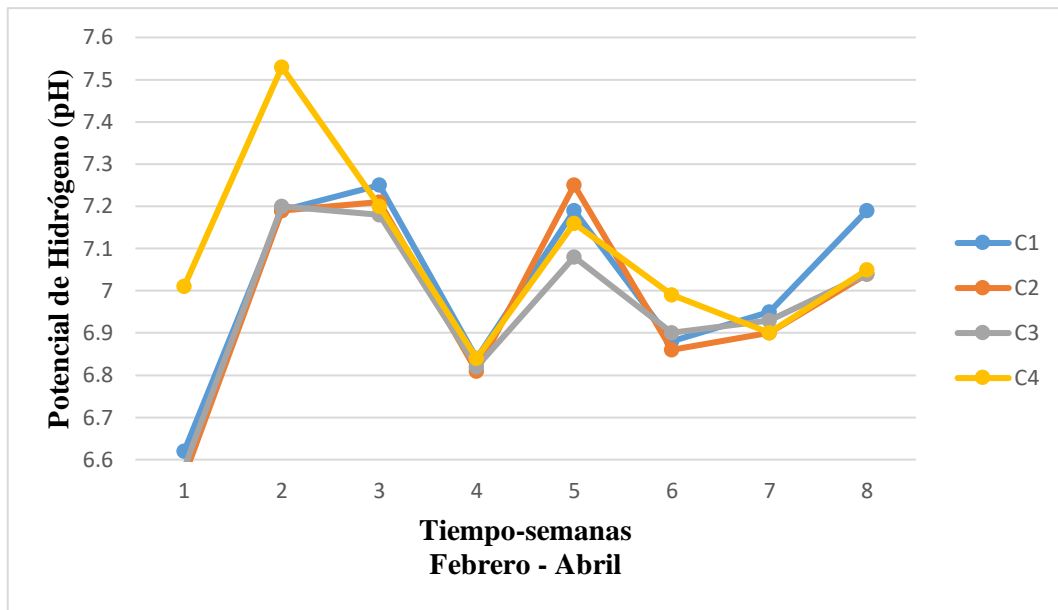
### c. Potencial de Hidrógeno (pH)



**Figura 28. Variación del potencial de hidrógeno (pH)**

Las bacterias metanogénicas son sensibles al pH y prefieren condiciones de pH casi neutrales con un rango óptimo generalmente aceptado de 6.5 a 8.2 (Zama, 2005). Según Lahay et al (2002) y Molina et al (2008), citado en Gaviria et al (2014), el pH para la digestión anaerobia debería encontrarse en rango de 6.6 y 7.4. Ya que los valores de pH en el reactor o tanque baffled proporcionan información sobre el estado general de la digestión anaerobia. (Foxon et al, 2006)

El promedio obtenido durante el tiempo de muestreo para el afluente y efluente ha sido de 7.69 y 7.09 respectivamente, lo que demuestra que existe un ligero descenso del pH dentro del tanque baffled, pero este descenso no es significativo ya que se encuentra dentro del rango en donde las bacterias anaerobias pueden trabajar adecuadamente.



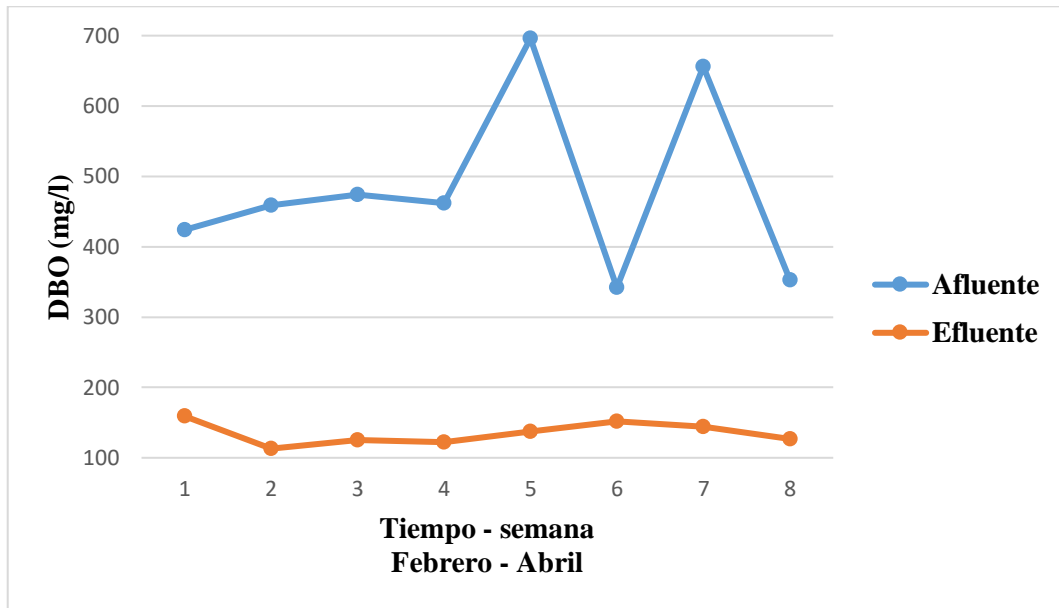
**Figura 29. Variación del pH en las cámaras del tanque baffled**

Se puede apreciar que, en cada una de las cámaras, C1, C2, C3 y C4 presentan un promedio de 7.01, 6.98, 6.97 y 7.09, respectivamente. Estos valores promedios de pH en las cámaras no presentan una gran variación entre cada una de ellas, estos valores obtenidos durante la investigación son adecuados para que se lleve a cabo el proceso de digestión anaerobia sin necesidad de aplicar sustancias estabilizantes de pH al tanque baffled para su adecuado funcionamiento.

Se puede observar que en las dos primeras semanas en la C4 existió un incremento del pH con relación a las demás cámaras que mantienen una similitud. Dichos valores altos, 7.01 y 7.53 respectivamente, se pueden explicar en la medida que, en la primera semana, el pH en la cámara cuatro era neutro ideal para la digestión anaerobia y, para la segunda semana, el incremento se puede interpretar como una basicidad media, la cual no afecta la digestión anaerobia de las bacterias.

### 4.3.2. Parámetros de laboratorio

#### a. Demanda Bioquímica de Oxígeno

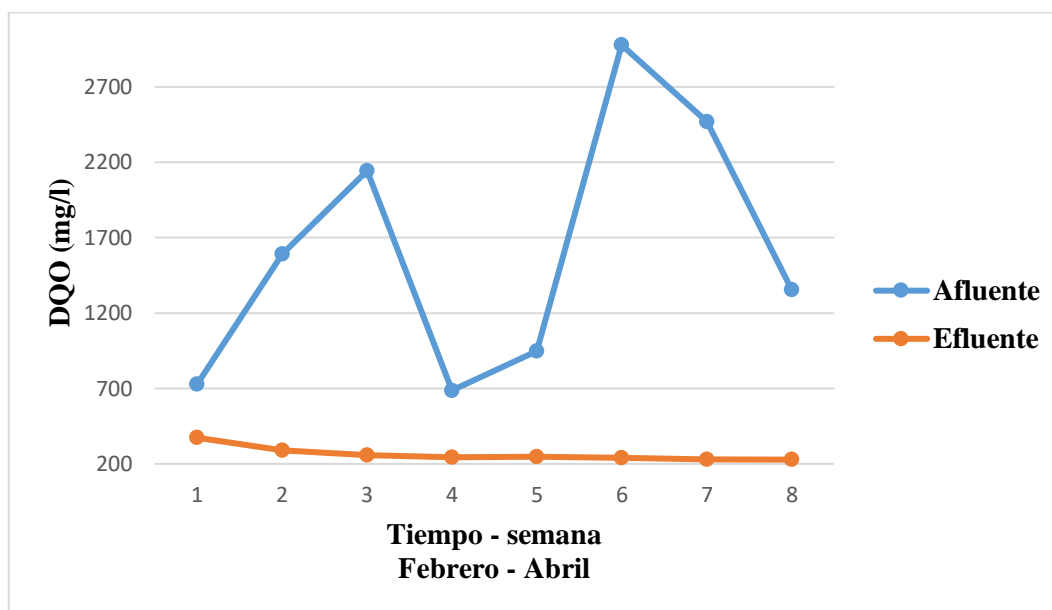


**Figura 30. Variación de la demanda bioquímica de oxígeno**

Se puede apreciar que hay una disminución de la demanda bioquímica de oxígeno en el periodo de muestreo. En promedio se han obtenido valores del afluente y efluente de 483.25 y 134.82 mg/l respectivamente, lo cual representa una eficiencia de remoción promedio de 70.38 %. El valor de remoción obtenida en la investigación se encuentra dentro del rango teórico de 70 % a 90 % de la DBO (Gutterer, B. et al., 2009). Sin embargo, el valor obtenido en la cámara final está ligeramente por encima de los LMP, que indican que el valor de DBO debe de ser de 100 mg/l, por lo que se necesitaría de un tratamiento complementario para disminuir este valor.

