

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**Evaluación físico-química, biológica e hidrodinámica del funcionamiento de sistemas
de tratamiento prefabricados para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias.**

Sofía de los Ángeles Picado Valverde

CARTAGO
Junio, 2016

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

Evaluación físico-química, biológica e hidrodinámica del funcionamiento de los sistemas de tratamiento prefabricados para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias

Informe presentado a la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

M.Sc. Diana A. Zambrano
Director

MSc. Elías Rosales Escalante
Lector 1

Ing. Macario Pino Gómez
Lector 2

M.Sc. Diana A. Zambrano
Coordinador COTRAFIG

Dra. Floria Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química

M.Sc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mi apoyo y amor
incondicional; mi familia.
A mi mamá Yorleny Valverde, a
mi papá Elías Picado y a mi
hermano Luis Felipe Picado; por
ser mi motor diario de vida.

“El éxito no es la clave de la felicidad. La felicidad es la clave del éxito”.

Albert Schweitze

AGRADECIMIENTOS

Con este documento finalizo una de las etapas más lindas y significativas de mi vida; no sin antes agradecer a Dios y a la Virgen de los Ángeles, en quienes he puesto mi fe y soporte en todo momento.

A mis papás, Yorleny y Elías; junto a mi hermano Luis Felipe, protagonistas de fomentar parte de lo que soy y ser mi apoyo incondicional desde pequeña. Y a toda mi familia en general, que por medio de consejos o palabras me dieron cada vez un impulso más para seguir adelante.

A mis amigos, especialmente a Alessa, con quien compartí la mayor parte de mi etapa universitaria, cómplice y testigo de aventuras, estudiadas, estrés, risas, lloradas y un intercambio.

Un agradecimiento enorme, a una persona que sin conocerme confió en mí desde el inicio, a la que más que la mejor tutora de tesis, se convirtió en guía, psicóloga, motivadora; por su aprecio, su apoyo, su paciencia y sobre todo por ser ejemplo de pasión y amor por lo que hacemos, mil gracias a la Profe Diana.

Al profesor Guillermo por su ayuda y servicio en el Laboratorio a lo largo del desarrollo del proyecto. A Marcos, por su apoyo y a cada una de las personas que de alguna u otra forma me prestaron servicios para llevar a cabo esta investigación.

Indudablemente, una gratificación muy grande a la Carrera de Ingeniería Ambiental, a la Escuela de Química y al Tecnológico de Costa Rica, por ser formadores académicos de grandes profesionales en el país y de donde me siento muy orgullosa de haberme formado.

A los dueños de los sitios de muestreo, de los Apartamentos, Condominios y de la Casa; por permitir el desarrollo de cada fecha de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	13
2	<u>OBJETIVOS</u>	14
3	<u>REVISIÓN DE LITERATURA</u>	15
3.1	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	15
3.2	TANQUE SÉPTICO	17
3.3	FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)	23
3.4	CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS	25
3.4.1	MODELOS HIDRODINÁMICOS	27
4	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	31
4.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO	31
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	32
4.3	EVALUACIÓN HIDRÁULICA	33
4.4	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO	35
4.5	CARACTERIZACIÓN DE LODOS	37
5	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	40
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	40
5.1.1	AGUAS RESIDUALES DE APARTAMENTOS	40
5.1.2	AGUAS RESIDUALES DE CONDOMINIOS	43
5.1.3	AGUAS RESIDUALES DE CASA	47
5.2	EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LOS SISTEMAS DE TANQUES SÉPTICOS	51
5.2.1	SISTEMA DE TRATAMIENTO DE APARTAMENTOS	51
5.2.2	SISTEMA DE TRATAMIENTO DE CONDOMINIOS.	56
5.2.3	IDENTIFICACIÓN DE PORCENTAJES DE RÉGIMENES DE FLUJO	62
5.2.4	SISTEMA DE TRATAMIENTO DE CASA	63
5.3	EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TANQUE SÉPTICO-FILTRO ANAEROBIO	64
5.3.1	DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE APARTAMENTOS	64
5.3.2	DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE CONDOMINIOS.	67
5.3.3	DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE CASA	70
5.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS	73
5.4.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA	73
5.4.2	ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA (AME)	75
5.4.3	TASA DE ACUMULACIÓN DE LODOS	78
6	<u>CONCLUSIONES</u>	82
7	<u>RECOMENDACIONES</u>	84
	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Separación de zonas en un sistema de tanques sépticos.
- Figura 2. Diagrama de flujo y estructura de compartimentalización de tanques, vista en planta.
- Figura 3. Diagrama de Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente prefabricado.
- Figura 4. Diagrama de dos reactores ideales.
- Figura 5. Curva de Método Wolf-Resnick.
- Figura 6. Ejemplo de Curva de tendencia e indicadores de análisis.
- Figura 7. Ubicación de los Sitios de Estudio.
- Figura 8. Curva de correlación Conductividad-Concentración NaCl.
- Figura 9. Puntos de muestreo del tanque séptico de los apartamentos de Escazú.
- Figura 10. Puntos de muestreo del sistema de tratamiento de los Condominios.
- Figura 11. Puntos de muestreo del sistema de tratamiento de la Casa de Escazú.
- Figura 12. Montaje experimental del Ensayo Volumétrico para la medición de Actividad Metanogénica.
- Figura 13. Producción de aguas residuales en Apartamentos.
- Figura 14. Comportamiento de la variación de la temperatura respecto al tiempo en el agua residual de entrada de Apartamentos.
- Figura 15. Comportamiento de DBO_5 y SST de aguas residuales en Apartamentos.
- Figura 16. Producción de aguas residuales en Condominios.
- Figura 17. Comportamiento de la variación de la temperatura respecto al tiempo en el agua residual de entrada de Condominios.
- Figura 18. Comportamiento de DBO_5 y SST de aguas residuales en Condominios.
- Figura 19. Comportamiento de la variación de la temperatura respecto al tiempo en el agua residual de entrada de Casa.
- Figura 20. Comportamiento de DBO_5 y SST de aguas residuales en Casa de Escazú.
- Figura 21. Esquema vista frontal sistema de tratamiento de Apartamentos.
- Figura 22. Curvas de conductividad y caudal versus tiempo para el tanque séptico de Apartamentos.
- Figura 23. Curva F vs tiempo para el sistema de tratamiento de Apartamentos.
- Figura 24. Vista interior de tanque séptico compartimentalizado en tres cámaras.
- Figura 25. Vista sistema de tratamiento Condominios.
- Figura 26. Esquema vista frontal sistema de Condominios.
- Figura 27. Relación de conductividad y caudal versus tiempo transcurrido del Tanque Séptico de Condominios
- Figura 28. Curva F vs tiempo para el sistema de tratamiento de Tanque Séptico de Condominios.
- Figura 29. Curva del modelo de Wolf Resnick para el sistema de tratamiento de Apartamentos.
- Figura 30. Curva del modelo de Wolf Resnick para el tanque séptico de Condominios.
- Figura 31. Esquema vista frontal sistema de casa San Rafael de Escazú.
- Figura 32. Concentración de SST para cada etapa del sistema de tratamiento de Apartamentos
- Figura 33. Concentración de la DBO para cada etapa del sistema de tratamiento de Apartamentos.
- Figura 34. Concentración de SST para cada etapa del sistema de tratamiento de Condominios.
- Figura 35. Concentración de DBO_5 para cada etapa del sistema de tratamiento de Condominios.
- Figura 36. Muestras de cada etapa de tratamiento de Condominios.

- Figura 37. Sólidos Suspendidos Totales para cada etapa del sistema de tratamiento de Casa Escazú.
- Figura 38. DBO₅ para cada etapa del sistema de tratamiento de Casa Escazú.
- Figura 39. Actividad metanogénica en los lodos del tanque séptico de Apartamentos.
- Figura 40. Actividad metanogénica en los lodos del tanque séptico de Condominios.
- Figura 41. Actividad metanogénica en los lodos del tanque séptico de Casa San Antonio de Escazú.
- Figura 42. Perfil de acumulación de lodos del tanque séptico de Apartamentos.
- Figura 43. Perfil de acumulación de lodos del tanque séptico de Condominios.
- Figura 44. Perfil de acumulación de lodos del tanque séptico de Casa San Antonio de Escazú.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Composición típica de aguas residuales domésticas.
- Tabla 2. Tasas Reportadas de Acumulación de Lodos en Tanques Sépticos.
- Tabla 3. Características de lodos provenientes de tanques sépticos.
- Tabla 4. Parámetros principales de la curva de Concentración vs. Tiempo.
- Tabla 5. Métodos de análisis por parámetros evaluados.
- Tabla 6. Métodos de análisis por parámetro evaluados a los lodos de los tanques sépticos.
- Tabla 7. Parámetros de caracterización y estadísticos horarios del agua residual de Apartamentos.
- Tabla 8. Estadísticos diarios, para los parámetros de DBO_5 y SST del agua residual de Apartamentos.
- Tabla 9. Parámetros de caracterización y estadísticos horarios del agua residual de Condominios.
- Tabla 10. Estadísticos diarios, para los parámetros de DBO_5 y SST del agua residual de Condominios.
- Tabla 11. Parámetros de caracterización y estadísticos del agua residual de Casa de Escazú.
- Tabla 12. Resumen de parámetros de caracterización de aguas residuales de los lugares de estudio analizados.
- Tabla 13. Parámetros de estudio de trazadores del tanque séptico de Apartamentos.
- Tabla 14. Interpretación de las relaciones del Método de Curva de Tendencia.
- Tabla 15. Relaciones para análisis de las curvas de tendencia del trazador en Apartamentos.
- Tabla 16. Valores de los principales parámetros del Tanque Séptico de los Condominios.
- Tabla 17. Resultados obtenidos para las relaciones de los principales parámetros en el análisis de la curva de tendencia del Tanque Séptico de Condominios.
- Tabla 18. Estadísticos de pH y temperatura en etapas del sistema de tratamiento de Apartamentos
- Tabla 19. Estadísticos de pH y temperatura en etapas del sistema de tratamiento de Condominios.
- Tabla 20. Estadísticos de pH y temperatura en etapas del sistema de tratamiento de Casa Escazú.
- Tabla 21. Parámetros físico químicos de lodos de tanques sépticos.
- Tabla 22. Cálculo de la producción de actividad metanogénica para los diferentes sistemas de tratamiento.
- Tabla 23. Tasa de Acumulación de lodos (L/hab.día) para los diferentes sistemas de tratamiento.

LISTA DE SIGLAS

AGV: ácidos grasos volátiles.

AME: Actividad Metanogénica Específica.

CH₄: metano.

CO₂: dióxido de carbono.

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Desv. : desviación

DQO: Demanda Química de oxígeno.

FAFA: Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente.

FOCARD: Foro de Centroamérica y República Dominicana.

g: gramos.

h: hora.

hab: habitantes

H₂S: sulfuro de hidrógeno.

kg: kilogramos.

L: litros

m: metro.

mg: miligramos

mL: mililitros

NaOH: hidróxido de sodio.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

Q: caudal.

S: segundos.

SS: Sólidos Suspendidos.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

ST: Sólidos Totales.

SV: Sólidos Volátiles.

t: tiempo.

TAL: Tasa de Acumulación de Lodos.

°C: grados Celsius

RESUMEN

En Costa Rica, el 70,9% de la población utiliza el tanque séptico como sistema para el tratamiento individual a las aguas residuales domésticas; éste porcentaje, representa aproximadamente 800 000 hogares costarricenses. (FOCARD-APS, 2013). Esta cobertura, no es sinónimo de un sistema de tratamiento bien diseñado, operado, y mantenido (FOCARD-APS, 2013b). Actualmente, a pesar de que los tanques sépticos son la tecnología de tratamiento más utilizada, no se cuenta con información detallada acerca de su funcionamiento, su eficiencia, dado que la inversión en la infraestructura y las labores de mantenimiento, como lo es la remoción de lodos sépticos, son ejecutadas directamente por cada familia que usa este sistema, empleando recursos propios y siendo, por lo tanto, un servicio privado (OMS, 2013). En este contexto, nace una iniciativa de evaluar el funcionamiento de algunos sistemas de tratamiento prefabricados y constituidos principalmente por un tanque séptico y un filtro anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La evaluación realizada incluyó una caracterización física, química y biológica de la calidad y cantidad del agua residual producida en tres sistemas de tratamiento distintos, considerando variaciones horarias; una evaluación del comportamiento hidrodinámico, físico, químico y biológico de las tres tipologías y una caracterización de la calidad y la cantidad de lodos acumulados en cada sistema; las unidades en estudio se encuentran instaladas en dos multifamiliares y un unifamiliar. Los resultados indican que los sistemas tratamiento individual como el tanque séptico, son muy sensibles en cuanto a cantidad y calidad del agua residual, presentando variaciones horarias significativas y además afectadas por el tipo de uso de agua que se da en los hogares; lo cual está directamente relacionado a la efectividad del tratamiento.

Palabras Claves: aguas residuales domésticas, sistemas de tratamiento, tanques sépticos, filtro anaerobio, evaluación físico-química, evaluación biológica, evaluación hidrodinámica.

ABSTRACT

In Costa Rica, 70,9% of the population uses septic tank as a system of individual treatment for domestic wastewater; This percentage represents approximately 800 000 Costa Rican households. (FOCARD-APS, 2013). However, it is not exactly known if the design, operation and maintenance of such systems are the most appropriate, since there is not a national entity responsible for these valuations, so the responsibility is direct and unique by users. Under this need at the country, the initiative of the evaluation in the operation of treatment systems prefabricated and mainly consisting of a septic tank and an up flow anaerobic filter for the treatment of domestic sewage born.

The assessment included a physical, chemical and biological characterization of the quality and quantity of wastewater produced in three different treatment systems considering hourly variations; Hydrodynamic evaluation of physical, chemical and biological behavior of the three types of systems and characterization of the quality and the quantity of sludge accumulated in each system. Studies were made in some apartments, condos and a house, all located in Escazú.

From the results, it is concluded that the systems of individual treatment and septic tank are very sensitive in terms of quantity and quality of wastewater, presenting significant time variations and are affected by the type of water consumption given in homes; which are directly related to the operation of the treatment.

Keywords: Domestic wastewater, treatment systems, septic tank, up flow anaerobic filter, physical-chemical-biological and hydrodynamic evaluation.

1 Introducción

Según el Diagnóstico de Excretas y Aguas Residuales en Centroamérica y República Dominicana, realizado por el Foro Centroamericano y República Dominicana de Agua Potable y Saneamiento en el año 2013; la cobertura de saneamiento regional se refleja en un 92,07%, utilizando al menos un sistema básico para el tratamiento de aguas residuales. En Costa Rica, el 74% del tratamiento de aguas residuales es a partir de sistemas individuales; siendo el tanque séptico el sistema de tratamiento individual más comúnmente utilizado, cuyo uso se representa en un 70,9% de la población; lo que equivale aproximadamente a 800 000 hogares costarricenses utilizando este tipo de tecnología como tratamiento a sus aguas. Sin embargo, existen grandes deficiencias y aspectos que no se han evaluado tanto en diseño como en operación, mantenimiento y función de estos sistemas de tratamiento. (FOCARD-APS, 2013).

En la actualidad, la inversión en la infraestructura y las labores de mantenimiento, como lo es la remoción de lodos sépticos, son ejecutadas directamente por cada familia que usa tanque séptico, convirtiéndose en un servicio privado y no regulado por ningún ente estatal. (OMS, 2013). Además, la regulación y gestión legal en el país es desactualizada e insuficiente, lo cual implica un manejo que no es totalmente adecuado, impactando los cuerpos de agua superficial e incrementando el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2013).

Con respecto al método de diseño de estas unidades, Mara y Sinnatamby (1986) de la Universidad de Leeds-Inglaterra y el programa HÁBITAT, Naciones Unidas respectivamente, realizaron investigaciones en países tropicales para conocer el comportamiento de estas unidades de tratamiento y definir los parámetros de diseño; método que fue promovido en Costa Rica por el Ingeniero Elías Rosales (Rosales, 2005). Producto de esta alianza se desarrolló el tanque séptico piramidal y el filtro anaerobio de flujo ascendente.

Esta investigación, tienen por objeto la evaluación de algunas variantes de esas unidades en cuanto a aspectos físicos, químicos, biológicos e hidrodinámicos del funcionamiento aplicado bajo varias tipologías de sistemas tratamiento de aguas residuales domésticas; así como caracterización de la cantidad y la calidad de las aguas residuales de entrada tomando en cuenta una variación horaria; y la acumulación de lodos dentro de los sistemas en los periodos de estudio.

2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el funcionamiento físico-químico, biológico e hidrodinámico con relación a la variación horaria de sistemas de tratamiento prefabricados para las aguas residuales domésticas.

Objetivos específicos.

- Caracterizar las aguas residuales domésticas en función de la variación horaria en términos de la cantidad y las propiedades fisicoquímicas y biológicas.
- Evaluar el comportamiento hidráulico de dos tipologías de sistemas para el tratamiento de aguas residuales domésticas en función de la variación horaria de la producción de aguas residuales
- Evaluar el desempeño de sistemas para el tratamiento de aguas residuales domésticas con tanque séptico y filtro anaerobio.
- Caracterizar los lodos de tratamiento de aguas residuales doméstica en tanques sépticos considerando la tasa de su acumulación y la calidad

3 Revisión de literatura

3.1 Aguas residuales domésticas

El agua residual es toda aquella que proviene del abastecimiento de una población, la cual ha modificado las propiedades físico químicas y biológicas del agua después de su uso, ya sea en actividades domésticas, industriales, agrícolas y/o comunitarias. Debido a su transformación, las aguas residuales, contienen tanto materia orgánica como inorgánica, y es hábitat de cientos de microorganismos que desempeñan un papel importante eliminando los compuestos orgánicos. (Varila & Díaz, 2008).

La calidad del agua residual depende de las actividades realizadas previamente con el recurso hídrico, antes de ingresar al sistema de captación de agua residual y va ligado directamente a la complejidad del tratamiento físico, químico o biológico que ésta deba tener. (Rodríguez & Mañunga, 2012).

Una de las clasificaciones más comunes de las aguas residuales es según su uso, clasificándose como aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas, pluviales, especiales. (Simón, S. 2015)

Las aguas residuales domésticas son el principal aporte de residuos líquidos producidos en una ciudad y se refiere a las aguas que provienen de las viviendas o residencias. Por lo general, el agua residual doméstica se subdivide en dos tipos: las aguas pardas y las aguas grises. Las aguas pardas, son aguas residuales concentradas y derivadas de los inodoros y servicios sanitarios, es decir, son aquellas aguas que transportan excrementos humanos y orina, éstas son ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. (Seoáñez-Calvo, M. 2005).

Por otro lado, las aguas grises, son aguas más diluidas y se originan a partir del resto de actividades realizadas en las casas, son residuos de tinajas, duchas, lavaplatos, lavamanos y lavadoras y representan una fracción del 75% del volumen total de las aguas residuales domésticas. La diferencia entre las aguas grises domésticas y las aguas residuales domésticas, reside en el contenido de materia orgánica y la concentración de materiales que puedan generar un impacto ambiental negativo, como sales, aceites, productos de síntesis química y contaminantes microbianos existentes en jabones y detergentes. (Sarmiento et al., 2014).

La caracterización del agua residual es indispensable en el diseño de un sistema de depuración de contaminantes, por lo que saber la calidad de los parámetros físicos y químicos es uno de los primeros pasos al tratar con aguas residuales. Los orígenes en los cambios de esos parámetros son distintos; por ejemplo, las características físicas se adquieren según el

contenido total de sólidos en sus diferentes variantes de materiales flotantes, sustancias coloidales y productos disueltos. Mientras que las propiedades químicas se generan principalmente por sustancias que según su naturaleza se agrupan en materia orgánica, compuestos inorgánicos y componentes gaseosos. (Simón, S. 2015).

Dentro de las propiedades físicas más importantes está la temperatura; la cual es mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. Otra característica física importante, son los sólidos suspendidos totales, que son todas aquellas partículas flotantes en el agua, también incluye sólidos que pueden percibirse a simple vista. Éstos pueden ser separados del medio líquido a partir de tratamientos físicos sencillos o por medios mecánicos. La naturaleza de los sólidos suspendidos totales es principalmente orgánica. (López et al, 2014).

Las propiedades químicas por otro lado, aportan nutrientes y contaminantes a la calidad del agua residual. La presencia de hidrógeno, la cual es medida a partir del pH, la concentración de éste es un intervalo pequeño y a la vez crítico ya que una concentración idónea en el pH asegura un funcionamiento biológico ideal permitiendo un crecimiento adecuado de microorganismos y facilitando el tratamiento del agua residual; bacterias como las metanogénicas las cuales cumplen un papel fundamental dentro de un reactor anaerobios, tienen un crecimiento óptimo entre 6.6-7.6 unidades de pH. Uno de los indicadores de materia orgánica más importantes es la Demanda Bioquímica de Oxígeno que corresponde a la determinación de la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación de materia orgánica biodegradable. (Pérez, A. 2007).

En la tabla 1, se presentan datos típicos de calidad de agua residual doméstica; que pueden servir como parámetros indicadores de la carga del agua residual de entrada al sistema; el cual tiene gran importancia en el diseño y operación de un tratamiento para medir eficiencias tomando en cuenta tanto el caudal como su calidad. (Hidalgo & Mejía, 2010)

Tabla 1. Composición típica de aguas residuales domésticas.

Componente	Intervalo de Concentraciones	
	Alta	Baja
pH	7.5	6.5
DBO ₅ a 20°C (mg/l)	800	250
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	400	100

Fuente: Torres, P. (2012).

Sin embargo, los parámetros varían según el lugar o la comunidad de la que prevengan, por lo que los valores de un país desarrollado son diferentes a los de uno subdesarrollado por la cantidad y la calidad que se le dé al agua de consumo. Productos de limpieza, higiene y hasta la dieta en las personas modifican la carga de las aguas residuales. Por ejemplo, en Estados Unidos, donde el consumo es entre (350-400) L/persona.día, la DBO₅ oscila entre (200-250) mg/L; mientras que en países tropicales subdesarrollados donde el consumo es la mitad o un cuarto de esa dotación la DBO₅ es de (300-700mg/L). (Mara, 2003).

Según una propuesta metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, se realizaron muestreos en distintas horas del día, obteniendo diferencias evidentes en la generación de aguas residuales para los diferentes lapsos evaluados. Un 85,3% de las aguas residuales producidas se generaban en un periodo de 8 horas, mientras que el 14,7% restante es generado en un tiempo de 10 horas. Con esas variaciones en el tiempo, también determinaron variables del pH y temperatura relacionadas con la actividad microbológica del sistema que sirve como indicador para evaluar el desempeño fermentativo y metanogénico del sistema (Wills et al. 2010). Además, también se ha determinado una correlación entre la cantidad de agua residual que entra al sistema y la carga de residuos, ya que los picos de Sólidos Suspendidos van a incrementar conforme incrementa el caudal en el sistema, es por ello, que el tiempo de retención debe ser el adecuado para que exista una mayor separación de los sólidos y la estabilización de los líquidos. (Leonardo, 2011)

3.2 Tanque séptico

El tanque séptico, es un sistema anaerobio capaz de tratar aguas residuales domésticas, institucionales o en algunos casos industriales; a partir de un proceso físico, químico y biológico. (Rosales, 2005). Los procesos de tratamiento dados en el tanque séptico inician con el tratamiento físico del agua residual, cuyo objetivo es la sedimentación por gravedad generando estratificaciones dentro del tanque, como se observa en la figura 1; donde las partes gruesas se van al fondo y las partículas livianas, espumas, natas y grasas se acumulan en la parte superior o primer zona. En la segunda zona, es el sitio donde se lleva a cabo la mayor parte del proceso de sedimentación y donde se ubican líquidos con materia orgánica disuelta; es decir, las partículas con mayor peso bajan por gravedad, para dar lugar a una tercera zona donde se da la digestión anaeróbica; que corresponde a la parte inferior o zona de almacenamiento de lodos es donde se asienta la materia resultante después de la digestión. Sobre la zona de natas y grasas, existe un espacio libre que permite la ubicación de los gases que se producen por la descomposición de la materia. (Rosales, 2003).

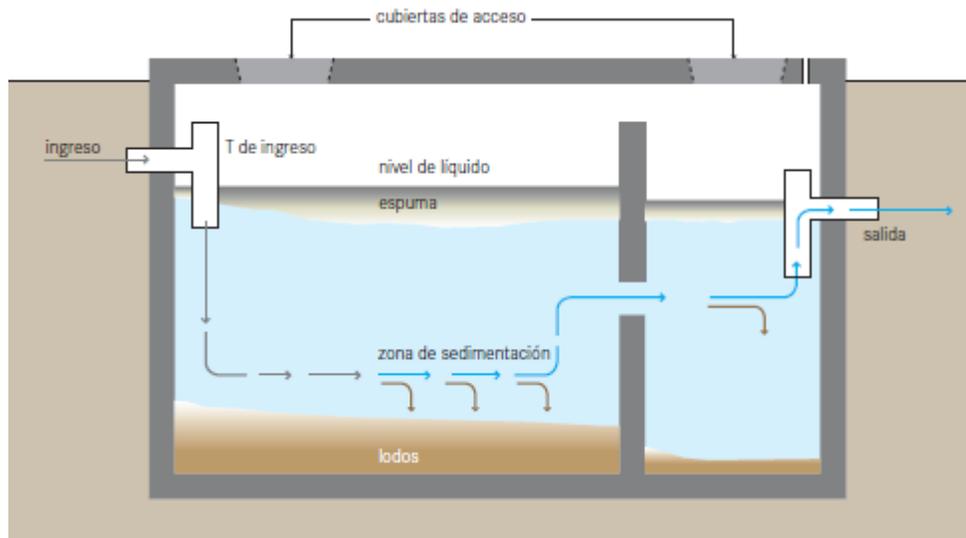


Figura 1. Separación de zonas en un sistema de tanques sépticos.

- a. Zona de espumas o natas. b. Zona de Sedimentación. c. Zona de digestión. d. Zona de almacenamiento de lodos digeridos.

Fuente: EAWAG. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento

Además de la sedimentación, dentro del tanque séptico se llevan a cabo otros procesos químicos y biológicos para la depuración del agua; procesos en los que se disminuye el oxígeno disuelto que contiene el afluente a partir de microorganismos que utilizan ese oxígeno y la materia orgánica del agua residual como nutrientes, lo cual produce una liberación de agua y gases como el metano. Existen diferentes especies microbiológicas que actúan para lograr la degradación de compuestos; por ejemplo, hay presencia de microorganismos que solubilizan los complejos de material orgánico y los transforman en ácidos orgánicos volátiles; estos ácidos luego son fermentados gracias a las bacterias anaeróbicas. (Bedinger et al. (1997)). Los sólidos orgánicos volátiles se forman como grasas y aceites y permanecen en la zona superior del reactor, mientras que el lodo se asienta en el fondo, formando un depósito que comprende entre un 20 a un 50% del volumen total del tanque séptico. (PROSAB, 2009).

Cuando las condiciones de funcionamiento de un tanque séptico son las óptimas, a partir de los procesos físico-químicos y biológicos propios del sistema anaerobio, se puede obtener una remoción del oxígeno disuelto entre un 60 y 70%. (Bitton, 2011).

Igualmente, el porcentaje de remoción en sólidos suspendidos podría estar aproximadamente en un rango entre 60 y 70%. (PROSAB, 2009). La eficiencia además para ambos parámetros como fue estudiado en los años 80 por Mara & Sinnatamby, se encuentra beneficiado en países tropicales como Costa Rica, donde por la estabilidad climática, el tanque séptico supone tener un comportamiento y funcionamiento regular a lo largo del año. Al tener

temperaturas similares a lo largo del año que rondan entre los 20 y 30°C aproximadamente se da una mejor remoción; ya que se encontró relación entre la eficiencia y la temperatura estimando que en sitios con temperaturas por debajo de los 10°C la remoción de sistemas anaerobios como los tanques sépticos era muy baja; ascendiendo a un porcentaje entre 40 y hasta un 60% en temperaturas que rondan los 20°C y presentando una mejor eficiencia para aguas mayores a los 25°C donde pueden obtenerse porcentajes de remoción de DBO₅ hasta de 80%. (Mara & Sinnatambu, 1986).

Los porcentajes promedios presentados anteriormente, son resultados sugeridos por algunos autores; sin embargo, es difícil de determinar exactamente la calidad del efluente de los tanques sépticos domésticos ya que existen problemas en la obtención de análisis estadísticos significativos en los parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno o Sólidos Suspendidos Totales, esto puesto que es un sistema pequeño con un flujo de entrada muy bajo que a la vez sufre grandes variaciones diurnas tanto en calidad como en cantidad aumentando o disminuyendo drásticamente las concentraciones físicas, además que pequeñas fluctuaciones en la temperatura diaria pueden afectar la digestión anaerobia dependiendo de la sección del sistema de digestión. (Méndez et al. ,2007).

La estructura del tanque séptico es el aspecto fundamental para un adecuado funcionamiento en la depuración de las aguas residuales. Desde la entrada hasta la salida, existen detalles que marcan la diferencia en la eficiencia del sistema.

Configuración entrada-salida: La configuración de la entrada y salida de un reactor, puede llegar a tener un impacto importante en el funcionamiento, alterando el tiempo de retención, la mezcla y la calidad del agua. (Crittenden et al. 2012). Los accesorios de entrada y salida deben ser en forma de T y tienen una posición específica, donde la tubería de entrada, dirige el afluente a la parte media del volumen del líquido; permitiendo así, una retención adecuada de modo que se desarrolle la acumulación de materiales flotantes y una debida sedimentación; además, evita la mezcla de las aguas por alteraciones en el flujo de entrada. El dispositivo de salida, en forma en T mantiene la calidad del efluente de forma que al salir no exista ninguna degradación con los sólidos, grasas o aceites. (CEPIS, 2005).

Dimensionamiento: Otra característica que interfiere en el tratamiento, es la forma y la relación de dimensiones del tanque séptico. Los tanques circulares propician movimientos de flujo tangencial; mientras que los rectangulares provocan movimientos laterales. (Department of Environment and Conservation, 2011). El largo es determinante para la calidad de la sedimentación y la interacción microbiológica de la materia del afluente. Una relación adecuada entre ancho y largo es 1:3 y una profundidad mínima de 1 metro. (Rosales, 2005). Las características anteriormente mencionadas, son parte importante de los aspectos hidrodinámicos de un tanque séptico, ya que son quienes definen el comportamiento del agua

en su recorrido por el sistema. Hidráulicamente, en un tanque séptico se puede evaluar el tiempo de retención, el tipo de flujo predominante; ya sea pistón, completamente mezclado o no ideal, la presencia de zonas muertas, de cortos circuitos y/o recirculaciones. (Wills et al., 2010).

Para mejorar las condiciones hidráulicas y físicas de un tanque, se han implementado técnicas de segmentación de áreas para producir un movimiento de flujo más uniforme. De esta manera, se divide el tanque en diferentes compartimentos; con el fin de mejorar la capacidad de retención de sólidos del sistema; ya que se obliga al agua seguir un flujo sinusoidal entre las divisiones paralelas en las que se divide el área; tal y como se muestra en la figura 2. (Afonso, 2011).

