



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**CONTROL DE OLORES OFENSIVOS GENERADOS
EN UNIDADES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA DURANTE LAS
ETAPAS DE ARRANQUE Y ESTABILIZACIÓN**

Maria Camila Gómez Quintero

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020



**Control de olores ofensivos generados en unidades de plantas de
tratamiento de agua residual doméstica durante las etapas de arranque
y estabilización**

Maria Camila Gómez Quintero

Informe de práctica como requisito para optar al título de:
Ingeniera Sanitaria

Asesores:

Francisco José Molina Pérez. Ingeniero Sanitario
Diana Catalina Rodríguez Loaiza. Ingeniera Sanitaria

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín Colombia
2020.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	12
2. INTRODUCCIÓN.....	13
3. MARCO TEÓRICO	14
3.1 TREN DE TRATAMIENTO DE LAS PTAR	14
3.2 CONTROL DE OLORES OFENSIVOS GENERADOS EN LAS PTAR	15
4. OBJETIVOS.....	17
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
5.METODOLOGÍA.....	18
5.1 LUGAR DE ESTUDIO.....	18
5.1.1 Municipio de Abejorral	18
5.1.2 Municipio de Argelia.....	19
5.1.3 Municipio de Sonsón	20
5.2 DIAGNÓSTICO INICIAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	21
5.3 SEGUIMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	21
5.3.1 Muestreo de agua residual doméstica	21
5.3.2 Análisis fisicoquímico de las muestras de agua residual doméstica.....	22
5.3.3 Medición de alcalinidad y pH.....	22
5.4 CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES FUGITIVAS DE GASES PTAR SONSÓN.....	23
5.5 CAPACITACIÓN PERSONAL OPERATIVO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA	25
5.5.1 Capacitación de operarios de la PTAR del municipio de Abejorral	25
5.5.2 Capacitación de operarios de la PTAR del municipio de Argelia	26
6.RESULTADppOS Y ANÁLISIS	27
6.1 DIAGNÓSTICO INICIAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	27
6.1.1 Planta de tratamiento del municipio de Abejorral	27
6.1.2 Planta de tratamiento del municipio de Argelia.....	29
6.1.3 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón	32

6.2 SEGUIMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO	33
6.2.1 Caudales de ingreso a la PTAR	33
6.2.1.1 Planta de tratamiento del municipio de Argelia	34
6.2.1.2 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón	35
6.2.2 Análisis fisicoquímico de la PTAR de Argelia	36
6.2.3 pH y alcalinidad	42
6.2.3.1 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón	42
6.2.3.2 Planta de tratamiento del municipio de Argelia	53
6.2.4 Caracterización de emisiones fugitivas de gases en la PTAR del municipio de Sonsón	56
6.2.4.1 Entrada a la PTAR y unidades preliminares	56
6.2.4.2 Reactor UASB	58
6.2.4.3 Estructura de salida de los filtros anaerobios.....	60
6.2.4.4 Lechos de secado	62
6.2.4.5 Estructura de salida PTAR hacia la fuente receptora	63
6.3 DIFICULTADES DETECTADAS DURANTE EL ARRANQUE Y OPERACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS 64	64
6.3.1 Planta de tratamiento del municipio de Abejorral.....	65
6.3.2 Planta de tratamiento del municipio de Argelia	66
6.3.3 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón.....	66
6.4 DIMENSIONAMIENTO SIMPLIFICADO Y CONCEPTUAL: UNIDAD DE DESORCIÓN Y BIOFILTRO CONVENCIONAL DE COMPOST	67
6.4.1 Dimensionamiento de la unidad de desorción	67
6.4.1.1 Unidad de desorción	67
6.4.2 Dimensionamiento del biofiltro de compost	70
6.4.2.1 Consideraciones iniciales para el dimensionamiento del biofiltro de compost	70
6.4.2.2 Estimación del flujo de aire requerido para ser removido .	71
6.4.2.3 Selección de la carga superficial (propuesta).....	71
6.4.2.4 Selección de la profundidad del medio (propuesta).....	71
6.4.2.5 Estimación de la carga volumétrica.....	71
6.4.2.6 Estimación de la concentración de H ₂ S de (ppm _v) a (g.m ⁻³) 72	
6.4.2.7 Estimación de la carga másica (superficial)	72
6.4.2.8 Estimación de la carga másica (volumétrica)	73
6.4.2.9 Tiempo de retención con el lecho vacío (EBRT).....	73

6.4.2.10	Estimación de la velocidad de flujo de H ₂ S a través del lecho del biofiltro	74
6.4.2.11	Adición de agua en el biofiltro convencional de compost 74	
6.4.2.12	Estimación de la eficiencia de remoción teórica.....	74
6.4.2.13	Estimación de la capacidad de eliminación teórica.....	75
6.4.2.14	Verificación del volumen vacío del lecho	75
7.	CONCLUSIONES	78
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
8.	ANEXOS	83
8.1	FOTOS.....	83

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas puntos de monitoreo de las caracterizaciones de emisiones fugitivas de gases.....	25
Tabla 2. Resultados análisis fisicoquímico del primer muestreo de agua residual en la PTAR del municipio de Argelia	36
Tabla 3. Eficiencia de remoción del sistema de tratamiento primer muestreo	37
Tabla 4. Eficiencia de remoción del reactor UASB primer muestreo.....	38
Tabla 5. Eficiencia de remoción de los filtros anaerobios (FAFA) primer muestreo	39
Tabla 6. Resultados análisis fisicoquímico del segundo muestreo de agua residual doméstica en la PTAR del municipio de Argelia	39
Tabla 7. Eficiencia de remoción del sistema de tratamiento segundo muestreo	40
Tabla 8. Eficiencia de remoción del reactor UASB segundo muestreo ...	41
Tabla 9. Eficiencia de remoción de los filtros anaerobios (FAFA) segundo muestreo	41
Tabla 10. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en la entrada a la PTAR y unidades preliminares	57
Tabla 11. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en la entrada a la PTAR y unidades preliminares	57
Tabla 12. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en la entrada a la PTAR y unidades preliminares	58
Tabla 13. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en el reactor UASB	59
Tabla 14. Caracterización de emisiones fugitivas 02 de octubre de 2019 en el reactor UASB	60
Tabla 15. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en el reactor UASB.....	60
Tabla 16. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en la estructura de salida de los filtros anaerobios	61
Tabla 17. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en la estructura de salida de los filtros anaerobios	61
Tabla 18. Caracterización de emisiones fugitivas 06 de noviembre de 2019 en la estructura de salida de los filtros anaerobios	62
Tabla 19. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en el lecho de secado # 3.....	62
Tabla 20. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en el lecho de secado # 3.....	63
Tabla 21. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en el lecho de secado # 3	63
Tabla 22. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en la estructura de salida de la PTAR hacia la fuente receptora	64

Tabla 23. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en la estructura de salida de la PTAR hacia la fuente receptora.....	64
---	----

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización municipio de Abejorral, Antioquia	19
Ilustración 2. Localización municipio de Argelia, Antioquia	20
Ilustración 3. Localización municipio de Sonsón, Antioquia	21
Ilustración 4. Analizador de gases GEM5000	24
Ilustración 5. Rangos de medición del equipo GEM5000	24
Ilustración 6. Representación esquemática del detalle de la unidad de desorción para el biofiltro de la PTAR Sonsón.....	70
Ilustración 7. Representación esquemática del biofiltro de compost para la PTAR Sonsón	76
Ilustración 8. Representación esquemática de la unidad de desorción y el biofiltro convencional de compost para la PTAR Sonsón	77

LISTADO DE FOTOS

Foto 1. Canal de entrada con disipadores de energía.....	83
Foto 2. Vertedero de excesos.....	83
Foto 3. Unidad de cribado (sin canastillas ni pasarela)	83
Foto 4. Unidad de desarenadores	84
Foto 5. Canaleta Parshall de 6''	84
Foto 6. Vertedero lateral después de unidades preliminares	84
Foto 7. Reactor UASB y quemador de biogás	85
Foto 8. Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA).....	85
Foto 9. Lechos de secado.....	85
Foto 10. Canal de entrada	86
Foto 11. Vertedero lateral o de excesos	86
Foto 12. Unidad de cribado con pasarela y canastillas.....	86
Foto 13. Canales desarenadores	87
Foto 14. Rejilla fina.....	87
Foto 15. Canaleta Parshall de 3''	87
Foto 16. Vertedero lateral después de unidades preliminares	88
Foto 17. Reactor UASB.....	88
Foto 18. Quemador de biogás.....	88
Foto 19. Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA).....	89
Foto 20. Vertedero triangular con un ángulo de 90 grados.....	89
Foto 21. Lechos de secado.....	89
Foto 22. Alcantarillado combinado	90
Foto 23. Canal de entrada	90
Foto 24. Vertedero de excedentes (Aliviadero)	90
Foto 25. Unidad de cribado (con pasarela y canastillas)	91
Foto 26. Canales desarenadores	91
Foto 27. Canaleta Parshall de 6''	91
Foto 28. Reactor UASB.....	92
Foto 29. Quemador de biogás.....	92
Foto 30. Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA).....	92
Foto 31. Lechos de secado.....	93
Foto 32. Tanque séptico y filtro anaerobio.....	93
Foto 33. Cámara 1 reactor UASB PTAR Sonsón	93
Foto 34. Cámara 2 reactor UASB PTAR Sonsón	94
Foto 35. Estructura de salida filtros anaerobios PTAR Sonsón	94
Foto 36. Estructura de descarga a la fuente receptora PTAR Sonsón	94

LISTADO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Caudal promedio mensual de la PTAR Argelia.....	35
Gráfica 2. Caudal promedio mensual de la PTAR Sonsón.....	36
Gráfica 3. pH afluente PTAR Sonsón octubre 2019.....	43
Gráfica 4. pH afluente PTAR Sonsón noviembre 2019.....	43
Gráfica 5. pH afluente PTAR Sonsón diciembre 2019.....	44
Gráfica 6. pH afluente PTAR Sonsón enero 2020.....	44
Gráfica 7. pH afluente PTAR Sonsón febrero 2020.....	45
Gráfica 8. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón octubre 2019.....	45
Gráfica 9. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón octubre 2019.....	46
Gráfica 10. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón noviembre 2019.....	46
Gráfica 11. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón noviembre 2019.....	47
Gráfica 12. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón diciembre 2019.....	47
Gráfica 13. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón diciembre 2019.....	48
Gráfica 14. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón enero 2020.....	48
Gráfica 15. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón enero 2020.....	49
Gráfica 16. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón febrero 2020.....	49
Gráfica 17. Relación alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón febrero 2020.....	50
Gráfica 18. pH efluente PTAR Sonsón octubre 2019.....	51
Gráfica 19. pH efluente PTAR Sonsón noviembre 2019.....	51
Gráfica 20. pH efluente PTAR Sonsón diciembre 2019.....	52
Gráfica 21. pH efluente PTAR Sonsón enero 2020.....	52
Gráfica 22. pH efluente PTAR Sonsón febrero 2020.....	53
Gráfica 23. pH afluente PTAR Argelia febrero 2020.....	54
Gráfica 24. pH efluente reactor UASB PTAR Argelia febrero 2020.....	54
Gráfica 25. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Argelia febrero 2020.....	55
Gráfica 26. pH efluente PTAR Argelia febrero 2020.....	55

1. RESUMEN

El tratamiento de las aguas residuales que se generan como producto de las diferentes actividades que realiza a diario el hombre, es de gran importancia tanto para la salud pública como para los ecosistemas acuáticos, ya que estas aguas residuales presentan altas cargas de materia orgánica y patógenos, que al ser vertidas a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento generan un foco de contaminación y riesgo socioambiental. Se realizaron muestreos compuestos de agua residual, caracterizaciones de emisiones fugitivas de gases y seguimiento de variables in situ, tales como; caudal, pH y alcalinidad, en tres plantas de tratamiento de aguas residuales municipales del departamento de Antioquia. El seguimiento de parámetros fisicoquímicos y monitoreos in situ permiten determinar el comportamiento de los procesos biológicos y tomar decisiones que permiten corregir situaciones que no fueron contempladas a la hora de realizar el diseño del sistema de tratamiento de agua residual doméstica. Durante el arranque y estabilización de la PTAR del municipio de Argelia se logró dar cumplimiento con lo establecido en la resolución 0631 de 2015, mientras que, para la PTAR del municipio de Sonsón, se planteó el diseño de un biofiltro para el control de olores ofensivos.

2. INTRODUCCIÓN

Son denominadas aguas residuales aquellas que se generan a partir de las diferentes actividades que realiza a diario el hombre en los hogares, instituciones, oficinas e industrias, la falta de un adecuado tratamiento al agua residual antes de su descarga a cuerpos receptores trae como consecuencia efectos dañinos sobre la salud y el ambiente; como la generación de olores ofensivos, el agotamiento del oxígeno disuelto, la liberación de nutrientes, contaminantes patógenos y tóxicos, entre otros. El tratamiento de las aguas residuales domésticas se puede lograr mediante la combinación de procesos fisicoquímicos o biológicos (Amy et al., 2008) y trenes de tratamiento, los cuales tienen como finalidad eliminar desde el material grueso y arenas que llegan a las plantas de tratamiento, hasta compuestos más complejos como la materia orgánica presente. En el caso de los municipios de Abejorral, Argelia y Sonsón, del departamento de Antioquia, las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) cuentan con un tren de tratamiento que inicia con unidades de cribado y desarenado como procesos físicos, una canaleta Parshall para el aforo del caudal y con un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) y un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) como proceso biológico para la eliminación de la materia orgánica; también cuentan con lechos de secado para el manejo de los lodos generados en las unidades preliminares y en los procesos biológicos (Londoño, 2019). El arranque y estabilización de las PTAR es parte fundamental para la adecuada operación de cada una de las unidades de tratamiento, y en el caso de las unidades anaerobias, es necesario realizar un seguimiento riguroso para disminuir y controlar la generación de olores ofensivos provenientes del tratamiento biológico del agua residual doméstica.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 TREN DE TRATAMIENTO DE LAS PTAR

Argelia, Abejorral y Sonsón son municipios de Colombia, localizados en la subregión Oriente del departamento de Antioquia. Las plantas de tratamiento de agua residual doméstica de cada uno de estos municipios cuentan con un tren de tratamiento que inicia con un tratamiento preliminar, el cual consiste en una unidad de cribado utilizada para separar el material grueso del agua mediante el paso de ella por una rejilla, y un desarenador que tiene como objetivo eliminar arenas, gravas y partículas de origen inorgánico (Galeano & Rojas, 2016); también cuentan con una canaleta Parshall para realizar el aforo del caudal de ingreso a la PTAR. Para lograr la sedimentación de sólidos suspendidos y transformar parte de la materia orgánica se tiene como tratamiento secundario un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB), el cual consiste en un proceso biológico que se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica se transforma en biomasa, compuestos inorgánicos y biogás; estos reactores cuentan con una zona de lecho de lodo donde se concentran los microorganismos que van a degradar la materia orgánica presente en el agua residual a tratar, una zona de manto de lodos donde los microorganismos se encuentran más dispersos a lo largo del UASB y una zona de separación gas-líquido-sólido (Lorenzo & Obaya, 2006), posteriormente, como sistema de pulimiento, el agua pasa a un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) mediante el cual se realiza la transformación de la materia orgánica remanente, este proceso biológico consiste en hacer fluir el agua residual a través de un falso fondo, el agua atraviesa una masa de sólidos biológicos adheridos dentro del sistema por un medio de soporte fijo. Los microorganismos se pueden adherir a la superficie en forma de biopelícula o en forma de masa de lodo granulado dentro de los intersticios del medio de soporte; la materia orgánica soluble que pasa a través del filtro se distribuye dentro de la superficie de los sólidos adheridos o floculados, donde se realiza la degradación anaerobia (Parra, 2006). El tratamiento de los lodos provenientes de los reactores UASB, FAFA y las unidades preliminares, es llevado a cabo mediante lechos de secado, en los cuales se reduce la humedad del lodo por la evaporación y filtración del agua contenida en ellos, en esta etapa los lodos son acondicionados para su disposición final.