En comparación con el tanque séptico, el cual tiene una eficiencia de remoción de entre 30-40%, el tanque baffled está demostrando una buena eficiencia y podría reemplazar al tanque séptico, que es más empleado en zonas rurales.

## b. Demanda Química de Oxígeno



**Figura 31. Variación de la demanda química de oxígeno**

Se puede apreciar que hay una disminución de la demanda química de oxígeno en el periodo de muestreo. En promedio se han obtenido valores del afluente y efluente de 1612.88 y 263.88 mg/l respectivamente, lo cual representa una eficiencia de remoción promedio de 77.85 %. Con relación a otras experiencias, un estudio realizado en Kingsburgh obtuvo una eliminación constante entre 78 y 90 % de DQO, con un tiempo de retención de 42 horas aproximadamente (**Hudson, 2010**); por lo que se podría decir que la remoción del tanque baffled evaluado, en cuanto a DQO, ha operado eficientemente con un tiempo de retención de 13 horas aproximadamente.

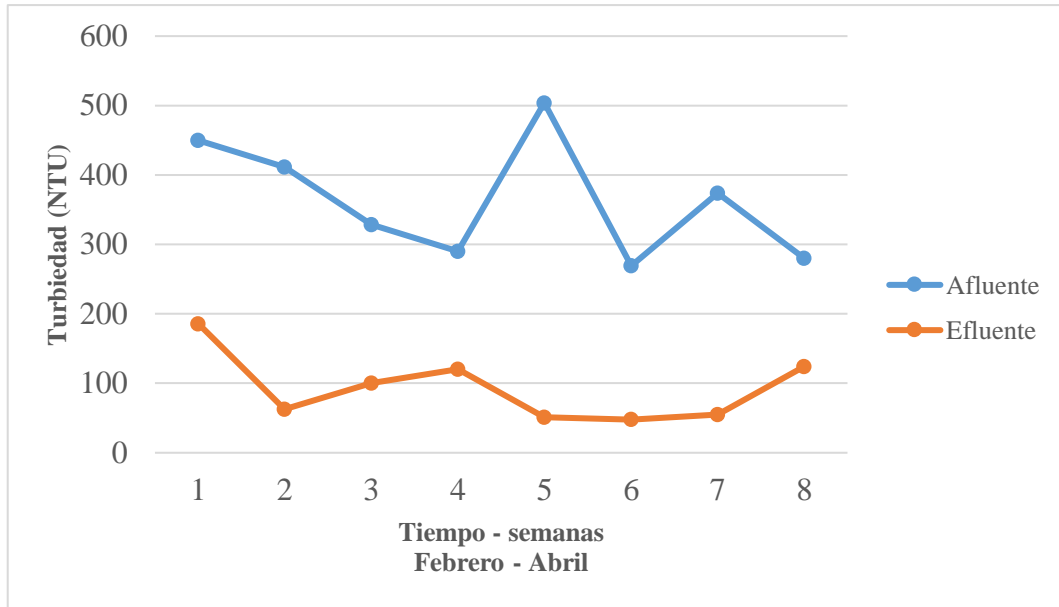
En la escuela de ingeniería y medioambiente de la Universidad de Sureste de Nanjing – China, midieron la remoción de DQO en un tanque baffled a escala piloto, donde obtuvieron resultados de remoción de DQO de 60%, 65%, 72% y 74% para tiempos de retención de 24, 48h, 72h y 96h, respectivamente para la estación de verano, con temperaturas de 23-35°C (**Abbasi et al, 2016**).

Con relación a otras tecnologías más conocidas como el tanque Imhoff, que representan una eficiencia de remoción entre 25 y 50% (**Tilley et.al., 2014**), la eficiencia de remoción del tanque baffled es superior.



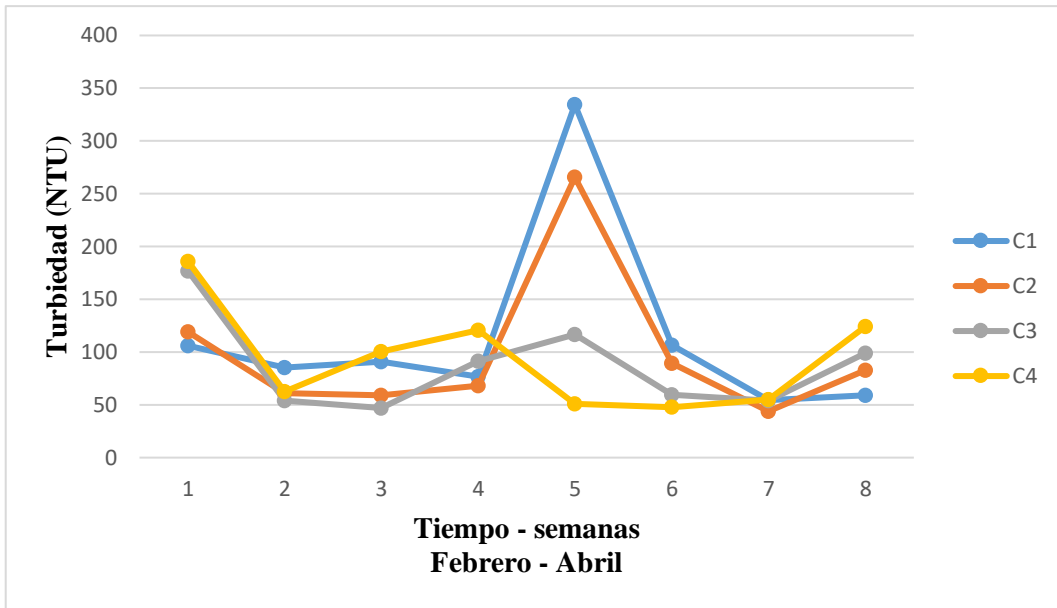
### c. Turbiedad

La turbiedad en el agua se debe a las partículas en suspensión (materia orgánica e inorgánica), las cuales no permiten el pase de la luz. Esto se debe a que las partículas absorben la luz y generan poca visibilidad a través de ella. Con esta medida podemos determinar la calidad del tratamiento.



**Figura 32. Variación de la turbiedad**

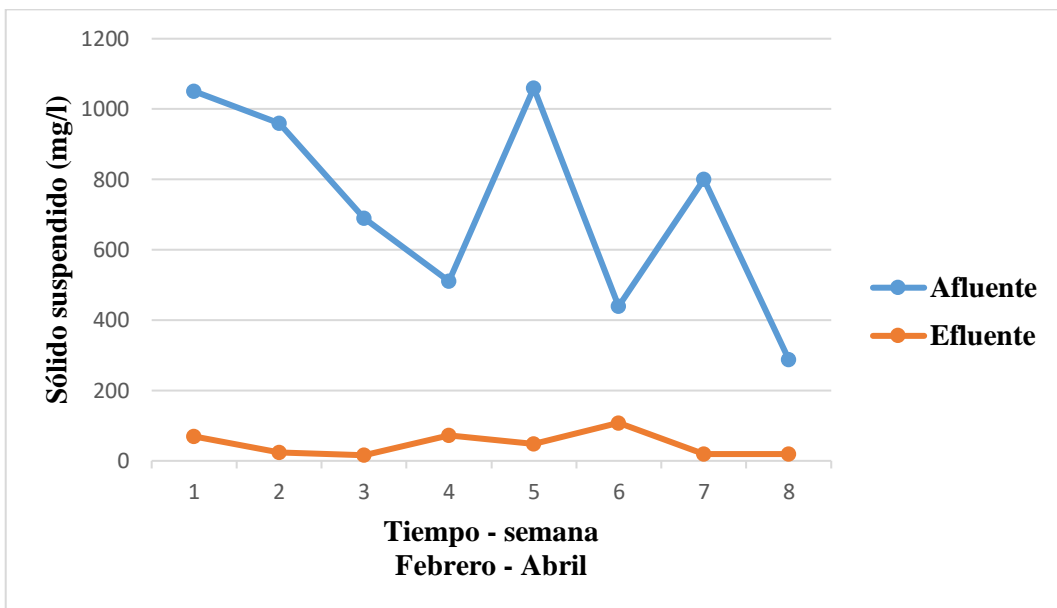
El valor promedio obtenido durante el tiempo de muestreo para el afluente y efluente fue de 363.4 y 93.42 NTU respectivamente, lo que representa un porcentaje de remoción de 73.06%.