De esta forma, el tanque se convierte en un reactor constituido por una sola unidad dividida verticalmente en varios compartimentos por medio de paredes que interconectan secuencialmente las cámaras, produciendo un trabajo en serie. (PROSAB, 2005).

Teóricamente, se ha establecido que se puede utilizar la compartimentalización para tanques con volúmenes mayores a los 5m^3 y con un máximo de cuatro divisiones cada una de ellas con un largo mínimo de 0,60m. En el primer compartimento se llevaría a cabo el mayor porcentaje de sedimentación y digestión representando un 50 o un 60% de volumen de partículas sedimentada, dando lugar a la digestión más favorecida. (CEPIS, 2003).

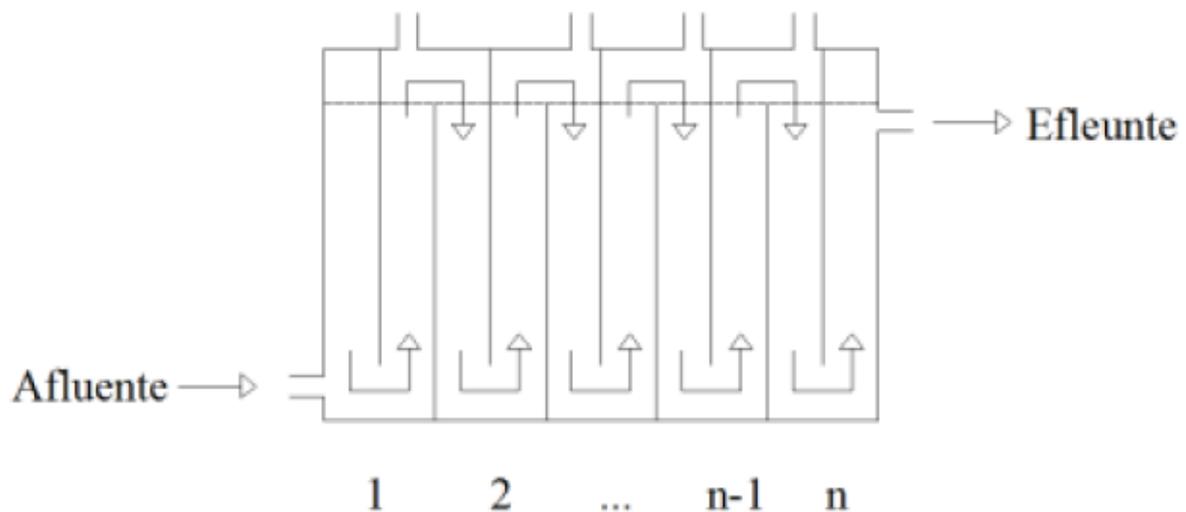


Figura 2. Diagrama de flujo y estructura de compartimentalización de tanques, vista en planta.

Fuente: (Afonso, 2011)

De las mayores ventajas que se presenta al tener un tanque dividido en compartimentos, es una mejor distribución y realización de los procesos de acidogénesis y metanogénesis segmentada en cada área; además que, se disminuye en gran parte los choques hidráulicos que afectan hidráulicamente los tanques no divididos. (Barber & Stuckey, 1999). Otros estudios brasileños, también han concluido que es recomendable utilizar la segmentación de tanques sépticos, cuando se desea un efluente con bajo contenido de sólidos en suspensión, ya que por el trayecto del flujo la eficiencia en la remoción de sólidos aumenta, teniendo la misma construcción del tanque y con el mismo espacio; es decir sigue siendo una tecnología simple, de bajo costo y es compacta. (PROSAB, 2005).

Como producto de cada uno de los procesos realizados por un reactor anaerobio, dentro del tanque séptico se da un almacenamiento de lodos en la parte inferior de la estructura; por la descomposición anaerobia y facultativa, el cual es hábitat para una gran cantidad de bacterias y microorganismos; las cuales tienen importancia ambiental por el efecto que podrían causar tanto dentro como fuera del tanque séptico. (Mara & Sinnatambu, 1986). La acumulación de la materia orgánica, es proveniente principalmente de las sustancias disueltas con las aguas grises; además de los filamentos de los compuestos del papel higiénico; los cuales aunque se degradan biológicamente, tienen una velocidad de descomposición más lenta que la velocidad de sedimentación, dirigiéndose al fondo del tanque y acumulándose como lodo. Dentro de los productos de la descomposición de esa materia se encuentran en su mayoría gases estables como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y sulfuro de hidrogeno (H_2S). (Méndez et al., 2007).

Para una cuantificación adecuada de éstos, el volumen final de los lodos se puede determinar a partir de la naturaleza de las aguas residuales, la temperatura y el tiempo de acumulación. (PROSAB, 2005). En la literatura existen ya rangos obtenidos de diferentes tasas de acumulación de lodos digeridos; como se muestra en la tabla 2, sin embargo, para éstos no se tiene claramente el método por el que fueron obtenidos esos valores; teniendo una incertidumbre grande entre los rangos. Frecuentemente en los países tropicales, se usa un valor de tasa de acumulación de 40 L/persona*año de lodo digerido. (Mara & Sinnatambu, 1986). Éste valor es también el parámetro utilizado en Costa Rica, según Rosales 2003.

Tabla 2. Tasas Reportadas de Acumulación de Lodos Digeridos en Tanques Sépticos.

Referencia	Tasa de Lodo Acumulado (litro/caput/año)	Periodo de acumulación (años)
Weibel et al (1949)	93	1
	60	2
	43	4
	39	6
	38	8
	38	10
Hill and Ackers (1953)	96	1
Vincent et al (1961)	28-40*	-
Brandesw(1978b)	80	2
Egbuniwe (1980)	30-60	-
Rosales (2003)	40	1

* Sólo agua residuales del sanitario

El lodo proveniente de los tanques sépticos se caracteriza por tener cantidades significativas de arena, aceite y grasa, sólidos y materia orgánica. Las propiedades químicas y físicas que definen un lodo, están conformadas por altas tasas de materia orgánica, nutrientes y metales. (Crites, 2000). A pesar de que está compuesto aproximadamente por 97% de agua, las altas concentraciones de materia orgánica lo hacen alcanzar valores de DQO de 3000 mg/l o más; y porcentajes de sólidos en porcentajes entre 6-7% del total del reactor. (Méndez et al. 2007). Estudios de varios autores, han caracterizado los lodos por parámetros físico-químicos obteniendo rangos diferentes entre sí, tal y como se muestra en la tabla 3. (PROSAB, 2005)

Tabla 3. Características de lodos provenientes de tanques sépticos.

Referencia	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SST (mg/L)	SS (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Fósforo (mg/L)
Kolega et al. (1977)	22400	-	2350	1819	4794	26162	-	72	-
Segail et al. (1979)	11600	9170	9500	7650	5990	19500	410	100	190
USEPA (1994)	34106	23100	12862	9027	6480	31900	588	97	210
Strauss (1995, USA)	40000	25000	15000	-	7000	15000	700	150	250
Koottatep et al. (2007)	2200-67200	900-52500	1000-44000	-	600-5500	1200-76000	1000	350	-
Alt (2003)	15647	11476	12998	-	5550	16003	1002	396	863
Metcalf & Eddy (1995)	5000-100000	-	1240-17350	1030-8160	1020-4800	2400-16000	55-180	39-149	6-67

La calidad del efluente al sistema, puede verse alterada por la presencia del lodo el cual es un ecosistema lleno en nutrientes para los microorganismos encargados de depurar la carga orgánica del agua residual; sin embargo, una operación y mantenimiento adecuado es imprescindible en el funcionamiento del tanque séptico. Por dicha razón, se recomienda como tiempo máximo, una extracción de lodos entre 3 y 4 años para que la acumulación no afecte el funcionamiento respecto al dimensionamiento del reactor, puesto que después de ese lapso el lodo se convierte en materia muerta que afectaría las bacterias. Pero tampoco es recomendable, el drenaje de los lodos muy seguido ya que se requiere de cierto tiempo el crecimiento microbiano presente en este para la remoción de contaminantes. Un tiempo óptimo es entre 12 y 18 meses según la calidad y cantidad de agua residual que recibe el sistema. Cuando se tratan tanques compartimentalizados, se recomienda dejar 1/16 del lodo en el primer compartimento para mantener el cultivo bacteriano, mientras que el lodo de los siguientes compartimentos puede ser extraído totalmente. (Chi, 2005).

3.3 Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

Se han realizado diferentes investigaciones para evaluar formas de complementar el tratamiento de aguas residuales de tanques sépticos con otras herramientas que permitan una mejor calidad en el efluente de agua. Una alternativa que se ha utilizado es la implementación de filtros anaerobios de flujo ascendente posterior a la salida del tanque séptico; como un postratamiento con facilidad operacional y bajo costo de implementación. (Busato, R. & Plowsky, U., 2005).

Un filtro anaerobio es un sistema de tratamiento eficaz utilizado para aguas residuales solubles, el cual está constituido por un tanque que contiene material de relleno de materia inerte que forma un lecho fijo; por lo general, piedras en diferentes granulometrías que dan soporte a ese lecho. En ese relleno, se lleva a cabo una fijación y es un desarrollo de hábitat para los microorganismos, los cuales conforman biopelículas, columnas de relleno o las bacterias son atrapadas en los intersticios del relleno agrupándose entre ellas; lo cual hace que no se requiera ningún tipo de recirculado por la adhesión de la biomasa al relleno del filtro. Los compuestos orgánicos solubles que no fueron removidos en la etapa de tratamiento anterior, son digeridos y convertidos en productos finales; en su mayoría gaseosos, como el metano o el dióxido de carbono. (Quiterio. T., 2014).

En la figura 3, se presenta un diagrama de la composición y estructura de un filtro anaerobio de flujo ascendente prefabricado; presentando características como la altura del material filtrante, entrada y salida del filtro y las cámaras de registro.

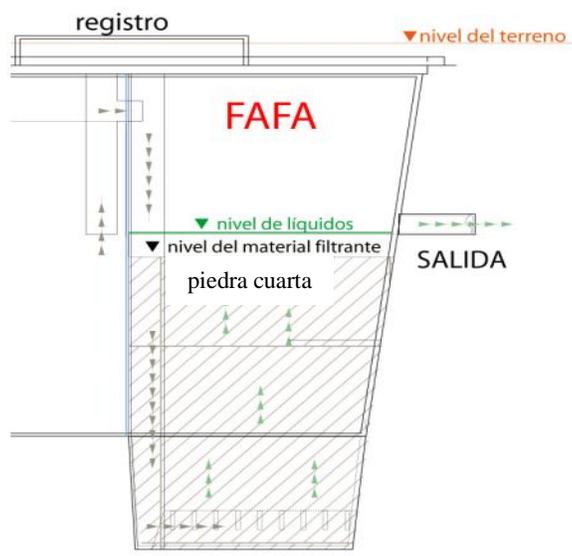


Figura 3. Diagrama de Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente prefabricado.

Fuente: Catálogo empresarial.

Entre las ventajas de los filtros anaerobios de flujo ascendente, es que son reactores con aportes muy bajos de lodo y consisten en tratamientos cuyo funcionamiento no consume electricidad para ser ejecutado. Este tipo de filtro, tiene la capacidad de resistir a variaciones de caudal del afluente sin que exista una pérdida de los sólidos que componen la materia biológica y orgánica que se adhiere a las biopelículas. (Andrade et al., 2001)

Varios estudios se han realizado en la evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente que complementan sistemas de tratamiento de reactores anaerobios como el tanque séptico. Ejemplo de ello, fue la que se llevó a cabo en Brasil por Busato y Palowsky, (2005); donde evaluaban comportamientos y eficiencias sistemas integrados en términos de materia orgánica y velocidades de remoción. Ellos obtuvieron que en cuanto a pH y temperatura, los resultados son constantes; mientras que para la DBO_5 , se obtuvo una eficiencia de remoción del 78% aproximadamente de todo el sistema compuesto, teniendo el mayor porcentaje de remoción en el reactor anaerobio (69%), complementado el resto con el filtro anaerobio. En el caso de SST, se obtuvo como eficiencia general un 73%, alcanzando una eficiencia de aproximadamente 56% hasta el sistema similar al tanque séptico. (Busato, R. & Plowsky, U., 2005).

3.4 Características hidrodinámicas

El tiempo de retención es la duración que tarda una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir del reactor; éste se calcula dividiendo el volumen del tanque entre el caudal de ingreso al mismo. (Gómez, A.L, 2014). Éste, debe ser el apto para cada tanque séptico tomando en cuenta su estructura, diseño, caudal de entrada; para que se lleve a cabo el contacto entre los contaminantes y se pueda dar la eliminación promedio de materia orgánica, dando buenos resultados en términos de DQO, DBO₅, SST y coliformes fecales. (Nasr & Mikhaeil, 2014).

Si el tiempo de retención hidráulico es muy corto, los microorganismos no pueden cumplir su función de degradación correcta de las partículas, ni se logra una adecuada sedimentación; mientras que, si el tiempo por el contrario es demasiado largo, se da una inundación de superficie o se suspenden las partículas ya sedimentadas, teniendo contaminaciones cruzadas. (Kennedy & Van Geel, 2000). En el funcionamiento real de los reactores, es muy difícil encontrar un cumplimiento ideal del tiempo de retención, debido a las condiciones hidráulicas de un fluido; como las zonas muertas o los cortos circuitos, que imposibilitan un flujo estable. (Crittenden et al., 2012).

Las zonas muertas, son espacios dentro del tanque donde no se mezcló bien el agua con el resto del afluente, interfiriendo en el funcionamiento del tanque; generando una zona aislada que no permite que un volumen específico de agua salga del tanque hasta que se interrumpan las condiciones hidrodinámicas normales de funcionamiento. (Pérez, 1992). Las principales causas asociadas se enfocan en la configuración del reactor, donde por elevaciones o variaciones de nivel mínimas en el tanque (Araya, 2012), o la forma del tanque también pueden ocasionar zonas muertas al ocasionar movimientos tangenciales en el caso de tanques circulares o movimientos laterales en tanques rectangulares. El tiempo de retención que acumula una zona muerta es infinito. (Gómez, A.L, 2014).

Los cortos circuitos; por otra parte, son los segmentos de corriente del flujo de agua que atraviesan de una manera anormal el tanque disminuyendo considerablemente el tiempo de residencia hidráulica. Es uno de los problemas que más afectan el funcionamiento de los tanques en general y es producto de un diseño de capacidad insuficiente que no propicia la mezcla, puede afectar la configuración entrada-salida y principalmente, la relación de dimensiones del tanque. (Crittenden et al., 2005).

El modelo de flujo, es un prototipo del comportamiento que tendrá el afluente durante su recorrido por el tanque séptico. Según (Crittenden et al., 2005) los tipos de flujo que se pueden encontrar dentro de un tanque son:

Flujo de Mezcla Completa: sucede cuando el flujo es continuo pero al ingresar al tanque, éste se dispersa inmediatamente dentro de él. La concentración de una sustancia a la salida es

igual a la existente a lo largo del sistema de tratamiento. Como el flujo de agua que entra al reactor, supone ser el mismo que sale; los tiempos de retención suelen ser más cortos.

Flujo Pistón: consiste en un flujo continuo con concentración uniforme donde todos los elementos del fluido permanecen dentro del reactor en un tiempo igual, como si fueran un bloque donde atraviesan el trayecto dentro del reactor con concentraciones uniformes en el tiempo.

Flujo no ideal: es cuando se presenta un flujo continuo pero éste no tiene características bien definidas de ninguno de los flujos anteriormente mencionados; esto producto de la presencia en el tanque de cortos circuitos, zonas muertas o recirculaciones.

En la figura 4, se pueden observar diagramas de reactores con diferentes tipos de flujo, en el caso de la figura 4.a se muestra un flujo de mezcla completa y en la 4.b, corresponde a flujo pistón.

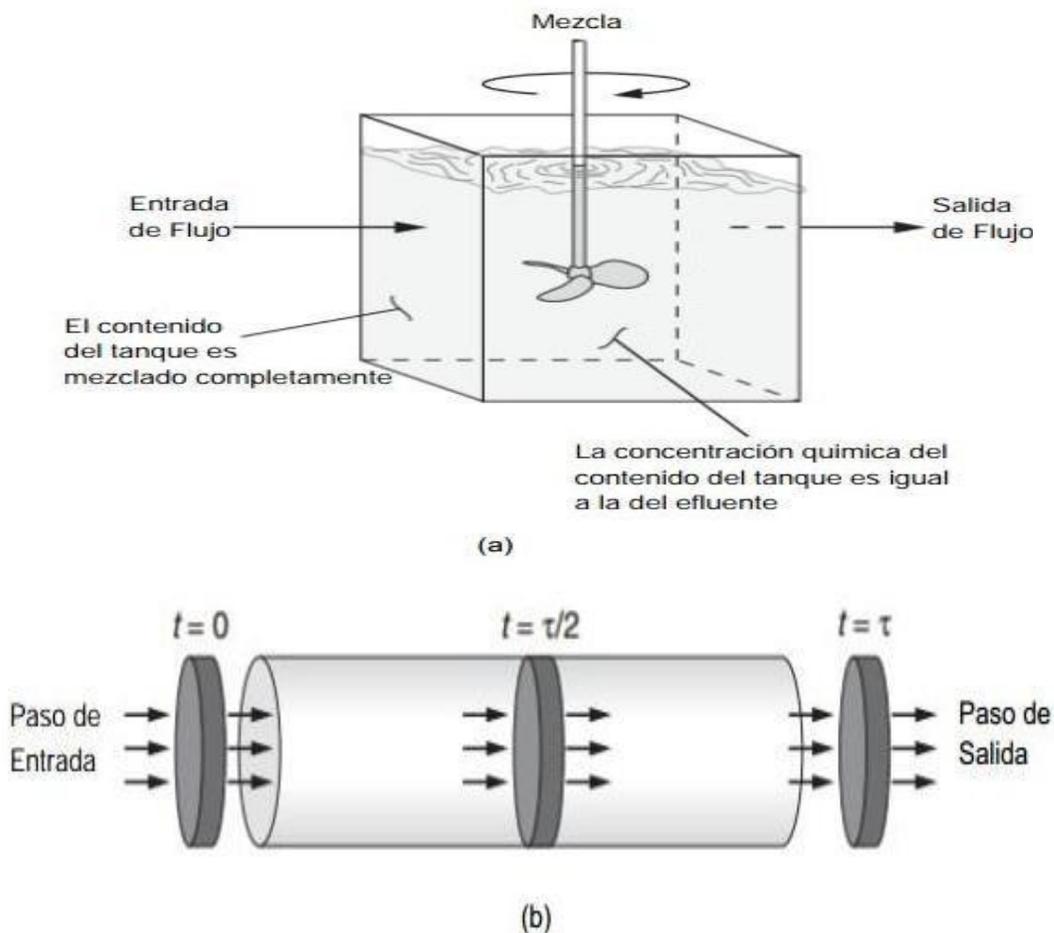


Figura 4. Diagrama de dos reactores ideales.
(a) Reactor de Flujo de Mezcla Completa y (b) Reactor de Flujo Pistón.

Fuente: Crittenden et al., (2012)

Modelos hidrodinámicos

La evaluación hidráulica de un sistema, es posible de realizar a partir de métodos tecnológicos a partir de la modelación de reactores con modelos computacionales, requiriendo equipos complejos y materiales costosos, obteniendo los mismos resultados que al utilizar modelos más simplificados para obtener resultados analíticos de los reactores. (Gómez, 2011). Los métodos de Curva de Tendencia el análisis simplificado de Wolf-Resnick y el Número de Peclet, permiten estudiar los reactores de manera analítica obteniendo comportamientos igual de válidos que los modelos computacionales. (Crittenden et al., 2012).

3.4.1.1 Análisis simplificado de Wolf Resnick

A partir de éste método es posible encontrar los porcentajes de los comportamientos del trazador dentro del reactor, obteniendo las relaciones entre mezcla completa (M), flujo pistón (P) y zonas muertas (m); las cuales se determinan a partir de una gráfica entre la concentración acumulada ($1-F(t)$) contra el tiempo normalizado (t/t_0). (Sánchez et al., 2009).

A partir de la curva resultante en la gráfica, se traza una recta tangente la cual desborda unos valores el cual al relacionarse por medio de ecuaciones que determinan los porcentajes de presencia de cada flujo.

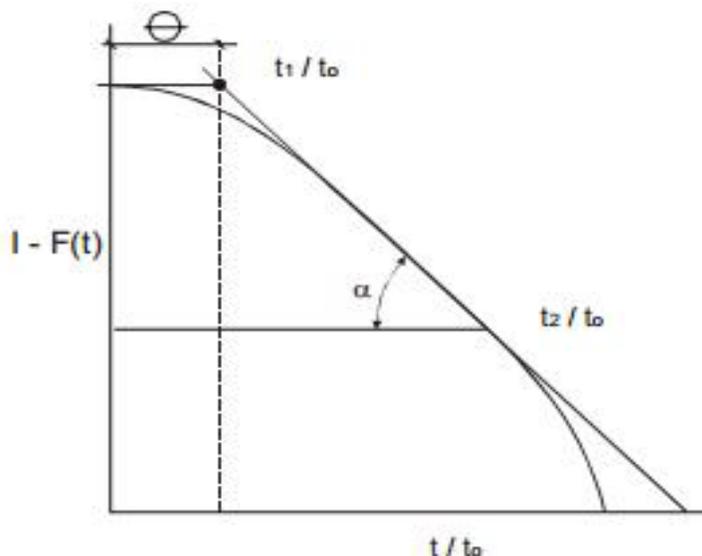


Figura 5. Curva de Método Wolf-Resnick.

Fuente: (Gómez, 2014)

La gráfica de la figura 5, representa la curva esperada en el método de análisis simplificado de Wolf-Resnick, donde además se puede notar la recta tangente a ésta tomada en dos tiempos normalizados diferentes denotados como t_1/t_0 y t_2/t_0 , la cual corresponde a la línea de mayor ajuste a la curva. (Gómez, 2014).

3.4.1.2 Curva de Tendencia

El objetivo de este método, es determinar las tendencias del tipo de flujo que presenta el reactor, así como los tiempos de retención media. El análisis consiste en graficar la concentración del trazador contra el tiempo de retención práctico obtenido dentro del reactor, donde además se determinan ciertos indicadores que permiten el análisis del comportamiento hidrodinámico del reactor. (Gómez, 2014). En la figura 6, se presenta el análisis de un ejemplo de curva de tendencia con el análisis de algunos de los indicadores que se pueden valorar con este método.

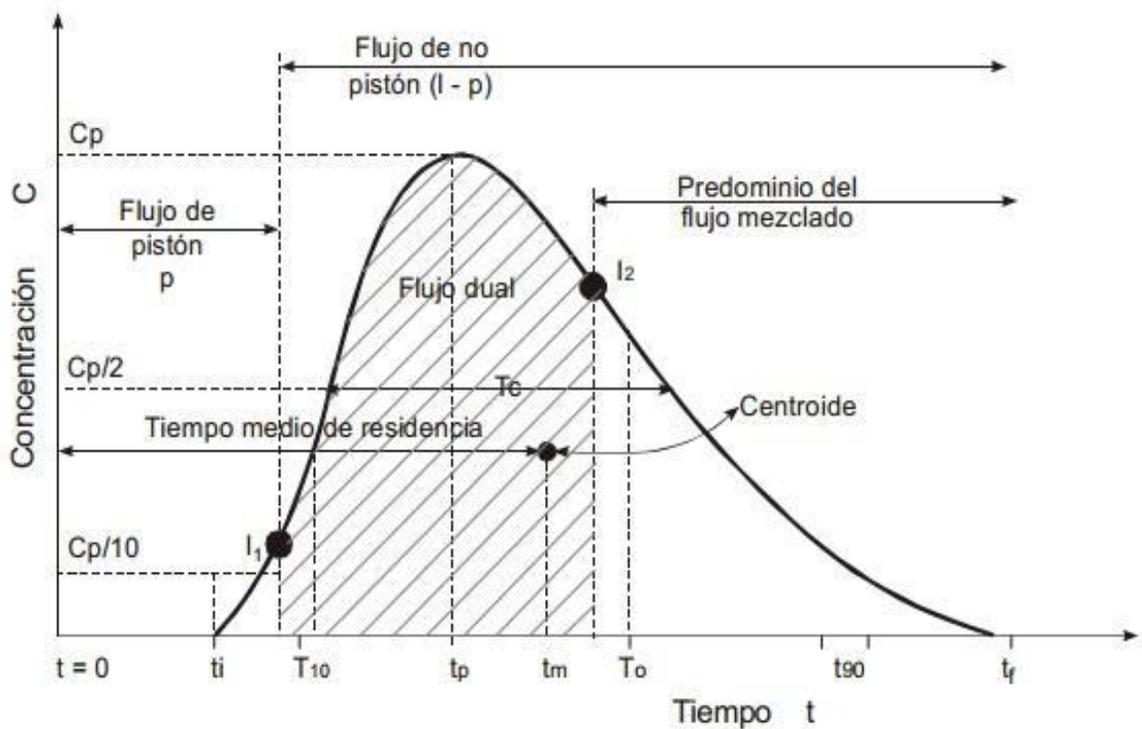


Figura 6. Ejemplo de Curva de tendencia e indicadores de análisis.

Fuente: Gómez, 2014.

Tabla 4. Parámetros principales de la curva de Concentración vs. Tiempo.

Parámetro	Descripción
t_i	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador y aparece un cambio de conductividad o concentración en el efluente.
t_{10}	Tiempo en el que pasa 10% del total del trazador.
t_m	Tiempo mediano, 50% del trazador.
t_0	Tiempo teórico de retención.
t_{90}	Tiempo en que pasa 90% del trazador
t_r	Tiempo hasta que pasa el 100% del trazador
t_c	Tiempo para el que la concentración es mayor a $C_p/2$
c_0	Concentración Inicial
c_p	Concentración Máxima

A partir de los parámetros de la Tabla 4, es posible obtener algunas relaciones que permiten establecer aspectos hidrodinámicos como la presencia de cortos circuitos, zonas muertas, el tipo de proceso y movimiento del flujo si predomina la difusión o la advección, además que permite obtener la tendencia del tipo de reactor presente. (Pérez, 1992).

Si se desea analizar, la presencia de cortos circuitos grandes, se puede determinar la relación de t/t_0 ; para el cual si se obtiene un valor mayor a 0.3 indica que hay presencia de cortos circuitos; además, se pueden evaluar las tendencias del tipo de flujo, donde si el resultado es cercano a 1 corresponde a flujo pistón y 0 a mezcla completa. Esta teoría de la presencia de cortos circuitos, también se puede fundamentar con la relación t_m/t_0 ya que si ésta es menor que 1 se indica que existen cortos circuitos hidráulicos dentro del reactor, pero si es mayor a 1 la explicación es más difícil de determinar ya que existen dos posibles causantes; el primero, errores en la medición o bien que existan zonas muertas dentro del reactor lo que hace que el fluido quede estancado en ciertos espacios saliendo lentamente e incrementando los tiempos de retención. (Sánchez&Cardona, 2009).

Para indicar la relación entre el flujo pistón y el flujo completamente mezclado se determina entre el tiempo de concentración o conductividad pico y el tiempo teórico (t_p/t_0), si de la relación se obtiene un valor cercano a la unidad prevalece únicamente el flujo pistón, si por el contrario es cercano a 0 predomina el flujo de mezcla completa. El parámetro relacionado con el fenómeno de difusión es la relación, t_c/t_0 , si el valor es cercano a 0.7, el flujo corresponde a completamente mezclado. (Sánchez & Cardona, 2009).

3.4.1.3 Número de Peclet.

El número de Peclet es la relación entre los tipos de transporte; advección y dispersión. El método consta de la aplicación de una ecuación donde se relaciona el tiempo normalizado (θ) y la normalización de la edad del agua (E). Cuando se obtiene un número alto significa que el transporte del flujo dentro del reactor es un movimiento en paralelo entre la dispersión y advección; cuando el número de Peclet tiende al infinito el reactor está ligado principalmente al flujo pistón y cuando el número de Peclet se aproxima a cero, se dice que solamente existe dispersión axial, es decir el flujo tiene más características de mezcla completa. (Crittenden et al., 2012).

4 Materiales y métodos

4.1 Descripción de las áreas de estudio

El estudio se realizó en tres lugares. Dos en multifamiliares, uno denominado en la investigación como “Apartamentos” y otro en Escazú centro llamado “Condominios”. El tercero es una casa de habitación unifamiliar ubicada igualmente en San Antonio de Escazú, la cual se denominó “Casa”. La ubicación de los sitios de estudio se presenta en la Figura 7.

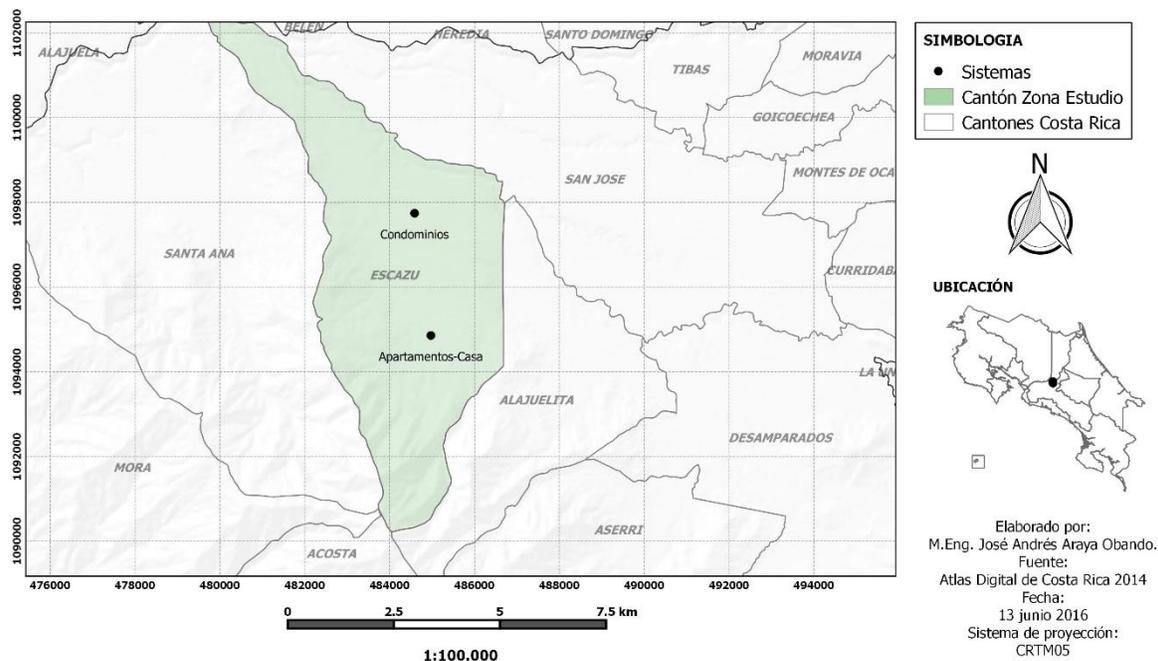


Figura 7. Ubicación de los sitios de estudio: Apartamentos, Condominios y Casa

Apartamentos

Está compuesto por 4 unidades de vivienda, de nivel socioeconómico medio-alto, donde residen 10 personas en total. Durante el día, son pocas las personas con permanencia en las residencias, ya que salen a sus actividades cotidianas; saliendo generalmente antes de las 9 de la mañana y regresando después de las 4 de la tarde. Las aguas residuales, están compuestas por la mezcla de aguas pardas y aguas grises. Las instalaciones hidrosanitarias de cada apartamento constan de 2 servicios sanitarios, 1 ducha, 2 lavatorios, un lavaplatos y la lavandería.