3.2 CONTROL DE OLORES OFENSIVOS GENERADOS EN LAS PTAR

Toda planta de tratamiento de agua residual sea de tipo fisicoquímica o biológica, y en este último caso, de tipo aerobia o anaerobia, es susceptible de generar olores ofensivos. Sin embargo, debido al metabolismo de las bacterias anaerobias sulfato-reductoras, el medio anaerobio es el más propenso a generar estos olores, sobre todo cuando en el agua residual existen altas concentraciones de sulfatos y sulfuros. El mal diseño y la deficiencia en la operación de la PTAR son algunas de las causas generales de olores ofensivos en las unidades de tratamiento; aunque algunas causas se pueden evitar desde el diseño, otras por la naturaleza del tratamiento y del agua residual, son difícilmente controlables si no se considera un sistema de control de olores ofensivos (Noyola et al., 2000). Con el fin de solucionar la problemática que generan los olores ofensivos, se han estudiado y empleado diversas tecnologías como los tratamientos fisicoquímicos, los cuales requieren una menor área para su instalación, pero altos costos de inversión y operación, y los tratamientos biológicos que tienen bajos costos de operación, requerimientos de insumos, pero presentan dificultades en cuanto al arranque del sistema y a la operación de este cuando se tienen periodos sin ingreso del gas contaminante; teniendo en cuenta que previo al tratamiento seleccionado para el control de olores ofensivos es necesario realizar un cerramiento, captura y conducción de los gases (Noyola et al., 2000).

La selección de una tecnología en particular o la combinación de tecnologías depende de varios parámetros, incluyendo las especificaciones del sitio, la capacidad de operación y mantenimiento, los objetivos del tratamiento, las cargas contaminantes, las tasas de flujo de aire, y las características del contaminante. Recientemente, los métodos de tratamiento biológico han aumentado su aplicación en compuestos inorgánicos olorosos tales como el amonio, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos de nitrógeno y azufre (Álvarez et al., 2011).

Los primeros reportes del uso de los sistemas de biofiltración se remontan al año 1923 y se utilizaron en la depuración del aire contaminado por H_2S procedente de una depuradora de agua. Éstos fueron sistemas abiertos en los que se empleaba suelo poroso como soporte, consistía en hacer huecos en el suelo y colocar un sistema de tubos perforados en la base que dejaban pasar el aire a través de suelo. Desde la década de los 70 la tecnología evolucionó y a partir de ese momento, se pudieron aplicar

cargas de contaminantes más elevadas, fue entonces, en la década de los 80 donde se desarrollaron sistemas cerrados, algunos con sistemas de control computarizados y medios filtrantes inorgánicos novedosos, tales como el carbón activado granular, el poliestireno y las cerámicas (Mozo, 2011).

La biofiltración se basa en la interacción del gas con un medio orgánico cuya actividad de degradación proviene de los microorganismos que viven y se desarrollan en él (Noyola et al., 2000). Actualmente es considerada como la mejor tecnología disponible en el tratamiento de contaminantes disueltos de gases o compuestos con olores ofensivos, dado que requiere menor uso de energía, no adiciona sustancias peligrosas y su costo de operación es reducido; esta tecnología comparte con la oxidación (incineración y catálisis) el hecho que los contaminantes son destruidos y no transferidos a otra fase como sucede en otras tecnologías de control (adsorción, absorción y condensación) (Jiménez & Villegas, 2005).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer estrategias de control de olores ofensivos generados en unidades durante el arranque y operación en plantas de tratamiento de agua residual doméstica.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diagnóstico de las unidades de tratamiento en la PTAR del municipio de Abejorral y seguimiento mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y mediciones in situ en la PTAR del municipio de Argelia.
- Diagnosticar las emisiones de olores ofensivos generados en la operación de la PTAR del municipio de Sonsón mediante el monitoreo y análisis de gases generados.
- Proponer una solución técnica para el control de olores ofensivos producidos en la PTAR del municipio de Sonsón.

5.METODOLOGÍA

5.1 LUGAR DE ESTUDIO

5.1.1 Municipio de Abejorral

Abejorral es un municipio de Colombia, localizado en la subregión Oriente del departamento de Antioquia (**ilustración 1**). Limita por el norte con los municipios de Montebello, La Ceja y La Unión, por el este con los municipios de Sonsón y El Carmen de Viboral, por el sur con el departamento de Caldas y por el oeste con los municipios de Santa Bárbara y Montebello. Su cabecera está a una distancia de 84 kilómetros de la ciudad de Medellín. El municipio posee una extensión de 491 kilómetros cuadrados, está ubicado a 2.125 m.s.n.m y tiene una temperatura promedio de 17 °C. Actualmente cuenta con una población de 6.765 abejorraleños en la zona urbana ubicados en una extensión de 1.0 kilómetro cuadrado y 12.331 en la zona rural en una extensión de 490 kilómetros cuadrados. En el primer renglón de la economía abejorraleña se ubica el café, siendo el principal productor en el Oriente antioqueño, la ganadería de leche se ubica en el segundo renglón de la economía local, la exportación de aguacate ocupa el tercer renglón y como cuarto renglón de la economía del municipio se tiene la floricultura (Alcaldía Municipal de Abejorral en Antioquia, 2019).

El municipio de Abejorral limita con los ríos Arma, Buey y Aures, característica que lo lleva a tener tierras en tres (3) vertientes diferentes, permitiéndole una topografía agreste moldeada por las ochenta y cuatro (84) quebradas secundarias (Alcaldía Municipal de Abejorral en Antioquia,2019).



Ilustración 1. Localización municipio de Abejorral, Antioquia
Fuente: Alcaldía municipal de Abejorral en Antioquia

5.1.2 Municipio de Argelia

Argelia es un municipio de Colombia, localizado en la subregión Oriente del departamento de Antioquia (**ilustración 2**). Limita al norte y al oeste con el municipio de Sonsón, al sur con el municipio de Nariño y al este con el departamento de Caldas. Su cabecera está a una distancia de 140 kilómetros de la ciudad de Medellín. El municipio posee una extensión de 254 kilómetros cuadrados, está ubicado a 1.750 m.s.n.m y tiene una temperatura promedio de 20°C (Cornare,2009). Cuenta actualmente con una población de 2.387 argelinos en la zona urbana, distribuidos en una extensión de 0.4 kilómetros cuadrados y 5.778 en la zona rural, en una extensión de 253.6 kilómetros cuadrados (Gobernación de Antioquia,2019). La economía del municipio de Argelia es agropecuaria, basada principalmente en cultivos de café, caña, ganadería, madera y cacao (Alcaldía Argelia Antioquia, 2019).

El municipio de Argelia está ubicado dentro de la cuenca del Samaná Sur, esta cuenca presenta una gran diversidad biofísica, con topografía esencialmente quebrada, profundos cañones y estrechos valles aluviales, empinadas y largas vertientes, colinas bajas y planicies en el amplio valle del Magdalena. Se extiende desde el cerro de Las Palomas en el Páramo de Sonsón, Argelia y Nariño, hasta la divisoria del río Arma y las cuencas Samaná Norte y Claro-Cocorná Sur (Cornare,2009).



Ilustración 2. Localización municipio de Argelia, Antioquia

Fuente: Alcaldía municipal de Argelia

5.1.3 Municipio de Sonsón

Sonsón es un municipio de Colombia, localizado en la subregión Oriente del departamento de Antioquia (**ilustración 3**). Limita al norte con los municipios de El Carmen de Viboral, Cocorná, Puerto Triunfo y San Francisco, al occidente con el municipio de Abejorral y el departamento de Caldas, al oriente con el departamento de Boyacá y al sur con los municipios de Argelia y Nariño y con el departamento de Caldas. Su cabecera está a una distancia de 113 kilómetros de la ciudad de Medellín. El municipio posee una extensión de 1.339 kilómetros cuadrados, está ubicado a 2.475 m.s.n.m y tiene una temperatura promedio de 13 a 15°C (Alcaldía de Sonsón, 2019). En la actualidad tiene una población de 14.860 sonsoneños en la zona urbana, distribuidos en una extensión de 1.6 kilómetros cuadrados y 19.121 en la zona rural, en una extensión de 1.337,4 kilómetros cuadrados (Cornare, 2019). En la economía del municipio se destaca la ganadería, el cultivo de café, cacao, plátano, aguacate, caña panelera y la piscicultura en el Magdalena Medio (Alcaldía de Sonsón, 2019).

La topografía del municipio es montañosa y entre los accidentes orográficos se destacan las cuhillas de Chamuscado, Norí, La Salada, San Lorenzo, Santa Rosa, La Vieja, Las Palomas, Capiro, La Delgadita, Los Altos del caño, El Pañuelo y La Osa; todo el relieve corresponde a la cordillera Central donde se destaca el Páramo de Sonsón. Al municipio lo cruzan varios ríos como el Magdalena, el San Lorenzo, Samaná Sur, Claro, Río

Verde, los Henaos y de los Montes, Aures, Sonsón, Murringo, Arma, Sirgua, Perrillo, y Tasajo (Alcaldía de Sonsón, 2019).



Ilustración 3. Localización municipio de Sonsón, Antioquia

Fuente: Alcaldía municipal de Sonsón

5.2 DIAGNÓSTICO INICIAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

Se realizaron visitas técnicas a las plantas de tratamiento de agua residual doméstica con el fin de determinar el estado actual de cada una de las operaciones unitarias y procesos biológicos previo al inicio de arranque y puesta en marcha de las PTAR.

5.3 SEGUIMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

5.3.1 Muestreo de agua residual doméstica

Se realizaron dos muestreos compuestos, tomando muestras puntuales durante 8 horas en el afluente, en la salida del reactor UASB y en el efluente de la PTAR del municipio de Argelia los días 02 de diciembre de 2019 y 03 de febrero de 2020. Las muestras compuestas se conformaron a partir de las alícuotas puntuales tomadas cada hora. Se midió el caudal instantáneo empleando la canaleta Parshall, y posteriormente se calculó el caudal promedio, de acuerdo con dichos valores se calculó el volumen de cada alícuota, el cual dependía del caudal de ingreso a la PTAR. Para calcular el volumen de alícuota se utilizó la siguiente ecuación (IDEAM, 2007).

$$V_i = \frac{V * Q_i}{n * Q_p}$$

Donde:

V_i: Volumen de cada alícuota (L)

V: Volumen total a componer (L)

Q_i: Caudal instantáneo de cada muestra (L/s)

Q_p: Caudal promedio durante el muestreo (L/s)

n: Número de muestras tomadas

5.3.2 Análisis fisicoquímico de las muestras de agua residual doméstica

Las muestras del municipio de Argelia fueron refrigeradas y transportadas al laboratorio de Cornare para su posterior análisis. Los parámetros medidos fueron: DQO, DBO₅, Grasas y aceites, SST, SSED, SDT, Cloruros, Sulfatos, SSV, ST, SF, y en cuanto a nutrientes, Fósforo total (P), Nitritos (N-NO₂⁻), Nitratos (N-NO₃⁻) y Nitrógeno amoniacal (N-NH₃). Todas las mediciones de laboratorio fueron llevadas a cabo siguiendo los protocolos establecidos en el Estándar Métodos (APHA, 2017).

5.3.3 Medición de alcalinidad y pH

Para la PTAR del municipio de Sonsón, la alcalinidad se realizó una (1) vez al día entre los meses de octubre de 2019 y febrero de 2020, en la salida del reactor UASB. En la PTAR del municipio de Argelia se realizó el análisis una (1) vez al día durante el mes de febrero de 2020 a la salida del reactor UASB. Por otro lado, la medición de pH en las PTAR del municipio de Sonsón y Argelia se realizó cada hora en la jornada de 7:00 a 16:00, en los siguientes puntos; afluente de la PTAR, efluente del reactor UASB y en el efluente de la PTAR.

La determinación de la alcalinidad consistió en una valoración con H₂SO₄ (Con normalidad conocida) a un pH de 5,75 (alcalinidad parcial debida al bicarbonato) y luego a pH 4,30 (alcalinidad total debida al bicarbonato y a los ácidos grasos volátiles). Los valores de alcalinidad fueron expresados en términos de mg CaCO₃/L. A continuación, se describe el procedimiento paso a paso para la determinación de este parámetro:

- a. Tomar 50 mL de la muestra y añadirlo a un beaker o erlenmeyer
- b. Agitar la muestra durante la medición para mantenerla homogénea

- c. Agregar en una bureta ácido sulfúrico (H₂SO₄) con normalidad conocida
- d. Registrar el volumen inicial de la solución titulante
- e. Medir y registrar el pH inicial de la muestra
- f. Adicionar la solución titulante gota a gota hasta llegar a un pH de 5,75
- g. Registrar el volumen de la solución titulante gastada
- h. Continuar adicionando la solución titulante hasta llegar a un pH de 4,3
- i. Registrar el volumen total de la solución titulante gastada

Para encontrar la alcalinidad total, intermedia y parcial se utilizaron las siguientes ecuaciones

$$\text{Alcalinidad total (AT)} = \frac{V_{\text{total}} * N \text{ solución titulante} * 50.000}{V_{\text{muestra}}}$$

$$\text{Alcalinidad parcial (AP)} = \frac{V_{\text{pH } 5,75} * N \text{ solución titulante} * 50.000}{V_{\text{muestra}}}$$

$$\text{Alcalinidad intermedia (AI)} = \text{AT} - \text{AP}$$

Donde:

V_{total}: Volumen total gastado en mL de H₂SO₄ en la titulación (desde el volumen inicial hasta el volumen para llegar a pH 4,3)

V_{pH 5,75}: Volumen gastado en mL de H₂SO₄ hasta llegar a pH 5,75

V_{muestra}: volumen de agua residual

N: Normalidad del ácido sulfúrico utilizado

Para verificar la estabilidad del sistema se calculó la relación AI/AT, en la cual la alcalinidad intermedia se debe a la presencia de los ácidos grasos volátiles. Si la relación AI/AT es mayor a 0,30, es indicativo que el reactor se está acidificando y puede ser necesario adicionar bicarbonato en el afluente de la PTAR (Londoño, 2019).

5.4 CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES FUGITIVAS DE GASES PTAR SONSÓN

Se realizaron tres (3) caracterizaciones de emisiones fugitivas de gases en la PTAR del municipio de Sonsón. Las mediciones de H₂S, CH₄, CO₂, CO, O₂ y el balance residual de N₂ fueron realizadas por el Laboratorio de Salud Pública de la Universidad de Antioquia utilizando el método de lectura directa con el equipo GEM5000 (**ilustración 4**), el cual es una

analizador de gases portátil fácil de usar, diseñado para medir el flujo y concentración del gas. Dentro de sus beneficios se encuentra la estandarización de las rutas de monitoreo, la fácil transferencia de los datos y la incorporación de GPS (Geotech, s.f).