**Figura 33. Variación de la turbiedad en cada una de las cámaras del tanque baffled**

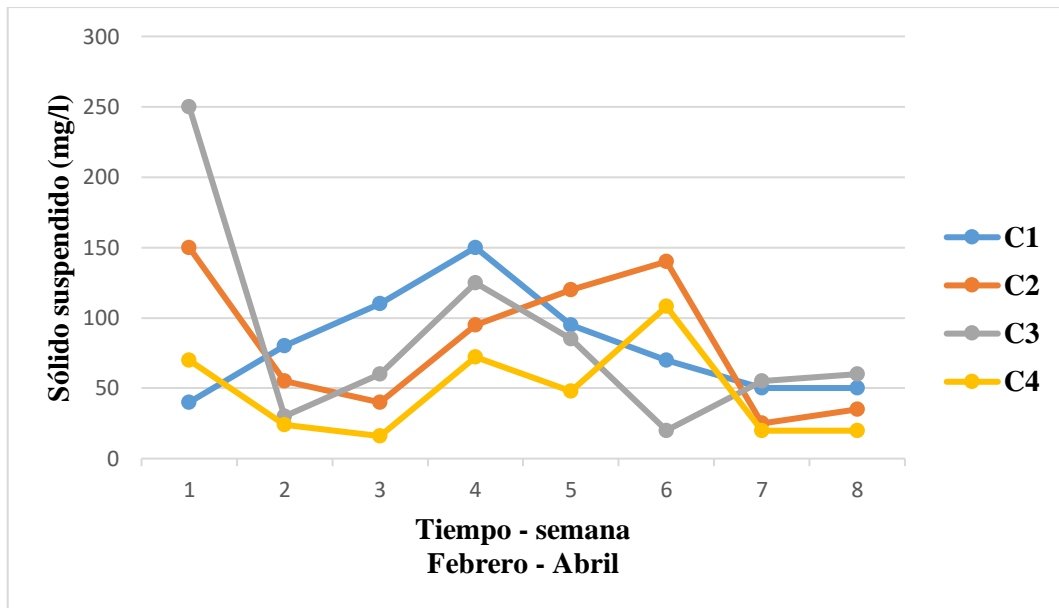
De la **figura 33** se puede apreciar que, al inicio de la toma de muestras, el valor de turbiedad va aumentando de valor desde la cámara C1 hasta C4, y en la semana cinco se ve un pico de subida de los valores de turbiedad en las cámaras C1 y C2 con valores de 334.5 y 265.7 NTU respectivamente. Este incremento coincide con el incremento de turbiedad en el afluente. El promedio alcanzado en las cámaras C1, C2, C3 y C4 es de 114.22, 98.57, 87.35 y 93.42, respectivamente.

**d. Sólidos suspendidos totales**



**Figura 34. Variación sólidos suspendidos del afluente y efluente**

El valor promedio obtenido durante el tiempo de muestreo para el afluente y efluente es 725 y 47 mg/l respectivamente, lo que representa un 92% de remoción de sólidos suspendidos totales.

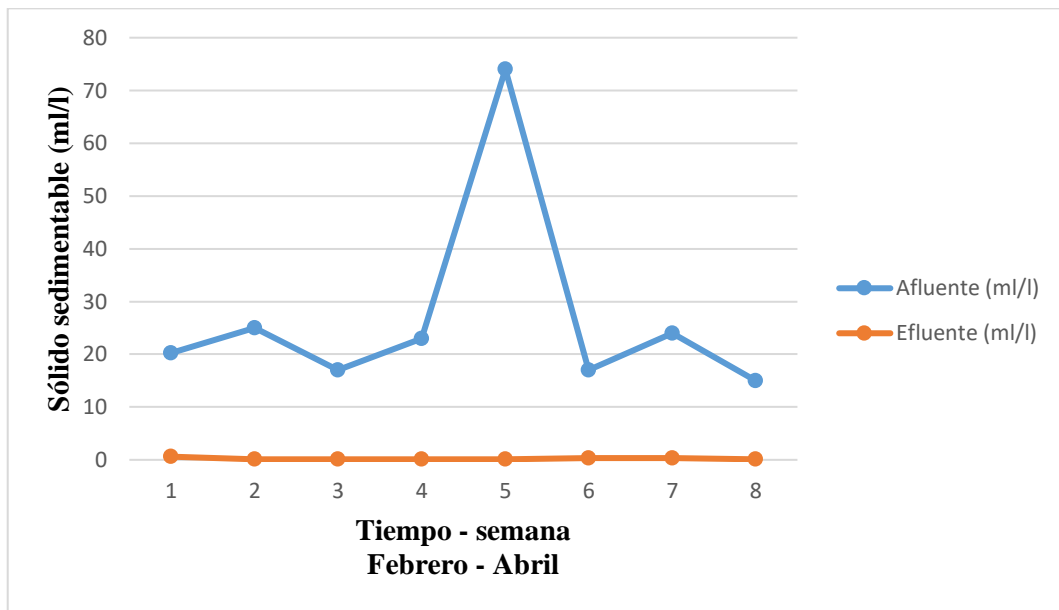


**Figura 35. Variación de sólidos suspendidos totales en cada una de las cámaras del tanque baffled**

El promedio obtenido de las cámaras del tanque baffled de mayor a menor ha sido de 196.8, 106.6, 103.2 y 70.3 mg/l para las cámaras C3, C1, C2 y C4, respectivamente. De la figura 22 se puede observar que, en el periodo de muestreo, los valores de C4 han sido menores y se demuestra según la curva generada.

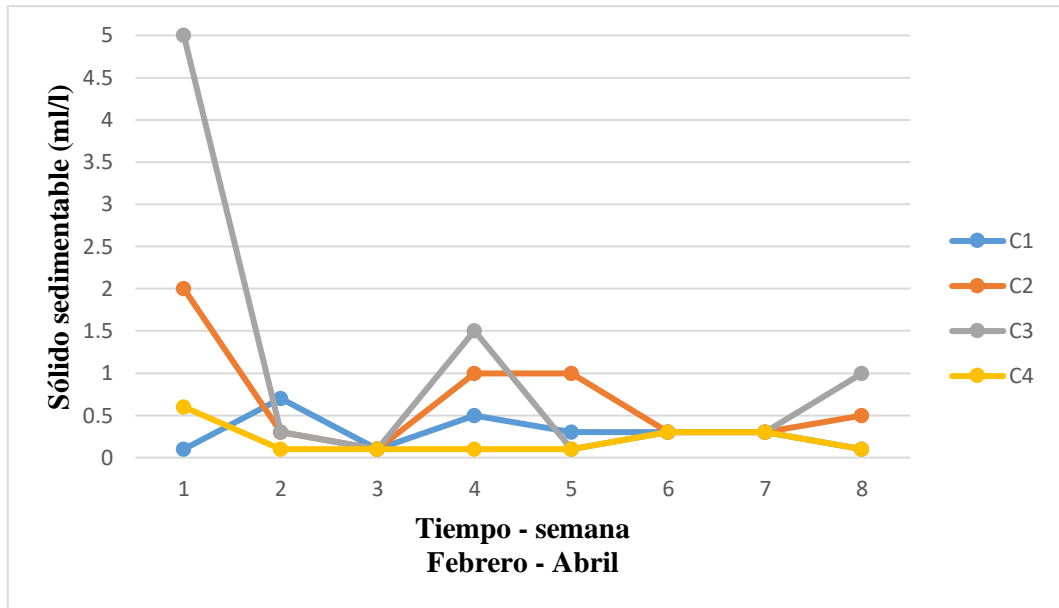
Las variaciones internas que se han dado en cada cámara pueden ser debido a que, al momento de abrir las tapas de las cámaras, los gases de cada una de ellas se liberen, lo que produce que las moléculas de sólidos que antes estaban sedimentadas se levanten, generando estas variaciones. En especial, se puede observar esta variación en la cámara C3 el primer día de muestreo. Pero si estos valores se relacionan con los valores del afluente, se observa que el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos es bueno.