Condominios

Conformado por 9 unidades de vivienda, de nivel socioeconómico alto y una casetilla de seguridad. En cada apartamento vive entre 1 o 2 personas, teniendo actualmente un total de 14 residentes. La mayoría de personas, pasan fuera del condominio durante el día; por lo que aproximadamente sólo 6 o 7 personas son las que permanecen en el edificio. Las aguas residuales, están compuestas por la mezcla de aguas pardas y aguas grises. Los aparatos hidrosanitarios por cada apartamento son, 2 servicios sanitarios, 2 lavatorios, 1 ducha, un lavaplatos, y una lavandería.

Casa

En la casa de habitación residen 6 personas; en la mañana, antes de las 7:00 a.m. la familia realiza las actividades rutinarias de aseo personal antes de salir a las ocupaciones cotidianas, después sólo se encuentra 1 persona dentro del hogar realizando las labores domésticas, durante la tarde se incorporan 3 personas más. Es decir, la casa está con su ocupación completa antes de las 7 de la mañana y después de las 5 de la tarde. Las aguas residuales generadas en el hogar, son separadas respectivamente en sus tuberías, por lo que se analizarán únicamente las aguas pardas.

4.2 Caracterización de las aguas residuales

El levantamiento de los usos del agua y las características de las áreas de estudio, se realizó a partir de entrevistas a los encargados de cada uno de los lugares de estudio, para tener una información base de la dinámica de producción de éstas.

Para la cuantificación de las de aguas residuales, en los dos multifamiliares, se realizaron aforos de caudal tipo volumétrico a lo largo de un día en lapsos de 15 a 30 minutos durante un periodo entre 5:30 de la mañana y 11:30 de la noche el Miércoles 25 de Noviembre del 2015 en Apartamentos y entre 7:00 de la mañana y 8:00 de la noche del Jueves 10 de Diciembre del 2015 en condominios. En el sistema unifamiliar, no se levantan caudales ya que estos están asociados con las descargas de los inodoros.

La caracterización en términos de calidad se realizó a partir de muestreos puntuales cada dos horas, entre el periodo de las 8:00 a.m. a 2:00 p.m. con una frecuencia mensual, durante 4 meses entre finales de julio e inicios de noviembre, los cuales se realizaban en la cámara de entrada de los respectivos sistemas de tratamiento. In situ se tomaron los parámetros de pH y temperatura para los últimos tres muestreos, y ex situ, se analizaron en el Laboratorio de Aguas del Centro de Investigación de Protección Ambiental (CIPA) del Tecnológico de Costa Rica, los sólidos suspendidos totales (SST) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). La Tabla 5, presenta los métodos y/o equipos que fueron utilizados para cada parámetro. Los datos se tabularon y se calcularon parámetros estadísticos, además de la presentación gráfica de la tendencia.

Tabla 5. Métodos de análisis por parámetros evaluados.

N°	Parámetro	Método	Referencia	Incertidumbre del Equipo
1	pH	4500-H+. pH value.	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2003.	(±0,01)
2	Temperatura	2550B. Temperature		(±0,1) °C
3	DBO ₅	5210B. 5-Day DBO Test.		(± 0,01) mgO ₂ /L
4	SST	2540D. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.		(±0,0001)g
5	Caudal	Método volumétrico.	Pabón &Suárez. 2009	(±1) mL

4.3 Evaluación hidráulica

Se levantó la información de los sistemas de tratamiento de aguas residuales instalados en cada uno de los sitios en estudio. Se analizaron los planos de cada uno de los sistemas para evaluar la estructura en términos de volúmenes de cada sección y la ubicación de entradas y salidas.

La evaluación hidráulica se realiza mediante el método experimental estímulo-respuesta, que consiste en estimular el sistema mediante una perturbación y observar su respuesta. El estímulo se logra inyectando un trazador a la entrada del sistema, y la respuesta se obtiene mediante la determinación del trazador a la salida del reactor (Wills et al., 2010). Por medio de la observación de cambios en la conductividad en el punto de salida, es posible determinar el tiempo de recorrido de la sustancia dentro del tanque séptico, lo cual sería proporcional al tiempo de retención hidráulica y con lo que posteriormente se puede determinar el tipo de flujo predominante, la presencia de zonas muertas, cortos circuitos y de recirculaciones (Wills, Vélez, Arboleda, & Garcés, (2010)).

El trazador utilizado fue cloruro de sodio al ser una sustancia que no interfiere en las propiedades con el agua; además de tener bajo costo y de fácil obtención. Es uno de los trazadores más usados porque su determinación en la salida es rápida y de fácil medición a partir de un parámetro indirecto, la conductividad. (Gómez, 2011).

Se verificó la correlación de la conductividad con la concentración de cloruro de sodio en aguas residuales de tal forma que otros iones disueltos en ella, no presentaran interferencias. La curva de correlación obtenidas para agua desionizada y para aguas residuales se presenta en la Figura 8, donde se presentan las ecuaciones para cada tipo de agua siendo y la conductividad y x la concentración de sustancia trazadora, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9972 para aguas residuales y de 0,9994 en agua desionizada.

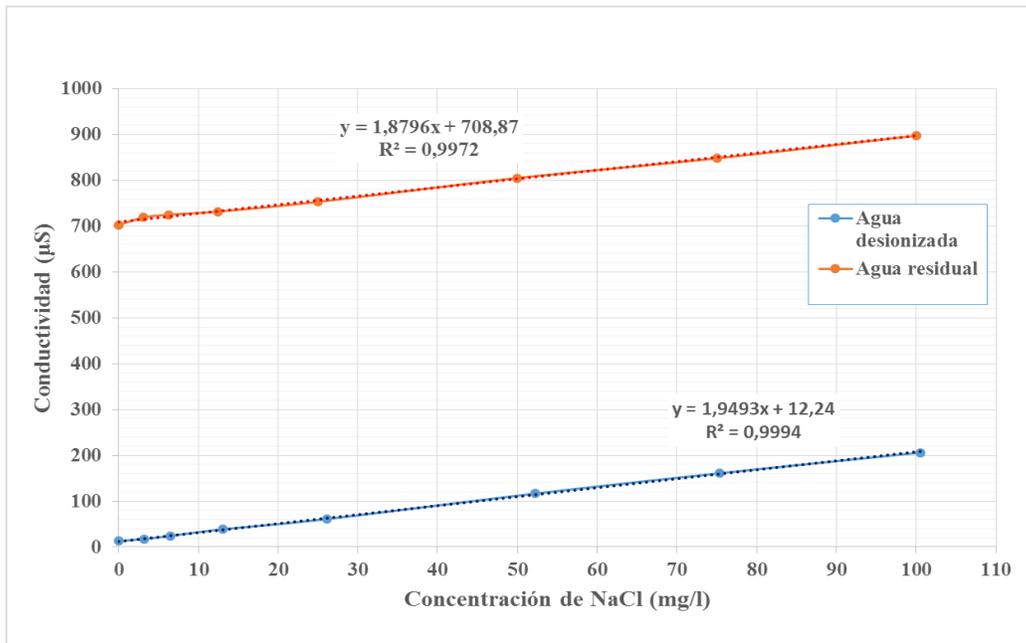


Figura 8. Curva de correlación Conductividad-Concentración NaCl.

El trazador fue colocado instantáneamente en la entrada de los sistemas de tratamiento de los Apartamentos de Escazú y Condominios. Las dosis de trazador utilizadas, se calcularon a partir de la ecuación 1 (Pérez, 1992);

$$P = \frac{VxKxCo}{Ix10^3} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P= peso del trazador a añadir, (kg).

V= volumen útil del reactor, (m³).

K= constante de corrección.

Co= concentración, (mg/L o g/m³).

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

$$K = \frac{\text{Peso de NaCl}}{\text{Peso Cl}} = \frac{23+35,5}{35,5} = 1,65 \quad \text{Ecuación 2}$$

Posterior a la aplicación en cada sistema, se realizaron muestreos del afluente a la salida del tanque séptico, tomados en promedio cada 15 minutos en Apartamentos y cada 30 minutos en Condominios, a excepción de lapsos largos de tiempo donde no había salida de caudal como en la tarde, en la noche y la madrugada.

A las muestras tomadas, se midió in situ la conductividad del agua con un conductivímetro; según el Método 2510 del Standard Methods Tercera Edición, con una precisión de 0,1. Los resultados obtenidos de la conductividad fueron tabulados y procesados en hojas de cálculo de Excel, donde se aplicaron tres métodos de modelos hidrodinámicos; Modelo Simplificado de Wolf-Resnick, Método de la Curva de Tendencia y el Número de Peclet, todos con relaciones entre la conductividad y el tiempo.

4.4 Evaluación del desempeño de los sistemas de tratamiento

Se realizaron muestreos con una frecuencia, fecha y hora coincidente con la caracterización del agua residual, donde igualmente se tomaron parámetros In situ (pH y temperatura) para los últimos tres muestreos y ex situ (SST y DBO₅) en cuatro muestreos. Los métodos y equipos utilizados son los presentados en la tabla 5 de caracterización del agua residual. Para la evaluación del desempeño se tabularon los datos de calidad y se calcularon parámetros estadísticos, además de la presentación gráfica de la tendencia, para su posterior análisis.

En el tanque séptico de los apartamentos de Escazú, se toman 3 puntos como referencia para los muestreos; uno en la entrada al tanque séptico, otro a la salida de éste y por último la salida del FAFA; tal y como se demarcan con equis en el diagrama de la figura 9.

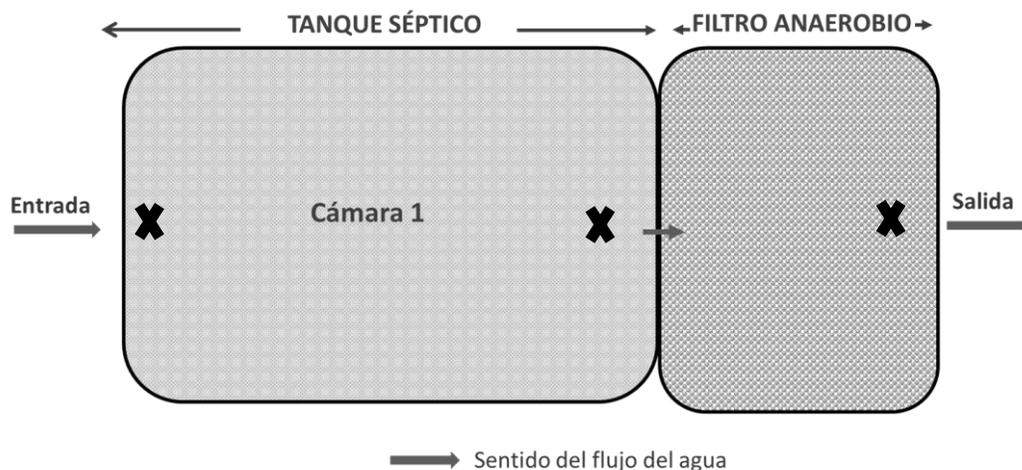


Figura 9 Puntos de muestreo del tanque séptico de los apartamentos de Escazú.

En el sistema de tratamiento ubicado en los Condominios, se muestrean 4 puntos; que corresponden a la entrada del tanque séptico, la salida de la cámara 1, salida de la cámara 3 y en la salida de los FAFA; como se muestra en la figura 10.

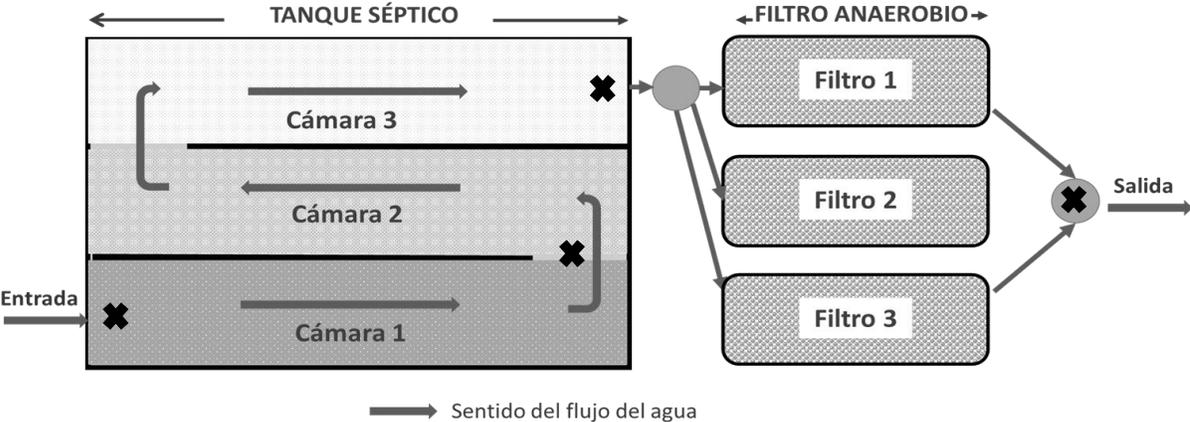


Figura 10. Puntos de muestreo del sistema de tratamiento del Condominios.

En el caso del sistema de tratamiento de Condominios, no es posible muestrear la salida de la cámara 2, ya que la cámara de inspección está totalmente cerrada con cemento lo cual dificulta su abertura.

En el sistema de tratamiento de la Casa de San Rafael de Escazú, son seleccionados 4 diferentes sitios para la caracterización del agua residual, uno en la entrada del tanque séptico, otros dos en las salidas de cada cámara y por último, en la salida del FAFA; tal y como se observa en la figura 11, los puntos seleccionados con equis.

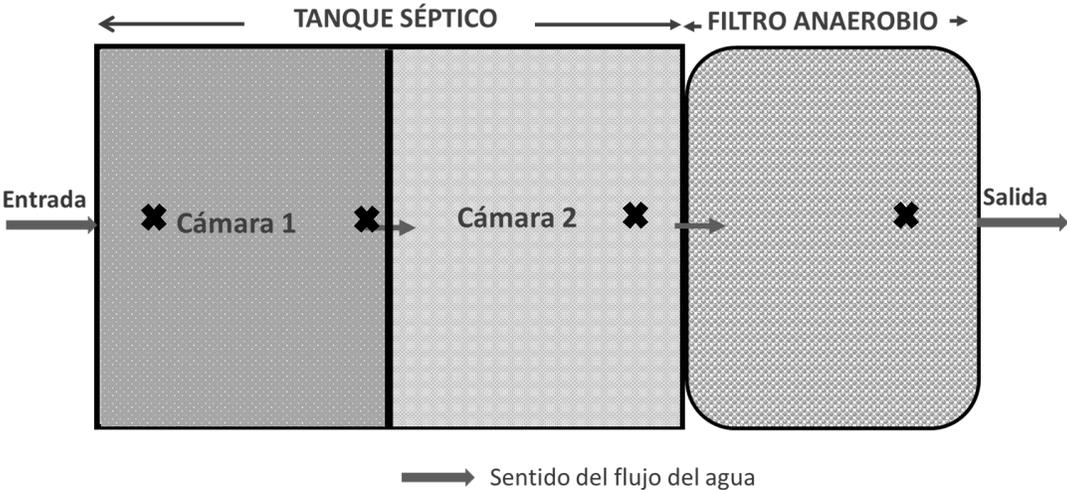


Figura 11. Puntos de muestreo del sistema de tratamiento de la Casa de Escazú.

4.5 Caracterización de lodos

La caracterización de los lodos, se realizó a través de una caracterización fisicoquímica y la identificación de la actividad metanogénica (AME) y la tasa de acumulación de lodos frescos.

Para la caracterización fisicoquímica se realizó un muestreo en cada compartimento para medir parámetros físicoquímicos y biológicos. Los parámetros y métodos de medición fueron realizados en los laboratorios del Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos del Tecnológico de Costa Rica (CEQUIATEC) y se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Métodos de análisis por parámetro evaluados a los lodos de los tanques sépticos.

Parámetro	Método	Referencia
DQO	5220D. Closed Reflux, Colorimetric Method.	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 2003
DBO ₅	5210B. 5-Day DBO Test.	
Nitrógeno Amoniacal	4500C. Ion Chromatographic Method.	
Sólidos Totales	2540B. Total Solids Dried at 103-105°C.	
Sólidos Suspendidos Totales	2540D. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	
Sólidos Totales Volátiles	2540G. Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples.	
Sólidos Suspendidos Volátiles	2540G. Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples.	
Coliformes Totales	9221. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group.	
Fósforo	AOAC 957.02 Phosphorus (total) in fertilizers.	AOAC International
Nitrógeno Total	AOAC 991.20. Nitrogen Total	
Actividad Metanogénica	Ensayo AME por Método Volumétrico.	Torres & Pérez. (2010)

Por el punto y facilidad de acceso, en el sistema de tratamiento de los Apartamentos se tomó el lodo cerca de la entrada del tanque séptico, en Condominios en la entrada de la cámara 2 y la salida de la cámara 3 y en casa Escazú en la cámara 1 y cámara 2.

La actividad metanogénica se ejecutó por el método volumétrico. Este consiste en una cuantificación indirecta del volumen de metano producido a través del uso de una sustancia desplazante, en este caso NaOH, el cual tiene la capacidad de reaccionar con el CO₂ que está presente en el biogás. El método no tiene un protocolo estandarizado; por lo que se aplica generalmente comparativamente, entre condiciones o fases operacionales de reactores anaerobios (Torres & Pérez, 2010). Para el montaje experimental, se construye un reactor anaerobio a escala de laboratorio con lodo de cada una de las etapas de tratamiento a analizar con el método presentado por Torres & Pérez, 2010 haciendo un montaje como el de la Figura 12 Los montajes para las pruebas de Actividad Metanogénica, fueron realizados en el Laboratorio Multiusos del Edificio de la Carrera de Ingeniería Ambiental.

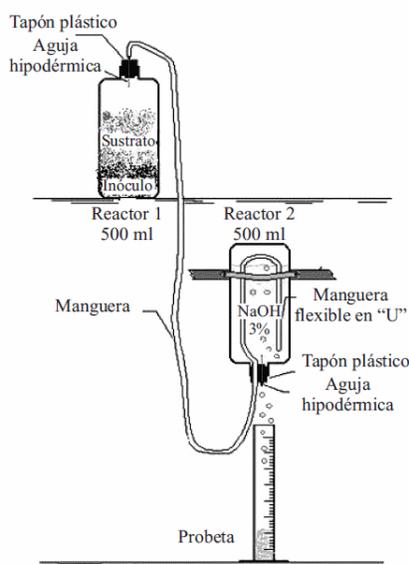


Figura12. Montaje experimental del Ensayo Volumétrico para la medición de Actividad Metanogénica.

Fuente: Torres, 2010.

El cálculo de la AME, se realiza mediante el análisis del comportamiento los datos de la producción de metano respecto al tiempo; a partir de la pendiente en la zona de mayor pendiente equivalente a la mayor producción de metano. Se realiza una estimación de la cantidad de metano producido respecto a los sólidos volátiles por día a partir de la ecuación 3. (Torres & Pérez, (2010)).

$$AME = \frac{M*24*2.66}{SV*1000} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

AME: Actividad Metanogénica Específica ($\frac{kg \text{ CH}_4}{kg \text{ Sólidos Volátiles.día}}$)

M: pendiente de la curva

SV: sólidos volátiles (Kg)

La tasa de acumulación de lodos dentro de los tanques sépticos, se cuantificó a partir de mediciones mensualmente de la cama de lodos, con un medidor de contacto (Méndez et al., 2007); construido a partir de una vara de madera y una manta blanca en la parte inferior, el cual al ser introducido al tanque séptico marcaba el nivel de lodos por la mancha que se generaba en el material textil, y posteriormente, se medía fuera del tanque séptico con cinta métrica. Con la altura de los lodos y las dimensiones del tanque séptico, se estimó la tasa de acumulación de lodos con la ecuación 4.

$$TAL = \frac{c}{a.b} \left(\frac{L}{hab/año} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

TAL: Tasa de Acumulación de Lodos (L/hab.año)

c: Volumen estimado de lodos (L) (A partir del cálculo de área del tanque (m²) x altura de la cama de lodos (m) x 1 E⁻³)

a: tiempo transcurrido desde la última lectura de la altura de lodos (años)

b: número de usuarios. (hab)

La referencia utilizada para el número de usuarios de cada sistema fue la cantidad de habitantes de cada sitio dada por cada administrador, excluyendo visitas u otros usuarios que pudieran generar aguas residuales destinadas al sistema de tratamiento en estudio. En el cálculo de la tasa de acumulación de lodos del sistema de tratamiento de la casa de Escazú que está compartimentalizado, se tomó una relación de área de 2/3 para el primer compartimento y 1/3 del área total para el segundo compartimento.

5 Resultados y discusión

5.1 Caracterización de las aguas residuales domésticas

Aguas residuales de Apartamentos

A partir de los aforos realizados se construye la Figura 13 la cual presenta la variación de caudales a lo largo de un día entre semana (Miércoles 25 de noviembre 2015) bajo condiciones normales de rutina de los habitantes. Se presenta un incremento en el caudal entre las 6:45 a.m. y las 9:00 a.m. siendo la hora pico las 7:15 a.m., teniendo como punto máximo un caudal de 0,070 L/s, se presenta un leve incremento en horas del medio día; mientras en periodos entre la 1:00 p.m. y las 5:00 p.m. no hay generación de aguas residuales. Ya que los habitantes o están en actividades que no implican el uso del agua o están fuera de la residencia, retornando después de las 5:30 p.m.; retomándose la producción de aguas residuales, extendiéndose hasta las 11:30 p.m. aproximadamente. Las actividades de lavandería, se registran en su mayoría, en horas de la noche ya que la calidad del afluente presenta mayor cantidad de espuma o agua jabonosa.

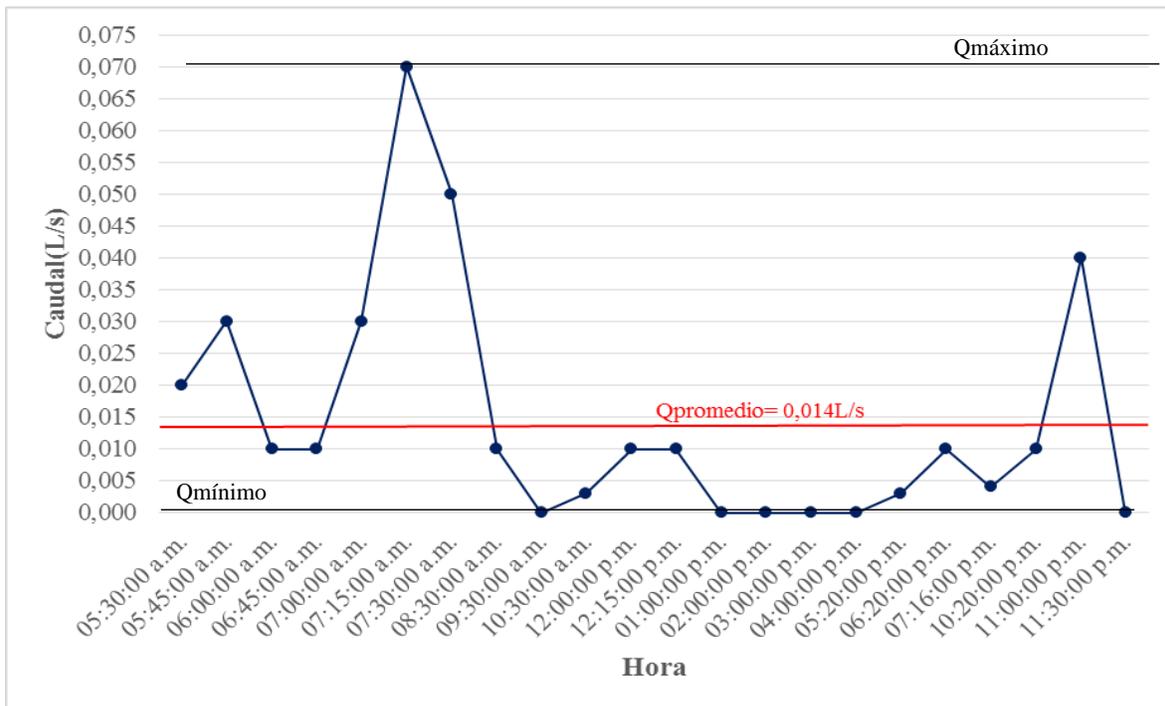


Figura 13. Producción de aguas residuales en Apartamentos.

Se obtiene un caudal promedio de 0,014L/s con una desviación estándar de 0,019 que varían en un rango entre un mínimo de 0,000L/s y un máximo de 0,070L/s.

Los muestreos para la caracterización físicoquímica tanto en las aguas de entrada como en el comportamiento del sistema de tratamiento en general, fueron realizados entre Julio y Noviembre; realizando el Miércoles 29 de Julio el primero, luego el Miércoles 26 de Agosto, el tercero se realizó el Miércoles 7 de Octubre y por último se llevó a cabo un muestreo el Jueves 5 de Noviembre. El muestreo del Miércoles 29 de Julio se realizó evaluando únicamente los parámetros ex situ; es decir, la prueba de DBO₅ y SST; para los otros tres se evaluaron además de éstos, la temperatura y el pH.

El pH del agua residual, varía entre $6,66 \pm 0,01$ y $7,28 \pm 0,01$ con un promedio de $7,01 \pm 0,24$; como se presentan variaciones tan pequeñas entre los datos no se presenta la gráfica de tendencia. La temperatura alcanza un rango entre $(21,3 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ y $(25,7 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ con un promedio de $(24,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$. En la figura 14, se presenta las variaciones de la temperatura a lo largo del día, durante tres meses diferentes.

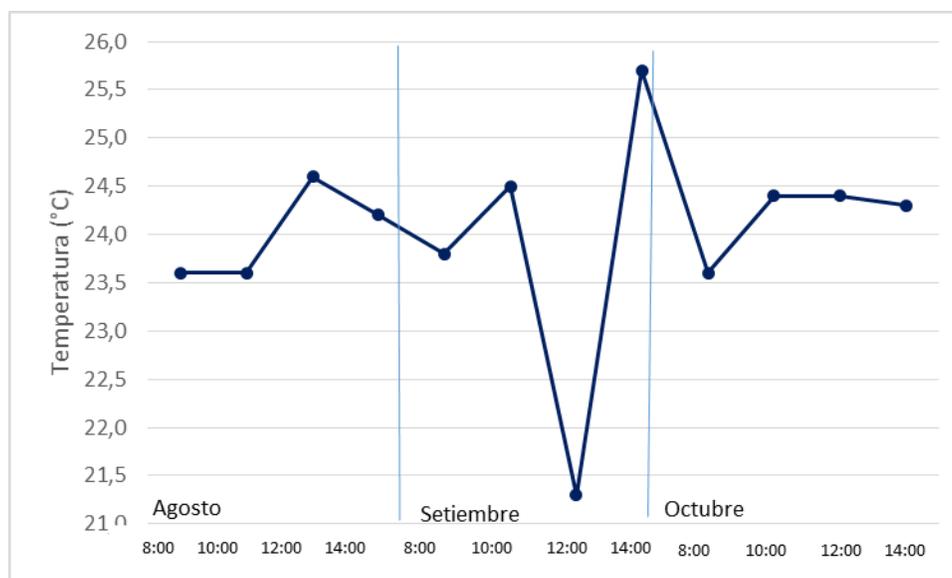


Figura 14. Comportamiento de la variación de la temperatura respecto al tiempo en la entrada del sistema de tratamiento de Apartamentos.

La temperatura como se muestra en la figura 14, presenta cambios a lo largo del día, sin poder tener una tendencia clara en que la temperatura fuera mayor en un mes específico.

Los resultados del comportamiento de los parámetros de DBO₅ y SST para el agua residual de entrada del sistema de tratamiento de Apartamentos se pueden observar en la Tabla 7 y 8 y gráficamente en la Figura 15.

Tabla 7. Parámetros de caracterización y estadísticos horarios del agua residual de Apartamentos.

DBO (mg/L)	Hora	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio	Desviación Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo
	08:00	312,45	429,20	793,33	614,83	537,56	211,20	522,01	793,33	312,45
10:00	298,20	216,30	687,08	622,50	456,10	233,41	460,40	687,08	216,30	
12:00	358,80	176,40	744,89	178,08	364,50	267,61	268,40	744,89	176,40	
02:00	343,50	142,50	111,50	84,75	170,60	117,71	127,00	343,50	84,75	
SST (mg/L)	08:00	172,3333	988,0000	1493,3333	96,0000	687,4160	672,0458	580,1667	1493,3333	96,0000
	10:00	160,0000	76,6667	220,0000	120,0000	144,1667	60,9417	140,0000	220,0000	76,6667
	12:00	1030,0000	48,0000	405,0000	196,6670	419,9168	432,2756	300,8335	1030,0000	48,0000
	02:00	600,0000	180,0000	105,0000	103,3333	247,0833	237,9791	142,5000	600,0000	103,3333

Muestreo 1: Miércoles 29 Julio 2015/**Muestreo 2:** Miércoles 26 de Agosto 2015/**Muestreo 3:** Miércoles 7 de Octubre 2015. **Muestreo 4:** Jueves 5 Noviembre 2015.

La tabla 7, presenta los resultados obtenidos en la cámara de entrada del sistema de tratamiento de Apartamentos en cada una de las fechas de muestreo pero además se colocan los datos estadísticos como promedio, mediana y desviación estándar, que evalúan el comportamiento en las mismas horas; es decir cada parámetro estadístico es tomado para una misma hora pero en muestreos con fechas diferentes. Tanto en DBO₅ como en SST, los resultados presentan promedios con desviaciones estándar muy altas, marcando un rango entre los valores máximos y mínimos muy grandes.

La misma situación se presencia en la tabla 8, donde se muestra el resumen de los estadísticos de DBO₅ y SST para cada día, obteniendo rangos amplios en el comportamiento y comprobando el cambio en las concentraciones según la variación horaria.

Tabla 8. Estadísticos diarios, para los parámetros de DBO₅ y SST del agua residual de Apartamentos.