Ilustración 4. Analizador de gases GEM5000

Fuente: Geotech

Los rangos de medición del analizador de gases GEM5000 se encuentran en la **ilustración 5**.

GAS RANGES				
Gases measured	CO ₂ and CH ₄	By dual wavelength infrared sensor with reference channel		
	O ₂	By internal electrochemical sensor		
	CO (H ₂ compensated), H ₂ S, NH ₃ and H ₂ (optional)	By internal electrochemical sensor		
	A full range of internal gas cells can be specified at the time of manufacture			
Standard gas cells	Cell	Range	Typical accuracy (range : accuracy)	Typical accuracy (range : accuracy)
	CH ₄	0-100%	0-70% : ±0.5% (vol)	70-100% : ±1.5% (vol)
	CO ₂	0-100%	0-60% : ±0.5% (vol)	60-100% : ±1.5% (vol)
	O ₂	0-25%	0-25% : ±1.0% (vol)	
Optional gas cells	Cell	Range	Typical accuracy	
	CO	0-500ppm	±2.0% FS	
	CO	0-1,000ppm	±2.0% FS	
	CO	0-2,000ppm	±2.0% FS	
	CO (H ₂) +	0-2,000ppm	±1.0% FS	
	H ₂ S	0-50ppm	±1.5% FS	
	H ₂ S	0-200ppm	±2.0% FS	
	H ₂ S	0-500ppm	±2.0% FS	
	H ₂ S	0-1,000ppm	±2.0% FS	
	H ₂ S	0-5,000ppm	±2.0% FS	
	H ₂ S	0-10,000ppm	±5.0% FS	
	NH ₃	0-1,000ppm	±10.0% FS	
	H ₂	0-1,000ppm	±2.5% FS	

Ilustración 5. Rangos de medición del equipo GEM5000

Fuente: Geotech

Las caracterizaciones de emisiones fugitivas de gases se llevaron a cabo el 21 de agosto de 2019, 02 de octubre de 2019 y 06 de noviembre de 2019, en los siguientes puntos; entrada a la PTAR, unidad de cribado, desarenador, cámara 1 y 2 del reactor UASB, emisión fugitiva cámara 1 y 2 del reactor UASB, quemador de biogás, salida de los FAFA, lecho de secado #3 y la estructura de salida de la PTAR hacia la fuente receptora (Laboratorio Salud Pública, 2019). Las coordenadas de los puntos de monitoreo mencionados anteriormente se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Coordenadas puntos de monitoreo de las caracterizaciones de emisiones fugitivas de gases

LUGAR DE MEDICIÓN	COORDENADAS	
	Norte	Oeste
Entrada a la PTAR	75°18'35,70"	5°42'16,68"
Unidad de cribado	75°18'35,01"	5°42'12,95"
Desarenador	75°18'35,13"	5°42'12,81"
Cámara 1 del reactor UASB	75°18'35,22"	5°42'12,50"
Cámara 2 del reactor UASB	75°18'35,52"	5°42'12,65"
Emisión fugitiva cámara 1 del reactor UASB	75°18'35,31"	5°42'12,52"
Emisión fugitiva cámara 2 del reactor UASB	75°18'35,43"	5°42'12,63"
Quemador de biogás	75°18'35,52"	5°42'12,52"
Salida de los FAFA	75°18'35,65"	5°42'12,14"
Lecho de secado # 3	75°18'35,79"	5°42'12,39"
Estructura salida PTAR hacia la fuente receptora	75°18'34,87"	5°42'11,89"

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 1,2,3-Biogás PTAR Sonsón

5.5 CAPACITACIÓN PERSONAL OPERATIVO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

5.5.1 Capacitación de operarios de la PTAR del municipio de Abejorral

Las capacitaciones al personal operativo de la PTAR del municipio de Abejorral fueron realizadas cada ocho (8) o quince (15) días, se tuvieron sesiones netamente teóricas, talleres de repaso y/o evaluaciones de desempeño, las cuales se distribuyeron en sesiones de cuatro (4) horas. Los temas tratados en las sesiones fueron: conceptos básicos y generalidades de la PTAR, conceptos básicos de la normativa actual, periodicidad de limpieza de las unidades de tratamiento, conversión de unidades, estimación del tiempo de retención hidráulico en las unidades de tratamiento, cálculos básicos, elementos e instrumentos básicos para

el operario y el laboratorio de la PTAR, planes de contingencias en caso de emergencia, explicación detallada de los parámetros a medir en la PTAR bajo buenas prácticas, toma de muestras de agua residual doméstica en la planta, porcentajes de remoción de materia orgánica y rangos estimados en cada unidad de tratamiento (Patiño, 2019).

5.5.2 Capacitación de operarios de la PTAR del municipio de Argelia

El programa de capacitación se desarrolló con los operarios que trabajan con la Empresa de Servicios Públicos de Argelia, se llevaron a cabo sesiones de tres (3) horas en las que se realizaron actividades teóricas y prácticas. Los temas que se abarcaron en las sesiones fueron: conceptos básicos y generalidades de la PTAR, importancia de la periodicidad de limpieza de las unidades de tratamiento, adecuado manejo de subproductos de las unidades preliminares, introducción a los medios de aforo utilizados, validación de la correcta lectura en (cm) y su equivalencia a (L/s) para conocer el caudal de ingreso a la PTAR, introducción al seguimiento y control de las unidades de tratamiento, introducción a la estadística básica e introducción a la seguridad, higiene y salud laboral (Mesa, 2019).

6.RESULTADppOS Y ANÁLISIS

6.1 DIAGNÓSTICO INICIAL DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

6.1.1 Planta de tratamiento del municipio de Abejorral

El caudal del diseño de la planta de tratamiento del municipio de Abejorral es de 30 L/s y la fuente receptora de la PTAR es la quebrada el Matadero (Patiño, 2019). La PTAR del municipio de Abejorral cuenta con los siguientes componentes y/o unidades de tratamiento:

- Un (1) alcantarillado de tipo combinado, el cual tiene como objetivo transportar las aguas residuales producidas por la población y las aguas lluvias hacia la planta para su tratamiento.
- Un (1) canal de entrada (**Foto 1**) cuyo objetivo es direccionar el agua residual y generar un flujo uniforme hacia la planta. El canal cuenta con cinco (5) disipadores de energía para controlar la velocidad de llegada del agua residual doméstica y lluvia. En cuanto al estado actual de la unidad se observó que los disipadores de energía tienen una altura mayor al vertedero de excesos, lo que afecta la funcionalidad del sistema y estimula la evacuación de caudales inferiores al caudal de diseño. También, se observó que para el caudal esperado la dimensión del canal de entrada es pequeño, lo que podría aumentar el tirante de agua (Patiño, 2019).
- Un (1) vertedero de excesos (**Foto 2**), cuyo propósito es evacuar el caudal que exceda la capacidad de diseño de la planta. Se observó que el vertedero de excesos está muy próximo a la unidad de cribado, lo que podría generar un vertimiento mayor por este cuando se genere un aumento del tirante de agua en las rejillas (Patiño, 2019).
- Una (1) unidad de cribado (**Foto 3**) con dos (2) rejillas de limpieza manual. Se observó que no cuenta con la canastilla para la recolección del material retenido ni la pasarela para la movilización del personal al momento de realizar el mantenimiento. Se requiere instalar una compuerta en cada una de las líneas de cribado, debido a que en el momento de la operación sólo debe funcionar una línea y es necesario aislar la otra línea (Patiño, 2019).

- Dos (2) canales desarenadores (**Foto 4**) de flujo horizontal y limpieza manual. Se observó un ligero ensanchamiento a la entrada que puede no ser suficiente para asegurar una velocidad de 0,3 m/s y permitir la sedimentación de arenas, gravas y partículas inorgánicas. El canal desarenador no cuenta con tubería perforada para el drenaje del agua residual, se detectó que el diámetro de la tubería es pequeño, lo que podría ocasionar obstrucciones dificultando la operación. La unidad cuenta con una caja anexa donde se encuentran las válvulas de purga, esta tiene una profundidad de 1,90 m aproximadamente, lo que complica el accionamiento manual de las válvulas del desarenador (Patiño, 2019).
- Una (1) canaleta Parshall (**Foto 5**) de seis pulgadas (6'') con su respectiva regla para realizar el aforo del caudal de ingreso a las unidades de tratamiento (Patiño, 2019).
- Un (1) vertedero lateral (**Foto 6**) después de las unidades preliminares (by-pass) que tiene como objetivo desviar el agua residual hacia la fuente receptora sin pasar por las unidades de tratamiento secundario bien sea por exceso de caudal o por afluentes no rutinarios que puedan afectar al proceso biológico. Se observó que el vertedero cuenta con su respectiva compuerta, lo cual permite el normal funcionamiento de las unidades posteriores (Patiño, 2019).
- Un (1) reactor UASB (**Foto 7**), con dos (2) módulos en paralelo de 490 m³ cada uno y un tiempo de retención hidráulico para el caudal de diseño de nueve (9) horas. Se observó que el reactor está provisto de canaletas dientes de sierra para realizar la recolección del efluente tratado y transportarlo al canal de rebose que conduce el agua residual a los filtros anaerobios, las canaletas cuentan con un baffle para evitar arrastrar flotantes hacia el efluente. El reactor UASB cuenta con válvulas de purga de diámetro pequeño comparado con el volumen del reactor, lo que genera posibles taponamientos y dificulta la extracción del lodo hacia los lechos de secado. También, cuenta con un quemador de biogás compartido para los dos (2) módulos, el cual no está provisto de una válvula para abrir y/o cerrar el paso del biogás cuando un (1) módulo esté funcionando y así evitar que el biogás sea transportado al otro módulo vacío y escape a la atmósfera (Patiño, 2019).

- Tres (3) filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) en paralelo (**Foto 8**) de aproximadamente 24 m³ cada uno y un tiempo de retención hidráulico para el caudal de diseño de cuarenta (40) minutos, mediante los cuales se realiza la transformación de la materia orgánica remanente. Se observó una gran diferencia en el volumen del reactor UASB y los FAFA, por lo tanto, el tiempo de retención hidráulico no será el mismo en las dos unidades, lo que genera una disminución en la eficiencia del sistema. Los FAFA no cuentan con válvula by-pass, es decir, todo el efluente del reactor UASB ingresa a los filtros, lo que genera inconvenientes a la hora de requerir una desviación de caudal ya sea por limpieza de los filtros anaerobios o por algún inconveniente con el proceso biológico (Patiño, 2019).
- Tres (3) lechos de secado (**Foto 9**) en paralelo cada uno de aproximadamente 28,2 m³, los cuales son utilizados para realizar el tratamiento de los lodos provenientes del reactor UASB, los FAFA y de las unidades preliminares; similar a lo sucedido con los filtros anaerobios, los lechos de secado tienen un volumen pequeño comparado con el volumen de reactor UASB, lo que dificulta tratar toda la cantidad de lodo extraído de las unidades; también se observó que los lechos no cuentan con la placa de concreto ubicada debajo de la válvula de ingreso del lodo, la cual es necesaria para evitar la erosión y el arrastre del material filtrante (Patiño, 2019).

6.1.2 Planta de tratamiento del municipio de Argelia

El caudal de diseño de la planta es de 13 L/s y la fuente receptora de la PTAR es la quebrada Llanadas (Mesa, 2019).

Los componentes y/ unidades de tratamiento de la PTAR del municipio de Argelia son:

- Un (1) alcantarillado de tipo combinado, el cual tiene como objetivo transportar las aguas residuales producidas por la población y las aguas lluvias hacia la planta para su tratamiento (a la planta ingresa el agua residual del 60% de la población) (Mesa, 2019).
- Un (1) canal de entrada (**Foto 10**) cuyo objetivo es direccionar el agua residual y generar un flujo uniforme hacia la planta (Mesa, 2019).

- Un (1) vertedero lateral (**Foto 11**), el cual sirve para evacuar los excesos de agua y así mantener constante el caudal de ingreso a las unidades de tratamiento (Mesa, 2019).
- Una (1) unidad de cribado (**Foto 12**) con dos (2) rejillas, esta unidad es de limpieza manual y cuenta con pasarela para el operario y dos (2) canastillas para la recolección de los residuos tales como ramas, plásticos, trapos, entre otros. También, cuenta con las compuertas para aislar las líneas de cribado al momento de la operación o si se presenta algún inconveniente (Mesa, 2019).
- Dos (2) canales desarenadores de flujo horizontal (**Foto 13**), ambos canales cuentan con tuberías ranuradas para la evacuación del agua residual cuando sea necesario su limpieza y compuertas para aislar la unidad en la operación o si se presenta algún inconveniente. Se observó que no cuentan con el ensanchamiento a la entrada de la unidad que garantiza la sedimentación de las partículas al tener una velocidad de 0,3 m/s (Mesa, 2019).
- Una (1) rejilla fina (**Foto 14**) ubicada verticalmente después de los desarenadores, la función de esta es remover los sólidos más pequeños que no son retenidos en la unidad de cribado. Esta rejilla, al no presentar un ángulo de inclinación dificulta la limpieza y exige una mayor periodicidad de limpieza debido a que cuando ésta se encuentra sucia, disminuye la lectura del tirante de agua en la canaleta Parshall (Mesa, 2019).
- Una (1) canaleta Parshall (**Foto 15**) de tres pulgadas (3'') para realizar el aforo del caudal de ingreso a las unidades de tratamiento. Esta canaleta cuenta con la regla para medir la lámina de agua, y así hallar el caudal del afluente (Mesa, 2019).
- Un (1) vertedero lateral (**Foto 16**) después de las unidades preliminares (by-pass) que tiene como objetivo desviar el agua residual hacia la fuente receptora sin pasar por las unidades de tratamiento secundario bien sea por el mantenimiento de las unidades, exceso de caudal o por algún afluente no rutinario que ingrese a la PTAR. Se observó que el vertedero cuenta con su respectiva compuerta, la cual permite el normal funcionamiento de las unidades posteriores (Mesa, 2019).

- Un (1) reactor UASB (**Foto 17**) de aproximadamente 300 m³ y un tiempo de retención hidráulico para el caudal de diseño de seis con cinco (6,5) horas. El reactor está provisto de canaletas dientes de sierra para la recolección del efluente con sus respectivos baffles que evitan el arrastre de flotantes hacia los filtros anaerobios, sin embargo, se observó que no se realizó de manera adecuada el empalme que conecta las canaletas dientes de sierra con el canal de rebose, por lo tanto, el agua residual pasa por debajo de la canaleta. También, cuenta con las válvulas requeridas para realizar la limpieza de los múltiples de distribución, la purga del reactor y el muestreo a diferentes alturas para realizar el perfil de lodos. La unidad está provista de un quemador de biogás (**Foto 18**) diseñado con latón galvanizado, el quemador se encuentra en buen estado y cuenta con su respectivo registro, sin embargo, falta la instalación del manómetro para medir la presión de biogás producido en el reactor UASB (Mesa, 2019).
- Tres (3) filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) en paralelo (**Foto 19**) de 24 m³ cada uno y un tiempo de retención hidráulico para el caudal de diseño de uno con cinco (1,5) horas. Los filtros están fabricados en fibra de vidrio, están provistos con medio filtrante (rosetas plásticas) y cada uno cuenta con su respectivo registro de entrada y salida (Mesa, 2019).
- Un (1) vertedero triangular con un ángulo de 90° (**Foto 20**) para la medición del caudal del efluente. El vertedero se encuentra en buen estado, se observó que no cuenta con la regla para realizar la lectura del tirante de agua y se evidenció que el agua residual no pasa por el centro del vertedero lo cual impide realizar el control del caudal (Mesa, 2019).
- Cuatro (4) lechos de secado (**Foto 21**) en concreto y provistos de material filtrante, registros para regular la entrada proveniente del reactor y de los filtros, estos están conectados a la tubería principal para realizar la descarga del agua residual a la quebrada Llanadas (Mesa, 2019).