### e. Sólidos sedimentables



**Figura 36. Variación de solido sedimentable del afluente y el efluente**

Los valores de sólidos sedimentables obtenidos durante la investigación del afluente y efluente han sido de 26.91 mg/l y 0.22 mg/l respectivamente, dando como resultado en promedio 98.97% de remoción. En la semana 5 se presentó un incremento en el afluente, lo cual también se observa en los resultados de los sólidos totales, sólidos suspendidos y en la turbiedad, por lo que se puede inferir que, para esa fecha, el afluente del agua residual ingresó con una mayor carga de sólidos.

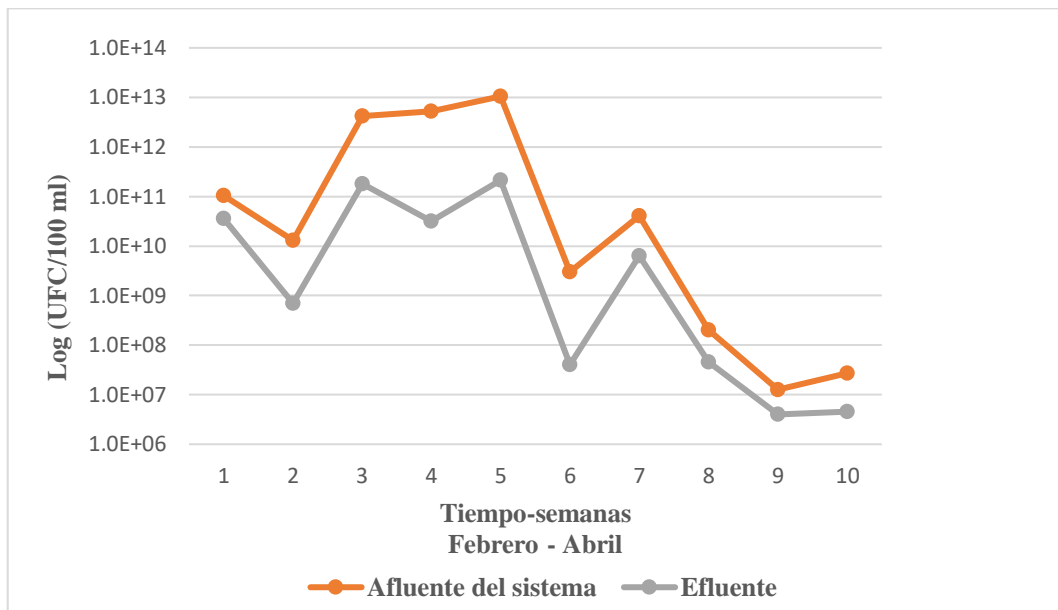


**Figura 37. Valores de variación de los sólidos sedimentables en cada una de las cámaras del tanque baffled**

El promedio obtenido de los sólidos sedimentables de las cámaras C1, C2, C3 y C4 es de 0.3 mg/l, 0.69 mg/l, 1.08 mg/l y 0.21 mg/l, respectivamente. Se puede apreciar que es la cámara C3 la que presenta una mayor cantidad de sólidos sedimentables y esto se observa en la **figura 37**, donde se ve que la tendencia de la cámara C3 es superior a las demás, pero que en el tiempo disminuye, al igual que en las demás cámaras; a excepción de la cámara 1 que se ha mantenido con valores casi constantes durante el tiempo que demoró la investigación.

El aumento de sólidos sedimentables en la primera semana de medición en la cámara C3, puede haber ocurrido debido a la liberación de gases que se produjo al mantener la tapa de la cámara C3 abierta, lo que alteró e hizo que los sólidos del fondo subieran y se mezclaran con el agua que estaba pasando a la siguiente cámara.

## f. Coliformes totales



**Figura 38. Valores de coliformes totales del afluente vs el efluente del tanque baffled**

En la **figura 38** se ha expresado el gráfico de líneas en escala  $\log(10)$  para el análisis de coliformes totales en el afluente y efluente. En la semana 5 hubo un incremento en la carga bacteriana, que dio una población de  $1.05 \times 10^3 \log(10)$  de NMP para luego ir disminuyendo. Se puede observar que los valores del efluente siguen la tendencia de los valores del afluente. En promedio se obtuvo una población bacteriana de  $2.01 \times 10^{12} \log(10)$  y  $4 \times 10^{10} \log(10)$  al ingreso y salida respectivamente, lo cual indica que se alcanzó una remoción de dos órdenes logarítmicos. Este valor no se encuentra dentro del rango de los LMP, que indican que el efluente debe tener un valor de  $10^4$  para que pueda ser vertido a algún cuerpo de agua natural (agua, lagos, ríos, etc).

## V. CONCLUSIONES

- Según la OS.090 el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> y sólidos suspendidos para tratamiento de sedimentación primaria es de 25-30% y 40-70%, respectivamente; por lo que, comparando con los resultados obtenidos en esta investigación, el tanque baffled demostró ser un tratamiento apropiado para ser aplicado como tratamiento primario en condiciones de costa peruana; al alcanzar eficiencias de remoción de 77.85%, 70.38% y 92% en DQO, DBO<sub>5</sub> y Sólidos suspendidos totales, respectivamente. Cabe destacar que la evaluación del tanque baffled se realizó entre los meses de enero a abril del 2018.
- Las eficiencias mostradas se alcanzaron con un tiempo de retención hidráulico de 13 horas.
- Mediante el método matemático de Wolf y Resnick se determinó que en el tanque baffled predomina el flujo de tipo pistón, con un porcentaje de 76.8% versus el flujo tipo mezcla, el cual tiene un valor de 23.2%; también dentro del tanque baffled existen espacios muertos en un porcentaje de 70.1%.
- El tanque baffled demostró ser un excelente tratamiento primario de sedimentación, porque permitió remover Sólidos Sedimentables y turbiedad en 98.97% y 73.06%, respectivamente.

## VI. RECOMENDACIONES

- Medir la alcalinidad y potencial redox, para evaluar mejor las condiciones anaerobias que se producen en cada una de las cámaras del tanque baffled.
- Medir los parámetros evaluados en cada una de las estaciones, para observar la variabilidad frente a diferentes temperaturas.
- Es recomendable realizar la prueba del índice volumétrico de lodos, con la finalidad de realizar comparaciones más exactas sobre el porcentaje de acumulación de lodos en cada una de las cámaras del tanque baffled.
- Si el sistema del tanque baffled funciona por bombeo, es recomendable que se instale un variador de frecuencia, para poder ir regulando el caudal de ingreso.
- Es recomendable realizar una investigación del tanque baffled funcionando por gravedad y comparar los parámetros obtenidos con los parámetros que se obtuvieron en la presente investigación.
- Usar una mezcla rica en cemento, en la estructura de concreto o un cemento resistente a los sulfatos para mantener la durabilidad del concreto en la estructura del tanque.
- Escalar el sistema del tanque baffled a un nivel real en un sistema descentralizado para corroborar los resultados obtenidos en esta investigación.
- Incorporar esta tecnología en la Norma S.090.



## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, H.; Lu, X. y Xu F. (2016). *Seasonal performance and characterist of ABR for low strength wastewater*. Applied ecology and environmental research. 15(1): pp. 263-273.
- American Public Health Association, A. W. (1992). *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. España: Díaz de Santos, S. A.
- Avendaño, D. (2015). *Identificación de Tipologías de Asentamiento para el Diseño de Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales. Caso estudio: San Isidro de Heredia – Costa Rica*. Revista Geográfica de América Central. N° 56. pp183-207.
- Cano, L. (2010). *Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras en la hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio*. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- Chiva, S.; Berlanga, J.; Martínez, R.; y Climent, J. (2018). *Depuración de aguas residuales: Digestión anaerobia*. Castellon de la Plata, España. Publicaciones campus del Riu Sec. Edifici Recto i Serveis Centrals.
- Cubillos A. (1981). *Proyecto de Desarrollo Tecnológico de las Instituciones de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado. Parámetros y Características de las Aguas Residuales*. CEPIS. Lima, Perú. Recuperada de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011643/011643-09.pdf>.
- Diaz, M.(1987). *Reactores anaeróbicos de alta tasa*. Ingeniería e investigación. Vol. 4. N°2.
- Foxon K. y Buckley C. (s.f). *Guidelines for the Implementation of Anaerobic Baffled Reactors for on-site or Decentralised Sanitation*. KwaZulu Natal,