Hora	DBO ₅ (mg/L)				SST (mg/L)			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Promedio	328,20	241,10	584,22	375,00	490,5833	323,1667	555,8333	129,0001
Desv. Estándar	27,80	129,00	318,11	283,91	413,7272	446,8329	637,1006	46,2455
Mediana	328,00	196,41	716,00	396,50	386,1665	128,3335	312,5000	111,6666
Máximo	358,80	429,20	793,33	622,50	1030,0000	988,0000	1493,3333	196,6670
Mínimo	298,20	142,50	111,50	84,75	160,0000	48,0000	105,0000	96,0000

Muestreo 1: Miércoles 29 Julio 2015/**Muestreo 2:** Miércoles 26 de Agosto 2015 **Muestreo 3:** Miércoles 7 de Octubre 2015. **Muestreo 4:** Jueves 5 Noviembre

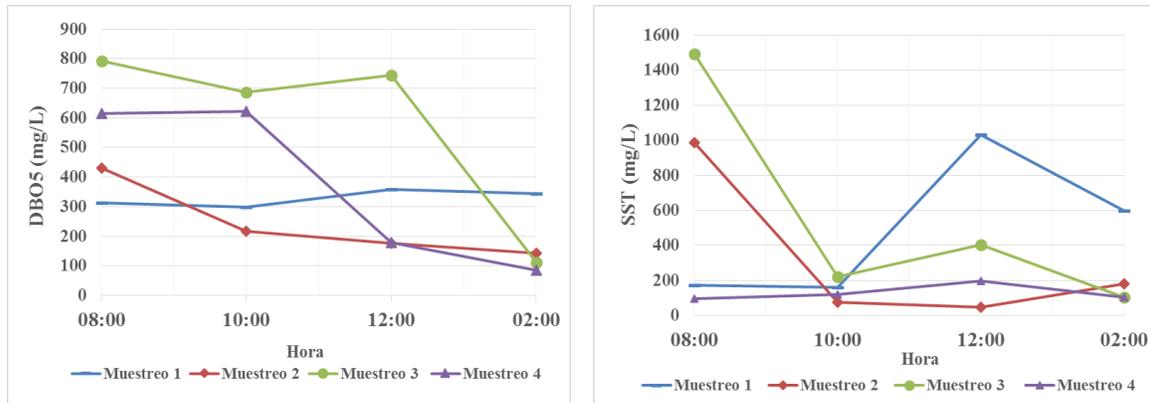


Figura 15. Comportamiento de DBO₅ y SST de aguas residuales en Apartamentos medidos en la entrada.

En términos generales los parámetros DBO₅ y SST de las aguas residuales son muy variables y sensibles a los cambios de las actividades domésticas y no guardan relación directa con la hora del día o el día de muestreo. Para DBO₅ se ubicaron mínimos de 84,75 mg/L y máximos hasta de 793,33 mg/L y en SST mínimo de 48,0000 mg/L hasta un máximo de 103,3333 mg/L. A pesar de las fluctuaciones en la calidad del agua residual, los parámetros de pH y temperatura si se muestran muy tendientes a 7,01 y 24,0 °C, respectivamente, con variaciones muy leves, mostrando estabilidad en los mismos.

Aguas residuales de Condominios

La Figura 16, presenta el comportamiento de la producción de aguas residuales en el Condominios a lo largo de un día entre semana (Jueves 10 de diciembre 2015) bajo condiciones normales de rutina de los habitantes del Condominios.

El comportamiento es variable, presenta los valores más altos durante la mañana, y el pico más significativo se presencié entre las 8:30 a.m. - 10:30 a.m. siendo el caudal más alto de 0,180 L/ s a las 9:00 a.m. A partir de la 1:30 p.m. aproximadamente y hasta las 6:00 p.m. se observaron caudales de entrada muy bajos; esto debido a que la actividad de limpieza disminuye; por lo general, son realizadas por un personal externo durante las horas de la mañana y hasta el mediodía y la mayoría de habitantes de cada apartamento regresa después de las 6:00 de la tarde. Después de las 7:00 pm no se evidenció producción de aguas residuales.

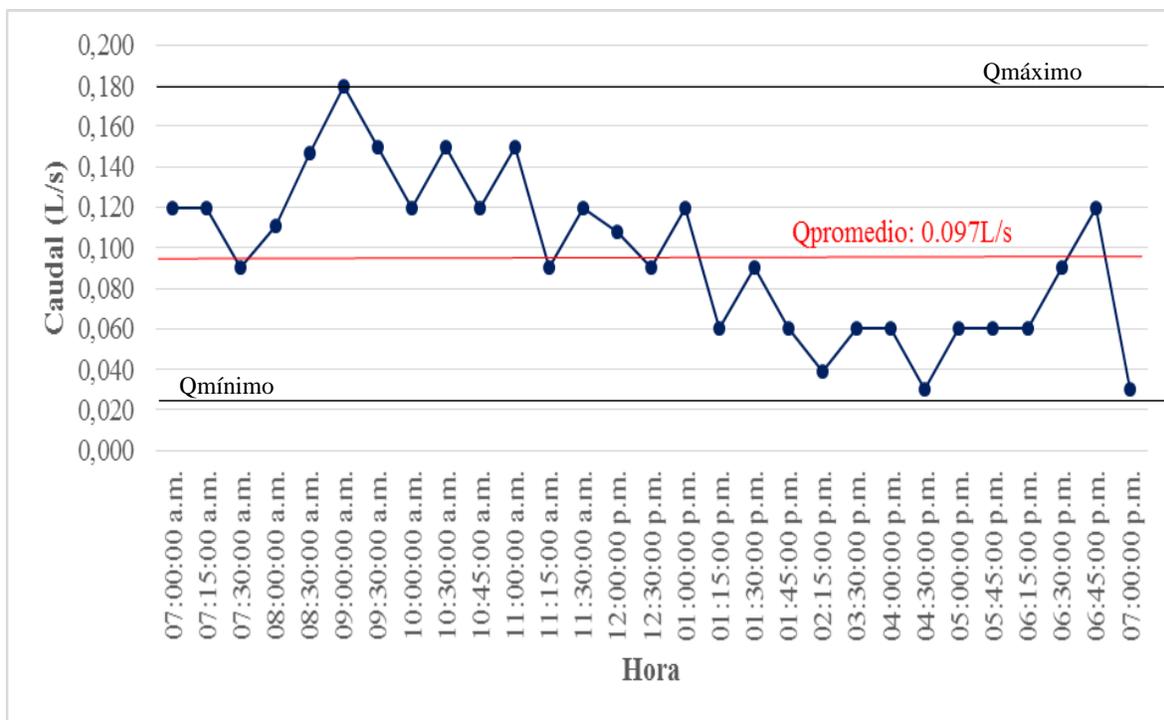


Figura 16. Producción de aguas residuales en Condominios.

El caudal promedio obtenido es de 0,097 L/s con una desviación de 0,040 y varía entre un caudal mínimo de 0,030 L/s y uno máximo de 0,180 L/s.

Para la caracterización físicoquímica y al igual que en el estudio del sistema de tratamiento de los Apartamentos, los muestreos fueron realizados entre Julio y Noviembre; realizando el primero el Miércoles 29 de Julio, el Miércoles 26 de Agosto el segundo, el tercero se realizó el Miércoles 7 de Octubre y por último se llevó a cabo un muestreo el Jueves 5 de Noviembre; en los últimos tres fue posible medir los parámetros in-situ y exsitu; para el primero solamente DBO₅ y SST.

Con respecto a la temperatura del agua residual para los tres muestreos realizados, oscila en un rango entre (25,4°C -27,2) ±0,1°C con una temperatura promedio de (26,0 ±0,5)° C como se observa en la figura 17 donde aparece una pequeña variación en la temperatura a lo largo del día y para los tres diferentes meses del año muestreados; correspondientes a Agosto, Octubre y Noviembre ya que por dificultades técnicas no fue posible obtener los datos de temperatura y pH el mes de Julio. Respecto al pH, se encuentran variaciones bajas entre (6,80-7,50) ±0,01 con un promedio de (7,19 ±0,25); debido a los cambios tan pequeños, no se realizó gráfica de comportamiento en las variaciones del pH.

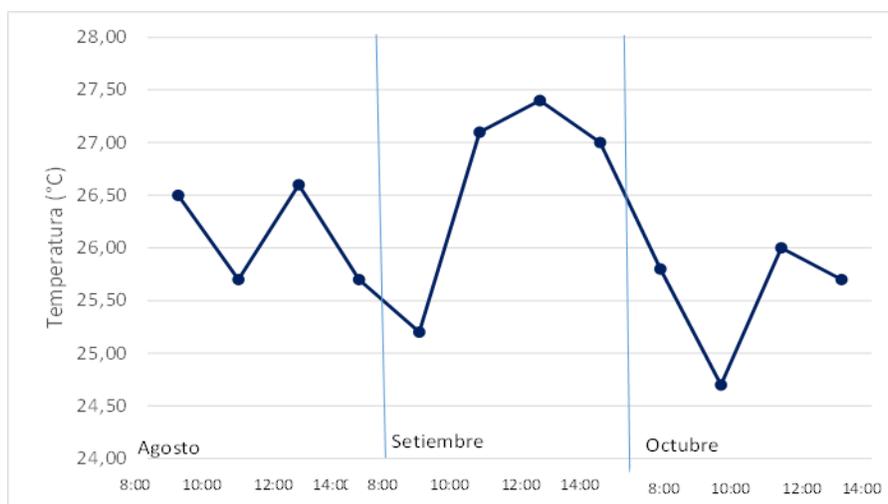


Figura 17. Comportamiento de la temperatura del agua residual de entrada en Condominios.

El comportamiento de los parámetros de DBO_5 y SST se presenta en la Tabla 9 y 10 y gráficamente en la Figura 18.

Tabla 9. Parámetros de caracterización y estadísticos horarios del agua residual de Condominios.

DBO ₅ (mg/L)	Hora	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio	Desviación Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo
		08:00	582,75	127,20	928,83	567,00	551,44	328,44	574,87	928,83
	10:00	432,00	398,40	828,83	398,25	514,37	210,24	415,20	828,83	398,25
	12:00	283,05	228,50	518,63	218,50	312,17	140,53	255,78	518,63	218,50
	02:00	276,15	163,70	354,80	283,45	269,52	78,97	279,80	354,80	163,70
SST (mg/L)	08:00	440,0000	136,0000	70,0000	170,0000	204,0000	162,7186	153,0000	440,0000	70,0000
	10:00	252,0000	140,0000	84,0000	360,0000	209,0000	122,5235	196,0000	360,0000	84,0000
	12:00	216,0000	64,0000	100,0000	500,0000	220,0000	197,6124	158,0000	500,0000	64,0000
	02:00	170,0000	170,0000	96,0000	90,0000	131,5000	44,5234	133,0000	170,0000	90,0000

Muestreo 1: Miércoles 29 Julio 2015/**Muestreo 2:** Miércoles 26 de Agosto 2015/**Muestreo 3:** Miércoles 7 de Octubre 2015. **Muestreo 4:** Jueves 5 Noviembre

En la tabla 9, se presentan los resultados obtenidos en la cámara de entrada del sistema de tratamiento de Condominios en cada una de las fechas de muestreo con los datos estadísticos como promedio, mediana y desviación estándar, que evalúan el comportamiento en las mismas horas; es decir cada parámetro estadístico es tomado para una misma hora pero en muestreos con fechas diferentes. En la mayoría de los casos, tanto en DBO_5 como en SST, los resultados presentan promedios con desviaciones estándar muy altas, marcando un rango entre los valores máximos y mínimos muy grande, por lo que no puede concluirse una tendencia clara que defina una hora específica como la que tenga mayor carga.

Tabla 10. Estadísticos diarios, para los parámetros de DBO₅ y SST del agua residual de Condominios.

Hora	DBO ₅ (mg/L)				SST (mg/L)			
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Promedio	393,5	229,5	627,4	366,8	269,5000	127,5000	87,5000	280,0000
Desv. Estándar	145,2	120,2	230,3	152,8	118,5172	44,9704	13,5031	185,2926
Mediana	357,5	196,1	663,1	340,9	234,0000	138,0000	90,0000	265,0000
Máximo	582,8	398,4	828,8	567,0	440,0000	170,0000	100,0000	500,0000
Mínimo	276,2	127,2	354,8	218,5	170,000	64,0000	70,0000	90,0000

Muestreo 1: Miércoles 29 Julio 2015/**Muestreo 2:** Miércoles 26 de Agosto 2015/**Muestreo 3:** Miércoles 7 de Octubre 2015. **Muestreo 4:** Jueves 5 Noviembre

En la tabla 10, se observa el resumen de los estadísticos de DBO₅ y SST para cada fecha de muestreo, donde también se obtienen rangos amplios entre los resultados máximos y mínimos en el comportamiento en la mayoría de los casos; presentando resultados más uniformes en Sólidos Suspendidos Totales del muestreo de Octubre por ejemplo. Al tener desviaciones estándar tan grandes entre los grupos de datos, es posible comprobar que existe una variación horaria que afecta la calidad del agua residual de entrada a lo largo del día.

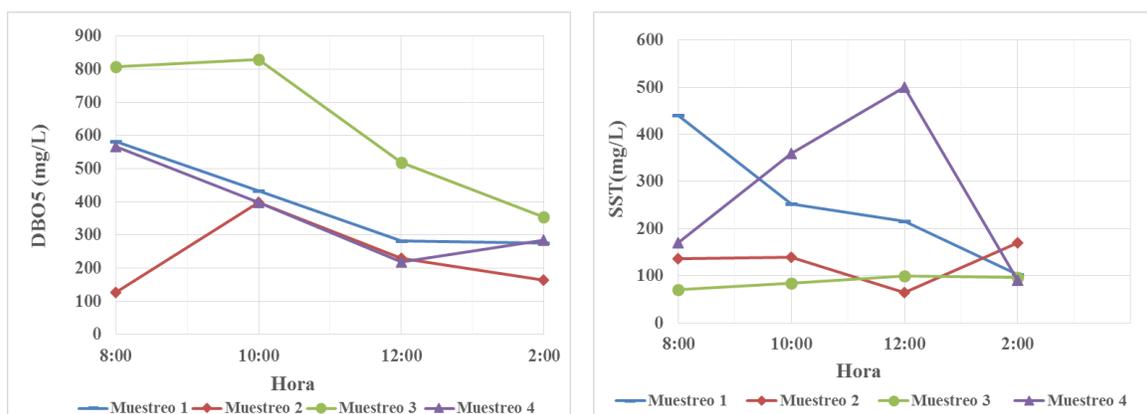


Figura 18. Comportamiento de DBO₅ y SST de aguas residuales en Condominios en la entrada del sistema de tratamiento.

Con el comportamiento mostrado en la Figura 18, no se puede establecer una relación entre la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno y los Sólidos Suspendidos Totales ya que en todos los muestreos el comportamiento de los resultados fue muy variable, tanto a lo largo del día como entre las fechas de muestreo. Solamente para los Sólidos Suspendidos Totales a las 2:00 p.m. tienen una desviación estándar baja, es decir, que para los diferentes días de muestreo los resultados fueron semejantes en este parámetro a esa hora; sin embargo, para los demás resultados tanto en DBO₅ como en SST, existen desviaciones estándar altas; lo cual corresponde a variaciones significativas en el agua de entrada, entre los diferentes días de muestreo para la misma hora. En ambos parámetros también, puede observarse que

las estadísticas de promedio y mediana alcanzan el máximo entre las 8:00 a.m. y las 10:00 a.m. y disminuyen en el transcurso del día, mostrando el punto más bajo a las 2:00 p.m. Por otro lado, en la segunda tabla estadística para el agua de entrada de los Condominios, se observan desviaciones estándar altas, notando que los valores para los dos parámetros fueron variantes en el tiempo, alejándose significativamente horariamente; exceptuando los resultados obtenidos para los Sólidos Suspendidos Totales en el muestreo 3, en el que se obtuvieron datos muy semejantes entre sí a pesar de la variación horaria. En cuanto a la DBO₅, se encontraron valores mínimos de 127,2 mg/L y máximos de 828,8 mg/L. Con relación a los SST, el valor mínimo presentado fue de 64,0 mg/L y un máximo de 500,0 mg/L.

Aguas residuales de Casa

Debido al poco caudal de aguas residuales que se genera en la casa, debido a que pasa casi desocupada durante todo el día y se producen únicamente las descargas de aguas pardas, no se realizó un análisis de variación horaria ni un aforo volumétrico para observar el comportamiento en la generación de las aguas residuales por lo que los muestreos realizados fueron puntuales con una frecuencia mensual entre los meses de Julio a Noviembre. Los muestreos se realizaron a las 7:00 de la mañana, considerando esa hora, el momento de mayor descarga de agua al sistema de tratamiento. Se tomó una sola muestra en cada fecha; para el primer muestreo realizado el Miércoles 29 de Julio del 2015, solo se analizaron los parámetros de DBO₅ y SST; en los muestreos posteriores del Miércoles 26 de Agosto, Miércoles 7 de Octubre y Jueves 5 de Noviembre, se realizó un estudio de los parámetros in situ y ex situ.

La temperatura para el agua residual varía entre 21,4 °C y 22,4 °C \pm 0,1 °C, con un promedio de 22,0°C \pm 0,6°C; como se muestra en la figura 19, el resultado de la temperatura más elevada fue en el mes de Agosto y Octubre fue el de menor temperatura; sin embargo las variaciones son leves.

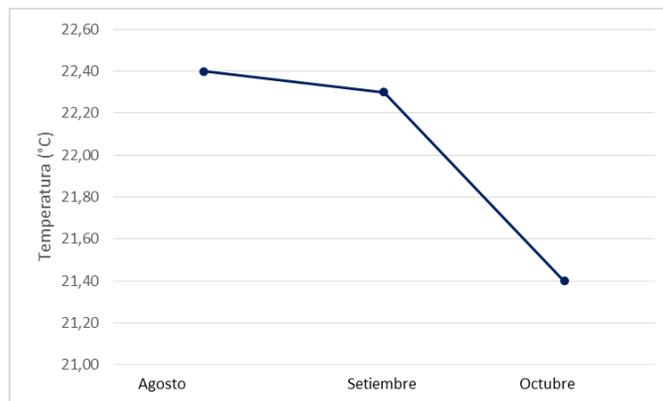


Figura 19. Comportamiento de la temperatura del agua residual de entrada de Casa.

El promedio del pH tiene un rango entre (7,48 y 8,14) \pm 0,01 y un promedio de 7,76 \pm 0,34; al presentar variaciones tan pequeñas no se consideró necesario incluir la gráfica correspondiente a este parámetro

La Tabla 11 presenta las concentraciones de DBO₅ y SST de las aguas pardas de entrada al sistema de tratamiento de la Casa, las cuales se presentan gráficamente en la Figura 20.

Tabla 11. Parámetros de caracterización y estadísticos del agua residual de Casa de Escazú.

Entrada Tanque Séptico Casa Escazú.									
Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Promedio	Desv . Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo
DBO ₅ (mg/L)	639,00	-	876,67	977,00	830,89	173,59	876,67	977,00	639,00
SST (mg/L)	1700,0000	316,6667	1213,3333	155,0000	846,2520	735,2832	765,0000	1700,0000	155,0000

Muestreo 1: Miércoles 29 Julio 2015/**Muestreo 2:** Miércoles 26 de Agosto 2015/**Muestreo 3:** Miércoles 7 de Octubre 2015. **Muestreo 4:** Jueves 5 Noviembre 2015.

Como se observa en la tabla 11, las desviaciones estándar principalmente en los Sólidos Suspendidos Totales de este sistema son muy grandes, y en menor medida sucede con el parámetro de DBO₅; por lo que la calidad del agua de entrada al sistema de la casa también es variable respecto al día.

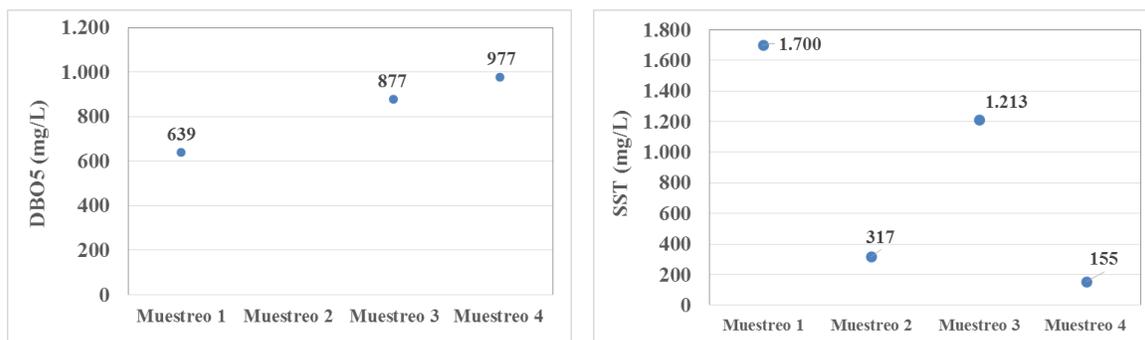


Figura 20. Comportamiento de DBO₅ y SST de aguas residuales en Casa de Escazú

La DBO₅ presentó concentraciones entre los 639,00 mg/L y los 977,00 mg/L. Los SST, presentan un comportamiento irregular con mínimo de 155,0000 mg/L y máximo de 1700,0000 mg/L. En términos generales la DBO₅ y los SST, presentan altas cargas dado que son aguas que no están muy diluidas, sus características son variables con desviaciones estándar altas.

La Tabla 12, presenta un resumen de los datos de la caracterización de las aguas residuales analizadas y parámetros de referencia de valores teóricos. La calidad del agua residual es muy cambiante en las concentraciones en los parámetros DBO_5 y SST, ya que al tener caudales de entrada tan pequeños, una descarga que se haga puede marcar la diferencia (Méndez et al. ,2007). Para comparar las aguas residuales de entrada, con una valor teórico, se utilizaron los rangos establecidos por Tchobanoglous, Burton y Stensel (2003); sin embargo, esos parámetros pueden ser variantes debido al uso en cantidad y calidad que se le da al agua potable, donde se genera el agua residual (Mara, 2003). En este caso, los parámetros de pH, temperatura, DBO_5 y SST; los valores se encuentran entre los rangos teóricos para aguas residuales domésticas en Apartamentos de Escazú y Condominios; sin embargo, la Casa en Escazú supera el valor en las concentraciones DBO_5 y SST dado que el agua residual de entrada no se encuentra diluida, por recibir solamente aguas de los inodoros, mientras que en los otros dos sitios, se encuentran mezcladas las aguas pardas con las aguas grises; mezclando los diferentes usos de duchas, servicios sanitarios, lavadoras, lavaplatos y otros generadores de aguas residuales. Además, el flujo de entrada al sistema de la casa es menor comparado con los otros dos sistemas en estudio.

Respecto a la temperatura, no se tiene un rango claramente establecido para las aguas residuales, ya que éste varía según la temperatura ambiente de cada lugar; sin embargo, teóricamente debe ser un poco mayor a ésta. Los resultados obtenidos para todos los sistemas de tratamiento son similares, y se acoplan a temperaturas de la zona en la que están ubicados; donde según el Instituto Meteorológico Nacional, la temperatura ambiente promedio anual es de $20.8^{\circ}C$ en la zona de Escazú. Las temperaturas del agua residual obtenidas, son propias de afluentes en países tropicales los cuales tienen ventajas en el funcionamiento por su estabilidad climática, lo cual permite un crecimiento y proliferación estable de la vida microbiana; facilitando el proceso de las reacciones químicas y manteniendo normales las velocidades de reacción. Mara & Sinnatamby (1986). El agua residual, tampoco presentará dificultades debido al pH, ya que las concentraciones de ión hidrógeno representan valores normales para el desarrollo de los procesos biológicos; por lo que no requieren ningún tipo de mecanismo de neutralización de pH para desempeñar adecuadamente la depuración de aguas residuales por parte de los microorganismos. (CIDTA).

Tomando en cuenta, todos los parámetros físicos, químicos y biológicos, puede confirmarse la teoría de (Méndez et al. ,2007), donde se menciona que la calidad de agua residual de una sistema de tratamiento individual en aguas domésticas, es muy variante respecto al tiempo, por presentar caudales pequeños los cuales cambian también horariamente y según al uso del agua dentro de los hogares, en particular para viviendas unifamiliares o multifamiliares de pocas unidades de vivienda, donde no hay amortiguación o regulación de las cargas.

Tabla 12. Resumen de parámetros de caracterización de aguas residuales de los lugares de estudio analizados

Parámetro	Valores teóricos de Aguas Residuales domésticas	Sitio	Rango Obtenido	Mediana Obtenida
Temperatura (°C)	Superior a temperatura ambiente.	Apartamentos Escazú	21.30-25.70	24.25
		Condominios	24.7-27.4	25.9
		Casa Escazú	21.4-22.4	22.3
pH	6.5-7.5	Apartamentos Escazú	6.66-7.28	7.10
		Condominios	6.83-7.51	7.20
		Casa Escazú	7.48-8.14	7.65
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	110-350 Tchobanoglous, Burton y Stensel (2003)	Apartamentos Escazú	84.75-793.33	327.98
		Condominios	106.90-828.89	289.63
		Casa Escazú	639-977	876.67
SST (mg/L)	120-400 Tchobanoglous, Burton y Stensel (2003)	Apartamentos Escazú	48-1493	176
		Condominios	64-440	112
		Casa Escazú	155-1700	765

5.2 Evaluación hidráulica de los sistemas de tanques sépticos

Sistema de tratamiento de Apartamentos

El agua residual afluyente a este sistema está compuesta por la mezcla de las aguas grises y las aguas pardas. El sistema de tratamiento tiene con una capacidad total de 4.220 m³, integrado por un tanque séptico de una sola cámara de 3.537 m³ y un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) de 0.683 m³, el cual usa como material filtrante piedra cuarta, una vista se presenta en la figura 21 y el detalle de la estructura en el Anexo I. Este fue instalado en el año 2009 y se le realiza mantenimiento cada dos años aproximadamente, en el que se evacúa el 80% del lodo existente y se limpia el material filtrante del filtro anaerobio.

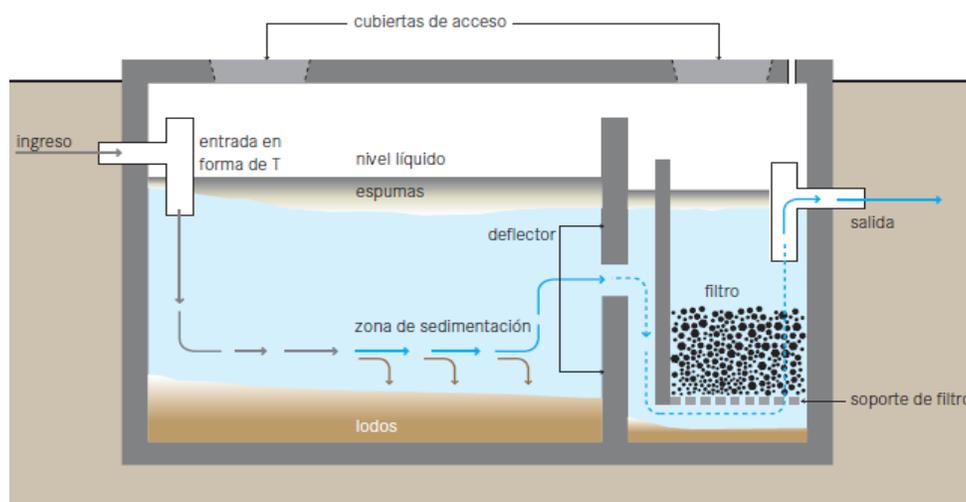


Figura 21. Esquema vista frontal sistema de tratamiento de Apartamentos.

Fuente: EAWAG. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento

Como primera orientación del comportamiento hidráulico del tipo de sistema, se presenta la curva de concentración y las variaciones de caudal en el tiempo obtenido a partir del ensayo de trazadores (figura 22). En el sistema, se presentan picos tanto de caudal como de conductividad, coincidiendo entre sí en algunos puntos con los valores máximos para cada parámetro.

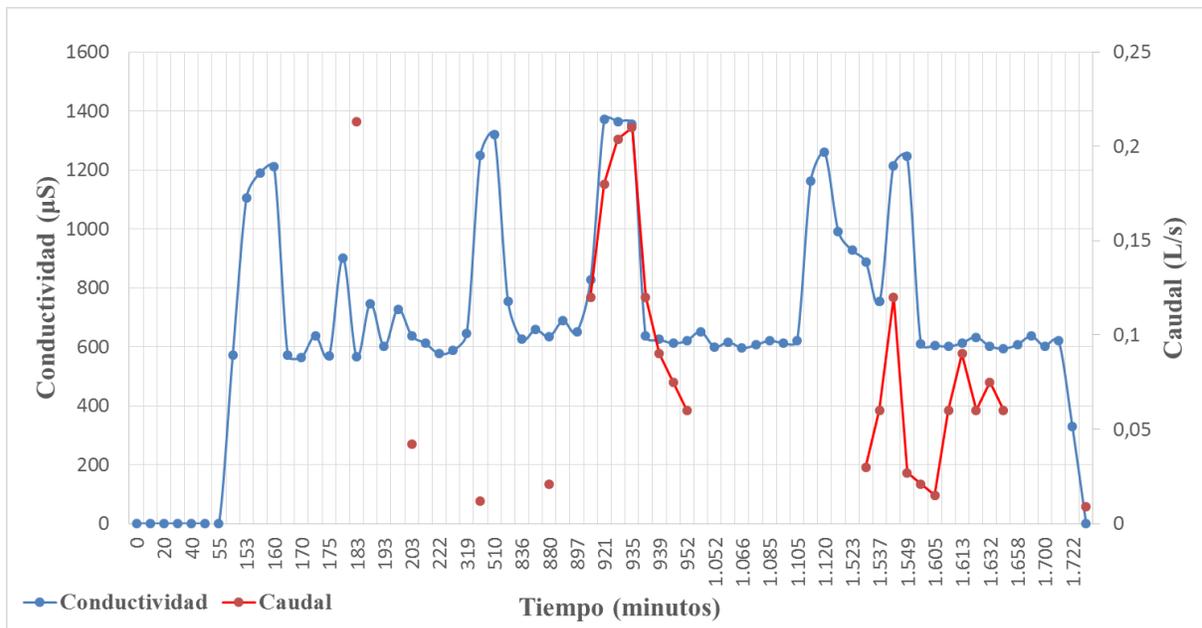


Figura 22. Curvas de conductividad y caudal versus tiempo para el tanque séptico de Apartamentos.

Transcurren 55 minutos, entre la inyección del trazador y la primera salida de este del tanque séptico; posteriormente, se presenta un comportamiento con cambios abruptos hasta los 1700 minutos (28 horas) aproximadamente, donde la conductividad desciende notablemente; presentándose la salida total del sistema a los 1722 minutos (28.7 horas) que fue el periodo de la prueba, este tiempo total incluye tiempos donde no hay salida de agua residual el cual ronda entre 6 y 8 horas durante la noche y 4 o 5 durante el día.

En los periodos entre los minutos 510 y 820 correspondientes al lapso horario entre 12:30p.m y 17:40 p.m. del 24 de noviembre del 2015, no se presentó la salida de flujo de agua, dado que no se dan usos de esta al interior de las unidades de vivienda; además a lo largo de la noche no hay flujo de entrada de aguas residuales al sistema, lo que corresponde al lapso entre los 1125 y 1523 minutos, que pertenece a las 22:45 p.m. del 24 de noviembre del 2015 y hasta las 05:23 a.m. del 25 de noviembre del 2015.

La conductividad de forma acumulada es proporcional a la concentración de sustancia trazadora dentro del reactor y tal como se muestra en la gráfica de la figura 23, a partir de la curva F, que representa una curva normalizada de la concentración acumulada del trazador en función del tiempo, se puede determinar el tiempo medio de residencia dando como resultado 725 minutos (12,1 horas); teniendo un tiempo inicial de 137 minutos (2,3 horas) y un final de 1700 minutos, lo que equivale a 30 horas aproximadamente.