6.1.3 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón

La planta entró en operación el 05 de febrero de 2018 con un caudal de diseño de 30 L/s y la fuente receptora de la PTAR es la quebrada La Hospital (Londoño, 2018).

Los componentes y/ unidades de tratamiento de la PTAR del municipio de Sonsón son:

- Un (1) alcantarillado combinado (**Foto 22**), encargado de dar ingreso del agua residual doméstica al canal de entrada. En el momento del arranque de la planta, el alcantarillado estaba conectado parcialmente, debido a que faltaba realizar la conexión del colector principal (Londoño, 2018).
- Un (1) canal de entrada (**Foto 23**) que garantiza el flujo laminar uniforme y se encuentra funcionando de manera adecuada (Londoño, 2018).
- Un (1) vertedero lateral de excedentes (**Foto 24**) para verter los excesos de caudal que se presenten en eventos de lluvia y poder regular el caudal de alimentación de la planta, el vertedero cuenta con la compuerta requerida para evitar que el agua residual sea vertida a la fuente receptora sin ningún tratamiento (Londoño, 2018).
- Una (1) unidad de cribado (**Foto 25**) con dos (2) rejillas, la unidad es de limpieza manual y cuenta con pasarela y dos (2) canastillas para la recolección de residuos voluminosos, también cuenta con la compuerta requerida para aislar una de las líneas del cribado a la hora de realizar limpieza y en la operación de la planta (Londoño, 2018).
- Dos (2) desarenadores (**Foto 26**) convencionales de flujo horizontal, ambos están provistos de tubería perforada para la evacuación del agua residual al momento de realizar limpieza o cuando se presente algún inconveniente con la unidad, también cuentan con su respectiva compuerta para aislar las líneas durante la operación (Londoño, 2018).
- Una (1) canaleta Parshall (**Foto 27**) de seis pulgadas (6'') con su respectiva regla para realizar la lectura del tirante de agua y conocer el caudal de ingreso a las unidades de tratamiento (Londoño, 2018).

- Un (1) reactor UASB (**Foto 28**) con dos (2) cámaras en paralelo de aproximadamente 490 m³ cada uno y un tiempo de retención hidráulico para el caudal de diseño de nueve (9) horas . A cada cámara le ingresa agua residual doméstica mediante tres (3) alimentadores. El reactor está provisto de canaletas dientes de sierra para la recolección del efluente y de baffles para evitar el arrastre de sólidos hacia los filtros anaerobios. La unidad cuenta con un quemador de biogás (**Foto 29**) en buen estado, sin embargo, no está provisto con el manómetro para la medición de producción de biogás. El reactor cuenta con válvulas de muestreo para realizar el perfil de lodos y válvulas de purga que conducen los lodos a los lechos de secado (Londoño, 2018).
- Tres (3) filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) en paralelo (**Foto 30**) de 24 m³ cada uno y un tiempo de retención hidráulico para el caudal de diseño de cuarenta (40) minutos. Están fabricados en fibra de vidrio y cuenta con material de soporte (rosetas plásticas) (Londoño, 2018).
- Siete (7) lechos de secado (**Foto 31**) con su respectivo material filtrante para la deshidratación de lodos, cada lecho de secado cuenta con la placa de concreto debajo de la tubería de entrada para evitar el arrastre del material filtrante (Londoño, 2018).
- Un (1) tanque séptico y un (1) filtro anaerobio (**Foto 32**) en serie, para tratar el agua residual doméstica generada en la caseta de operación, esta unidad permite un tratamiento primario de las aguas residuales, reduciendo su contenido en sólidos en suspensión, tanto sedimentables como flotantes. El filtro anaerobio de flujo ascendente está provisto de rosetas plásticas donde se genera la película de microorganismos y se produce la degradación de la materia orgánica remanente (Londoño, 2018).

6.2 SEGUIMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

6.2.1 Caudales de ingreso a la PTAR

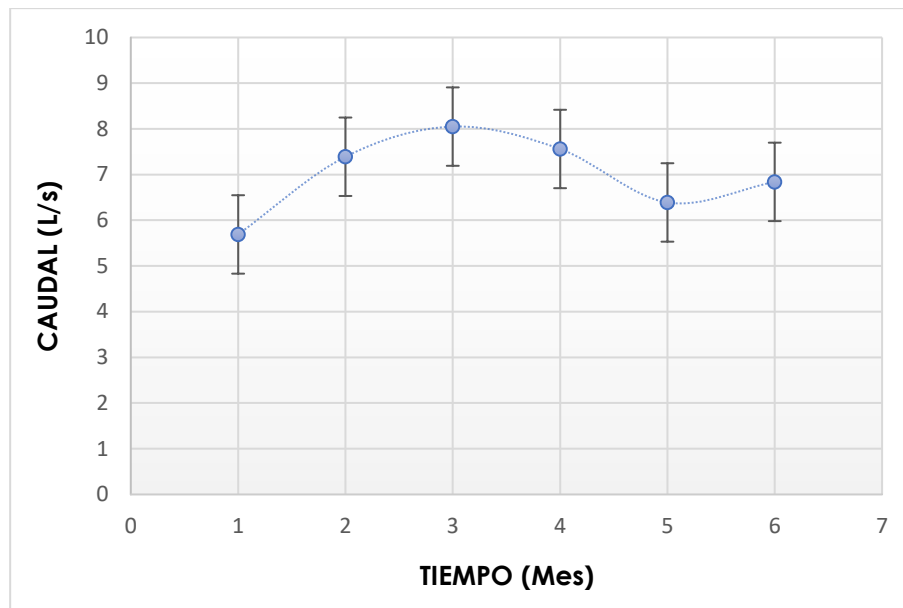
El caudal afluente PTAR es un parámetro de gran importancia, debido a que permite comprender la dinámica de funcionamiento del sistema y reconocer las horas pico de descarga; también, es importante y necesario tener registro de los caudales para estimar la tasa retributiva

por vertimientos puntuales que será cobrada por la autoridad ambiental competente, que en este caso es la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Río Negro y Nare (CORNARE).

6.2.1.1 Planta de tratamiento del municipio de Argelia

La medición del caudal en la PTAR del municipio de Argelia comenzó el 16 de septiembre de 2019, fecha en la cual se inició con el arranque de las unidades preliminares. El 30 de septiembre de 2019 se inició la alimentación del reactor UASB y el 01 de noviembre de 2019 de los filtros anaerobios, dando comienzo a la operación de todo el sistema de tratamiento. El reporte del caudal de ingreso a la PTAR durante el arranque y estabilización del sistema se realizó hasta el 25 de febrero de 2020.

En el mes de septiembre de 2019 se obtuvo un caudal promedio mensual de 5,69 L/s con un pico máximo de descarga de 7,71 L/s y mínimo de 0,73 L/s. En el mes de octubre de 2019 se presentó un caudal promedio mensual de 7,39 L/s con un caudal pico máximo de 10,56 L/s y mínimo de 5,4 L/s. Para el mes de noviembre de 2019 el caudal promedio mensual aumentó respecto a los meses anteriores, con un valor de 8,05 L/s y un pico máximo de descarga de 14,76 L/s y un mínimo de 5,80 L/s, este aumento se presentó debido a las fiestas de la mula que se desarrollaron en el municipio en este mes, lo que generó un aumento de la población flotante. El caudal del mes de diciembre de 2019 tuvo un comportamiento similar al presentado en octubre con un promedio mensual de 7,56 L/s un pico máximo de 9,82 L/s y mínimo de 5,45 L/s. En los meses de enero y febrero de 2020, el caudal se comportó de manera similar, con un valor promedio mensual de 6,39 L/s y 6,84 L/s, una descarga máxima de 9,1 L/s y 9,08 L/s y mínima de 5 L/s y 5,8 L/s respectivamente. Los resultados del caudal promedio mensual de los meses mencionados con la desviación estándar se encuentran en la **Gráfica 1**.

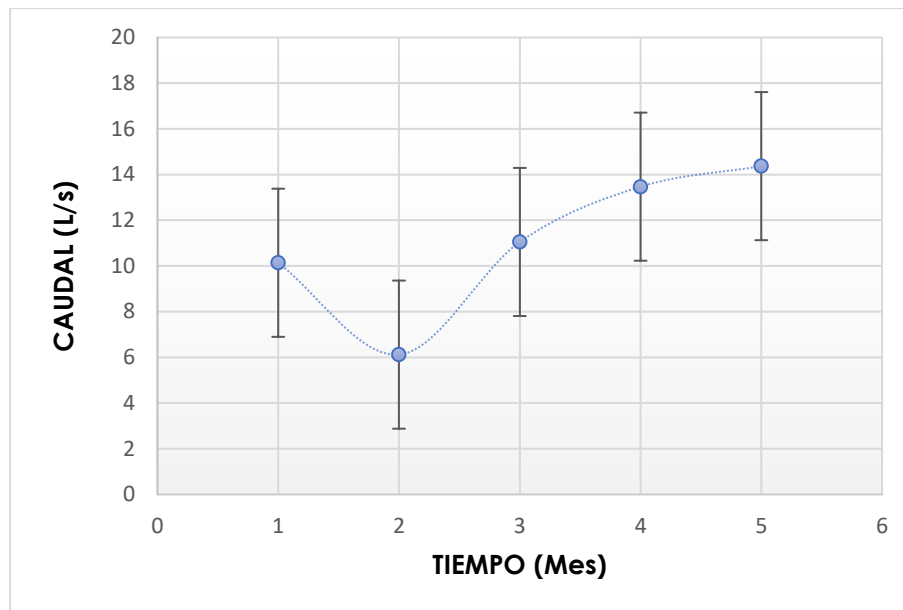


Gráfica 1. Caudal promedio mensual de la PTAR Argelia

6.2.1.2 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón

La PTAR del municipio de Sonsón comenzó el arranque y estabilización de los procesos biológicos desde el 05 de febrero de 2018 y entraron en funcionamiento todas las unidades del sistema de tratamiento el 15 de marzo de 2018, sin embargo, sólo será incluida y analizada la medición de caudal desde octubre de 2019 hasta febrero de 2020.

El caudal del mes de octubre de 2019 tuvo un valor promedio mensual de 10,14 L/s, un pico de descarga máxima de 15,65 L/s y mínimo de 2,40 L/s. En el mes de noviembre de 2019 se presentó un caudal promedio mensual de 6,12 L/s con un pico de descarga máxima de 10,40 L/s y mínimo de 2,23 L/s, en este mes, el municipio estaba realizando la conexión del colector principal del alcantarillado que transporta el agua residual, por tal motivo, a la PTAR le ingresó un caudal parcial. El caudal subió en el mes de diciembre de 2019, con un valor promedio mensual de 11,05 L/s, una descarga máxima de 14,12 L/s y mínima de 2,73 L/s. Para el mes de enero de 2020, el caudal promedio mensual estuvo en 13,47 L/s, con una descarga máxima de 17,15 L/s y mínima de 7 L/s, y finalmente, en el mes de febrero de 2020 el caudal promedio mensual fue 14,37 L/s presentando una descarga máxima de 18,48 L/s y mínima de 7,00 L/s. Los resultados con la respectiva desviación estándar se encuentran en la **Gráfica 2**.



Gráfica 2. Caudal promedio mensual de la PTAR Sonsón

6.2.2 Análisis fisicoquímico de la PTAR de Argelia

Los resultados del análisis fisicoquímico de agua residual doméstica realizado el 02 de diciembre de 2019 en la PTAR del municipio de Argelia (**Tabla 2**) muestran, que de acuerdo con la resolución 0631 de 2015 (capítulo V, artículo 8) la planta está cumpliendo con los límites máximos permisibles para el vertimiento puntual de agua residual doméstica, a excepción de la DQO, la cual se encuentra por encima del límite máximo.

Tabla 2. Resultados análisis fisicoquímico del primer muestreo de agua residual en la PTAR del municipio de Argelia

Parámetro	Unidades	Afluyente PTAR	Efluente Reactor UASB	Efluente PTAR	Valor máximo admisible por la Resolución 0631 de 2015	Cumplimiento
pH	-	6	6	6	6,0-9,0	Cumple
DQO	mg/L O ₂	305,2	222,2	283,5	180	No cumple
DBO5	mg/L O ₂	113,2	91,8	63,2	90	Cumple
SST	mg/L	96,8	42,3	23,7	90	Cumple
SSED	mL/L	2,0	-	<0,1	5	Cumple
Grasas y Aceites	mg/L	89,5	<15,0	<15,0	20	Cumple
Fósforo total	mg/L P	2,39	2,12	2,09	Análisis y Reporte	-
Nitrógeno amoniacal	mg/L NH ₃ -N	13,26	28,18	12,58	Análisis y Reporte	-
Nitritos	mg/L NO ₂ ⁻ -N	<0,002	<0,002	<0,002	Análisis y Reporte	-
ST	mg/L	312,4	227,5	195,7	No aplica	-
SF	mg/L	173,1	137,4	114,1	No aplica	-
SSV	mg/L	78,9	38,9	19,9	No aplica	-

SDT	mg/L	202,4	193,3	156,8	No aplica	-
SV	mg/L	139,3	90,1	81,6	No aplica	-
Cloruros	mg/L Cl ⁻	84,98	72,98	30,99	No aplica	-
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	64,82	110,51	59,96	No aplica	-

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

Sin embargo, a pesar de que se cumple con la normatividad vigente, la eficiencia de remoción del sistema en cuanto a DQO, DBO₅ es baja, y en cuanto a sólidos suspendidos totales (SST) se tiene una eficiencia considerable teniendo en cuenta los demás parámetros, esto indica que tanto el reactor UASB y los FAFA están cumpliendo el objetivo de reducir la cantidad de SST en el efluente de la PTAR (**Tabla 3**). También, se presenta la eficiencia para diferentes parámetros que no se encuentran regulados por la resolución vigente, sin embargo, se deben tener en cuenta a la hora de analizar el funcionamiento de la PTAR y así evitar un deterioro mayor al cuerpo de agua receptor. No se verifica la eficiencia de remoción para los parámetros de sólidos sedimentables (SSED) y grasas y aceites, debido a que el vertimiento cumple con la normatividad vigente y no fue reportado un valor exacto para dichos parámetros.

Tabla 3. Eficiencia de remoción del sistema de tratamiento primer muestreo

Parámetro	Eficiencia PTAR (%)
Demanda Química de Oxígeno total (DQO)	7
Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO ₅)	44
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	76
Fósforo total	12
Nitrógeno amoniacal	5
Sólidos totales (ST)	37
Sólidos totales fijos (STF)	34
Sólidos disueltos totales (SDT)	23
Cloruros	64
Sulfatos	7

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

Teniendo en cuenta los rangos de eficiencia en los procesos de tratamiento reportados en la resolución 0330 de 2017 (RAS 2017), el reactor UASB alcanza eficiencias mínimas de remoción del 65 al 80% para DBO₅, 60 al 80% para DQO y del 60 al 70% para SST, sin embargo, los resultados del primer muestreo (**Tabla 4**) indican que la eficiencia de remoción del reactor se encuentra muy por debajo de los rangos mencionados anteriormente, esto posiblemente es debido a que el

reactor lleva en funcionamiento muy poco tiempo, el cual puede no ser suficiente para formar la biomasa necesaria para lograr la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, también es importante tener en cuenta que el agua residual doméstica ingresa a la PTAR por un alcantarillado combinado, lo que genera una dilución significativa de esta, dificultando que la materia orgánica esté disponible para los microorganismos.