- Sudáfrica. Recuperada de:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.568.378&rep=rep1&type=pdf>.
- Foxon K.y Buckley C. (s.f). *The ABR Concept: A Holistic approach to managing wastewater from low income communities and institutions. KwaZulu Natal, Sudáfrica.* Recuperada de  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.522.8751&rep=rep1&type=pdf>.
  - Foxon K.; Buckley C.; Brouckaert, C.; Mtembu, Z.; Dama, P.; Rodda, N.; Smith, H.; Pillay, S.; Arjun, N.; Lalbahadur, T.; y Bux, F. (2006). *The evaluation of the anaerobic baffled reactor for sanitation in dense peri-urban settlements.* Gezina, Sudafrica. Research commission.
  - Galbán, L. (2009). *El Tratamiento Descentralizado de Aguas Residuales Domesticas como alternativa sostenible para el saneamiento periurbano en Cuba. Ingeniería Hidráulica y Ambiental.* Vol XXX. Cuba. Disponible en:  
[http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Hidraulica/Vol-XXX/1-2009/29-35\\_Tratamiento.pdf](http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Hidraulica/Vol-XXX/1-2009/29-35_Tratamiento.pdf).
  - Gallego, D. (2002). *Manual para el estudio del comportamiento hidráulico de un reactor continuo con los modelos de un factor.* Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
  - Gómez M., (2017). *Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales verticales empleando cyperus alternifolius y chrysopogon zizanioides para el tratamiento de aguas residuales servidas.* Tesis pregrado. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
  - Gutterer, B.; Sasse, L.; Panzerbieter, T.; Reckerzügel, T. 2009. [Decentralised Wastewater Treatment Systems \(DEWATS\) and Sanitation in Developing Countries.](#) Loughborough University (UK): Water Engineering and Deveopment Centre (WEDC). Ulrich, A.; Reuter, S.; Gutterer, B. (eds.). p.367.

- Hegg, S. (2018). *Evaluación de optimizaciones de sistemas individuales de tratamiento de aguas residuales*. Proyecto de grado. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Hilleboe Herman, (1964). *Manual de Tratamiento de Aguas Negras publicado por el Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York*. Editorial Limusa – Wiley. DF-México.
- Hudson K., (2010). *Operational performance of the Anaerobic Baffled Reactor used to treat wastewater from a peri-urban community*. Tesis de maestría. University of the Witwatersrand. Johannesburg, Sudáfrica.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Encuesta Nacional de Programas Presupuestales 2011-2016*. Lima, Perú.
- Levenspiel, O. 2004. *Ingeniería de las reacciones químicas*. 3ed México: Editorial Limusa Wiley. p.669.
- Lorenzo Acosta, Yaniris, & Obaya Abreu, Ma Cristina (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XXXIX(1),35-48.[fecha de Consulta 4 de Noviembre de 2020]. ISSN: 0138-6204. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2231/223120659006>.
- Mendez, JP; Marchan, J. 2008. Diagnóstico Situacional de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en las EPS del Perú y Propuestas de Solución. Lima, Perú, SUNASS/ GTZ.
- Méndez R., Gijón A., Quintal C. y Osorio H. (2007). Determinación de la tasa de acumulación de lodos en fosas sépticas de la ciudad de Mérida, Yucatán. Red de revistas científicas. Vol.1, num3, pp. 55-64. Yucatán, México.
- Metcalf & Eddy, 1998. *Ingeniería de Aguas Residuales*. 3ed Madrid: Editorial Mc Graw Hill. Vol 1. Impreso en España.

- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (2017). Decreto supremo que aprueba el Plan Nacional de Saneamiento 2017-2021. DS N°018-2017. El Peruano. Lima, Perú.
- Muñoz, Juan (s.f). Componentes de los Sistemas Convencionales de Depuración de Aguas Residuales. Consultado 04 de febrero 2017. Recuperado de [http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia\\_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%203%20a%204.pdf](http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%203%20a%204.pdf).
- Naturaleza del agua residual doméstica y su tratamiento... Consultado 04 Febrero 2017. Recuperado de [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_135\\_183\\_88\\_1242.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_135_183_88_1242.pdf).
- Nasr F, Doma H y Nassar H. (2008). Treatment of Domestic Wastewater using an Anaerobic Baffled Reactor Followed by a Duckweed pond for Agricultural purposes. Environmentalist pp: 270-279. Dokki, Egipto.
- Nguyen Huong, Turgeon Scott y Matte Soghua. (2010). The Anaerobic Baffled Reactor: A study of the wastewater treatment process using the anaerobic baffled reactor. Recuperado el 19 de noviembre de 2020 de: <https://cpb-us-w2.wpmucdn.com/wp.wpi.edu/dist/f/266/files/2010/12/Anaerobic-Baffled-Reactor-for-Wastewater-Treatment.pdf>.
- Noriega, R. (s.f.) Manual de Tratamiento de Aguas Residuales. Taller de la Imprenta del Ejercito del Perú. v.1. p.282.
- Noyola A.; Morgan-Sagastume J.; y Güereca, L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. 1era ed. México. Universidad Autonoma de México.
- OMS (Organización Mundial de la Salud)/, UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund) y PJM, ( Programa Conjunto de

- Monitoreo OMS/UNICEF). (2015). *Desigualdades en Materia de Saneamiento y Agua Potable en America Latina y el Caribe. Una perspectiva regional basada en datos del Programa Conjunto de Monitoreo OMS/UNICEF del abastecimiento de agua y del saneamiento y un análisis de la desigualdad a partir de encuestas nacionales de hogares y censos recientes*. Recuperado de: <https://washdata.org/file/411/download>.
- Perez, Juan (1992). *Manual de Evaluación: análisis de flujo y factores que determinan los periodos de retención*. CEPIS. Lima, Perú. v.2, p.37-91.
  - Portilla, E. (2019). “*Sistema Integrado Tanque Séptico y Humedal de Flujo Horizontal para el Tratamiento de Agua Residual Doméstica*”. Tesis pregrado. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
  - Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos de las Naciones Unidas. (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos – aguas residuales el recurso desaprovechado*. Paris, UNESCO.
  - Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté. Barcelona, España.
  - Resolución Ministerial N°273, 2013. *Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas o Municipales (Oficina de Medio Ambiente-Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento)*. Diario El Peruano. 30 oct.
  - Rodriguez, L. (2006). *Evaluación hidrodinámica de unidades de tratamiento de agua utilizando radio trazadores*. Informe de suficiencia profesional. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
  - Sarathai, Y.; Koottatep, T.; y Morel, M. (2010). *Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system*. Journal of environmental sciences. 22(9), pp: 1319-126.

- Seoanez, M. (1995). *Aguas residuales urbanas: Tratamiento naturales de bajo costo y aprovechamiento*. Ediciones Mundi Prensa-Madrid España.
- Singh S.; Raimund, H.; Moog, O.; Shrestha R.; Shrestha, P.; y Shrestha R. (2008). *Performance of an anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland treating high-strength wastewater in Nepal a model for DEWATS*. Elsevier ecological engineering. 35(2009) pp: 654-660.
- Stuckey, David. 2010. *Anaerobic Baffled Reactor for Wastewater Treatment*. Londres. Inglaterra.
- SUNASS (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, Perú). 2016. *Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento*. 2ed. Lima, Perú.
- Torres A. (s.f.). *Análisis de aguas residuales. Diapositiva de powerpoint. Laboratorio de medio ambiente*. Diputación provincial de Granada. Granada, España. Recuperado el 15 de octubre de 2020 de:  
[http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion\\_ANTONIO.pdf](http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion_ANTONIO.pdf)
- Trapote, A (2016). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Segunda Edición*. Editorial Unión de Editores Universitarias Españolas.
- Valencia, E.; Silva, I.; y Narváez, C. (2010). *Sistemas descentralizados integrados y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Revista ingeniería y región. N°7.
- Vargas J. y Torres J. (2008). *Diseño implementación y estudio hidrodinámico de un reactor biológico de cargas secuenciales de flujo pistón para tratar aguas residuales sintéticas. Tesis de grado. Universidad de la Salle*. Bogotá, Colombia.

- Zama Dela. 2005. *The Anaerobic Baffled Reactor for Sanitation in Dense Peri-Urban. Settlements*. Tesis maestria. Rhodes University. KwaZulu Natal, Sudafrica.
  
- Yaya R. (2012). *Módulo 4: Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Curso virtual. Sustainable water and wastewater management in urban growth centres copinco with climate change concept for metropolitan. Lima, Peru. Recuperado el 13 de abril de 2020 de:  
[http://www.lima-water.de/documents/modulo4\\_tratamiento\\_anaerobio.pdf](http://www.lima-water.de/documents/modulo4_tratamiento_anaerobio.pdf).
  