Tabla 13. Parámetros de estudio de trazadores del tanque séptico de Apartamentos.

Parámetro	Descripción del parámetro	Resultado (min)	Resultado (h)
t_i	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador y aparece un cambio de conductividad o concentración en el efluente.	137,0	2,3
t_{10}	Tiempo en el que pasa 10% del total del trazador.	65,0	2,7
t_p	Tiempo en el que se reporta la conductividad máxima.	921,0	15,3
t_m	Tiempo mediano, 50% del trazador.	725,0	12,1
t_o (Caudal Promedio)	Tiempo teórico de retención.	2044,0	34,1
t_{90}	Tiempo en que pasa 90% del trazador	1613,0	26,9
t_f	Tiempo hasta que pasa el 100% del trazador	1836,0	30,6
Cond_o	Conductividad Inicial	571,0	571,0
Cond_p	Conductividad máximo o pico.	1391,0	1391,0

El tiempo teórico para el tanque séptico, calculado con el volumen efectivo y caudal promedio es de 2044 minutos (34,1 horas) mientras el tiempo medio de residencia del estudio de trazadores es de 725 minutos (12,1 horas); teniendo en cuenta que este está asociado a caudales máximos que difieren notablemente del caudal promedio y de tiempos muertos por día de hasta 10 horas aproximadamente, lo cual al no contemplarse puede generar una variabilidad considerable. Sin embargo, existe un tiempo inicial de 137,0 minutos (2,3 horas) y un tiempo final de 1836,0 minutos (30,6 horas); esto quiere decir que existe un amplio rango en los tiempos de estancia de la sustancia trazadora dentro del sistema. Las variaciones en los tiempos de residencia están ligadas a las variaciones de caudal pero también pueden existir zonas muertas que incrementen el tiempo,, al dejar fracciones de flujo atrapadas por lapsos mayores a los normales; o por el contrario flujos preferenciales que generen cortos circuitos y disminuyan drásticamente el tiempo de retención. (Pérez, 1992).

Para valorar la existencia de zonas muertas o cortos circuitos, además del tipo de flujo del reactor; se establecen algunas relaciones, tal y como se presentan en la tabla 14, donde se calcularon no solo para el caudal promedio, sino como también para los caudales mínimos y máximos.

Tabla 14. Interpretación de las relaciones del Método de Curva de Tendencia.

Relaciones	Valor	Interpretación
t_0	Tiempo teórico	
t_i/t_0	Cercano a 0	Tendencia de Flujo de Mezcla Completa
	Cercano a 1	Tendencia de Flujo Pistón
	Mayor a 0.3	Presencia de cortos circuitos
t_m/t_0	Menor a 1	Presencia de cortos circuitos
	Mayor a 1	Presencia de zonas muertas
t_p/t_0	Cercano a 0	Tendencia de Flujo de Mezcla Completa
	Cercano a 1 (menor)	Tendencia de Flujo Pistón
	Mayor a 1	t_i/t_0 cercano 0: tendencia de Flujo de Mezcla Completa
		t_i/t_0 cercano a 1: tendencia de Flujo Pistón

Tabla 15. Relaciones para análisis de las curvas de tendencia del trazador en Apartamentos.

Relaciones	En condición de caudal mínimo	Interpretación	En condición de caudal promedio	Interpretación	En condición de caudal máximo	Interpretación
t_0	327,50	horas	34,07	horas	13,84	horas
t_i/t_0	0,01	mezcla completa	0,07	mezcla completa	0,17	mezcla completa
t_m/t_0	0,04	corto circuito	0,35	corto circuito	0,87	corto circuito
t_p/t_0	0,05	mezcla completa	0,45	mezcla completa	1,11	mezcla completa

La primer relación de la tabla 15, correspondiente a t_i/t_0 brinda una primera suposición sobre la tendencia en el tipo de flujo dentro del reactor, para todas las variables del caudal, el resultado obtenido es menor que la unidad, tiene mayor tendencia a un flujo de mezcla completa; además, con ésta relación se puede determinar la presencia de cortos circuitos grandes, cuando el resultado es mayor a 0.3; sin embargo, el resultado obtenido es menor con lo que no se puede asegurar la presencia de éstos cortos circuitos; pero se puede utilizar también la relación entre el tiempo medio y el tiempo teórico (t_m/t_0) para verificar la

existencia de cortos circuitos, ya que si es menor a la unidad si se pueden considerar como existentes dentro del reactor, mientras que si es mayor a uno se determina la presencia de zonas muertas, en todos los casos de caudales se obtienen valores debajo de 1, lo cual indica que si existen cortos circuitos, generando flujos preferenciales; el cual es un problema típico hidrodinámico de reactores sin compartimentos (Pérez (1992), Pérez y Torres (2008)). La característica del corto circuito, a pesar de que el reactor tiene una relación largo:ancho mayor a 1, la distancia entre la salida y la entrada no es considerable y se da a niveles muy cercanos.

La relación asociada al tiempo cuando se reportó la conductividad máxima entre el tiempo teórico (t_p/t_o), la cual brinda también la tendencia del tipo de flujo. Cuando el resultado de t_p/t_o es igual a 1 se tiene flujo pistón, si por el contrario es 0 se refiere a un flujo completamente mezclado y cuando el valor obtenido es mayor a 1, se debe complementar además con el valor de t_i/t_o ; para los caudales mínimos y promedios se obtienen valores cercanos a 0 por lo que la tendencia se inclina hacia flujo de mezcla completa y para caudales máximos el valor es mayor a 1 pero al ser t_i/t_o menor a la unidad, se obtiene también una tendencia de mezcla completa. (Pérez (1992); Sánchez & Cardona, (2009)).

Otro de los indicadores para evaluar el comportamiento del tipo de flujo es el índice de Morril, para éste según Pérez (1992) y Pérez & Torres (2008); cuando el valor es mayor a 1, existe presencia tanto de flujo pistón como de flujo completamente mezclado; en este caso el valor obtenido es de 9,78, al estar alejado de la unidad, la mayor tendencia es de flujo completamente mezclado.

Con respecto al Número de Peclet, el cual es otro de los modelos hidrodinámicos que brindan información del tipo de flujo y de transporte dentro del reactor. En este caso, se obtuvieron valores muy cercanos a 0, lo cual indica que se da un transporte por dispersión; es decir, el sistema de tratamiento de Apartamentos tiene un comportamiento con mayor tendencia a mezcla completa. (Pérez & Torres, 2008).

Sistema de tratamiento de Condominios.

El agua residual afluyente a este sistema está compuesta por la mezcla de las aguas grises y las aguas pardas. El sistema de tratamiento está constituido por un tanque séptico con una capacidad de 9.691 m^3 compartimentalizado en tres cámaras. Posterior a éste, se encuentran tres FAFA's en paralelo de 0.662 m^3 cada uno, y un tanque de cloración; el cual no se utiliza como sistema de desinfección. Además, el sistema cuenta con un distribuidor de caudal, como se muestra en la Figura 24, detalles del sistema se presentan en el Anexo I. El sistema fue instalado hace 9 años y cada año se le da mantenimiento de extracción de lodos y limpieza del material filtrante. La última operación de mantenimiento fue realizada dos meses antes de iniciar con los muestreos de esta investigación; es decir, en mayo del 2015.

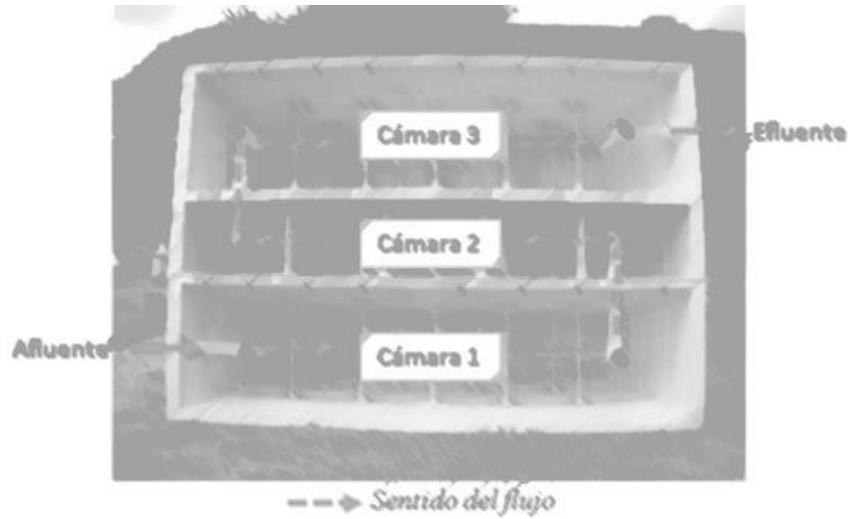


Figura 24. Vista interior de tanque séptico compartimentalizado en tres cámaras.
Fuente: Adaptado de empresa, 2015

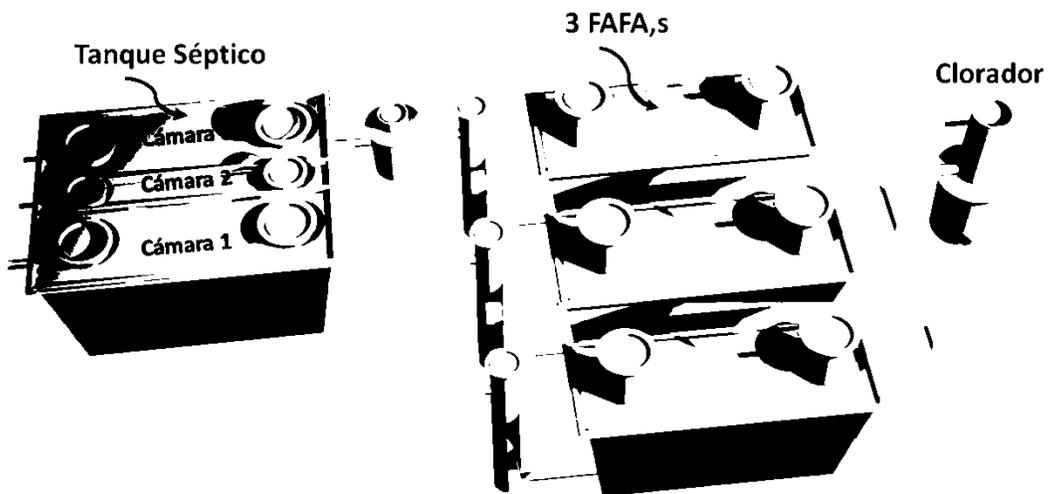


Figura 25. Vista sistema de tratamiento Condominios.
Fuente: Empresa, 2015

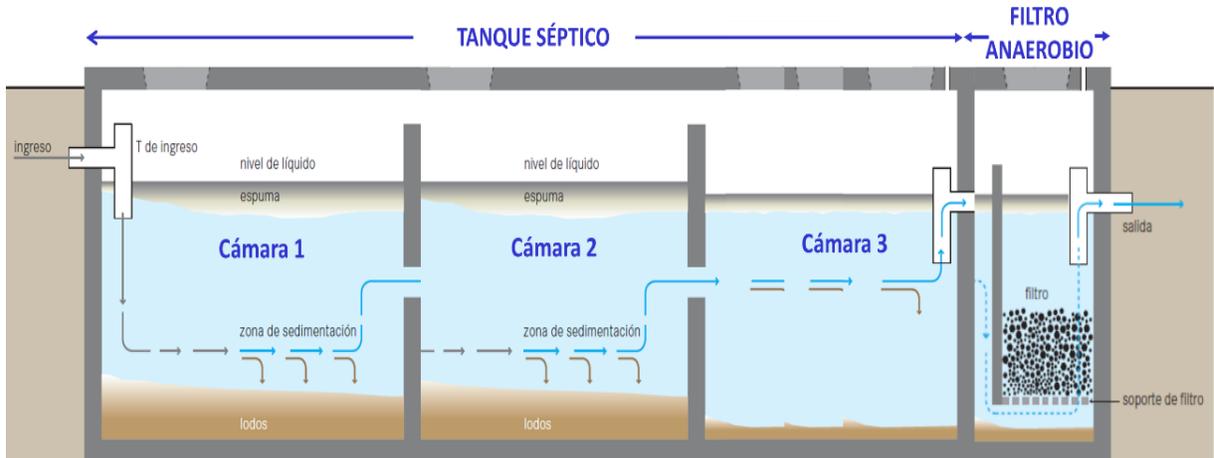


Figura 26. Esquema vista frontal sistema de tratamiento Condominios.
Fuente: EAWAG. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento

El comportamiento del trazador en el tiempo se presenta en la figura 27, donde además se muestra la variabilidad del caudal de entrada al sistema de tratamiento.

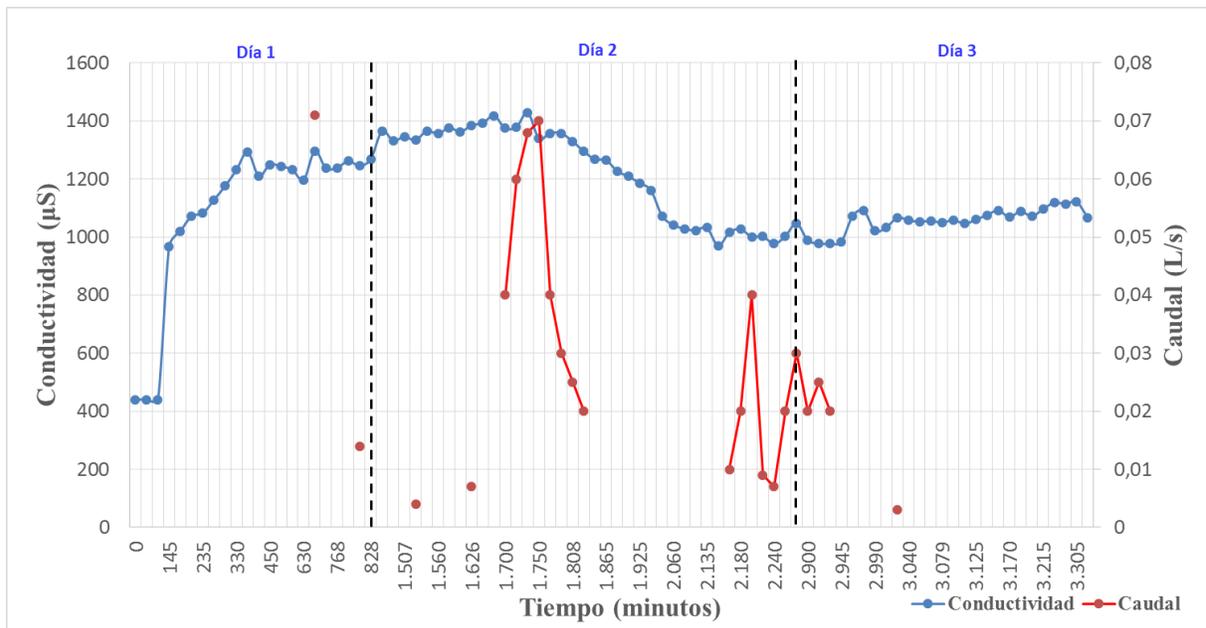


Figura 27. Relación de conductividad y caudal versus tiempo transcurrido del Tanque Séptico de Condominios.

Después de haber agregado la sustancia trazadora, transcurren 145 minutos hasta que se da la primera salida del trazador del tanque séptico; posteriormente, se presenta un comportamiento con cambios abruptos hasta los 3305 minutos (55,6 horas) aproximadamente, que fue el periodo de la prueba, este tiempo total incluye tiempos donde

no hay salida de agua residual el cual ronda entre 10 horas durante la noche y lapsos de 2 horas aproximadamente durante el día.

En los periodos entre los 828 y 1470 minutos correspondientes al lapso horario entre 19:58 p.m. del Miércoles 9 de diciembre del 2015 y las 06:40 a.m. del Jueves 10 de diciembre del 2015; donde no se observó flujo de entrada de agua residual al tanque séptico. Mismo comportamiento observado durante la noche del Jueves 10 de diciembre del 2015, donde el flujo de agua de entrada se detuvo a las 20:30 p.m. que corresponde a los 2305 minutos, reapareciendo caudal hasta los 2900 minutos que equivale a las 06:30 a.m. del Viernes 11 de diciembre del 2015.

El tiempo medio de residencia se determinó a partir de la curva normalizada de concentración del trazador vs. Tiempo, denominada curva F; dando como resultado 1788 minutos (29,8 horas); la cual se presenta en la figura 28, donde se encuentra en función de la conductividad inicial de agua residual de entrada y con la cual se puede describir el progreso de la conductividad acumulada que es proporcional a la concentración de la sustancia trazadora dentro del tanque séptico.

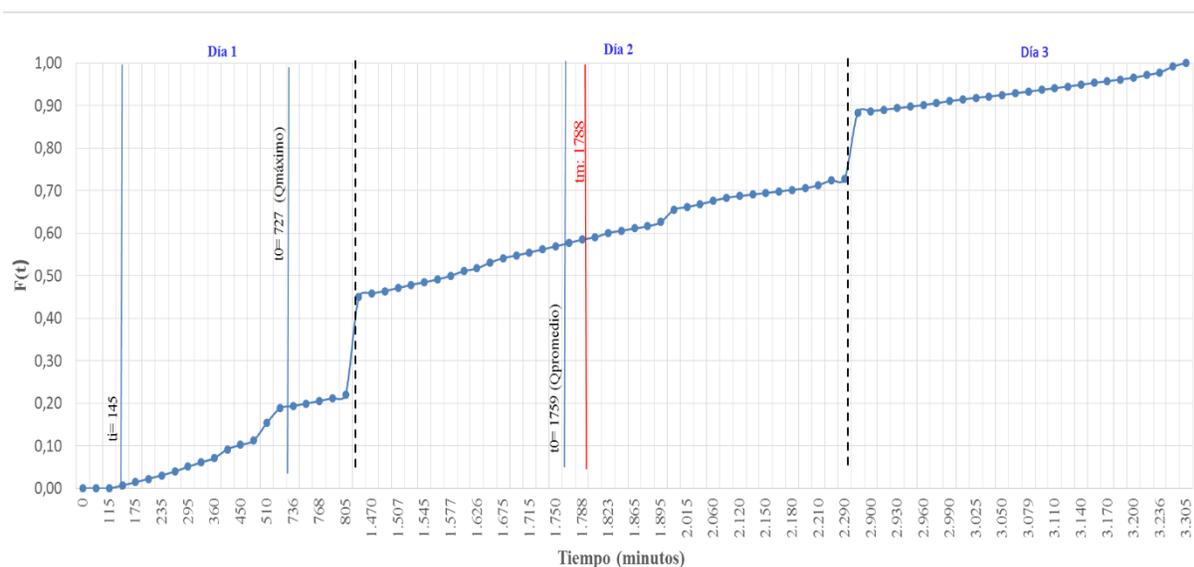


Figura 28. Curva F vs tiempo para el sistema de tratamiento de Tanque Séptico de Condominios

En la figura 28, se aprecia la conductividad acumulada a lo largo de 3 días de muestreo, lo que representa aproximadamente 3400 minutos. Puede observarse, por medio de las líneas negras punteadas la división de cada una de los días, donde se observan escalones asociados al tiempo en el que el tanque no recibe afluente; lo cual corresponde a las horas de la noche. Con la línea roja se representa el tiempo medio, el cual es el instante en el que se reporta el valor que representa el 50% de la conductividad acumulada; éste fue reportado a los 1788

minutos, que equivale a 29.8 horas frente a un total de 3305 minutos que es aproximadamente 55 horas.

A pesar de no obtener una curva semejante a las ideales para alguno de los tipos de flujo, debido a los lapsos de tiempo sin caudal, dado que el sistema se comporta de forma intermitente; fue posible determinar algunos parámetros principales que permiten evaluar la tendencia del tipo de flujo que se asemeja al comportamiento del trazador dentro del tanque séptico de los Condominios.

En la tabla 16, se muestran los principales parámetros del Método de Curva de Tendencia que fueron calculados con el fin de determinar algunas relaciones posteriormente.

Tabla 16. Valores de los principales parámetros del Tanque Séptico de los Condominios.

Parámetro	Descripción del parámetro	Resultado (min)	Resultado (h)
t_i	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador y aparece un cambio de conductividad o concentración en el efluente.	145,0	2,4
t_{10}	Tiempo en el que pasa 10% del total del trazador.	388,0	6,5
t_p	Tiempo en el que se reporta la conductividad máxima.	1733,0	28,9
t_m	Tiempo mediano, 50% del trazador.	1788,0	29,8
t_o (Q promedio)	Tiempo teórico de retención.	1759,6	29,3
t_{90}	Tiempo en que pasa 90% del trazador	3140,0	52,3
t_f	Tiempo hasta que pasa el 100% del trazador	3335,0	55,6
Cond_o (μS)	Conductividad Inicial	440,0	440,0
Cond_p (μS)	Conductividad máximo o pico.	1429,0	1429,0

*Los valores de las conductividades son en unidades de μ S.

Al comparar en la tabla 16, el tiempo de retención teórico para un caudal promedio (t_o) con el tiempo medio de retención real (t_m) obtenido para el caudal promedio, se obtienen valores muy semejantes y cercanos a la vez al momento en el que se reporta la conductividad o concentración máxima; rondando los aproximadamente 1700 minutos; contra un tiempo final de 3335 minutos que corresponden a 55 horas aproximadamente.

En la tabla 17; se presentan los resultados de relaciones para los caudales mínimos, promedios y máximos; con las que es posible obtener tendencias del tipo de flujo del sistema; así como la presencia de anomalías hidráulicas como cortos circuitos o zonas muertas.

Tabla 17. Resultados obtenidos para las relaciones de los principales parámetros en el análisis de la curva de tendencia del Tanque Séptico de Condominios.

Relaciones	En condición de caudal mínimo	Interpretación	En condición de caudal promedio	Interpretación	En condición de caudal máximo	Interpretación
t_0	448,66 horas	-	29,33 horas	-	12,13 horas	-
t_i/t_0	0,01	Cortos circuitos, mezcla completa	0,08	Cortos circuitos Mezcla completa	0,20	Cortos circuitos Mezcla completa
t_m/t_0	0,07	corto circuito	1,02	zona muerta	2,46	zona muerta
t_p/t_0	0,06	mezcla completa	0,98	Flujo pistón	2,38	Mezcla completa

La relación entre el tiempo inicial y el tiempo teórico (t_i/t_0), es uno de los factores que brindan la tendencia del tipo de flujo que se tiene en un reactor, además que detecta la posible presencia de cortos circuitos grandes; en el tanque séptico de Condominios, se obtuvo la incidencia de cortos circuitos y una tendencia hacia flujo de mezcla completa para las tres condiciones de caudal. Cuando el caudal es mínimo, se refuerza la teoría anterior de t_i/t_0 propuesta por Sánchez & Cardona, (2009), con t_m/t_0 con la que se obtuvo un resultado menor a 1, que indica la presencia de cortos circuitos dentro del reactor; mientras que para caudales promedio y máximos, al sobrepasar la unidad, pueden existir problemas con zonas muertas. La relación del tiempo cuando se reportó la conductividad máxima entre el tiempo teórico (t_p/t_0), brinda también la tendencia del tipo de flujo. En este caso, se obtiene para los caudales mínimos un resultado más cercano a 0 por lo que la tendencia se inclina hacia un flujo de mezcla completa; caso contrario al resultado para los caudales promedios donde se obtuvo 0.98 y al ser más cercano a 1 se deduce una tendencia hacia flujo pistón; mientras que las condiciones con caudal máximo al ser mayor a la unidad, debe relacionarse ese valor también con el resultado de t_i/t_0 obteniendo una tendencia hacia mezcla completa. (Pérez (1992); Sánchez & Cardona, (2009)).

Como se pudo observar, algunas de las relaciones son variables en cuanto a la tendencia hacia el tipo de flujo dependiendo de los cambios en los caudales; obteniendo sí en la mayoría de los casos una mayor tendencia a flujo de mezcla completa, presencia de cortos circuitos y zonas muertas. Para complementar, las relaciones antes mencionadas, también se calculó el Índice de Morril y el Número de Peclet. El indicador del índice de Morril, dio como resultado 8.09, el cual según Pérez (1992) y Pérez & Torres (2008); cuando el valor es mayor a 1, existe presencia tanto de flujo pistón como de flujo completamente mezclado; con mayor tendencia a mezcla completa.

El modelo del número de Peclet determinado para el tanque séptico de Condominios dio como resultados valores muy bajos, aproximadamente 0; lo cual según (Pérez & Torres, 2008), es producto de un transporte por dispersión generando un comportamiento con tendencia a flujo de mezcla completa.

Identificación de porcentajes de regímenes de flujo en apartamentos y condominios

El método simplificado de Wolf Resnick, es el modelo por el cual se pueden obtener porcentajes de los comportamientos del flujo dentro de un reactor, que al no ser un flujo ideal, la unidad se encontrará compuesta de un porcentaje de flujo pistón, mezcla completa y zonas muertas (que incluyen cortos circuitos y zonas de estancamiento). (Gómez, 2014).

$$\text{Comportamiento del reactor} = \% \text{ Flujo Pistón} + \% \text{ Mezcla completa} + \% \text{ zonas muertas}$$

En el caso de los sistemas en estudio, no fue posible determinar los porcentajes correspondientes a cada tipo de flujo, ya que como se puede observar en las figuras 29 y 30, las gráficas escalonadas no presenta el comportamiento de un reactor de flujo continuo; debido a que los tanques sépticos al ser de uso doméstico con pocas unidades de vivienda, tienen un afluente intermitente generando una tendencia escalonada donde no se puede trazar una recta tangente a la curva que sea representativa para los datos de campo. Por esto no se pudo identificar los puntos t_1/t_0 y t_2/t_0 , que permiten calcular los porcentajes de flujo pistón, mezcla completa y zonas muertas en cada caso y su identificación se realizó con las tendencias de modelo de flujo presentada en el ítem 4.2.1.

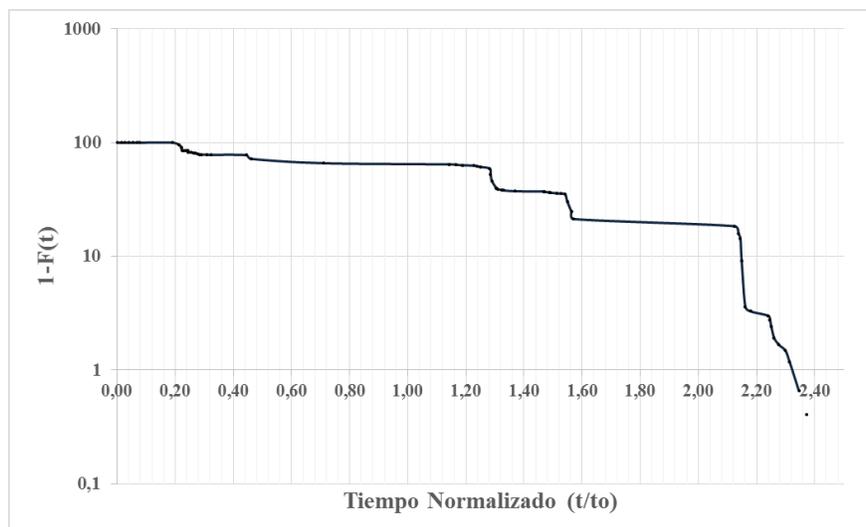


Figura 29. Curva del modelo de Wolf Resnick para el sistema de tratamiento de Apartamentos.

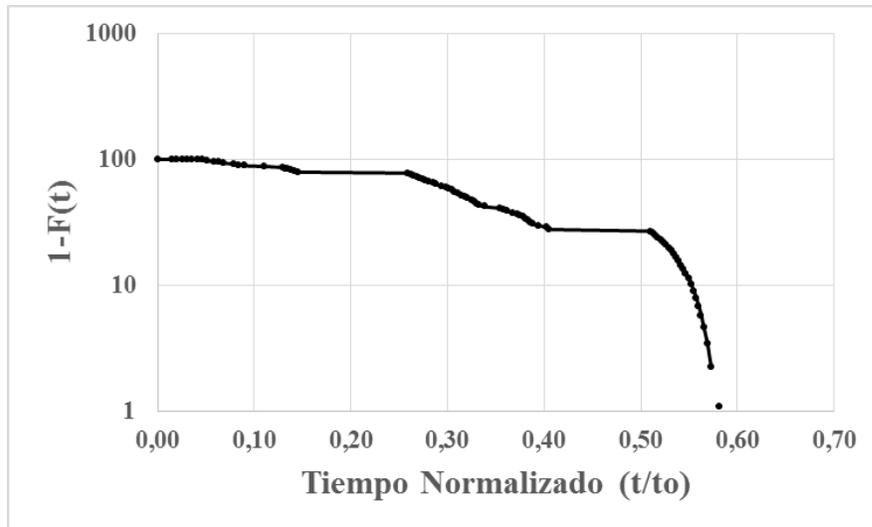


Figura 30. Curva del modelo de Wolf Resnick para el tanque séptico de Condominios.

Sistema de tratamiento de Casa

El agua residual afluyente a este sistema lo constituyen las aguas de inodoros. El sistema de tratamiento es unifamiliar con una capacidad de 1200 L, consta de un tanque séptico elíptico compartimentalizado en dos cámaras e integrado a un FAFa, cuyo material filtrante es piedra cuarta; tal y como se muestra en la Figura 31. El tanque séptico fue instalado en el año 2013 y se le da mantenimiento cada dos años.

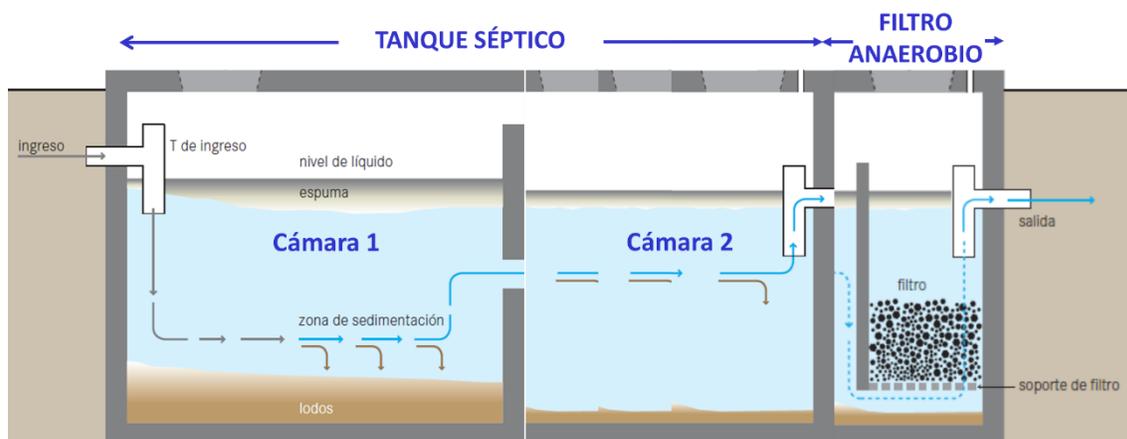


Figura 31. Esquema vista frontal sistema de casa San Rafael de Escazú
Fuente: EAWAG. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento

Para este sistema no se hizo la evaluación hidráulica, ya que este opera por pulsos asociados a las descargas de sanitarios.