Tabla 4. Eficiencia de remoción del reactor UASB primer muestreo

Parámetro	Eficiencia Reactor UASB (%)
Demanda Química de Oxígeno total (DQO)	27
Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO5)	19
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	56
Fósforo total	11
Nitrógeno amoniacal	-
Sólidos totales (ST)	27
Sólidos totales fijos (STF)	21
Sólidos disueltos totales (SDT)	4
Cloruros	14
Sulfatos	-

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

Respecto a la eficiencia mínima de los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), la resolución 0330 de 2017 (RAS 2017) reporta los mismos valores del reactor UASB, sin embargo, los resultados del muestreo indican que la eficiencia de los FAFA es muy baja (**Tabla 5**), esto es debido principalmente al bajo tiempo de retención hidráulico que tienen los filtros, ya que no es tiempo suficiente para poder degradar la materia orgánica remanente. También, en esta unidad se presentó un aumento en la DQO respecto al efluente del reactor UASB, lo que podría ser debido a una resuspensión de lodo del fondo del filtro o a un desprendimiento del lodo adherido al material de soporte, lo que provoca arrastre de sólidos al efluente de los FAFA y a su vez, al efluente de la PTAR; este resultado, puede estar ligado también a que la muestra del efluente del reactor UASB fue puntual, por tanto no es una muestra representativa que nos indique el comportamiento normal de los FAFA. Esta unidad presentó una eficiencia importante en remoción de sulfatos, cloruros y nitrógeno amoniacal.

Tabla 5. Eficiencia de remoción de los filtros anaerobios (FAFA) primer muestreo

Parámetro	Eficiencia Filtros Anaerobios (%)
Demanda Química de Oxígeno total (DQO)	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO5)	31
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	44
Fósforo total	1
Nitrógeno amoniacal	55
Sólidos totales (ST)	14
Sólidos totales fijos (STF)	17
Sólidos disueltos totales (SDT)	19
Cloruros	58
Sulfatos	46

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

Los resultados de los análisis fisicoquímicos del muestreo compuesto de agua residual realizados el 03 de febrero de 2020 (**Tabla 6**) indican que la PTAR está cumpliendo con el vertimiento de acuerdo con los parámetros regulados en la resolución 0631 de 2015.

Tabla 6. Resultados análisis fisicoquímico del segundo muestreo de agua residual doméstica en la PTAR del municipio de Argelia

Parámetro	Unidades	Afluyente PTAR	Efluente reactor UASB	Efluente PTAR	Valor máximo admisible por la Resolución 0631 de 2015	Cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015
pH	-	6,76	6,66	6,71	6,0 a 9,0	Cumple
DQO	mg/L O ₂	259,4	186,1	167,7	180	Cumple
DBO5	mg/L O ₂	115,1	83,7	66,1	90	Cumple
SST	mg/L	54,5	47,4	33,6	90	Cumple
Grasas y Aceites	mg/L	21,7	17,0	17,3	20	Cumple
Fósforo total	mg/L P	1,64	-	1,85	Análisis y Reporte	-
Nitrógeno amoniacal	mg/L NH ₃ -N	10,42	-	11,19	Análisis y Reporte	-
Nitritos	mg/L NO ₂ -N	0,038	-	0,015	Análisis y Reporte	-
Nitratos	mg/L NO ₃ -N	<0,4	-	<0,4	Análisis y Reporte	-
ST	mg/L	263,4	230,5	200,7	No aplica	-
SSV	mg/L	46,6	38,5	30,7	No aplica	-
SDT	mg/L	194,4	163,8	160,8	No aplica	-
SV	mg/L	143,5	113,7	108,8	No aplica	-
Cloruros	mg/L Cl ⁻	<3,0	-	<3,0	No aplica	-
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	21,64	-	10,32	No aplica	-

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

Comparado con los resultados del primer muestreo compuesto, la eficiencia de remoción de DQO aumentó, teniendo en cuenta que en el primer muestreo este parámetro no cumplía con la normativa, en cuanto, a la DBO₅, se presentó una eficiencia de remoción similar a la del primer muestreo; respecto a los sólidos suspendidos totales, la eficiencia de remoción disminuyó de manera considerable para el segundo muestreo compuesto, lo que indica que posiblemente a lo largo del sistema se esté presentando una resuspensión de sólidos y estén escapando hacia el efluente final (**Tabla 7**).

Tabla 7. Eficiencia de remoción del sistema de tratamiento segundo muestreo

Parámetro	Eficiencia PTAR (%)
Demanda Química de Oxígeno total (DQO)	35
Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO ₅)	43
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	38
Grasas y aceites	20
Fósforo total	-
Nitrógeno amoniacal	-
Nitritos	61
Sólidos totales (ST)	24
Sólidos disueltos totales (SDT)	17
Sulfatos	52

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

El reactor UASB siguió presentando eficiencias de remoción por fuera del rango reportado en la resolución 0330 de 2017 (**Tabla 8**), esto se debe principalmente, al poco tiempo que lleva el sistema operando, debido a que, por experiencia en el arranque de otras plantas de tratamiento con el mismo tren de tratamiento, se han reportado altas eficiencias de remoción y producción de biogás luego de aproximadamente un (1) año de operación.

Tabla 8. Eficiencia de remoción del reactor UASB segundo muestreo

Parámetro	Eficiencia Reactor UASB (%)
Demanda Química de Oxígeno total (DQO)	28
Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO5)	27
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	13
Grasas y aceites	22
Sólidos totales (ST)	12
Sólidos disueltos totales (SDT)	16

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

En cuanto a la eficiencia de remoción de los filtros anaerobios de flujo ascendente, no se presentó aumento de la DQO, lo cual podría indicar que en el muestreo anterior esto sucedió debido al tipo de muestra tomada a la salida del reactor UASB, que a su vez es el ingreso a los FAFA, la remoción de DBO₅ y sólidos suspendidos totales disminuyó comparada con la presentada en el primer muestreo, lo que sugiere que el sistema aún no está estabilizado completamente (**Tabla 9**).

Tabla 9. Eficiencia de remoción de los filtros anaerobios (FAFA) segundo muestreo

Parámetro	Eficiencia Filtros Anaerobios (%)
Demanda Química de Oxígeno total (DQO)	10
Demanda Bioquímica de Oxígeno total (DBO5)	21
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	29
Grasas y aceites	-
Sólidos totales (ST)	13
Sólidos disueltos totales (SDT)	2

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados presentados por el laboratorio de CORNARE

De acuerdo con las características fisicoquímicas de las aguas residuales domésticas en países desarrollados presentada por Von Sperling, 2007, solo la concentración de nitratos se encuentra en el rango de concentraciones típicas de aguas residuales domésticas en países desarrollados; los demás parámetros analizados, se encuentran por debajo de los valores reportados.

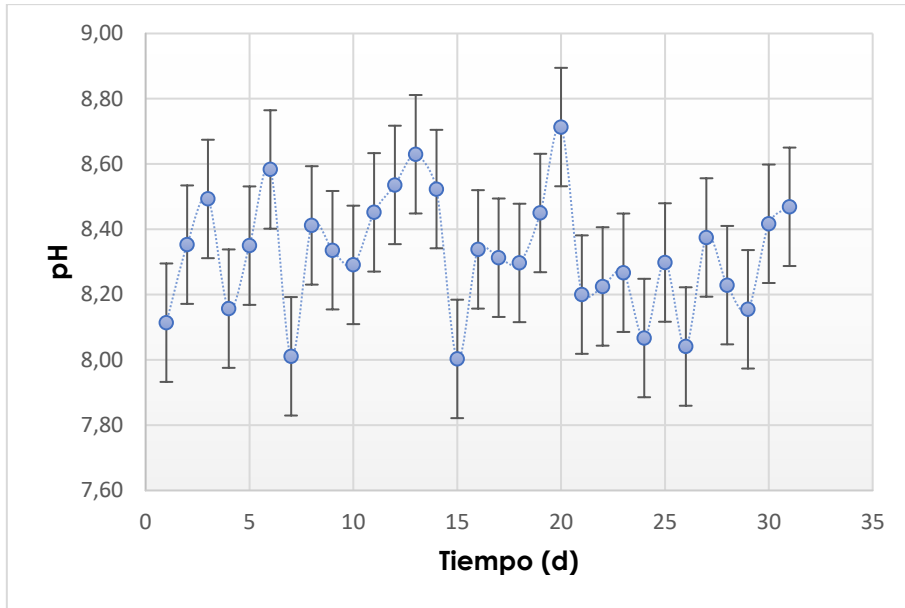
6.2.3 pH y alcalinidad

Para garantizar el buen funcionamiento de los reactores anaerobios, es necesario generar condiciones adecuadas que busquen siempre incrementar el valor de la biomasa, para esto, es necesario tener control sobre variables como el pH y la alcalinidad, considerando que estas inciden directamente en el comportamiento del reactor, ya que el pH y la capacidad tampón en un sistema anaerobio son completamente dependientes del equilibrio entre el ácido carbónico (H_2CO_3) y el ion bicarbonato (HCO_3^-) (Pérez & Torres, 2008). La estabilidad de los procesos de tratamiento anaerobio depende en gran medida del pH, mientras que las bacterias acidogénicas son más tolerantes a valores de pH por debajo de 6, los valores óptimos de pH para los microorganismos metanogénicos se encuentran entre 7 y 8. Por lo tanto, el rango de pH de 6.5 a 7.8 es adecuado para todo el proceso (Akunna, 2018). En el caso de la alcalinidad, es importante conocer que es un parámetro que brinda capacidad buffer o amortiguadora al sistema haciéndolo más estable frente a cambios de pH, generalmente descensos. En los reactores anaerobios un valor de AI/AT de 0,30 indica que el sistema se está acidificando (Molina et al., 2002).

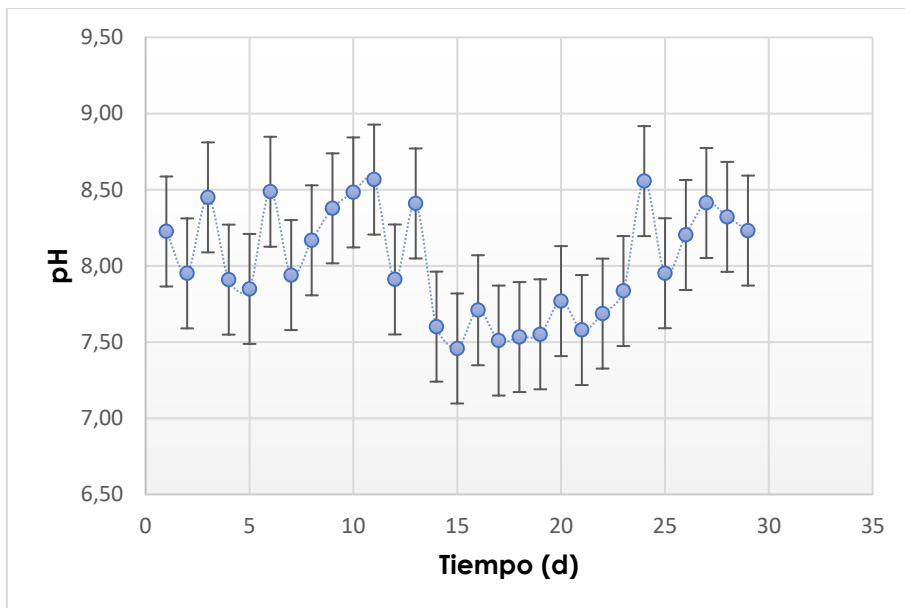
6.2.3.1 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del seguimiento de pH y alcalinidad entre octubre de 2019 y febrero de 2020.

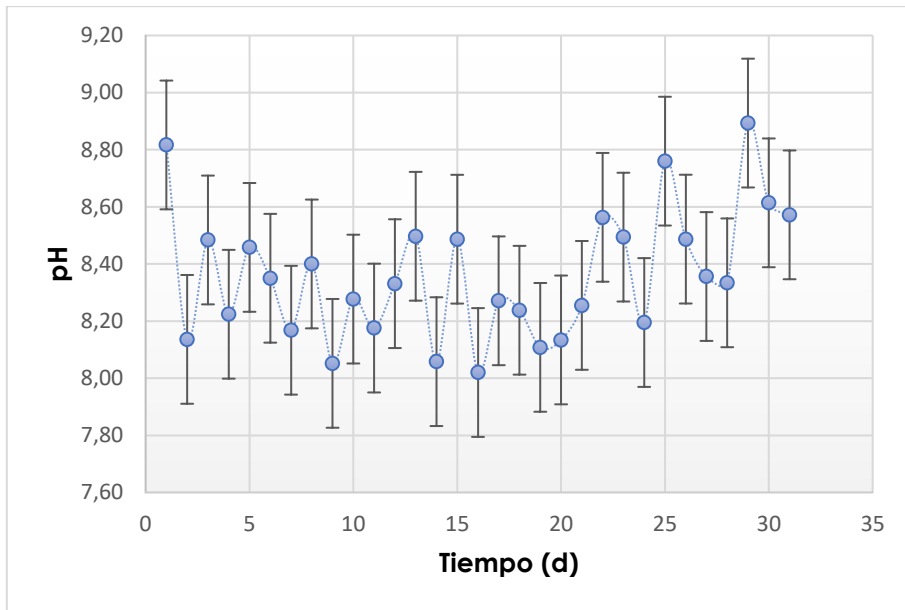
El pH del afluente osciló en el rango de 7.46 a 8.89 durante los meses evaluados (**Gráfica 3, Gráfica 4, Gráfica 5, Gráfica 6, Gráfica 7**), estos valores elevados de pH se deben al tipo de agua residual que ingresa a la PTAR, ya que el agua residual doméstica se caracteriza por presentar altas cantidades de compuestos nitrogenados, como las proteínas; estos compuestos nitrogenados se hidrolizan para producir amoníaco, lo que provoca un aumento del pH. Es importante mencionar que sería adecuado medir el pH al ingreso de los reactores UASB debido a que el amoníaco ejerce un efecto tóxico sobre las bacterias metanogénicas a valores de pH por encima de 8.5 (Akunna, 2018).