- Yulistyorini, A.; Camargo-Valero, M.; Sukarni, S.; Suryoputro, N.; Mujiyono, M.; y Tri-Rayahu, E. (2019). *Performance of anaerobic baffled reactor for decentralized wastewater treatment in urban*. Melang, Indonesia. Processes.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1. Datos medidos para el cálculo del caudal de ingreso

**Tabla 16: Medida de caudal in-situ**

Bombes	Repeticiones	Litros	Segundos	Q (l/s)	Qpromedio (l/s)	Q promedio* (m <sup>3</sup> /d)
<b>Primero</b>	1	3.136	1.41	2.22	2.35	3.27
	2	2.5	1.35	1.85		
	3	2.7	0.91	2.97		
<b>Segundo</b>	1	3.25	2.05	1.59	1.71	2.39
	2	3.29	2.16	1.52		
	3	2.5	1.24	2.02		
<b>Tercero</b>	1	3.3	1.87	1.76	2.01	2.8
	2	3.42	1.29	2.65		
	3	2.75	1.7	1.62		

\*Resultado de 24 bombes de un minuto de duración cada uno

### ANEXO 2. Datos medidos para el cálculo del tiempo de retención

**Tabla 17: Medición del tiempo de retención**

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Horas	Tiempo (minutos)	t/to	Concentración	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	100-F(t)
0	0	0	616	0	0	0	0
0.02	1	0.00	616	0	0	0.00	100.00
0.05	3	0.00	616	0	0	0.00	100.00
0.08	5	0.00	616	0	0	0.00	100.00
0.12	7	0.00	616	0	0	0.00	100.00
0.15	9	0.01	616	0	0	0.00	100.00
1.03	62	0.04	622	6	6	0.17	99.83
1.07	64	0.04	625	9	15	0.44	99.56
1.10	66	0.04	622	6	21	0.61	99.39
1.13	68	0.04	620	4	25	0.73	99.27
1.17	70	0.04	622	6	31	0.90	99.10

Continúa



2.03	122	0.07	627	11	42	1.22	98.78
2.07	124	0.07	628	12	54	1.57	98.43
2.10	126	0.07	628	12	66	1.92	98.08
2.13	128	0.08	632	16	82	2.39	97.61
2.17	130	0.08	634	18	100	2.92	97.08
3.03	182	0.11	635	19	119	3.47	96.53
3.07	184	0.11	642	26	145	4.23	95.77
3.10	186	0.11	643	27	172	5.02	94.98
3.13	188	0.11	637	21	193	5.63	94.37
3.17	190	0.11	628	12	205	5.98	94.02
4.03	242	0.14	650	34	239	6.97	93.03
4.07	244	0.14	675	59	298	8.69	91.31
4.10	246	0.15	671	55	353	10.29	89.71
4.13	248	0.15	654	38	391	11.40	88.60
4.17	250	0.15	648	32	423	12.34	87.66
5.03	302	0.18	691	75	498	14.52	85.48
5.07	304	0.18	693	77	575	16.77	83.23
5.10	306	0.18	699	83	658	19.19	80.81
5.13	308	0.18	684	68	726	21.17	78.83
5.17	310	0.18	682	66	792	23.10	76.90
6.03	362	0.21	725	109	901	26.28	73.72
6.07	364	0.21	725	109	1010	29.45	70.55
6.10	366	0.22	733	117	1127	32.87	67.13
6.13	368	0.22	725	109	1236	36.05	63.95
6.17	370	0.22	718	102	1338	39.02	60.98
7.03	422	0.25	738	122	1460	42.58	57.42
7.07	424	0.25	737	121	1581	46.11	53.89
7.10	426	0.25	733	117	1698	49.52	50.48
7.13	428	0.25	732	116	1814	52.90	47.10
7.17	430	0.25	736	120	1934	56.40	43.60
8.03	482	0.28	731	115	2049	59.76	40.24
8.07	484	0.29	729	113	2162	63.05	36.95
8.10	486	0.29	731	115	2277	66.40	33.60
8.13	488	0.29	721	105	2382	69.47	30.53
8.17	490	0.29	724	108	2490	72.62	27.38
9.03	542	0.32	695	79	2569	74.92	25.08
9.07	544	0.32	699	83	2652	77.34	22.66
9.10	546	0.32	700	84	2736	79.79	20.21
9.13	548	0.32	691	75	2811	81.98	18.02

Continúa

9.17	550	0.32	690	74	2885	84.14	15.86
10.03	602	0.35	685	69	2954	86.15	13.85
10.07	604	0.36	680	64	3018	88.01	11.99
10.10	606	0.36	671	55	3073	89.62	10.38
10.13	608	0.36	666	50	3123	91.08	8.92
10.17	610	0.36	660	44	3167	92.36	7.64
11.03	662	0.39	670	54	3221	93.93	6.07
11.07	664	0.39	665	49	3270	95.36	4.64
11.10	666	0.39	658	42	3312	96.59	3.41
11.13	668	0.39	637	21	3333	97.20	2.80
11.17	670	0.39	632	16	3349	97.67	2.33
12.03	722	0.43	634	18	3367	98.19	1.81
12.07	724	0.43	637	21	3388	98.80	1.20
12.10	726	0.43	632	16	3404	99.27	0.73
12.13	728	0.43	624	8	3412	99.50	0.50
12.17	730	0.43	623	7	3419	99.71	0.29
13.03	782	0.46	620	4	3423	99.83	0.17
13.07	784	0.46	622	6	3429	100.00	0.00
13.10	786	0.46	616	0	3429	100.00	0.00

### ANEXO 3. Datos medidos para la tasa de acumulación de lodos

**Tabla 18: Altura de lodos en cm en cada una de las cámaras de tanque baffled**

FECHA	C1	C2	C3	C4
<b>10/01/2018</b>	0.6	19	11.3	0
<b>11/04/2018</b>	4	21	13	1
<b>30/05/2018</b>	10	30	22	9
<b>14/06/2018</b>	19	25	15	5
<b>19/07/2018</b>	22	32	24	9
<b>25/07/2018</b>	23	25	27	4.5
<b>01/08/2018</b>	24	35	30	7
<b>11/08/2018</b>	20	27	23	7
<b>22/08/2018</b>	22	30	27	7
<b>28/08/2018</b>	19	25	28	10

## ANEXO 4. Datos de temperatura

**Tabla 19: Temperatura medida por la Estación Von Humbolt**

Fecha	T. Max	T. Min	T. Prom
14/02/2018	30.5	19.8	24.55
21/02/2018	28.1	19	24.12
28/02/2018	29.8	18.6	23.18
07/03/2018	29	18	23.05
14/03/2018	28.9	17.8	23.05
21/03/2018	29.4	18.4	22.18
28/03/2018	29.6	18	22.97
04/04/2018	29.4	18.1	22.46

**Tabla 20: Temperatura medida en campo en el afluente y efluente del tanque baffled**

Fecha	Afluente	Efluente
14/02/2018	27.5	27
21/02/2018	28.4	29.9
28/02/2018	28.2	28.3
07/03/2018	27.2	27.3
14/03/2018	28.5	27.7
21/03/2018	26.8	27.4
28/03/2018	29.4	27
04/04/2018	26.5	26
<b>Promedio</b>	27.81	27.58
<b>Desv.Est.</b>	0.98	1.15
<b>Cv%</b>	3.52	4.16

**Tabla 21: Temperatura tomada en campo para cada una de las cámaras del tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	Entrada	C1	C2	C3	C4
<b>1</b>	14/02/2018	27.5	27.3	27.2	27.7	27
<b>2</b>	21/02/2018	28.4	28	28	28.2	29.9
<b>3</b>	28/02/2018	28.2	29.3	28	28.2	28.3
<b>4</b>	07/03/2018	27.2	28.1	26.5	27.2	27.3
<b>5</b>	14/03/2018	28.5	27.5	27.8	28	27.7
<b>6</b>	21/03/2018	26.8	27.8	27.5	27.6	27.4
<b>7</b>	28/03/2018	29.4	28.4	27.8	28.1	27
<b>8</b>	04/04/2018	26.5	26.2	26.4	26.1	26
<b>Promedio</b>		27.81	27.83	27.40	27.64	27.58
<b>Desv.Est.</b>		0.98	0.90	0.64	0.71	1.15
<b>Cv%</b>		3.52	3.22	2.35	2.57	4.16

## ANEXO 5. Datos medidos de los parámetros de campo

### ANEXO 5.1 Conductividad eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )

**Tabla 22: Conductividad medida en el afluente y efluente del tanque baffled**

Semanas	Fecha	Afluente	Efluente
1	14/02/2018	1626	1351
2	21/02/2018	1446	1439
3	28/02/2018	1323	1632
4	07/03/2018	1495	1440
5	14/03/2018	1769	1556
6	21/03/2018	1584	1549
7	28/03/2018	1649	1600
8	04/04/2018	1324	1334
<b>Promedio</b>		1527	1487.625
<b>Desv.Est.</b>		158.97	112.64
<b>Cv%</b>		10.41	7.57