5.3 Evaluación de los sistemas de tanque séptico-filtro anaerobio.

Los muestreos para la evaluación de los sistemas de tratamiento, se realizaron en las mismas fechas que los muestreos de caracterización de aguas residuales; siendo 4 fechas diferentes comprendidas entre el miércoles 29 de julio, el miércoles 26 de agosto, el miércoles 7 de octubre y por último, el jueves 5 de noviembre del 2015.

5.3 . 1 Desempeño del sistema de tratamiento de Apartamentos

Para el sistema de Apartamentos los puntos de control fueron la entrada al sistema, la salida del tanque séptico y la salida del filtro anaerobio.

Los parámetros de pH y temperatura, fueron muy estables a lo largo del tren de tratamiento, la tabla 18 presenta los estadísticos de estos parámetros en relación a los datos tomados en los 4 muestreos realizados. Se encuentra que tanto el pH como la temperatura presentan un leve incremento hasta la salida del tanque y luego disminuye en la salida del filtro mostrando valores normales para un funcionamiento adecuado en el sistema de tratamiento, esta disminución el pH se debe a que en el proceso anaerobio que se da en el filtro genera ácidos grasos que reaccionan con la matriz de agua, provocando desequilibrios en la producción y consumo de esos ácidos grasos disminuyendo su pH (Martí, 2006); sin embargo, en términos generales, el proceso es muy estable, como se nota en la poca variación de este parámetro.

Tabla 18. Estadísticos de pH y temperatura en etapas del sistema de tratamiento de Apartamentos

Parámetro	pH			Temperatura (°C)		
	Entrada	Salida de tanque séptico	Salida FAFA	Entrada	Salida de tanque séptico	Salida FAFA
Promedio	7,01	7,06	6,96	24,0	24,6	23,9
Desv. Est	0,24	0,25	0,21	1,0	1,0	0,4
Mediana	7,10	7,17	7,05	24,3	24,5	24,1
Mínimo	6,66	6,65	6,63	21,3	23,6	23,1
Máximo	7,28	7,34	7,22	25,7	27,7	24,6

Los resultados de la SST se presentan gráficamente en la Figura 32 y de DBO₅ en la Figura 33 y con mayor detalle se presentan en las tablas del Anexo II-I.

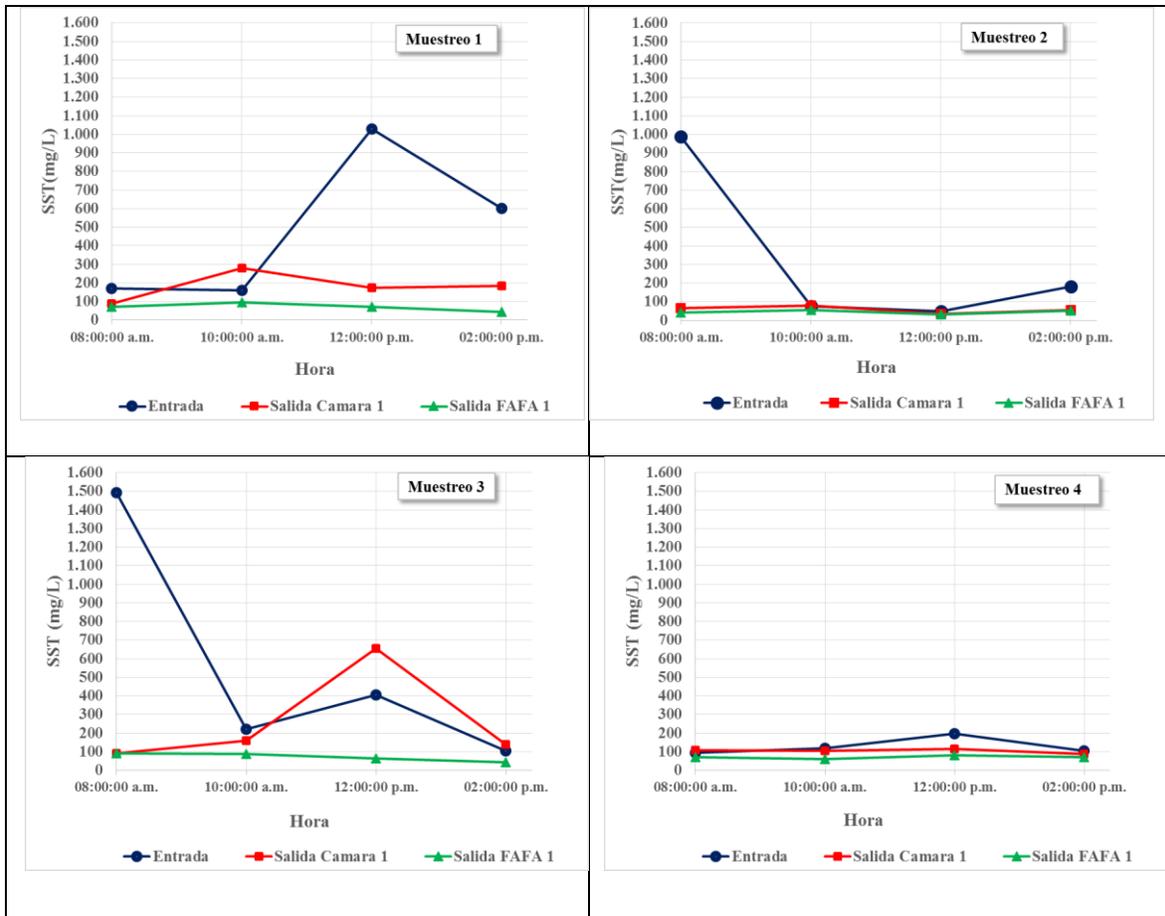


Figura 32. Concentración de SST para cada etapa del sistema de tratamiento de Apartamentos

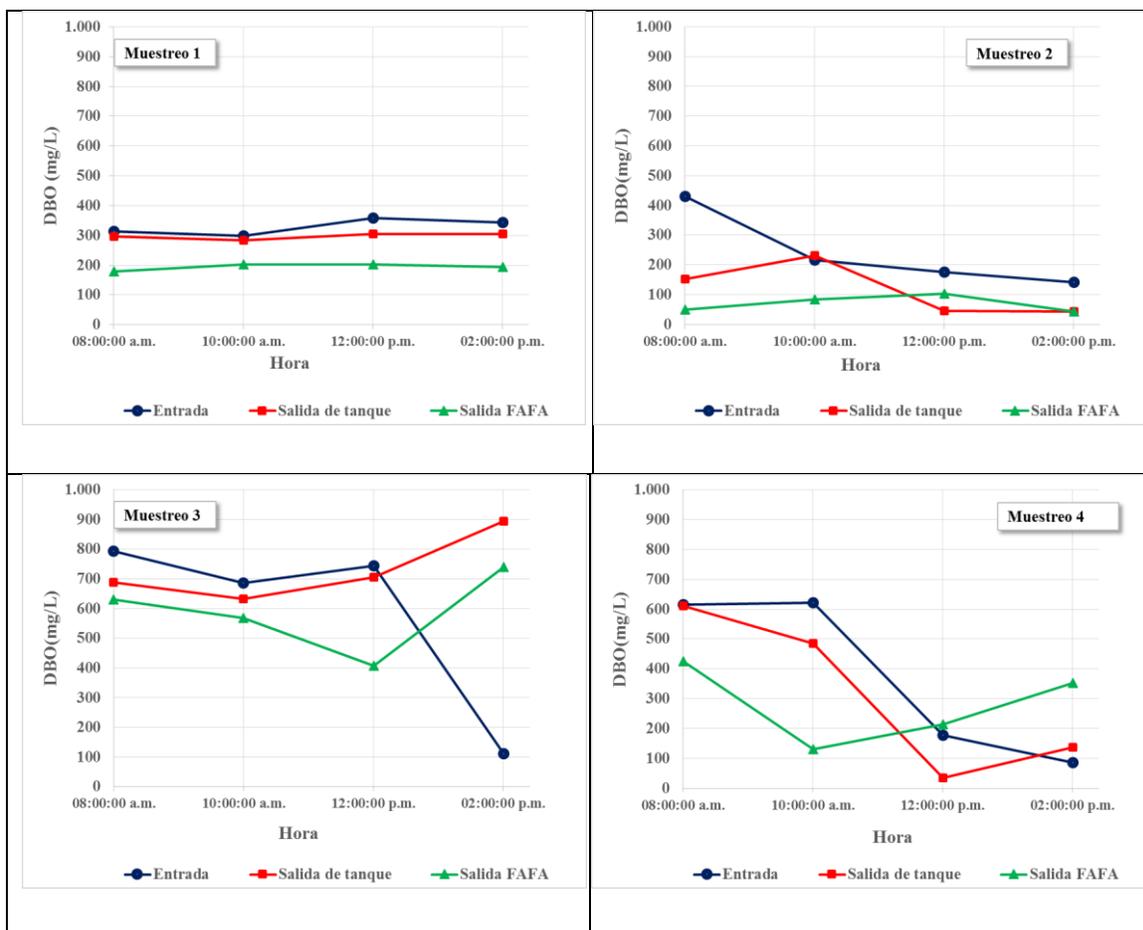


Figura 33. Concentración de la DBO₅ para cada etapa del sistema de tratamiento de Apartamentos.

Tanto los SST como la DBO₅, tiende a disminuir después de cada etapa de tratamiento. Para ambos parámetros los valores de salida en cada etapa son variables, y no son tendientes a un valor, mostrando la dependencia que se presenta de la carga contaminante de entrada, las cuales van a estar asociados a los tiempos de retención de la masa de agua y las variaciones horarias. El sistema no presenta una regulación de las cargas mostrando la sensibilidad y dependencia de la carga de entrada, los caudales, y por ende los tiempos de retención. En términos de SST hay una disminución notable en el tanque séptico, y menos marcada en el FAFA, la cual es la principal función del tanque séptico. Con respecto a la DBO₅, se da una baja remoción en el tanque séptico y una remoción más significativa en el FAFA, que tiene por objetivo de tratamiento el nivel secundario.

Desempeño del sistema de tratamiento de Condominios.

Para el sistema de Condominios, se monitoreó la salida de cámara 1, cámara 3 y salida de FAFAs.

Los parámetros de pH y temperatura fueron muy estables, la tabla 19 presenta los estadísticos de estos parámetros en relación a los datos tomados en los 4 muestreos realizados.

Tabla 14. Estadísticos de pH y temperatura en las etapas del sistema de tratamiento de Condominios.

Parámetro	pH				Temperatura (°C)			
	Entrada	Salida Cámara 1	Salida Cámara 3	Salida FAFAs	Entrada	Salida Cámara 1	Salida Cámara 3	Salida FAFAs
Promedio	7,19	6,99	7,02	7,00	26,0	26,0	26,2	25,8
Desv. Est	0,25	0,12	0,12	0,10	0,5	0,4	0,4	0,6
Mediana	7,20	7,02	7,02	7,00	25,9	26,2	26,3	25,8
Mínimo	6,80	6,80	6,80	6,80	25,4	25,4	25,4	25,0
Máximo	7,50	7,10	7,10	7,20	27,2	26,6	26,7	27,1

El pH mostró una leve disminución a lo largo del tren de tratamiento; esta estabilidad es indicador del equilibrio entre la alcalinidad y la generación de AGV en el sistema. (Martí, 2006). La temperatura, presentada es propia del clima tropical de área de estudio y como lo muestra la baja desviación, no se ve afectada por el cambio estacional.

El comportamiento los SST y la DBO₅, se presentan en la Figura 34 y Figura 35, respectivamente y los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se pueden observar en el Anexo II-II.

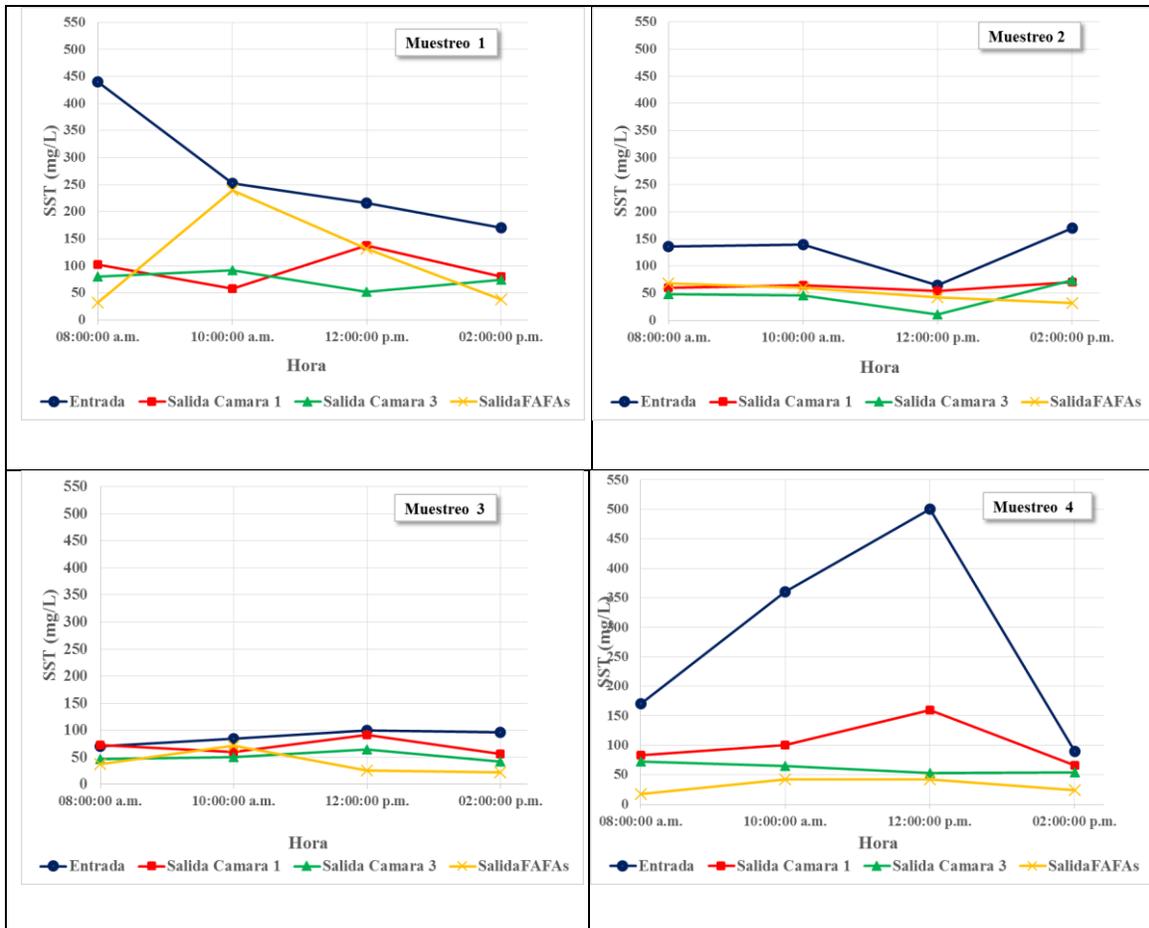


Figura 34. Concentración de SST para cada etapa del sistema de tratamiento de Condominios.

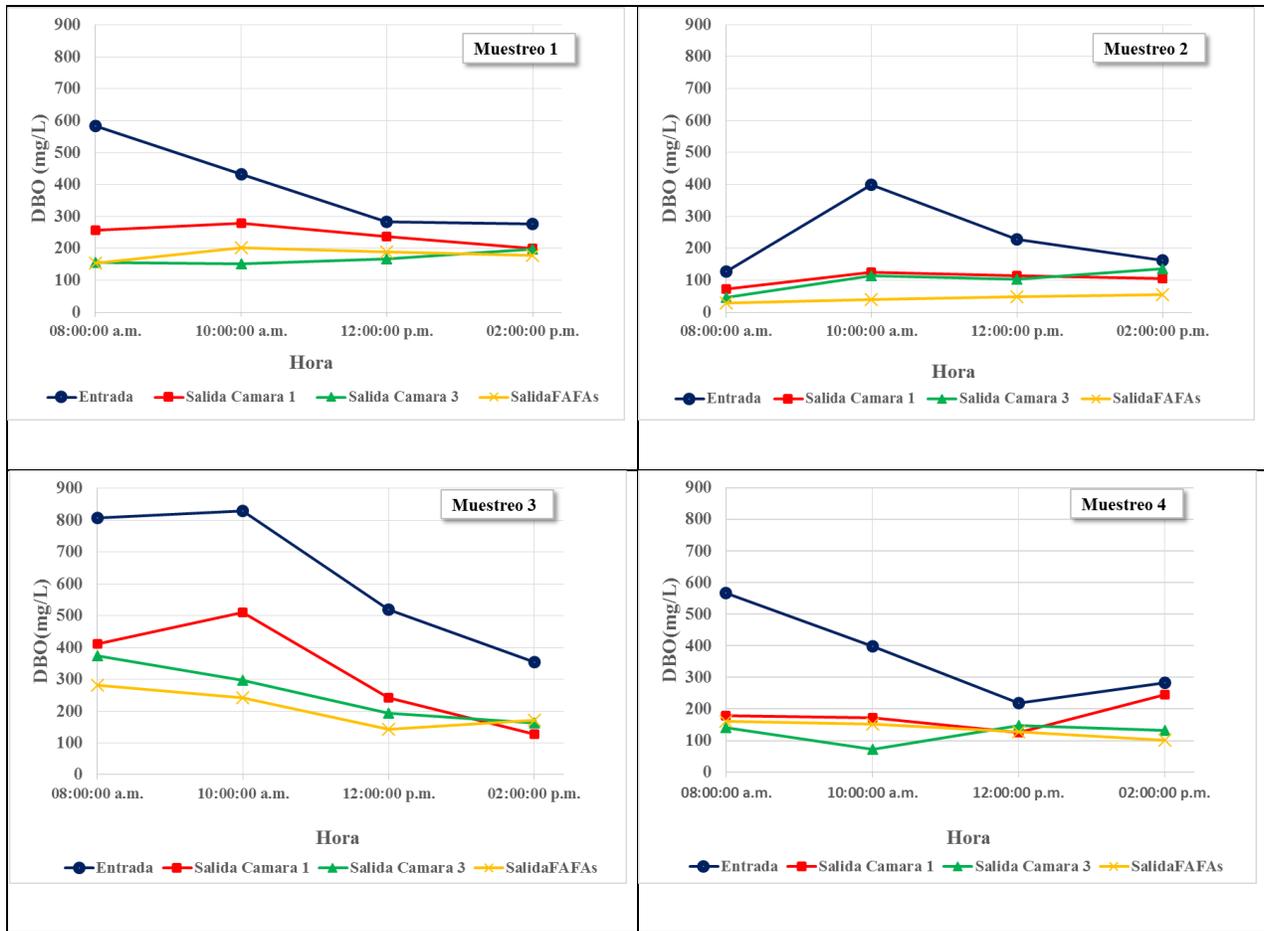


Figura 35. Concentración de la DBO₅ para cada etapa del sistema de tratamiento de Condominios.

En la figura 34 y 35, es posible observar cómo tanto en el parámetro de DBO₅ y los SST, se evidencia una disminución importante entre la cámara de entrada del sistema y la salida de la cámara 1, lo cual comparándolo con la teoría de CEPIS (2003), donde se menciona que la compartimentalización de los tanques sépticos se va a favorecer en el primer compartimento, dándose en este la sedimentación y la digestión de las partículas del agua residual, se estaría cumpliendo. Después de la salida de la cámara 1, los cambios de Sólidos Suspendedos Totales son muy pequeños hasta la salida del sistema; es decir, la sedimentación propia del tratamiento del tanque séptico se efectúa en su mayor parte dentro del compartimento 1 y es casi nula en el recorrido del agua por los filtros anaerobios de flujo ascendente; donde según la figura 35 se da un pequeño descenso o cambio en la DBO₅.

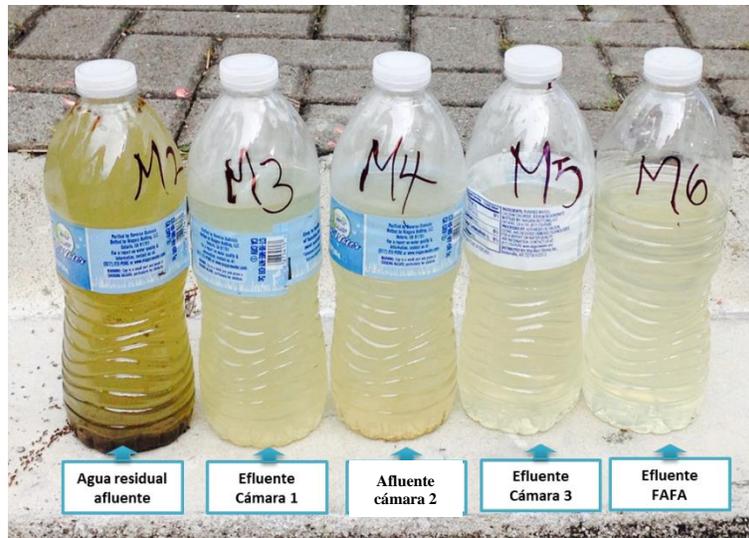


Figura 36. Muestras de cada etapa de tratamiento de Condominios

En la figura 36, se observa una fotografía real del agua extraída en uno de los muestreos en el sistema de tratamiento de Condominios, en la primer botella se presenta el agua residual de entrada al sistema de tratamiento, la cual tiene un color café amarillento con gran contenido de sólidos sedimentados al fondo del recipiente, las otras dos muestras marcadas como M3 y M4 corresponden a aguas con las mismas características ya que pertenecen a la salida de la cámara 1 y la entrada de la cámara 2 respectivamente. Hasta éste punto, entrada a la cámara 2, se visualiza un cambio de color considerable logrado en el primer compartimento. Posteriormente, la botella que aparece como M5, fue extraída del efluente de la cámara 3; es decir, representa el agua efluente al tanque séptico y que es la que se distribuye hacia los tres filtros anaerobios, dando como resultado la muestra M6 que representa el efluente extraído de los FAFA.

Desempeño del sistema de tratamiento de Casa

En este sistema se realizó el monitoreo a la salida de cada etapa del tratamiento, una vez al día, y entre 7:00- 8:00 de la mañana, dado la baja permanencia de los habitantes y que trata solo las aguas provenientes de las descargas del sanitario. Los 4 muestreos realizados, contemplaron un tiempo entre finales de Julio e inicios de Noviembre, llevándose a cabo el primero el Miércoles 29 de Julio, luego el Miércoles 26 de Agosto, el Miércoles 7 de Octubre y por último, el Jueves 5 de Noviembre. En la tabla 20, se presentan los estadísticos de los parámetros in-situ, pH y temperatura, tomados en los últimos 4 muestreos realizados.

Tabla 15. Estadísticos de pH y temperatura en etapas del sistema de tratamiento de Casa Escazú.

PARÁMETRO	pH				Temperatura (°C)			
	Entrada	Salida Cámara 1	Salida Cámara 2	Salida FAFA 1	Entrada	Salida Cámara 1	Salida Cámara 2	Salida FAFA 1
Promedio	7,76	7,82	7,83	7,78	22,0	21,6	21,8	21,5
Desv. Estándar	0,34	0,05	0,08	0,13	0,6	0,4	0,5	0,2
Máximo	8,14	7,87	7,92	7,86	22,4	22,4	22,4	22,4
Mínimo	7,48	7,77	7,76	7,63	21,4	21,4	21,4	21,4
Mediana	7,65	7,81	7,81	7,85	22,3	21,4	21,6	21,5

En la Tabla 20, se aprecia que el pH presenta valores muy estables, los rangos presentados se encuentran dentro de los valores normales para que se dé un adecuado desempeño bacteriano. La temperatura, también presenta valores sin mucho cambio a lo largo del proceso con diferencias muy bajas.

La Figura 37, presenta los valores para SST y la Figura 38 para DBO₅, cuyas tablas de resultados de pruebas de laboratorio se encuentran en el Anexo II-III.

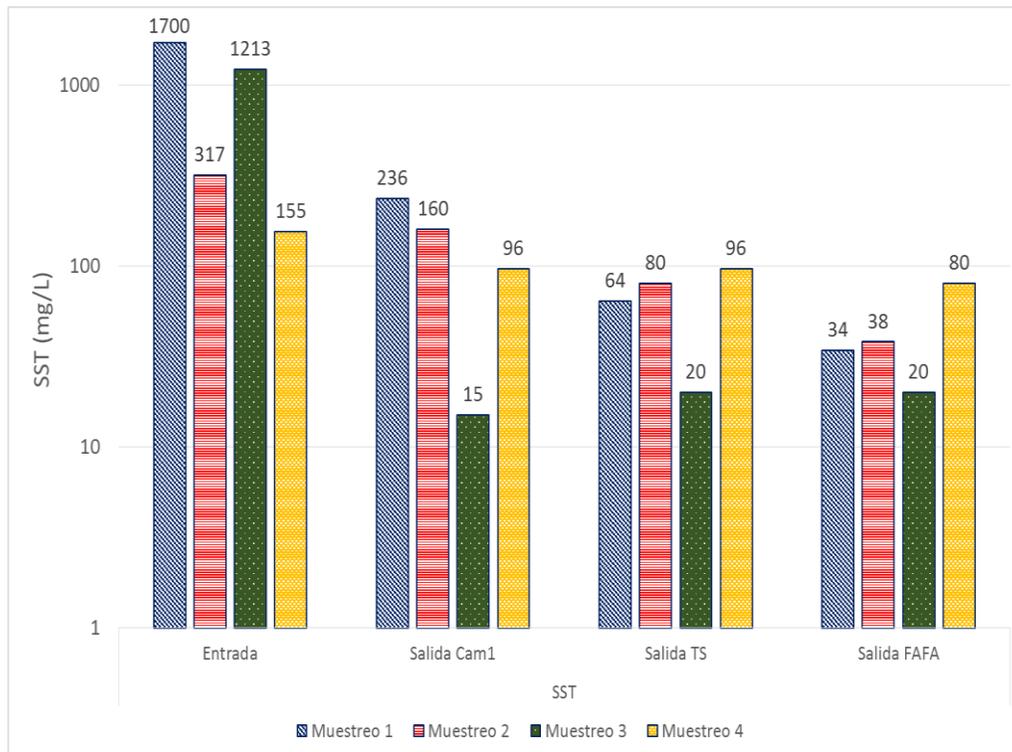


Figura 37. Sólidos Suspendidos Totales para cada etapa del sistema de tratamiento de Casa Escazú.

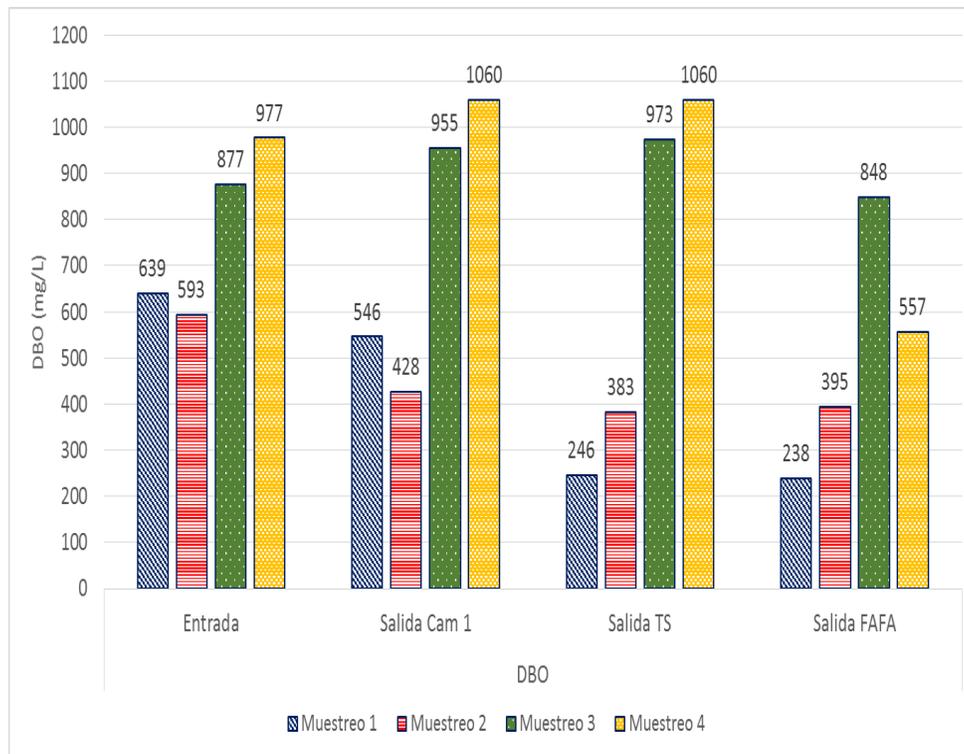


Figura 38. DBO₅ para cada etapa del sistema de tratamiento de Casa Escazú

Tanto las concentraciones de SST como de DBO₅, como se observa en las figuras 37 y 38, disminuye conforme van avanzando en el tren de tratamiento; presentando las diferencias más notorias en la primera cámara, cumpliendo igualmente con las características teóricas de un sistema de tratamiento compartimentalizado, donde CEPIS (2003) establece una mayor remoción en el primer compartimento para tanques sépticos segmentados. Posterior a esa primer división, para ambos parámetros, no hay una baja significativa entre el efluente del tanque séptico y la salida del FAFA.

El proceso en los tres sistemas de tratamiento se inclinan a la remoción de la carga de SST y DBO₅ en cada fase del tratamiento, donde es más notoria en la primera cámara del tanque séptico, por los procesos físicos y biológicos, propios de esta unidad, que propicia los tiempos de retención hidráulicos para la sedimentación de los sólidos y el consumo de la materia orgánica por parte de los microorganismos. (Mara & Sinnatamby, 1986). En el tanque séptico se da una remoción significativa de SST y en menor escala de DBO₅, mientras en el FAFA la remoción de SST es más baja ya que el material particulado en su afluente es menor, propiciándose la remoción de DBO₅ por la densidad microbiana que se da en la biopelícula formada en el lecho filtrante (Busato, R. & Palowsky, U.).

No se determinan porcentajes de eficiencia o remoción precisos dado que los parámetros se comportaron de forma variable en cada fase del tratamiento, mostrando en cada hora de muestreo rangos amplios de comportamiento con desviaciones considerables en los

promedios, exponiendo la sensibilidad que presentan los sistemas de tratamiento pequeños en función de las cargas afluentes y los caudales, en comparación con plantas de tratamiento que funcionen para poblaciones más amplias, donde tanto los caudales como las cargas se amortiguan en el tiempo.

La variación de los caudales asociados a los diferentes usos del agua y dinámicas de los habitantes, afectan los tiempos de retención, teniendo en cuenta que hay masas de agua que se someten a largos tiempos de residencia dado los periodos donde no hay producción de aguas residuales como en las tardes, en las noches y tiempos de retención más cortos asociados a los picos de caudal como los que se presentan en las horas de la mañana o el medio día (Méndez et al. ,2007).