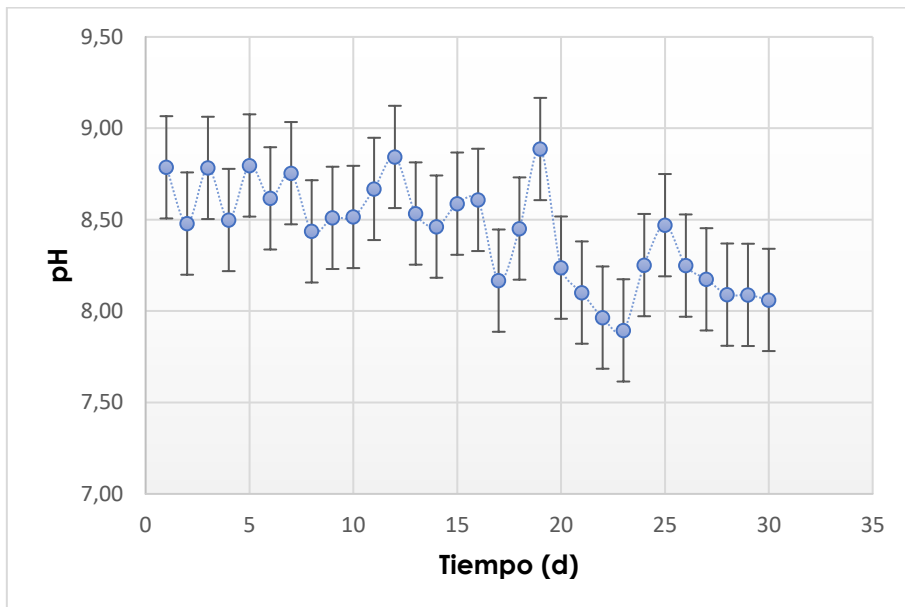
Gráfica 3. pH afluente PTAR Sonsón octubre 2019



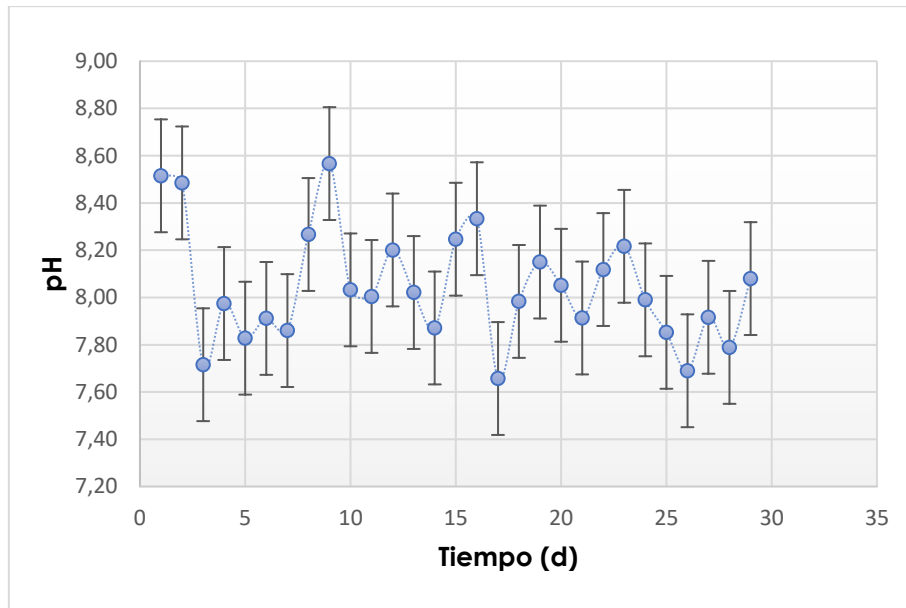
Gráfica 4. pH afluente PTAR Sonsón noviembre 2019



Gráfica 5. pH afluente PTAR Sonsón diciembre 2019

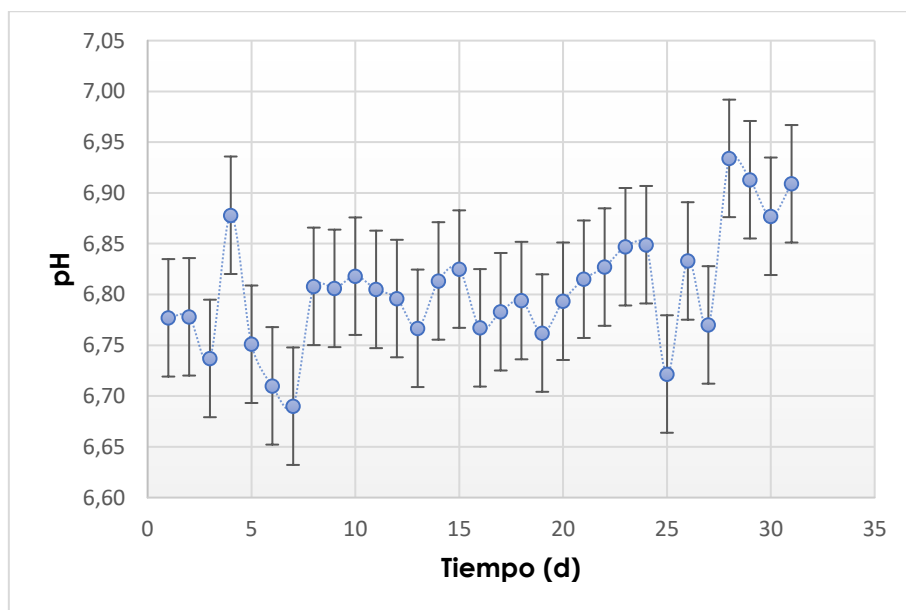


Gráfica 6. pH afluente PTAR Sonsón enero 2020



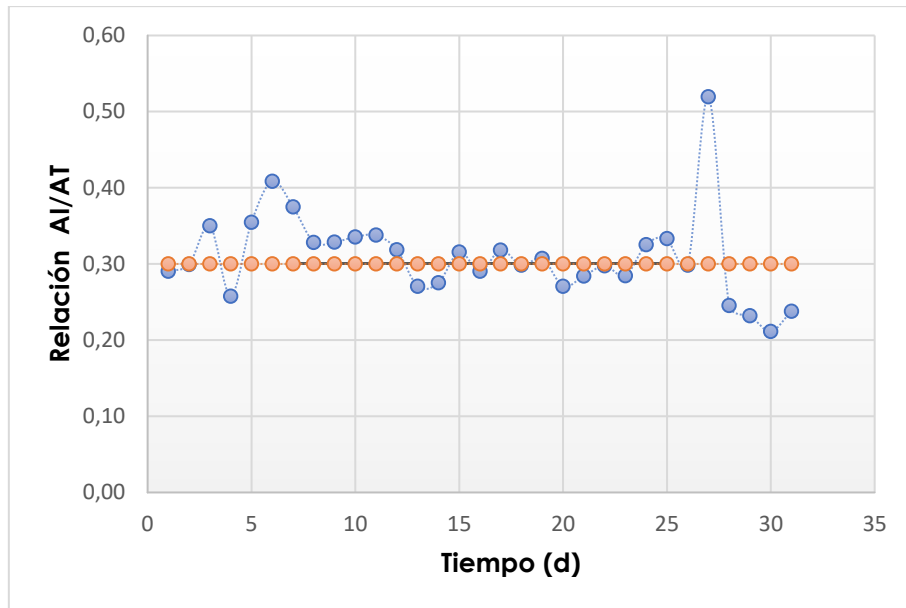
Gráfica 7. pH afluente PTAR Sonsón febrero 2020

En cuanto al pH en el efluente reactor UASB para el mes de octubre de 2019, se presentó un valor mínimo de 6.69 y máximo de 6.93 unidades de pH (**Gráfica 8**), este rango a pesar de ser estrecho es adecuado para que se presente actividad de los microorganismos metanogénicos.



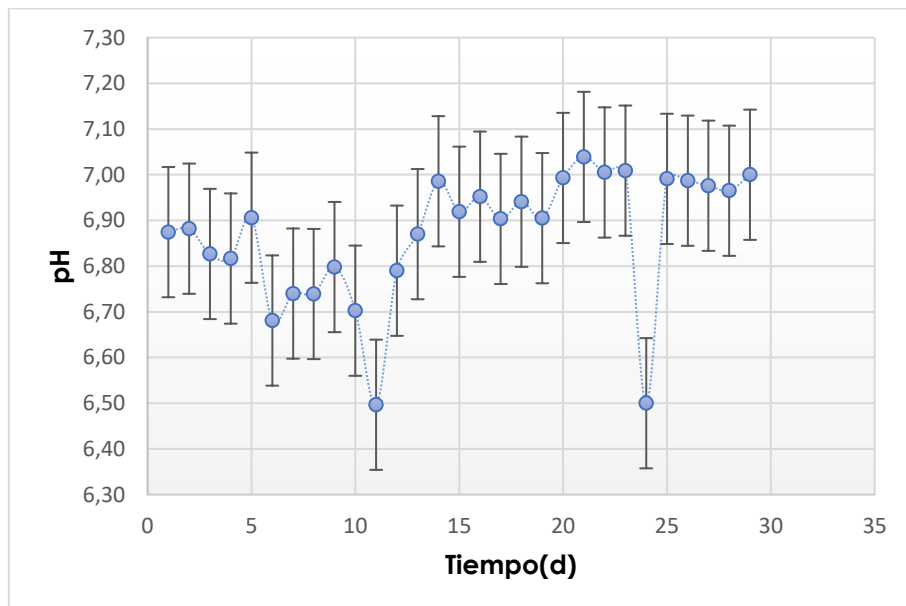
Gráfica 8. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón octubre 2019

En cuanto a la relación de alcalinidad intermedia y total (**Gráfica 9**), se obtuvo un valor mínimo de 0.21 y máximo de 0.52, teniendo en cuenta que durante 15 días la relación estuvo por encima del valor recomendado para el adecuado funcionamiento del reactor.



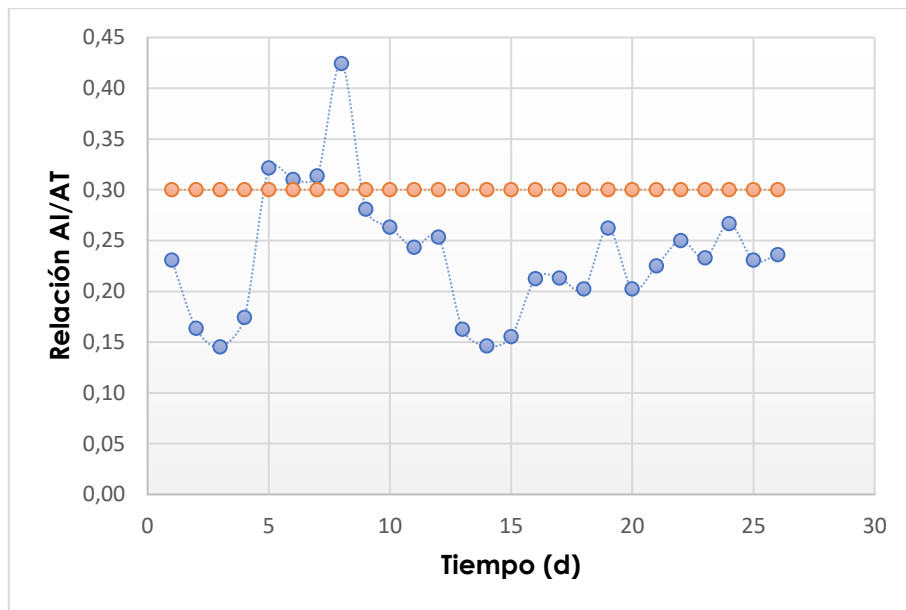
Gráfica 9. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón octubre 2019

En el mes de noviembre de 2019, el pH osciló entre 6.50 y 7.04 unidades de pH (**Gráfica 10**), cumpliendo con el rango óptimo para la operación del sistema.



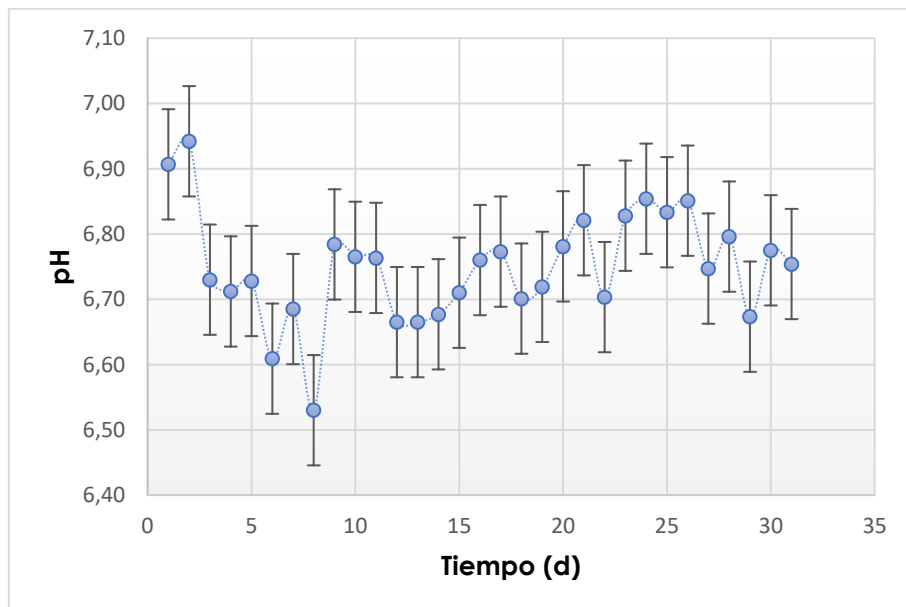
Gráfica 10. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón noviembre 2019

La relación de alcalinidad presentó un valor mínimo de 0.15 y máximo de 0.42 (**Gráfica 11**), esta se mantuvo por debajo del valor recomendado a excepción de los días 5,6,7 y 8, en los cuales se presentaron los valores máximos.



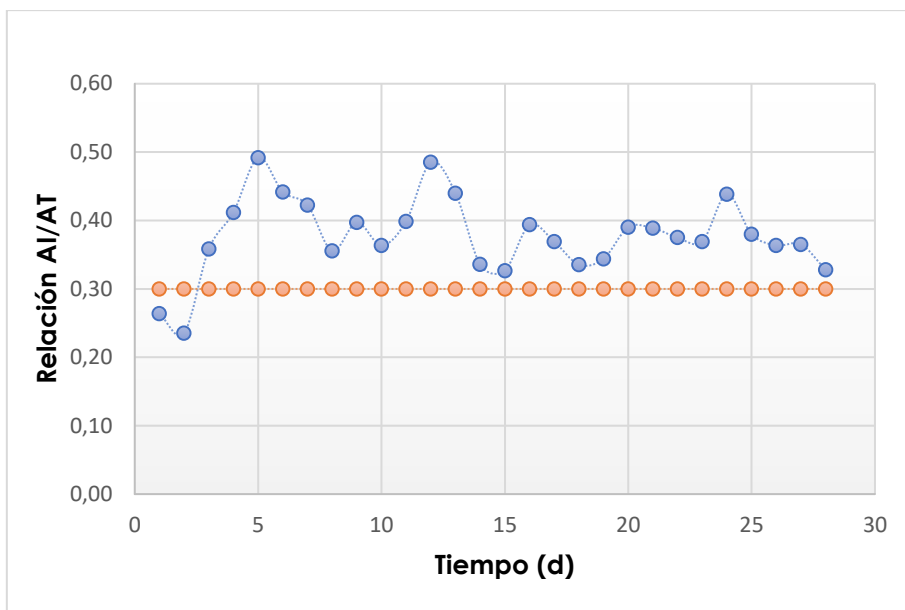
Gráfica 11. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón noviembre 2019

Para el mes de diciembre de 2019, el pH estuvo en el rango de 6.53 y 6.94 unidades de pH (**Gráfica 12**), continuando en el rango de operación recomendado.