**Tabla 23: Conductividad medida en las cámaras del tanque baffled**

Semanas	Fecha	C1	C2	C3	C4
1	14/02/2018	1440	1350	1352	1351
2	21/02/2018	1561	1433	1360	1439
3	28/02/2018	1267	1293	1359	1632
4	07/03/2018	1973	1818	1583	1440
5	14/03/2018	2290	1905	1595	1556
6	21/03/2018	1508	1496	1492	1549
7	28/03/2018	2047	1853	1612	1600
8	04/04/2018	1328	1348	1298	1334
<b>Promedio</b>		1676.75	1562.00	1456.38	1487.63
<b>Desv.Est.</b>		375.76	254.10	128.44	112.64
<b>Cv%</b>		22.41	16.27	8.82	7.57

## ANEXO 5.2 Potencial de hidrógeno (pH)

**Tabla 24: Potencial de hidrogeno medido en el afluente y efluente del tanque baffled**

N°de Muestras	Fecha	Afluente	Efluente
1	14/02/2018	7.64	7.01
2	21/02/2018	7.81	7.53
3	28/02/2018	7.79	7.2
4	07/03/2018	7.58	6.84
5	14/03/2018	7.8	7.16
6	21/03/2018	7.7	6.99
7	28/03/2018	7.62	6.9
8	04/04/2018	7.6	7.05
<b>Promedio</b>		7.6925	7.085
<b>Desv.Est.</b>		0.10	0.22
<b>Cv%</b>		1.24	3.05

**Tabla 25: Potencial de hidrógeno medido en cada una de las cámaras del tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	Entrada	C1	C2	C3	C4
1	14/02/2018	7.64	6.62	6.56	6.58	7.01
2	21/02/2018	7.81	7.19	7.19	7.2	7.53
3	28/02/2018	7.79	7.25	7.21	7.18	7.2
4	07/03/2018	7.58	6.84	6.81	6.82	6.84
5	14/03/2018	7.8	7.19	7.25	7.08	7.16
6	21/03/2018	7.7	6.88	6.86	6.9	6.99
7	28/03/2018	7.62	6.95	6.9	6.93	6.9
8	04/04/2018	7.6	7.19	7.04	7.04	7.05
<b>Promedio</b>		7.69	7.01	6.98	6.97	7.09
<b>Desv.Est.</b>		0.10	0.23	0.24	0.21	0.22
<b>Cv%</b>		1.24	3.22	3.42	2.95	3.05

## ANEXO 6. Datos medidos de los parámetros de laboratorio

### ANEXO 6.1. Turbiedad (NTU)

**Tabla 26: Turbiedad medida en el afluente y efluente del tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	Afluente	Efluente	%Remoción
1	14/02/2018	450	186	58.67
2	21/02/2018	411.2	62.35	84.84
3	28/02/2018	328.5	100.3	69.47
4	07/03/2018	290.1	120.5	58.46
5	14/03/2018	504	50.89	89.90
6	21/03/2018	269.2	47.72	82.27
7	28/03/2018	373.9	55.2	85.24
8	04/04/2018	280.3	124.4	55.62
<b>Promedio</b>		363.4	93.42	73.06
<b>Desv.Est.</b>		86.22	48.75	
<b>Cv%</b>		23.72	52.18	

**Tabla 27: Turbiedad medida en cada una de las camaras de tanque baffled en NTU**

N°Muestras	Fecha	Entrada	C1	C2	C3	C4
1	14/02/2018	450	106	119	177	186
2	21/02/2018	411.2	85.17	60.88	53.78	62.35
3	28/02/2018	328.5	90.91	58.99	46.99	100.3
4	07/03/2018	290.1	76.86	67.95	91.46	120.5
5	14/03/2018	504	334.5	265.7	116.9	50.89
6	21/03/2018	269.2	106.6	89.46	59.45	47.72
7	28/03/2018	373.9	54.44	43.94	54.23	55.2
8	04/04/2018	280.3	59.27	82.6	99	124.4
<b>Promedio</b>		363.40	114.22	98.57	87.35	93.42
<b>Desv.Est.</b>		86.22	91.05	71.31	44.23	48.75
<b>Cv%</b>		23.72	79.71	72.35	50.63	52.18

## ANEXO 6.2. Sólidos sedimentables (ml/l)

**Tabla 28: Medida de sólidos sedimentables en el afluente y efluente del tanque baffled**

Semana	Afluente (ml/l)	Efluente (ml/l)	%Remoción
1	20.3	0.6	97.04
2	25	0.1	99.60
3	17	0.1	99.41
4	23	0.1	99.57
5	74	0.1	99.86
6	17	0.3	98.24
7	24	0.3	98.75
8	15	0.1	99.33
<b>Promedio</b>	26.91	0.21	98.98
<b>Desv.Est.</b>	19.37	0.18	
<b>Cv%</b>	71.98	85.07	

**Tabla 29: Medida de sólidos sedimentables en cada una de las cámaras el tanque baffled**

NºMuestra	Fecha	C1	C2	C3	C4
1	14/02/2018	0.1	2	5	0.6
2	21/02/2018	0.7	0.3	0.3	0.1
3	28/02/2018	0.1	0.1	0.1	0.1
4	07/03/2018	0.5	1	1.5	0.1
5	14/03/2018	0.3	1	0.1	0.1
6	21/03/2018	0.3	0.3	0.3	0.3
7	28/03/2018	0.3	0.3	0.3	0.3
8	04/04/2018	0.1	0.5	1	0.1
<b>Promedio</b>		0.30	0.69	1.08	0.21
<b>Desv.Est.</b>		0.21	0.63	1.66	0.18
<b>Cv%</b>		71.27	91.15	154.44	85.07

### ANEXO 6.3 Sólidos suspendidos (mg/l)

**Tabla 30: Medida de sólidos suspendidos en el afluente y efluente del tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	Afluente	Efluente	% Remoción
1	19/02/2018	1050	70	93.33
2	26/02/2018	960	24	97.50
3	06/03/2018	690	16	97.68
4	13/03/2018	510	72	85.88
5	19/03/2018	1060	48	95.47
6	26/03/2018	440	108	75.45
7	02/04/2018	800	20	97.50
8	09/04/2018	288	20	93.06
<b>Promedio</b>		725	47	92
<b>Desv.Est.</b>		292.30	33.43	
<b>Cv%</b>		40.33	70.75	

**Tabla 31: Medida de sólidos suspendidos en cada una de las cámaras el tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	C1	C2	C3	C4
1	19/02/2018	40	150	250	70
2	26/02/2018	80	55	30	24
3	06/03/2018	110	40	60	16
4	13/03/2018	150	95	125	72
5	19/03/2018	95	120	85	48
6	26/03/2018	70	140	20	108
7	02/04/2018	50	25	55	20
8	09/04/2018	50	35	60	20
<b>Promedio</b>		106.6	103.2	196.8	70.3
<b>Desv.Est.</b>		36.88	50.07	73.89	33.43
<b>Cv%</b>		34.60	48.52	37.55	47.56



## ANEXO 6.5. DBO<sub>5</sub> (mg/l)

**Tabla 32: Medida de DBO<sub>5</sub> en el afluente y efluente del tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	Afluente	Efluente	%Remoción
1	19/02/2018	424	159	62.50
2	26/02/2018	459	113	75.38
3	06/03/2018	474	125	73.63
4	13/03/2018	462	122	73.59
5	19/03/2018	696	137	80.32
6	26/03/2018	342	152	55.56
7	02/04/2018	656	144	78.05
8	09/04/2018	353	127	64.02
<b>Promedio</b>		483.25	134.88	70.38
<b>Desv.Est.</b>		129.09	15.89	
<b>Cv%</b>		26.71	11.78	

## ANEXO 6.6. DQO (mg/l)

**Tabla 33: Medida de DQO en el afluente y efluente del tanque baffled**

N°Muestras	Fecha	Afluente	Efluente	%Remoción
1	14/02/2018	730	373	48.90
2	21/02/2018	1593	291	81.73
3	28/02/2018	2143	258	87.96
4	07/03/2018	687	244	64.48
5	14/03/2018	946	247	73.89
6	21/03/2018	2978	239	91.97
7	28/03/2018	2470	231	90.65
8	04/04/2018	1356	228	83.19
<b>Promedio</b>		1612.88	263.88	77.85
<b>Desv.Est.</b>		847.44	48.32	
<b>Cv%</b>		52.54	18.31	