Según el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, N° 33601-MINAE-S, del año 2007; solamente existen los límites máximos permisibles para parámetros físicoquímicos, como la DBO₅ o los SST cuando el efluente del sistema de tratamiento es vertido hacia un alcantarillado sanitario, según el artículo 18 o hacia un cuerpo receptor (artículo 20). En el caso de los sistemas de tratamiento en estudio, se realiza una descarga por infiltración en el sitio a partir de un drenaje, el cual no está normado en el país.

5.4 Caracterización de los lodos

Caracterización físico química

Las características físico químicas de los lodos de los tres sistemas evaluados se presentan en la tabla 21. En el caso de los Condominios y la Casa, al estar compartimentalizado se muestrearon puntos en las diferentes cámaras, a excepción de la cámara 1 del tanque séptico que debido a las condiciones de saturación papel higiénico que se acumula como material flotante.

Tabla 21. Parámetros físico químicos de lodos de tanques sépticos.

Parámetros	Apartamentos	Condominios		Casa Escazú	
	Cámara única	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 1	Cámara 2
DQO (mg/L)	(18261 ±665)	(36028 ±665)	(49141 ±998)	(29653 ±665)	(66026 ±1330)
DBO ₅ (mg/L)	(2658 ±163)	(2064 ±163)	(4272 ±491)	(2598 ±163)	(5346 ±493)
SST (mg/L)	(19500 ±863)	(45250 ±663)	(37750 ±645)	(72000 ±743)	(54875 ±699)
SS (mg/L)	(655±5)	(1000±5)	(937±5)	(937±5)	(900±5)
ST (mg/L)	(93030 ±1113)	(81740 ±978)	(50300 ±602)	(93000 ±1113)	(69200 ±828)
SV (mg/L)	(57110 ±2856)	(46080 ±2304)	(29960 ±1498)	(35160 ±1758)	(34160 ±1708)
SD(mg/L)	(348±6)	(374±6)	(402±6)	(236±6)	Menor 2.5
Fósforo (mg/100g)	(44±2)	(34±2)	(63±2)	(59±2)	(64±2)
Nitrógeno Total(mg/kg)	(12742±15)	(15030±15)	(13165±15)	(1398±15)	(1991±15)
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	(106±3)	(47±3)	Menor 0.5	(188±3)	(142±3)

Como lo presentan las investigaciones de (Méndez et al., 2007), existen rangos amplios para los parámetros que caracterizan los lodos, esto debido a la dependencia del proceso de tratamiento así como la calidad del agua residual de entrada de éstos; los cuales va a diferir según los usos y del país en el que se encuentre ubicado el tanque.

La DBO₅ y DQO en los sistemas analizados, se encuentra que en los tanques compartamentalizados, las cámaras posteriores presentan valores mayores a las cámaras que preceden, indicando que hay un factor de mayor remoción en estas cámaras. Los datos levantados localmente comparados con las referencias de otros estudios, se encuentran dentro de los rangos presentados por Koottatep et al. (2007), que corresponden a un rango entre 600-5500 mg/L para la DBO₅ y en un rango entre 1200 y 76000 mg/L para la DQO. La DBO₅ en el sistema de Casa Escazú con respecto a los Condominios, es más alta dado que esta solo trata aguas provenientes de inodoros, generando afluentes más concentrados que finalmente se acumulan en los lodos teniendo en cuenta el balance de masa.

En cuanto a los sólidos, tanto para los Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos (SS), Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV) y Sólidos Disueltos (SD); es difícil limitarse a los valores o rangos establecidos solo por uno de los autores de la Tabla 3, ya que en algunos casos se superan las referencias; como es el caso de los Sólidos Suspendidos Totales para los puntos de los Condominios y de la casa donde se obtuvieron resultados muy por encima sobre los datos teóricos. Sin embargo, aunque las variaciones entre los resultados obtenidos experimentalmente y los valores teóricos, tienen una explicación que se remonta en las variaciones de las concentraciones de entrada de sólidos que ingresan a los sistemas de tratamiento, además de la digestión de lodos, la cual se ve afectada también por las características geométricas e hidráulicas de las fosas. (Méndez et al, 2005).

En los sistemas compartamentalizados, Condominios y la Casa San Antonio de Escazú, las concentraciones de los sólidos de los lodos disminuyeron entre la primera y la segunda cámara muestreada, siendo la cámara 1 la que remueve la mayor cantidad de sólidos.

El fósforo en las aguas residuales, provienen en su gran mayoría de los residuos humanos y los detergentes utilizados en el hogar, el cual puede presentarse como ortofosfatos solubles o como polifosfatos orgánicos e inorgánicos, de los cuales los fosfatos de origen orgánico, que representan entre un 5 y 15% del total son los que presentan una fracción sedimentable acumulándose en los lodos. (Ronzando, E. & Dapena, J.L). Los resultados de las concentraciones de fósforo para los diferentes sitios de muestreo de lodos, se encuentran por debajo de los valores máximo establecidos principalmente por Metcalf (1995). En el caso de los tanques compartamentalizados, la concentración de fósforo aumenta en la cámara 2 para la casa y en la cámara 3 para los Condominios, esto debido a que en los reactores anaerobios los lodos son asimilados e incrementan a lo largo del tiempo y del espacio. (Ronzando, E. & Dapena, J.L).

Actividad metanogénica específica (AME)

Se evaluó la capacidad de los microorganismos anaerobios para la producción de metano, es decir la actividad metanogénica. Las Figuras 39, 40 y 41, presenta la relación de volumen acumulado de NaOH vs. Tiempo para los tanques de Apartamentos, Condominios y Casa San Rafael de Escazú, respectivamente.

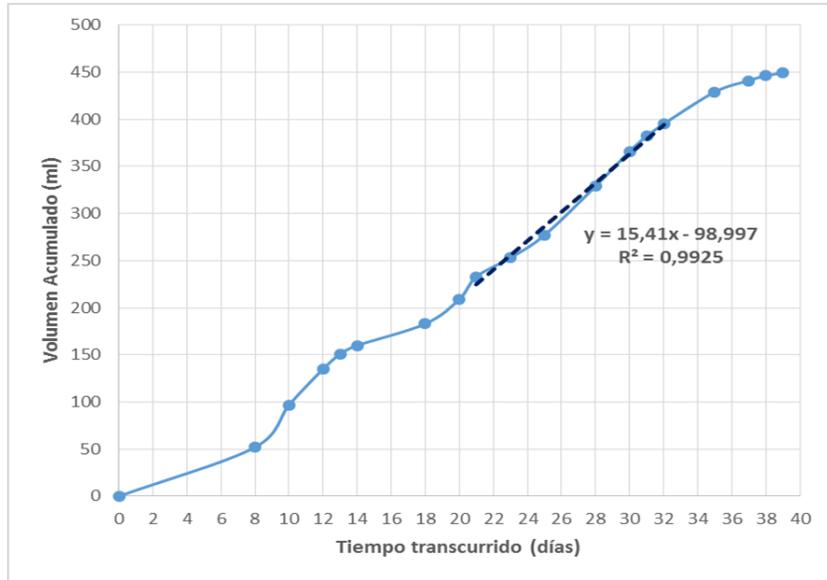


Figura 39. Actividad metanogénica en los lodos del tanque séptico de Apartamentos

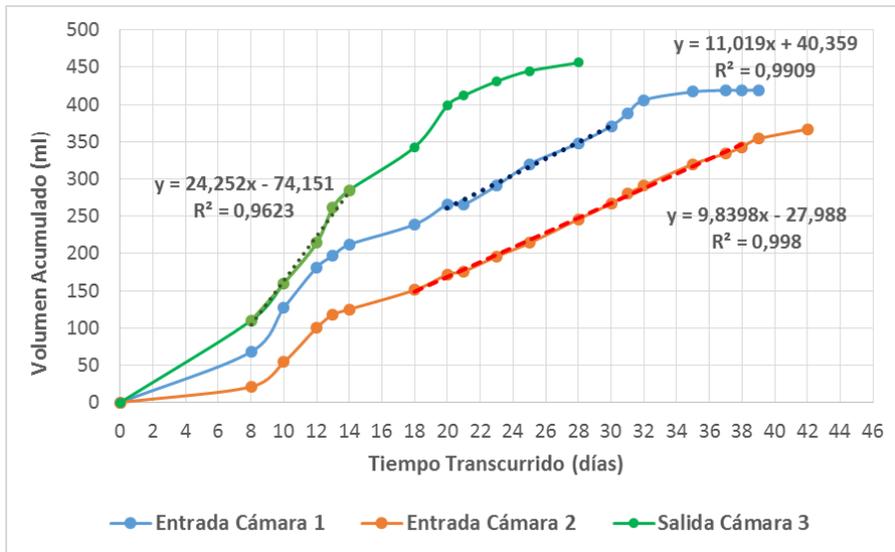


Figura 40. Actividad metanogénica en los lodos del tanque séptico de Condominios.

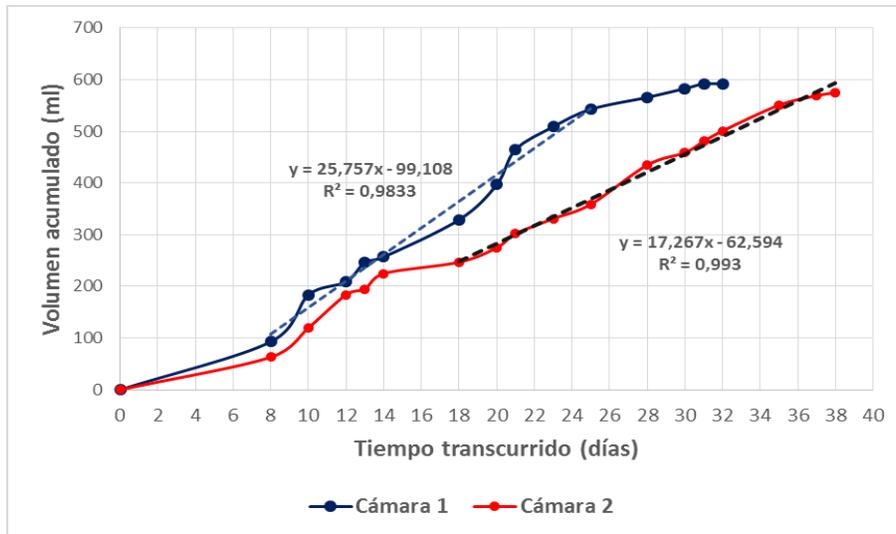


Figura 41. Actividad metanogénica en los lodos del tanque séptico de Casa San Antonio de Escazú

En el caso del lodo del sistema de tratamiento de Apartamentos, se observó una producción de metano durante aproximadamente 40 días, presentándose la mayor actividad entre el día 21 y el día 32, hasta el día 34 donde se notó una pequeña estabilidad en la producción.

En Condominios (figura 40), se evaluaron los lodos de los tres compartimentos en los que si divide el tanque séptico, obteniendo una mayor actividad metanogénica (asociada a la pendiente de la gráfica) para la tercer cámara, siguiendo con el lodo de la cámara 1 y posteriormente la cámara 2 la que presenta una menor actividad metanogénica.

En el tanque séptico de la Casa, se realizó el montaje de la prueba de Actividad Metanogénica en los lodos de la Cámara 1 y la Cámara 2, presentando una actividad entre 30 y 40 días aproximadamente, como se muestra en la figura 41, se observa una mayor pendiente en el lodo del primer compartimento.

Con el método volumétrico de la actividad metanogénica, se puede realizar una aproximación que permita un análisis cuantitativo de la producción de metano para cada lodo, la cual se hace mediante una relación entre la pendiente obtenida de las ecuaciones de las gráficas anteriores con los sólidos volátiles de cada muestra, obteniendo como resultado la cantidad de kilogramos de metano por cada kilogramo de sólidos volátiles por día; la cual se presenta en la tabla 22.

Tabla 16. Cálculo de la producción de actividad metanogénica para los diferentes sistemas de tratamiento.

Punto	Pendiente (%)	SV (g)	AME (kg CH ₄ /kg SV.d)
Apartamentos	15,41	0,02624	37,49
1	15,41	0,03614	27,22
2	9,84	0,03920	16,02
3	24,25	0,02755	56,19
Casa 1	25,76	0,01757	93,58
Casa 2	17,27	0,02688	41,01

Al comparar la AME presentada en la tabla 22, se encuentra que la Casa de San Antonio en la cámara 1 tiene el lodo con mayor actividad metanogénica, lo cual se puede asociar a que el agua residual de éste sistema proviene únicamente de las aguas pardas del hogar, generando mayor carga bacteriana y orgánica rica en nutrientes que da paso a un mejor ambiente microbiano. En el caso de Condominios la cámara 3 generó mayor actividad metanogénica en comparación con las cámaras que le preceden. Con los resultados de las propiedades fisicoquímicas aplicadas a los lodos de los sitios también evaluados en la producción de metano, se muestra la demanda química y bioquímica de oxígeno fue mayor en los sitios en los que se encontró mayor producción de metano, lo cual puede ser explicado con el aumento en la variedad microbiana existente en cada una de las cámaras (Anzola et al., 2008).

Tasa de acumulación de lodos

Para la construcción del perfil de lodos para los diferentes sistemas, se realizaron gráficos (Figuras 42, 43 y 44) donde se referencian la altura de los lodos en tres meses consecutivos, en relación a cada uno de los compartimentos. La línea punteada en cada gráfico corresponde al primer muestreo realizado el Miércoles 29 de julio, la línea de guiones representa la altura de los lodos tomada durante el segundo muestreo el Miércoles 26 de agosto y la línea continua sería el tercer muestreo realizado el Miércoles 7 de octubre en cada caso.

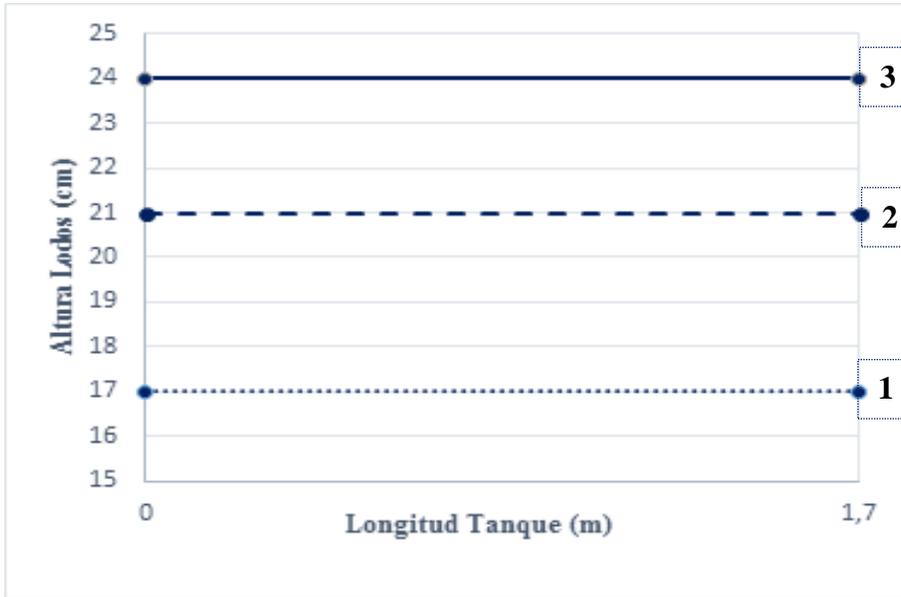


Figura 42. Perfil de acumulación de lodos del tanque séptico de Apartamentos.

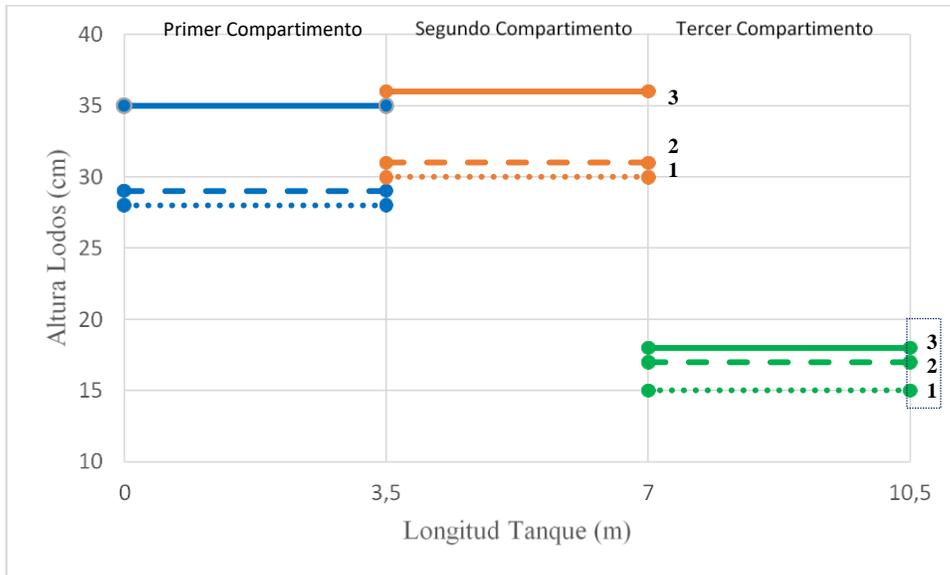


Figura 43. Perfil de acumulación de lodos del tanque séptico de Condominios

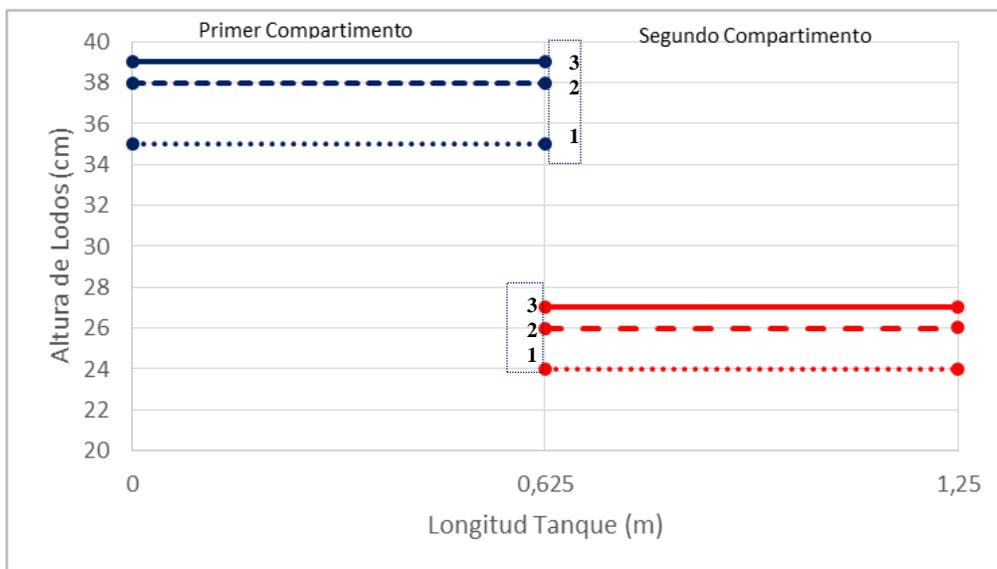


Figura 44. Perfil de acumulación de lodos del tanque séptico de Casa San Antonio de Escazú.

En Apartamentos, la medición de la altura de los lodos se hizo en la entrada del tanque séptico, al no estar este sistema compartimentalizado, se supone una distribución de lodos homogénea a lo largo del sistema; obteniendo variaciones mensuales de 4 y 5 cm de altura (Figura 42). El drenaje de los lodos de este sistema de tratamiento fue realizado en el mes de junio; es decir un mes antes de que se iniciara con el estudio de acumulación.

En el tanque séptico de Condominios, por estar compartimentalizado se realizó la medición de la altura de los lodos en cada una de las cámaras (Figura 43), obteniendo una mayor acumulación en el segundo compartimento, sin embargo es una altura muy semejante al primer compartimento, dándose en estas dos unidades la principal acumulación de sólidos. El incremento es bajo entre los primeros dos meses presentando un aumento de aproximadamente 5 cm entre el segundo y tercer mes. La acumulación en el tercer compartimento es cerca de la mitad de las primeras secciones, debido a que la mayor parte de la sedimentación tiene lugar en las primeras cámaras del tanque séptico sedimentándose en estas últimas sólidos más finos.

En el perfil de lodos de la Casa de San Antonio de Escazú (Figura 44), la mayor acumulación se lleva a cabo en el primer compartimento y a pesar de estar a una distancia tan corta de la segunda sección, las alturas entre las dos cámaras es considerable, teniendo diferencias mayores incluso a 10 cm entre ellas. Además, analizando las acumulaciones mensuales, se observa que entre el primer y segundo mes es cuando se evidencia mayor incremento para ambas secciones y siendo un poco más estables entre el segundo y el tercer mes.

Para los tres sistemas de tratamiento, se presentan cambios significativos tanto entre cada cámara para los tanques compartimentalizados como a través del tiempo. Esta acumulación

va a estar relacionada con el almacenamiento de lodo fresco, dado el corto periodo de seguimiento, el cual aporta un valor de referencia de producción de lodo fresco per cápita.

Con las alturas obtenidas, las áreas de cada tanque y el número de personas de cada sistema de tratamiento, se calculó la tasa de acumulación de lodos referenciándolo con dos periodos, el primero la diferencia con los resultados entre julio y agosto y el segundo entre finales de agosto e inicios de octubre (Ver Tabla 23).

Tabla 23. Tasa de Acumulación de lodos (L/hab.día) para los diferentes sistemas de tratamiento.

Punto Muestreo	Periodo 1	Periodo 2
	Equivalente a (L/hab.día)	
Apartamentos	0,26	0,20
1 Compartimento Condominio	0,07	0,59
2 Compartimento Condominio	0,46	0,52
3 Compartimento Condominio	0,22	0,13
Total Condominio	0,75	1,25
1 Compartimento Casa	0,18	0,07
2 Compartimento Casa	0,07	0,02
Total Casa	0,25	0,09

Es importante recalcar además, que los usos del agua dentro de las casas o apartamentos generadoras de agua residual, la dieta de los habitantes, el mantenimiento de cada sistema; así como alteran la calidad del agua residual, se ven reflejadas también en la calidad y cantidad del lodo. (Mara & Sinnatamby, 1986). Tal es el caso del sistema de tratamiento de los Condominios, donde a lo largo del tiempo muestreado, se observaron grandes concentraciones de papel higiénico que forman masas compactas que dificultaban el funcionamiento adecuado del tanque séptico y sumando una concentración de sólidos al lodo, evidenciado también en la acumulación de éste por sedimentación.

6 Conclusiones

El tipo de aguas residuales y el caudal que reciben los sistemas individuales es muy dependiente de las costumbres y las actividades de las personas.

En los sitios evaluados, los parámetros DBO₅ y SST, son muy fluctuantes en relación tanto a la hora del día como al día de monitoreo, debido a la variación en los caudales de producción. En contraposición los parámetros de pH y temperatura, son muy estables. Los tiempos de retención hidráulica en sistemas de tratamiento individuales como los tanques sépticos, son muy versátiles y dependiente a los valores de caudal los cuales son muy variables a lo largo del día, aunado a la presencia de periodos donde no se producen aguas residuales; por lo que la masa de agua afluyente puede tener diferentes tiempos de residencia.

Los modelos de mezcla obtenidos en los dos tanques sépticos de los sistemas de tratamiento evaluados tienen tendencia a flujo de mezcla completa, según los métodos de curva de tendencia y número de Peclet, con incidencia a presentar cortos circuitos dentro del sistema.

La evaluación fisicoquímica y biológica, indica que los sistemas compuestos por tanques sépticos son muy sensibles y dependientes de las concentraciones de contaminantes en la entrada y los tiempos de retención variables que se presentan, las cuales van a estar asociados a las variaciones horarias; por lo cual no se define un porcentaje de eficiencia, generando resultados en términos de tendencias de baja carga a medida que transitan por cada unidad de tratamiento.

El pH a lo largo del tren de tratamiento es muy estable, con una leve tendencia a la baja, debido a la digestión anaerobia de materia orgánica y por ende la producción de ácidos grasos volátiles, generados por los microorganismos del tanque séptico y el filtro anaerobio de flujo ascendente.

En el sistema de tratamiento de Apartamentos, el cual es un sistema integrado sin compartimentos; se obtiene que la mayor remoción de sólidos suspendidos totales se da en el tanque séptico, mientras que la mayor remoción de DBO₅ tiene lugar al FAFA que actúa como tratamiento secundario.

En los sistemas de tratamiento compartimentalizados, Condominios y Casa, se presenta la mayor remoción de SST y DBO₅ en la primera cámara. En general se presenta la disminución de los valores de estos parámetros conforme el flujo de agua avanza a lo largo del sistema, desde la entrada del tanque séptico hasta la salida del o los filtros anaerobios de flujo ascendente.

Los sistemas individuales para el tratamiento de aguas residuales deben ser analizados bajo normas y principios diferentes a los sistemas colectivos, debido al versátil comportamiento presenciado en los sistemas individuales.

A partir de la caracterización fisicoquímica y la tasa de acumulación de lodos, indica que efectivamente, tanto la calidad como la cantidad del lodo están relacionada a las costumbres de cada región respecto al uso del agua.

Este trabajo permite mostrar que con pocas unidades estudiadas y utilizadas para el tratamiento de aguas residuales ordinarias, el tema requiere una mayor atención, por ser la técnica más utilizada en el país y por la gran cantidad de tipologías que son distribuidas en el mercado, teniendo un uso generalizado sin ningún tipo de control.

7 Recomendaciones

Plantear protocolos de monitoreo más adaptados al funcionamiento de sistemas de tratamiento individuales, implementando medidas con equipos de homogenización de carga a la entrada a la salida o la generación de muestreos compuestos, ya que eficiencias planteadas a partir de entrada y salida en el mismo instante o aun después del tiempo de residencia, no va a ser representativo del sistema.

A partir de la evaluación realizada, se deben proponer mejoras en las tipologías de sistemas de tratamiento evaluados, por ejemplo la colocación de mamparas internas con el fin de mejorar la distribución del agua, para evitar cortos circuitos y promover mayor contacto entre la masa de agua y el lodo.

Desarrollar procedimientos para evaluar y tipificar a nivel de laboratorio los sistemas individuales prefabricados disponibles en el mercado nacional, de manera que se pueda guiar al consumidor sobre los productos; además de simular a escala caudales y condiciones constantes o variables que permitan establecer cuales escenarios son los más adecuados para lograr un mejor funcionamiento.

Promover campañas de concientización en la población y usuarios, sobre un adecuado uso y mantenimiento de los tanques sépticos y sistemas de tratamiento individuales de aguas residuales.

Realizar y entregar a los usuarios Manuales con una guía clara y básica de la operación y mantenimiento que pueden realizarse periódicamente en los sistemas de tratamiento compuestos por tanque séptico y filtro anaerobio, con el fin de mejorar el funcionamiento de los procesos.

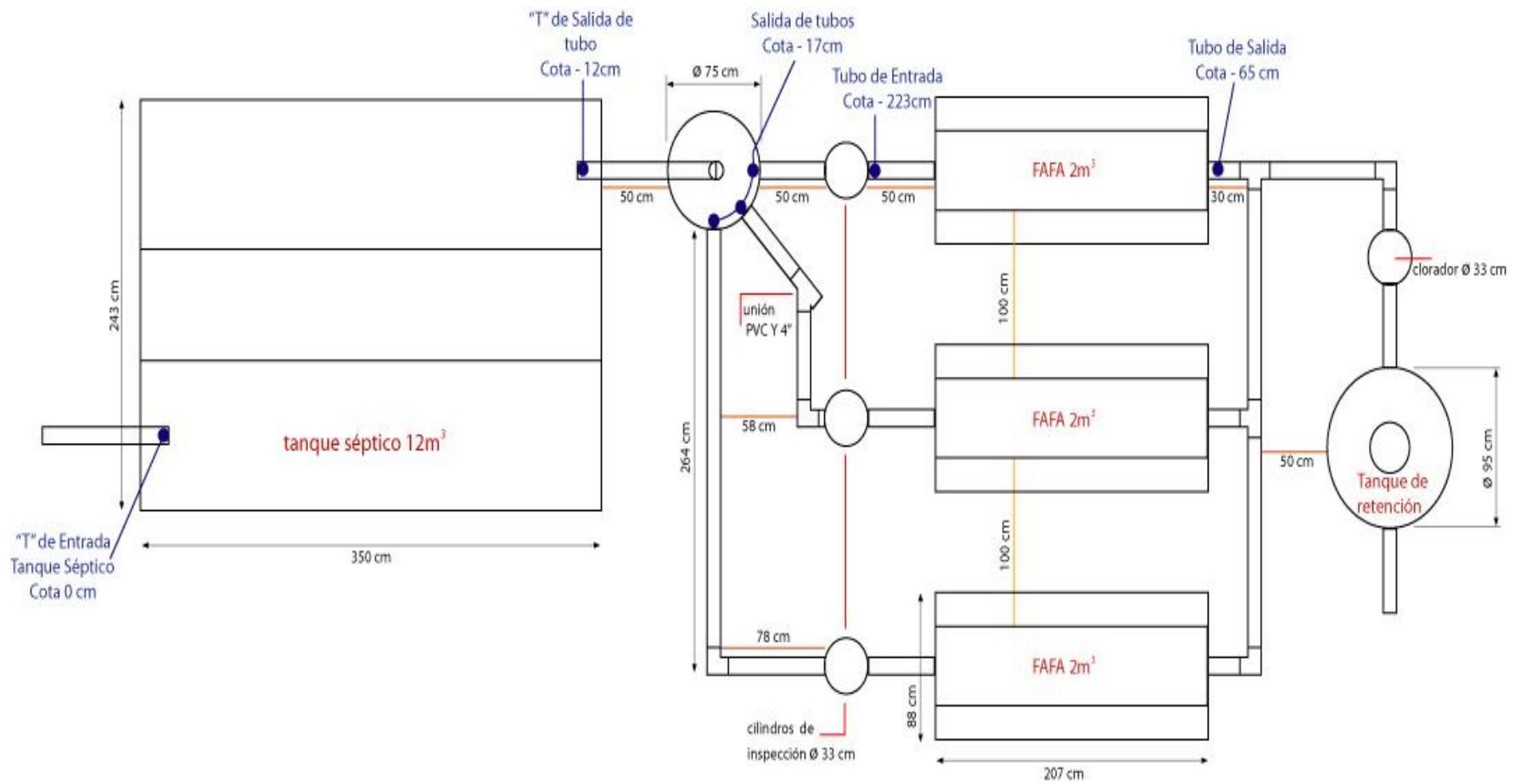
Promover el desarrollo de una norma propia para sistemas individuales ya que actualmente existe una tendencia a la comparación el funcionamiento de éstos con parámetros desarrollados para sistemas colectivos.