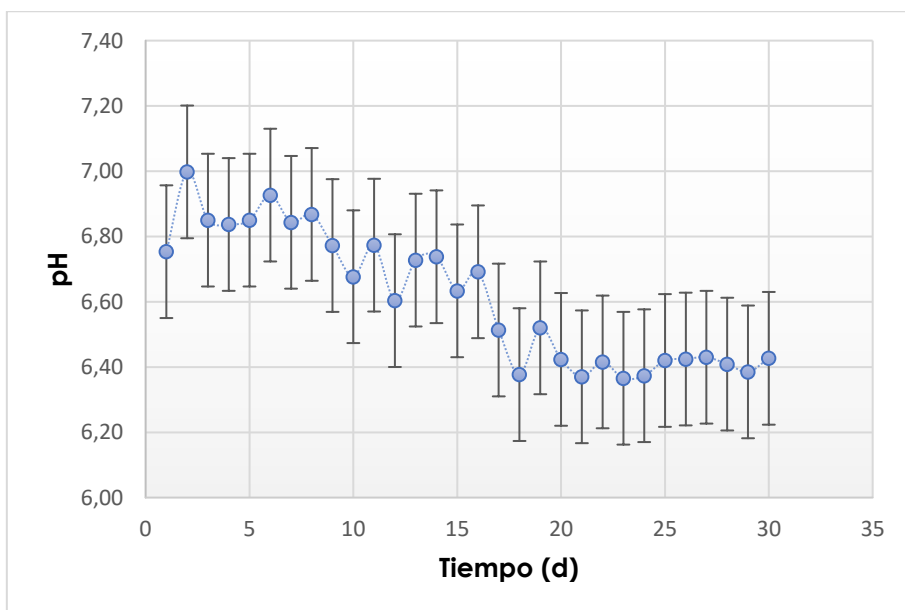
Gráfica 12. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón diciembre 2019

La alcalinidad, presentó un valor mínimo de 0.24 y máximo 0.49 (**Gráfica 13**), sin embargo, a excepción de los días 1 y 2, la relación de alcalinidad estuvo por encima del valor recomendado para evitar la acidificación del sistema.

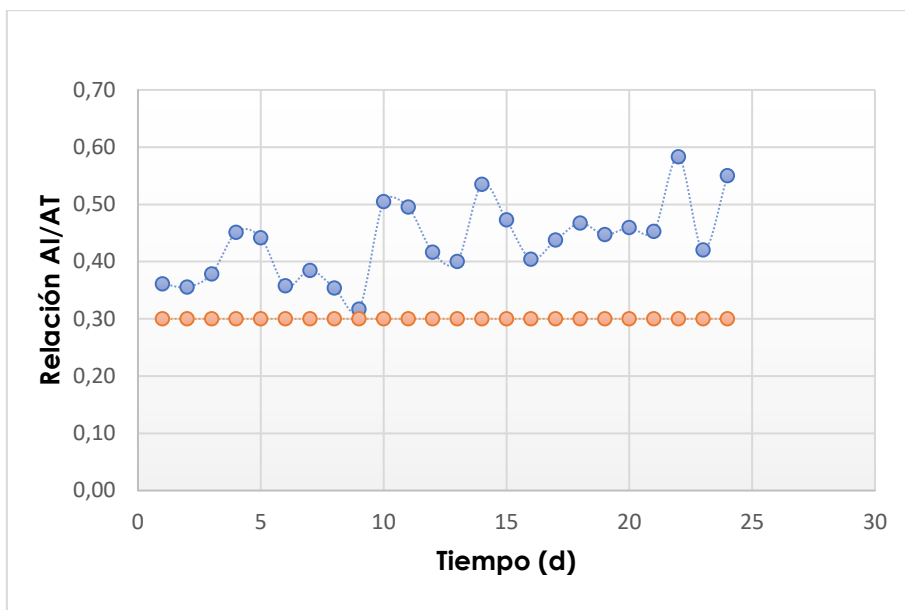


Gráfica 13. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón diciembre 2019

El pH en el mes de enero de 2020 osciló entre 6.37 y 7.00 unidades de pH (**Gráfica 14**), en este mes los valores de pH bajaron considerablemente, lo que afectó directamente el índice de alcalinidad (**Gráfica 15**), el cual se mantuvo durante el mes por encima del valor recomendado.

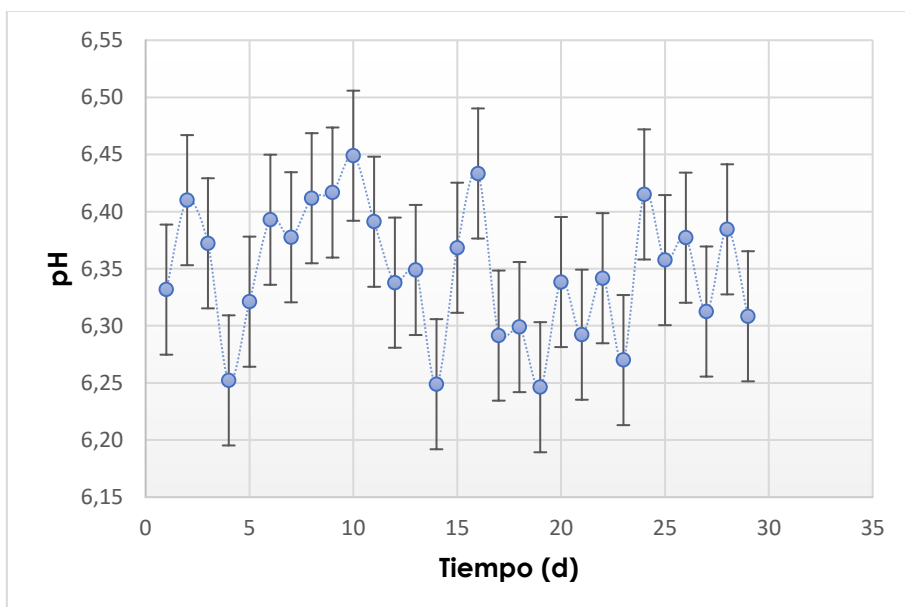


Gráfica 14. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón enero 2020

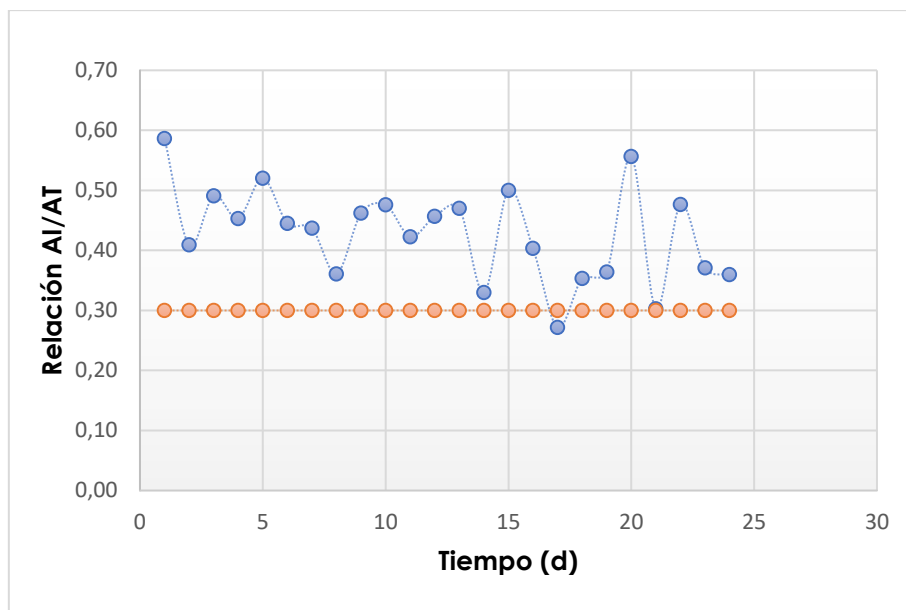


Gráfica 15. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón enero 2020

Para el mes de febrero de 2020 los valores de pH también disminuyeron de manera significativa, en el rango de 6.25 a 6.45 unidades de pH (**Gráfica 16**), encontrándose por fuera del rango recomendado para la actividad de los microorganismos metanogénicos, esta disminución de pH, se pudo corroborar con la relación de alcalinidad, la cual presentó un valor mínimo de 0.27 y máximo de 0.59 (**Gráfica 17**), y se mantuvo por encima del valor recomendado a excepción del día 17.



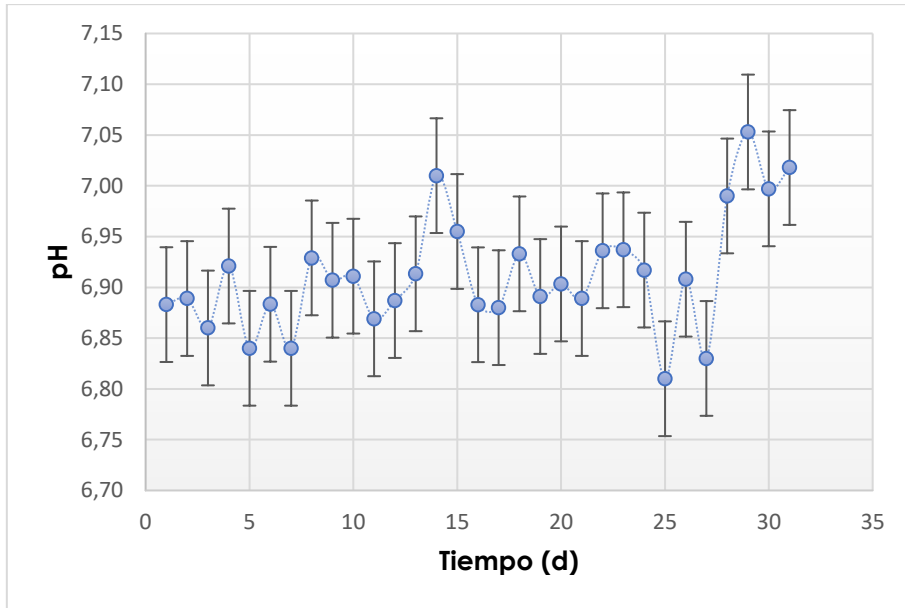
Gráfica 16. pH efluente reactor UASB PTAR Sonsón febrero 2020



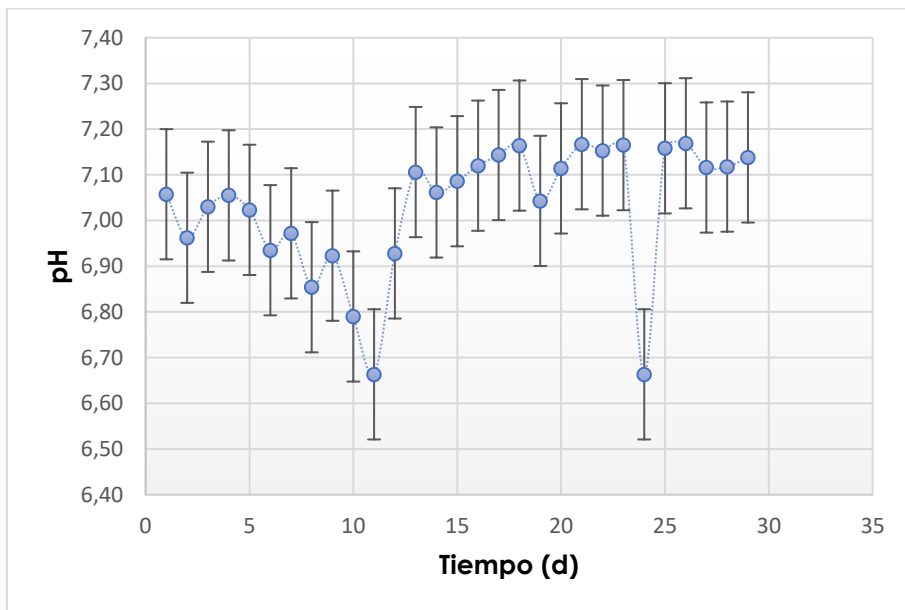
Gráfica 17. Relación alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Sonsón febrero 2020

Es necesario entender que la alcalinidad total por sí sola no es un buen parámetro de control debido que su variación no es muy significativa para explicar el funcionamiento del sistema ya que su valor puede permanecer alto y producirse al mismo tiempo un aumento de ácidos. Por tal motivo, se utiliza como indicativo la relación de alcalinidad intermedia y alcalinidad total (Molina & Rodríguez, 2011). Sin embargo, es importante aclarar que la relación Al/AT no es el único parámetro que se debe tener en cuenta para determinar si el sistema está funcionando en condiciones óptimas, ya que a pesar que a lo largo del seguimiento en el efluente del reactor UASB se obtuvieron valores de Al/AT por encima del valor óptimo, podría decirse que el reactor se encuentra funcionando de manera adecuada debido a que diariamente se realizó quema de biogás, se observó el color oscuro del agua residual característico de los procesos anaerobios y en la mayoría de los meses evaluados, el pH del efluente se encontró en el rango sugerido por diversos autores.

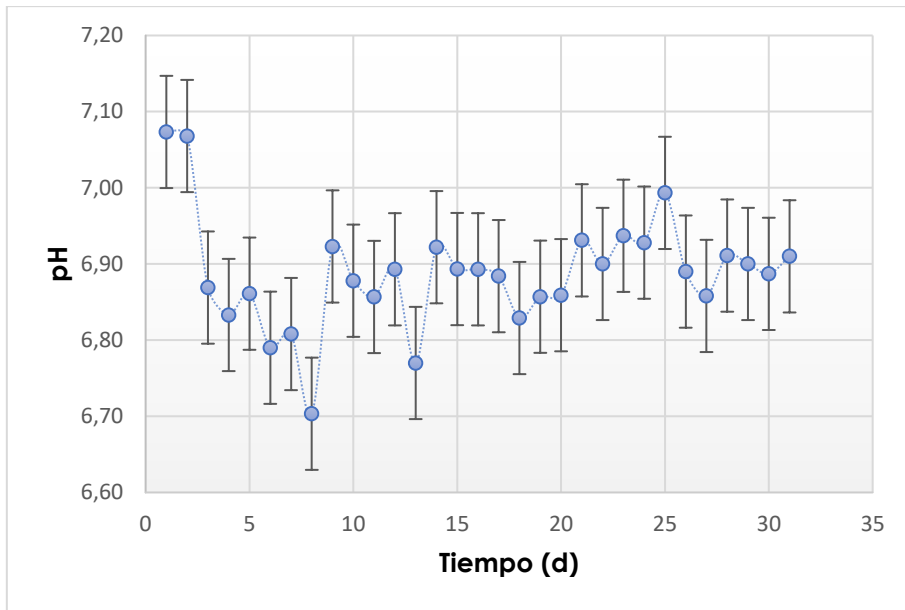
En cuanto al pH del efluente de la PTAR, la resolución 0631 de 2015 establece en el capítulo V artículo 8, que el pH del efluente de la PTAR debe estar en el rango de 6.0 a 9.0 unidades de pH. Los resultados obtenidos muestran que el pH del efluente a lo largo del seguimiento osciló entre 6.33 y 7.17 unidades de pH (**Gráfica 18, Gráfica 19, Gráfica 20, Gráfica 21, Gráfica 22**), lo cual cumple con los requerimientos de la normatividad.