## ANEXO 6.7. Coliformes totales (UFC/100 ml)

Tabla 34: Conteo de unidades formadoras de colonias en el efluente y afluente del tanque baffled

N°	Fecha	Afluente del sistema	Efluente	% Remoción
1	25/01/2018	1.1E+11	3.6E+10	65.71
2	15/02/2018	1.3E+10	7.0E+08	94.62
3	28/02/2018	4.2E+12	1.8E+11	95.71
4	22/03/2018	5.3E+12	3.2E+10	99.39
5	29/03/2018	1.1E+13	2.1E+11	97.97
6	24/08/2018	3.0E+09	4.0E+07	98.67
7	28/08/2018	4.1E+10	6.4E+09	84.39
8	03/09/2018	2.0E+08	4.6E+07	77.25
9	15/09/2018	1.3E+07	4.0E+06	68.42
10	17/09/2018	2.7E+07	4.5E+06	83.39
<b>Promedio</b>		2.0E+12	4.7E+10	86.55
<b>Desv.Est.</b>		3.6E+12	8.0E+10	
<b>Cv%</b>		1.8E+02	1.7E+02	

## ANEXO 7. Panel fotográfico

### ANEXO 7.1. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales



Figura 39. Planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas

## ANEXO 7.2. Buzón de derivación



Figura 40. Limpieza del buzón de derivación



Figura 41. Interior del buzón de derivación

## ANEXO 7.3. Caseta de bombeo



Figura 42. Caseta de bombeo



Figura 43. Interior de la caseta de bombeo



Figura 44. Pozo Cisterna de almacenamiento de aguas residuales domésticas



Figura 45. Bombas de captación de aguas residuales domésticas



Figura 46. Limpieza de la bomba de captación



Figura 47. Extracción de material no deseado de las bombas de captación



Figura 48. Tablero de control

#### **ANEXO 7.4. Regla medidora de acumulación de lodos**



Figura 49. Elaboración de la regla medidora de lodos



Figura 50. Regla medidora de lodos

#### **ANEXO 7.5. Tanque baffled**



Figura 51. Vista de perfil del tanque baffled



Figura 52. Cámaras del tanque baffled

**ANEXO 7.6. Toma de muestras y procesamiento de muestras**



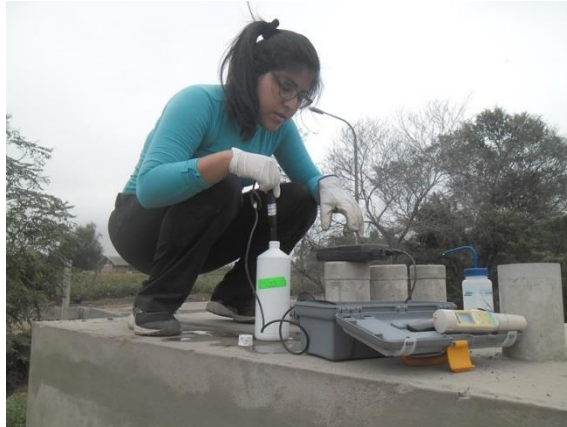


Figura 53. Toma de muestra y medición in situ

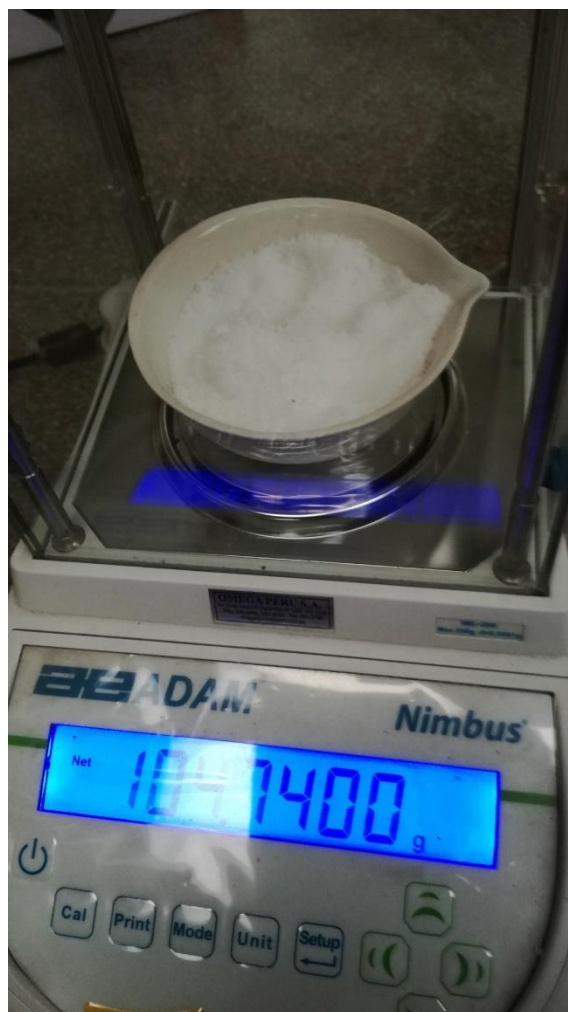


Figura 54. Pesado de NaCl



Figura 55. Dilución de CINa en agua destilada



Figura 56. Medición de solidos sedimentables



Figura 57. Medición de DQO

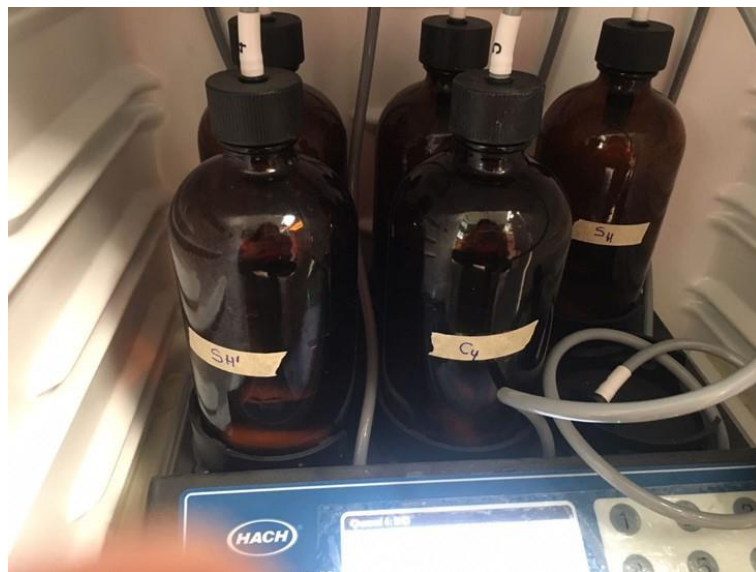


Figura 58. Medición de DBO



Figura 59. Medición de turbiedad



Figura 60. Medición solidos suspendidos

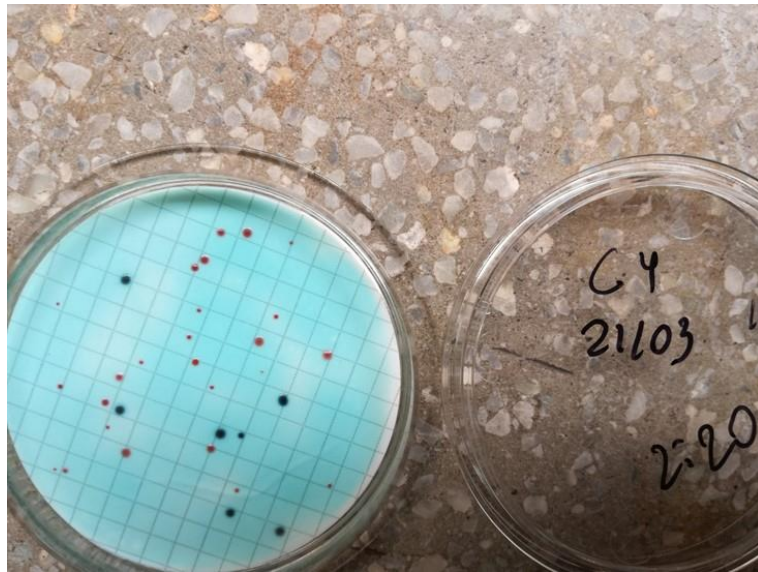


Figura 61. Lectura de coliformes totales



Figura 62. Proceso del tratamiento del agua residual doméstica en cada una de las cámaras del tanque baffled