8 Bibliografía

- Afonso Matangue, M. (2011). *Comportamento Hidrodinamico e cinético dos reatores anaeróbios compartimentado (RAC) e manta de lodo (UASB) operado em série*. Lavras: UFLA.
- Andrade, C. O.; Melo, H. N.; Lucas, M. (2001). *Análise comparativa de filtros anaeróbios com fluxo ascendente e fluxo descendente afogado*. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária E Ambiental, Paraíba, Brasil.
- Araya, J. (2012). *Modelación del cloro residual en la red de distribución del acueducto la Sirena, Cali*. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Barker, W, & Stuckey, D. (1999). *The use of the anaerobic baffled reactor for wastewater treatment*. A Review Water Research, 1559-1978.
- Busato, R. , & Palowsky, U. . (2005). *Estudo Cinético De Remoção De Matéria Orgânica De Um Filtro Anaeróbio De Fluxo Ascendente Usado Como Tratamento De Efluente De Reator Uasb: Estudo De Caso Da Ete De Imbituva*. Curitiba, Brasil.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2003). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques inhoff y lagunas de estabilización*, 40.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (CEPIS). (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Filtración Rápida*. Perú.
- Chi Tec Mauricio A. (2005). *Influencia de la temperatura en la remoción de materia orgánica de una fosa séptica*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- (CIDTA), (s.f.). Obtenido de Universidad de Salamanca: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- Crites R, Tchobanoglous G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*, 1ª. Edición, Mc. Graw Hill, Colombia.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2005). *Water Treatment - Principles and Design* (2nd Edition).
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH 's Water Treatment Principles and Design* (Third Edit.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Department of Environment and Conservation. (2011). *Evaluation of Potable Water Storage Tanks in Newfoundland and Labrador and their Effect on Drinking Water Quality*. Canada.
- EAWAG. Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento. Versión en Español por: Alianza por el Agua y Cooperación Suiza en América Central.
- FOCARD-APS. (2013b). *“Situación actual y perspectivas Costa Rica. Gestión de las excretas y aguas residuales”*.

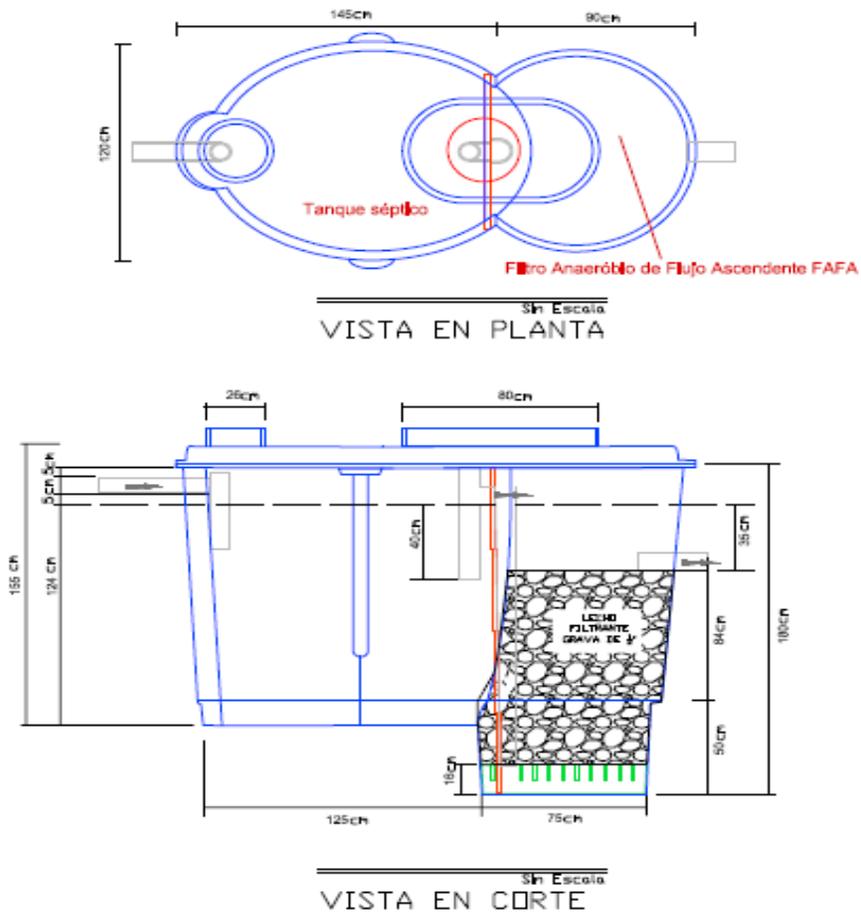
- Gómez, L. (2011). Uso de trazadores para determinar tiempos de retención en las lagunas de la Planta Piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Gómez, A.L. (2014). *Estudio del efecto del almacenamiento sobre la calidad de agua en un tanque de distribución*. Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica.
- Leonardo, A. D. (2011). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la central ecuatoriana de servicios agrícolas-Río Bamba 2013. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. Tomado de:<http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/1468/1/34T00246.pdf>
- López, E.; Martínez, J.G.; García, J.L. (2014). *Determinación de Sólidos suspendidos totales y Sólidos Suspendidos Volátiles*. Universidad del Mar, Puerto Ángel. San Pedro Pochutla, México.
- Mara, D. (2003). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Earthscan. London, Inglaterra.
- Mara, D., y Sinnatamby, G. S. (1986). *Rational design of septic tanks in warm climates*. The Public Health Engineer. Inglaterra.
- Martí, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Dissertation.com. Florida, USA.
- Méndez, R., Guijón, A. & Quintal, C. (2007). *Determinación de la tasa de acumulación de lodos en fosas sépticas de la ciudad de Mérida, Yucatán*. Yucatán, México.
- OPS. Banco Mundial. (2000). Sistemas sépticos. In *Tecnologías apropiadas en Agua potable y Saneamiento básico* (p. 152 p).
- Pérez, J. (1992). *Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención*. In V. Maldonado (Ed.), *Manual de evaluación*. Tomo II. Lima, Colombia: CEPIS/OPS.
- Pérez, A. & Torres, P. (2008). *Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo*. Área Académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Quiterio, T. (2014). *Tratamiento de Agua Residual Doméstica Mediante el Uso de un Filtro Anaerobio Empacado con Espuma de Poliuretano a Diferentes Tiempos de Retención Hidráulica*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.
- RAS. (2000). *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Basico República de Colombia Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico*. 22 De Noviembre, 45. Recuperado de: http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7._Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf
- Rodríguez, J. & Mañunga, T. (2012). *Effect of organic matter fractions on the performance of a pulp and paper mill wastewater treatment system*. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica 15: 447-455.
- Ronzano, E. & Dapena, J.L. (s.f). *Eliminación de fósforo en las aguas residuales*. CIDTA. Recuperado de: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/fosforo.pdf>

- Rosales, E. (2005). "*Tanques sépticos. Conceptos teóricos base y aplicaciones.*" Tecnología en Marcha, Costa Rica.
- Sánchez, J. & Cardona, S. (2009). *Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala.* Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Sarmiento, M., Montoya, O., & Ortiz, J. (2014). Impacto de aguas grises en propiedades físicas del suelo. *Revista Tecno Lógicas*, 17(32), 57-65.
- Simón, S. (2015). *Determinación De La Concentración De Nitrógeno En Lodos Activados Para Su Uso Como Biofertilizante.* Torreón, México.
- Torres, P., & Pérez, A. (2010). *Actividad Metanogénica: Una herramienta de control y Optimización de Sistemas de Tratamiento Anaerobios de Aguas Residuales.* Cali, Colombia: EIDENAR, Universidad del Valle .
- Torres, P. (2012). *Perspectivas del Tratamiento Anaerobios de Aguas Residuales Domésticas en Países en Desarrollo.* Revista EIA, ISSN 1794-1237. Número 18, p. 115-129. Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín, Colombia.
- Varila, J. A. & Díaz, F.E. (2008). "*Sewage treatment by activated sludge at laboratory scale.*" *Journal of technology* 7: 21-28.
- Wills, B., Vélez, S., Arboleda, A., & Garcés, J. P. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen.* Revista EIA, ISSN 1794-, 93–105.
- Zamora, F., Rodríguez, N; Torres, D y Yendis, H. (2008). "*Efectos del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de coro, estado Falcón.*" *Bioagro* 20: 193-199.



Esquema 2. Diseño en planta del Sistema de Tratamiento de Condominios.

VISTA EN PLANTA Y CORTE SISTEMA DE TRATAMIENTO
APARTAMENTOS SAN ANTONIO DE ESCAZU



Esquema 3. Diseño del Sistema de Tratamiento de Casa.

Anexo II. Estadísticas de los análisis físico-químicos para los diferentes sistemas de tratamiento.

II-I. Estadísticas del Sistema de Tratamiento de Apartamentos.

Tabla II-I-1. Resultados de la Evaluación de Temperatura en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Apartamentos.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque Séptico				FAFA	
		Entrada		Salida de tanque		Salida FAFA	
		Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre
2	26/08/2015 08:30	23,6	0,1	23,8	0,1	24,1	0,1
	26/08/2015 10:25	23,6	0,1	27,7	0,1	24,6	0,1
	26/08/2015 12:12	24,6	0,1	24,4	0,1	24,1	0,1
	26/08/2015 14:15	24,2	0,1	24,7	0,1	23,6	0,1
3	07/10/2015 07:30	23,8	0,1	24,0	0,1	23,1	0,1
	07/10/2015 09:22	24,5	0,1	24,2	0,1	24,0	0,1
	07/10/2015 11:30	21,3	0,1	24,5	0,1	23,9	0,1
	07/10/2015 13:25	25,7	0,1	24,7	0,1	24,4	0,1
4	05/11/2015 07:55	23,6	0,1	23,6	0,1	23,7	0,1
	05/11/2015 10:00	24,4	0,1	24,3	0,1	24,1	0,1
	05/11/2015 12:12	24,4	0,1	24,8	0,1	24,1	0,1
	05/11/2015 14:15	24,3	0,1	24,6	0,1	23,9	0,1
PROMEDIO		24,0	1,0	24,6	1,0	24,0	0,4
DESV. EST		1,0		1,0		0,4	
MEDIANA		24,3	0,1	24,5	0,1	24,1	0,1
MAXIMO		25,7	0,1	27,7	0,1	24,6	0,1
MINIMO		21,3	0,1	23,6	0,1	23,1	0,1

Tabla II-I-2. Resultados de la Evaluación de pH en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Apartamentos.

Fecha-Hora	Tanque séptico				FAFA	
	Entrada		Salida de tanque		Salida FAFA	
	pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre
26/08/2015 08:30	6,69	0,01	6,73	0,01	6,63	0,01
26/08/2015 10:25	6,70	0,01	6,65	0,01	6,70	0,01
26/08/2015 12:12	6,66	0,01	6,74	0,01	6,66	0,01
26/08/2015 14:15	6,75	0,01	6,80	0,01	6,78	0,01
07/10/2015 07:30	7,04	0,01	7,13	0,01	7,22	0,01
07/10/2015 09:22	7,17	0,01	7,18	0,01	7,07	0,01
07/10/2015 11:30	7,09	0,01	7,15	0,01	7,05	0,01
07/10/2015 13:25	7,11	0,01	7,21	0,01	7,04	0,01
05/11/2015 07:55	7,21	0,01	7,22	0,01	7,04	0,01
05/11/2015 10:00	7,28	0,01	7,26	0,01	7,10	0,01
05/11/2015 12:12	7,25	0,01	7,34	0,01	7,12	0,01
05/11/2015 14:15	7,20	0,01	7,30	0,01	7,16	0,01
PROMEDIO	7,01	0,07	7,06	0,07	6,96	0,06
DESV. EST	0,24		0,25		0,21	
MEDIANA	7,10	0,01	7,17	0,01	7,05	0,01
MAXIMO	7,28	0,01	7,34	0,01	7,22	0,01
MINIMO	6,66	0,01	6,65	0,01	6,63	0,01

Tabla II-I-3. Resultados de la Evaluación de DBO₅ en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Apartamentos.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico				FAFA	
		Entrada		Salida de tanque		Salida FAFA	
		DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre
1	28/07/2015 07:55	312,45	137,25	296,55	138,52	178,38	30,94
	28/07/2015 10:05	298,20	129,82	282,60	134,92	203,13	38,36
	28/07/2015 12:10	358,80	158,67	304,50	146,37	201,75	39,24
	28/07/2015 14:15	343,50	146,37	304,80	150,19	194,50	47,38
2	26/08/2015 08:30	429,20	54,60	152,00	131,64	50,83	15,49
	26/08/2015 10:25	216,30	55,58	230,40	0,90	83,00	6,24
	26/08/2015 12:12	176,40	5,09	46,50	0,28	103,75	44,19
	26/08/2015 14:15	142,50	19,09	42,90	15,70	44,13	10,43
3	07/10/2015 07:30	793,33	126,34	688,58	5,77	631,33	83,91
	07/10/2015 09:22	687,08	17,56	633,08	16,38	567,89	35,12
	07/10/2015 11:30	744,89	51,40	704,58	56,45	408,33	130,58
	07/10/2015 13:25	111,50	0,67	894,33	47,61	739,83	13,20
4	05/11/2015 07:55	614,83	6,84	610,83	37,01	424,08	57,39
	05/11/2015 10:00	622,50	41,72	484,58	147,20	129,75	39,95
	05/11/2015 12:12	178,08	74,36	35,25	30,05	214,08	36,18
	05/11/2015 14:15	84,75	6,01	135,75	74,60	259,00	1,56
PROMEDIO		382,14	238,37	365,45	270,25	277,11	214,46
DESV. ESTÁNDAR		238,37		270,25		214,46	
MEDIANA		327,98	53,00	300,53	52,03	202,44	37,27
MÁXIMO		793,33	126,34	894,33	47,61	739,83	13,20
MÍNIMO		84,75	6,01	35,25	30,05	44,13	10,43

Tabla II-I-4. Resultados de la Evaluación de SST en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Apartamentos.

Fecha-Hora	Tanque séptico				FAFA	
	Entrada		Salida Camara 1		Salida FAFA 1	
	SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre
28/07/2015 07:55	43,3330	0,0001	90,0000	0,0001	72,0000	0,0001
28/07/2015 10:05	160,0000	0,0001	280,0000	0,0001	94,0000	0,0001
28/07/2015 12:10	1030,0000	0,0001	175,0000	0,0001	72,0000	0,0001
28/07/2015 14:15	600,0000	0,0001	184,0000	0,0001	44,0000	0,0001
26/08/2015 08:30	988,0000	0,0001	66,0000	0,0001	42,0000	0,0001
26/08/2015 10:25	76,6667	0,0001	80,0000	0,0001	56,0000	0,0001
26/08/2015 12:12	48,0000	0,0001	34,0000	0,0001	32,0000	0,0001
26/08/2015 14:15	180,0000	0,0001	56,0000	0,0001	52,0000	0,0001
07/10/2015 07:30	1493, 3333	0,0001	90,0000	0,0001	90,0000	0,0001
07/10/2015 09:22	220,0000	0,0001	160,0000	0,0001	86,6667	0,0001
07/10/2015 11:30	405,0000	0,0001	655,0000	0,0001	63,3330	0,0001
07/10/2015 13:25	105,0000	0,0001	140,0000	0,0001	43,3330	0,0001
05/11/2015 07:55	96,0000	0,0001	108,0000	0,0001	72,0000	0,0001
05/11/2015 10:00	120,0000	0,0001	103,3333	0,0001	60,0000	0,0001
05/11/2015 00:12	196,6670	0,0001	115,0000	0,0001	80,0000	0,0001
05/11/2015 14:15	103,3333	0,0001	87,5000	0,0001	70,0000	0,0001
PROMEDIO	291,4667	325,9309	151,4896	147,0582	64,3333	18,4961
DESV. ESTÁNDAR	325,9309		147,0582		18,4961	
MEDIANA	160,0000	0,0001	105,6667	0,0001	66,6665	0,0001
MÁXIMO	1030,0000	0,0001	655,0000	0,0001	94,0000	0,0001
MÍNIMO	43,3330	0,0001	34,0000	0,0001	32,0000	0,0001

II-II. Estadísticas del Sistema de Tratamiento de Condominios.

Tabla II-II-1. Resultados de la Evaluación de Temperatura en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Condominios.

Fecha-Hora	Tanque séptico						FAFAs	
	Entrada		Salida Cámara 1		Salida Cámara 3		Salida	
	Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre
26/08/2015 09:00	26,5	0,1	26,0	0,1	26,6	0,1	25,5	0,1
26/08/2015 11:02	25,7	0,1	26,0	0,1	26,1	0,1	26,1	0,1
26/08/2015 13:18	26,6	0,1	26,3	0,1	26,6	0,1	27,0	0,1
26/08/2015 15:05	25,7	0,1	25,6	0,1	26,6	0,1	26,1	0,1
07/10/2015 08:00	25,2	0,1	26,1	0,1	26,0	0,1	24,9	0,1
07/10/2015 10:05	27,1	0,1	27,0	0,1	26,5	0,1	26,1	0,1
07/10/2015 12:00	27,4	0,1	26,8	0,1	26,7	0,1	26,2	0,1
07/10/2015 14:05	27,0	0,1	26,4	0,1	26,3	0,1	25,3	0,1
05/11/2015 06:20	25,8	0,1	25,4	0,1	25,4	0,1	25,4	0,1
05/11/2015 08:24	24,7	0,1	25,6	0,1	25,6	0,1	25,3	0,1
05/11/2015 10:19	26,0	0,1	26,4	0,1	26,3	0,1	26,0	0,1
05/11/2015 12:25	25,7	0,1	25,5	0,1	25,8	0,1	25,6	0,1
PROMEDIO	26,1	0,2	26,1	0,1	26,2	0,1	25,8	0,2
DESV. ESTÁNDAR	0,8		0,5		0,4		0,6	
MEDIANA	25,9	0,1	26,1	0,1	26,3	0,1	25,8	0,1
MAXIMO	27,4	0,1	27,0	0,1	26,7	0,1	27,0	0,1
MINIMO	24,7	0,1	25,4	0,1	25,4	0,1	24,9	0,1

Tabla II-II-2. Resultados de la Evaluación de pH en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Condominios.

Muestreo	Fecha	Tanque séptico						Salida FAFAs	
		Entrada		Salida Cámara 1		Salida Cámara 3		Salida	
		pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre
2	26/08/2015 09:00	7,04	0,01	6,80	0,01	6,86	0,01	6,84	0,01
	26/08/2015 11:02	6,83	0,01	7,07	0,01	6,8	0,01	6,79	0,01
	26/08/2015 13:18	7,36	0,01	7,10	0,01	6,79	0,01	6,81	0,01
	26/08/2015 15:05	7,29	0,01	7,10	0,01	6,94	0,01	6,89	0,01
3	07/10/2015 08:00	6,96	0,01	6,85	0,01	6,99	0,01	7,12	0,01
	07/10/2015 10:05	6,91	0,01	7,10	0,01	6,95	0,01	6,89	0,01
	07/10/2015 12:00	6,97	0,01	6,89	0,01	7,06	0,01	7,13	0,01
	07/10/2015 14:05	7,11	0,01	6,92	0,01	7,11	0,01	7,19	0,01
4	05/11/2015 06:20	7,51	0,01	6,95	0,01	7,11	0,01	7,19	0,01
	05/11/2015 08:24	7,48	0,01	6,88	0,01	7,1	0,01	7,03	0,01
	05/11/2015 10:19	7,38	0,01	7,14	0,01	7,05	0,01	7,11	0,01
	05/11/2015 12:25	7,48	0,01	7,20	0,01	7,08	0,01	7,08	0,01
PROMEDIO		7,19	0,25	7,00	0,13	7,0	0,03	7,01	0,15
DESV. ESTANDAR		0,25		0,13		0,1		0,15	
MEDIANA		7,20	0,01	7,01	0,01	7,02	0,1	7,06	0,01
MAXIMO		7,51	0,01	7,20	0,01	7,11	0,01	7,19	0,01
MINIMO		6,83	0,01	6,80	0,01	6,79	0,01	6,79	0,01

Tabla II-II-3. Resultados de la Evaluación de DBO₅ en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Condominios.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico						Salida FAFAs	
		Entrada		Salida Cámara 1		Salida Cámara 3			
		DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre
1	28/07/2015 08:00	582,75	66,82	256,20	91,64	155,80	18,21	153,63	23,51
	28/07/2015 10:00	432,00	2,60	279,45	141,49	151,00	36,77	202,20	0,79
	28/07/2015 12:00	283,05	127,92	235,95	122,40	167,75	38,54	189,00	0,79
	28/07/2015 14:00	276,15	133,43	199,20	0,77	197,25	35,00	178,25	53,39
2	26/08/2015 08:00	127,20	6,79	71,85	23,12	47,55	26,94	28,50	14,77
	26/08/2015 10:00	398,40	1,55	125,70	8,06	114,50	23,45	39,45	15,49
	26/08/2015 12:00	228,50	47,25	114,00	21,21	103,20	40,73	49,50	17,03
	26/08/2015 14:00	163,70	27,41	106,70	38,13	136,70	7,91	54,63	23,16
3	07/10/2015 08:00	928,83	28,52	411,50	2,47	372,63	34,47	282,25	1,18
	07/10/2015 10:05	828,83	93,57	511,00	54,21	295,80	108,36	240,75	25,81
	07/10/2015 12:00	518,63	211,25	241,00	4,24	192,75	29,34	142,50	28,99
	07/10/2015 14:05	354,80	76,01	127,33	4,54	162,25	0,68	171,00	67,18
4	05/11/2015 06:20	567,00	32,36	178,33	3,30	140,83	32,29	161,67	0,76
	05/11/2015 08:24	398,25	63,29	173,05	9,12	72,79	15,50	151,90	53,88
	05/11/2015 10:19	218,50	0,85	125,20	0,49	147,83	0,55	127,79	33,18
	05/11/2015 12:25	283,45	162,71	245,60	1,48	131,79	29,64	100,29	23,28
PROMEDIO		411,88	227,29	212,63	116,49	161,90	79,00	142,08	72,83
DESV. EST		227,29		116,49		79,00		72,83	
MAXIMO		928,83	28,52	511,00	54,21	372,63	34,47	282,25	1,18
MINIMO		127,20	6,79	71,85	23,12	47,55	26,94	28,50	14,77
MEDIANA		376,53	55,27	188,77	8,59	149,42	29,49	152,77	23,22

Tabla II-II-4. Resultados de la Evaluación de SST en diferentes días y diferentes horas para el sistema de tratamiento de Condominios.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico						FAFA	
		Entrada		Salida Cámara 1		Salida Cámara 3		Salida FAFAs	
		SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre
1	28/07/2015 08:35	440,0000	0,0001	102,0000	0,0001	80,0000	0,0001	32,0000	0,0001
	28/07/2015 10:30	252,0000	0,0001	58,0000	0,0001	92,0000	0,0001	240,0000	0,0001
	28/07/2015 12:25	216,0000	0,0001	138,0000	0,0001	52,0000	0,0001	132,0000	0,0001
	28/07/2015 14:36	170,0000	0,0001	80,0000	0,0001	74,0000	0,0001	38,0000	0,0001
2	26/08/2015 09:00	136,0000	0,0001	60,0000	0,0001	48,0000	0,0001	68,0000	0,0001
	26/08/2015 11:02	140,0000	0,0001	64,0000	0,0001	46,0000	0,0001	60,0000	0,0001
	26/08/2015 13:18	64,0000	0,0001	54,0000	0,0001	10,0000	0,0001	42,0000	0,0001
	26/08/2015 15:05	170,0000	0,0001	70,0000	0,0001	74,0000	0,0001	32,0000	0,0001
3	07/10/2015 08:00	70,0000	0,0001	73,0000	0,0001	47,0000	0,0001	37,0000	0,0001
	07/10/2015 10:05	84,0000	0,0001	60,0000	0,0001	50,0000	0,0001	72,0000	0,0001
	07/10/2015 12:00	100,0000	0,0001	92,0000	0,0001	64,0000	0,0001	26,0000	0,0001
	07/10/2015 14:05	96,0000	0,0001	56,0000	0,0001	42,0000	0,0001	22,0000	0,0001
4	05/11/2015 06:20	170,0000	0,0001	83,3000	0,0001	72,5000	0,0001	17,5000	0,0001
	05/11/2015 08:24	360,0000	0,0001	100,0000	0,0001	65,0000	0,0001	42,5000	0,0001
	05/11/2015 10:19	500,0000	0,0001	160,0000	0,0001	52,5000	0,0001	42,0000	0,0001
	05/11/2015 12:25	90,0000	0,0001	66,0000	0,0001	54,0000	0,0001	24,0000	0,0001
PROMEDIO		191,1250	133,4326	82,2688	30,3947	57,6875	19,1780	57,9375	55,9375
DES. ESTÁNDAR		133,4326		30,3947		19,1780		55,9532	
MEDIANA		155,0000	0,0001	71,5000	0,0001	53,2500	0,0001	40,0000	0,0001
MAXIMO		500,0000	0,0001	160,0000	0,0001	92,0000	0,0001	240,0000	0,0001
MINIMO		64,0000	0,0001	54,0000	0,0001	10,0000	0,0001	17,5000	0,0001

II-III. Estadísticas del Sistema de Tratamiento de Condominios.

Tabla II-III-1. Resultados de la Evaluación de Temperatura en diferentes días para el sistema de tratamiento de Casa.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico						FAFA	
		Entrada		Salida Camara 1		Salida Camara 2		Salida FAFA 1	
		Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre	Temp (°C)	Incertidumbre
2	26/08/2015 07:15	22,4	0,1	21,4	0,1	21,6	0,1	21,7	0,1
3	07/10/2015 07:10	22,3	0,1	22,1	0,1	22,4	0,1	21,5	0,1
4	05/11/2015 07:10	21,4	0,1	21,4	0,1	21,4	0,1	21,4	0,1
PROMEDIO		22,0	0,3	21,6	0,2	21,8	0,3	21,5	0,1
DESV. EST		0,6		0,4		0,5		0,2	
MAXIMO		22,4	0,1	22,4	0,1	22,4	0,1	22,4	0,1
MINIMO		21,4	0,1	21,4	0,1	21,4	0,1	21,4	0,1
MEDIANA		22,3	0,1	21,4	0,1	21,6	0,1	21,5	0,1

Tabla II-III-2. Resultados de la Evaluación de pH en diferentes días para el sistema de tratamiento de Casa.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico						FAFA	
		Entrada		Salida Camara 1		Salida Camara 2		Salida FAFA 1	
		pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre	pH	Incertidumbre
2	26/08/2015 07:15	8,14	0,01	7,87	0,01	7,76	0,01	7,63	0,01
3	07/10/2015 07:10	7,48	0,01	7,77	0,01	7,92	0,01	7,86	0,01
4	05/11/2015 07:10	7,65	0,01	7,81	0,01	7,81	0,01	7,85	0,01
PROMEDIO		7,76	0,34	7,82	0,05	7,83	0,08	7,78	0,13
DESV. EST		0,34		0,05		0,08		0,13	
MAXIMO		8,14	0,01	7,87	0,01	7,92	0,01	7,86	0,01
MINIMO		7,48	0,01	7,77	0,01	7,76	0,01	7,63	0,01
MEDIANA		7,65	0,01	7,81	0,01	7,81	0,01	7,85	0,01

Tabla II-III-3. Resultados de la Evaluación de DBO₅ en diferentes días para el sistema de tratamiento de Casa.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico						FAFA	
		Entrada		Salida de cámara 1		Salida de cámara 2		Salida FAFA	
		DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre	DBO (mg/L)	Incertidumbre
1	28/07/2015 07:21	639,00	3,84	546,00	3,28	246,30	131,10	238,05	136,40
2	26/08/2015 07:15	-	-	427,50	2,57	975,75	26,52	394,80	11,03
3	07/10/2015 07:10	876,67	6,53	954,67	7,12	972,67	7,25	847,83	75,19
4	05/11/2015 07:10	977,00	38,18	1059,50	10,61	-	-	557,00	4,15
PROMEDIO		830,89	173,59	746,92	307,28	731,57	420,26	509,42	260,49
MEDIANA		876,67	6,53	750,34	5,20	972,67	7,25	475,90	43,11
DESV. ESTANDAR		173,59		307,28		420,26		260,49	
MAXIMO		977,00	38,18	1059,50	10,61	975,75	26,52	847,83	75,19
MINIMO		639,00	3,84	427,50	2,57	246,30	131,10	238,05	136,40

Tabla II-III-4. Resultados de la Evaluación de SST en diferentes días para el sistema de tratamiento de Casa.

Muestreo	Fecha-Hora	Tanque séptico						FAFA	
		Entrada		Salida Camara 1		Salida Camara 2		Salida FAFA 1	
		SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre	SST (mg/L)	Incertidumbre
1	28/07/2015 07:21	1700,0000	0,0001	236,0000	0,0001	64,0000	0,0001	34,0000	0,0001
2	26/08/2015 07:15	316,6667	0,0001	160,0000	0,0001	80,0000	0,0001	38,0000	0,0001
3	07/10/2015 07:10	1213,3333	0,0001	15,0000	0,0001	20,0000	0,0001	20,0000	0,0001
4	05/11/2015 07:10	155,0000	0,0001	96,0000	0,0001	96,0000	0,0001	80,0000	0,0001
PROMEDIO		846,2500	735,2832	126,7500	93,9410	65,0000	32,7210	43,0000	25,8457
MEDIANA		765,0000	0,0001	128,0000	0,0001	72,0000	0,0001	36,0000	0,0001
DESV. ESTANDAR		735,2832		93,9410		32,7210		25,8457	
MAXIMO		1700,0000	0,0001	236,0000	0,0001	96,0000	0,0001	80,0000	0,0001
MINIMO		155,0000	0,0001	15,0000	0,0001	20,0000	0,0001	20,0000	0,0001

Anexo IV. Registros Fotográficos.

IV-I. Registro Fotográfico Sistema de Tratamiento de Apartamentos.



Fotografía 1. Vista en planta del Sistema de Tratamiento de Apartamentos.



Fotografía 2. Residuos de las Muestras de Sólidos Suspendedos Totales del Sistema de Tratamiento de Apartamentos.

IV-II. Registro Fotográfico Sistema de Tratamiento de Condominios.



Fotografía 3. Vista en planta del Sistema de Tratamiento de Condominios.

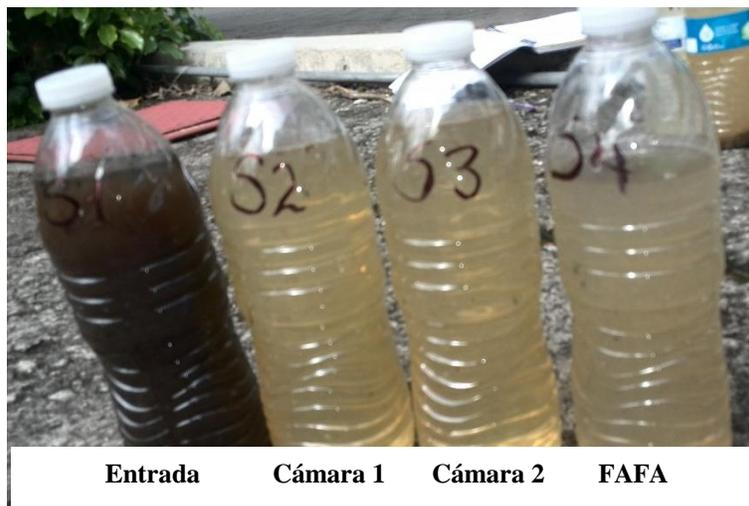


Fotografía 4. Residuos de las Muestras de Sólidos Suspending Totales del Sistema de Tratamiento de Condominios.

IV-III. Registro Fotográfico Casa.



Fotografía 5. Vista en Planta del Sistema de Tratamiento de Casa



Fotografía 6. Muestras del Sistema de Tratamiento de la Casa