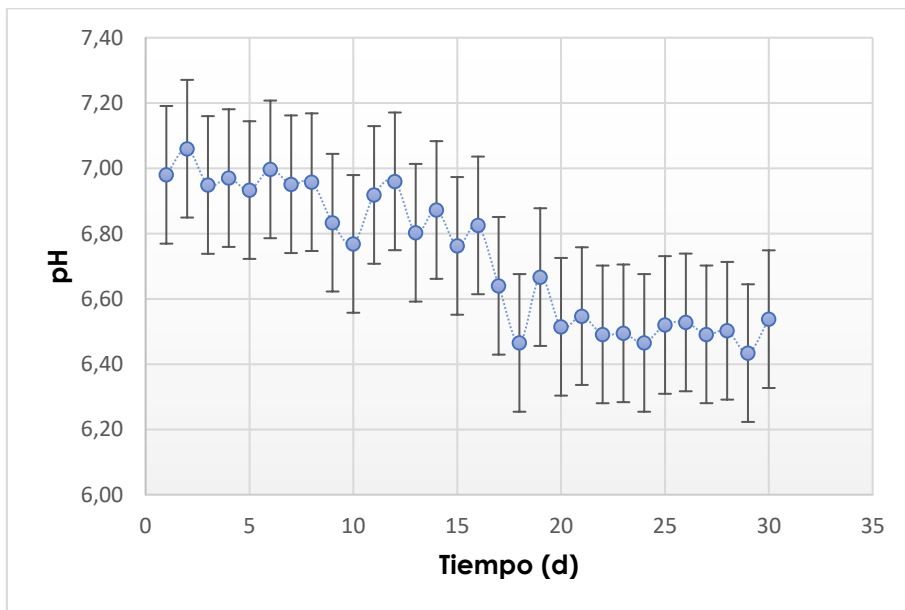
Gráfica 18. pH efluente PTAR Sonsón octubre 2019



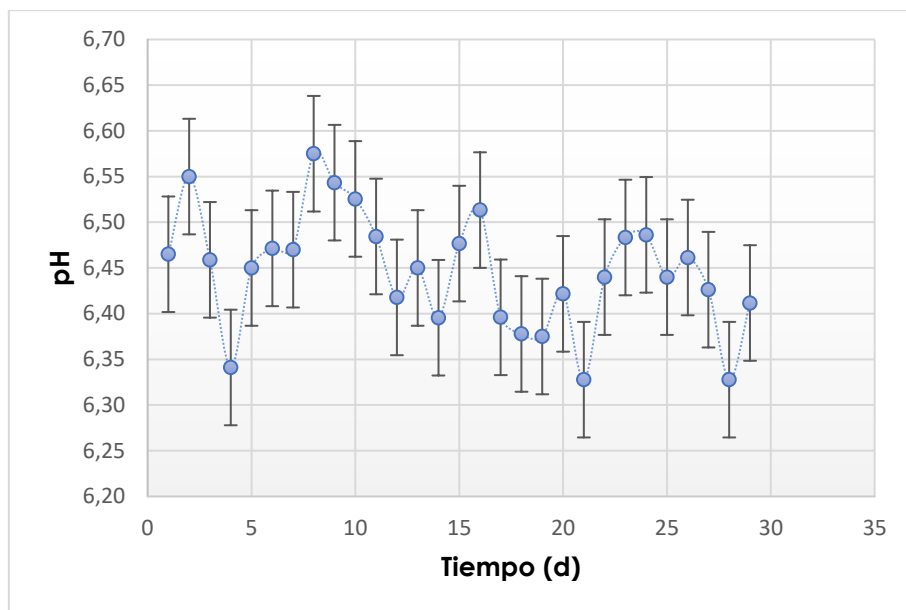
Gráfica 19. pH efluente PTAR Sonsón noviembre 2019



Gráfica 20. pH efluente PTAR Sonsón diciembre 2019



Gráfica 21. pH efluente PTAR Sonsón enero 2020

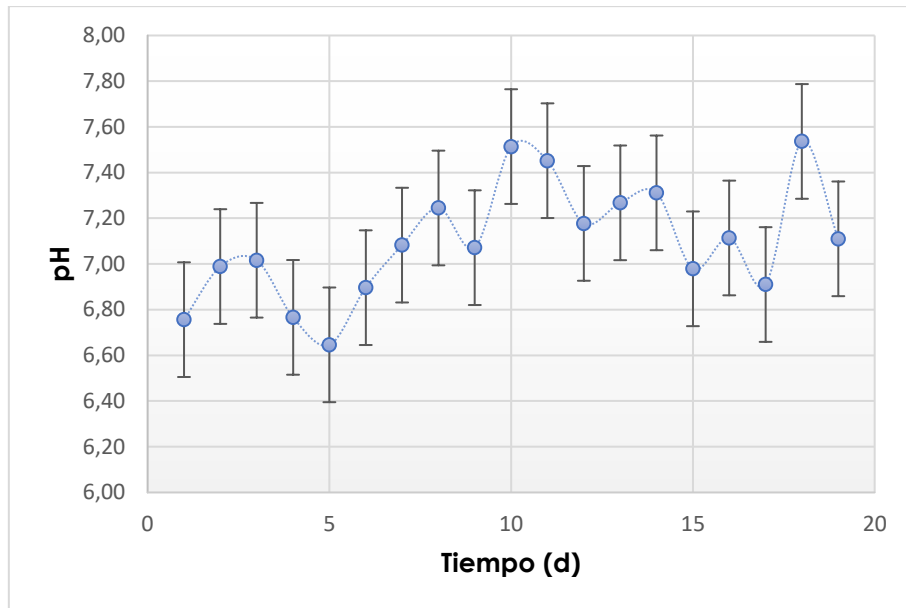


Gráfica 22. pH efluente PTAR Sonsón febrero 2020

6.2.3.2 Planta de tratamiento del municipio de Argelia

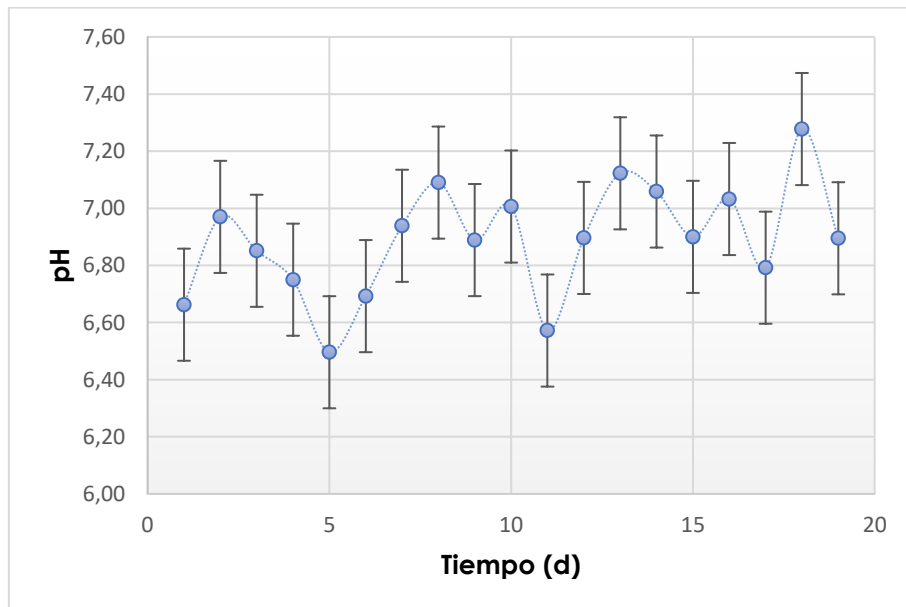
En la PTAR del municipio de Argelia sólo fue posible realizar seguimiento de pH y alcalinidad en febrero de 2020, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

El pH del afluente de la PTAR estuvo en el rango de 6.65 a 7.54 unidades de pH (**Gráfica 23**), a pesar de que el agua residual doméstica presente altas cantidades de compuestos nitrogenados, estos compuestos no elevan el pH de manera considerable al ingreso de la PTAR debido a que las viviendas se encuentran muy alejadas y el agua residual llega a la planta muy diluida, por tal motivo, no se tiene un aumento considerable del pH.



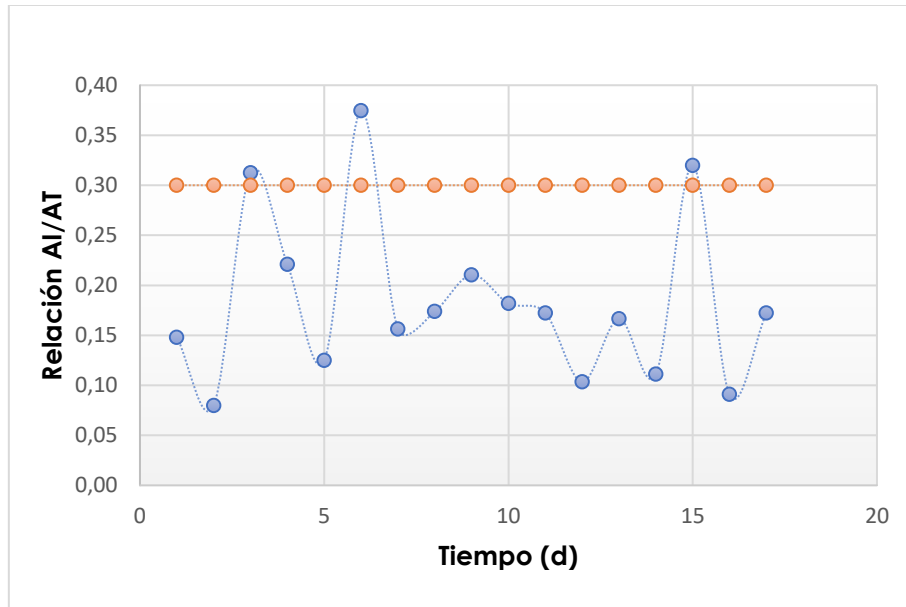
Gráfica 23. pH afluente PTAR Argelia febrero 2020

En cuanto al pH del efluente reactor UASB, a lo largo del mes de febrero de 2020 osciló entre 6.50 y 7.28 unidades de pH (**Gráfica 24**), manteniéndose en el rango recomendado para no afectar la actividad de los microorganismos metanogénicos, a pesar de que en la planta de tratamiento aún no se presenta producción de biogás.



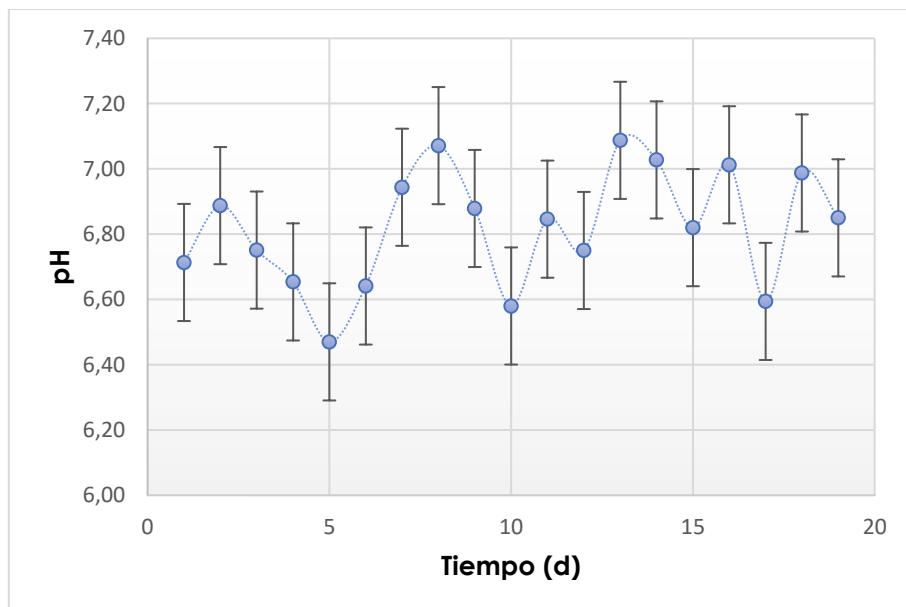
Gráfica 24. pH efluente reactor UASB PTAR Argelia febrero 2020

En cuanto a la relación de alcalinidad, esta estuvo en el rango de 0.08 a 0.37 (**Gráfica 25**), a lo largo del mes la relación de alcalinidad se mantuvo por debajo del valor sugerido a excepción de los días 3,6 y 15, lo que indica que en el reactor no se están presentando problemas de acidificación.



Gráfica 25. Relación de alcalinidad efluente reactor UASB PTAR Argelia febrero 2020

El pH del efluente de la PTAR se mantuvo en el rango de 6.47 a 7.09 unidades de pH (**Gráfica 26**), cumpliendo con lo establecido en la resolución 0631 de 2015.



Gráfica 26. pH efluente PTAR Argelia febrero 2020

6.2.4 Caracterización de emisiones fugitivas de gases en la PTAR del municipio de Sonsón

Numerosos compuestos odoríferos están asociados a olores producidos en aguas residuales domésticas e industriales. Los olores relacionados con aguas residuales se generan típicamente debido a compuestos sulfurosos o nitrogenados, ácidos orgánicos o cetonas. Los olores más asociados a plantas de tratamiento de agua residual doméstica se generan por ácido sulfhídrico y compuestos sulfurosos orgánicos como mercaptanos, dimetilsulfuro y dimetildisulfuro (Stuetz et al., 2001). Por esta razón, el análisis de los resultados de la caracterización de biogás se concentró en los puntos de mayor emisión de H_2S en la PTAR.

El principal compuesto que genera olores ofensivos es el ácido sulfhídrico (H_2S), este se forma durante el proceso de descomposición de la materia orgánica que contiene azufre, o en la reducción de sulfitos y sulfatos minerales (Metcalf & Eddy, 2002). Este compuesto se forma de la reducción biológica del sulfato (SO_4^{2-}) o tiosulfato bajo condiciones anaerobias; la bacteria estrictamente anaerobia *Desulfovibrio*, es responsable de la mayoría de la reducción del sulfato a sulfuro (Arriagada, 2012).

6.2.4.1 Entrada a la PTAR y unidades preliminares

En la entrada a la PTAR y en las unidades preliminares (rejillas y canal desarenador) se detectaron concentraciones de H_2S en el rango de 0 a 2 ppm para las tres (3) caracterizaciones de biogás realizadas; la presencia de olores ofensivos se debe a que en las rejillas se retiene materia orgánica de gran volumen debido a la cercanía de las viviendas (entre 90 metros y 130 metros) y en el canal desarenador se sedimentan tanto las arenas como materia orgánica, la cual al comenzar el proceso de descomposición estimula la proliferación de malos olores. Los resultados de caracterización de biogás para la entrada a la PTAR y unidades preliminares se encuentran en la **Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12.**

Tabla 10. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en la entrada a la PTAR y unidades preliminares

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,1	0	0	79,9
	Unidad de cribado	0	0	19,9	0	0	80,1
	Desarenador	0	0	20,0	0	0	80,0
10:00-11:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,2	0	1	79,8
	Unidad de cribado	0	0	20,2	0	1	79,8
	Desarenador	0	0	20,2	0	1	79,8
11:00-12:00	Entrada a la PTAR	0	0	19,7	0	0	80,3
	Unidad de cribado	0	0	20,9	0	0	79,1
	Desarenador	0	0	20,8	0	1	79,2
12:00-13:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,1	0	0	82,0
	Unidad de cribado	0	0	20,0	0	1	80,0
	Desarenador	0	0	20,1	0	2	79,9
13:00-14:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,0	0	0	80,0
	Unidad de cribado	0	0	20,6	0	1	79,4
	Desarenador	0	0	20,6	0	0	79,4
14:00-15:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,1	0	0	79,9
	Unidad de cribado	0	0	20,2	0	2	79,8
	Desarenador	0	0	20,3	0	0	79,6
15:00-16:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,4	0	0	79,6
	Unidad de cribado	0	0	20,5	0	2	79,5
	Desarenador	0	0	20,5	0	1	79,5
16:00-17:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,5	0	0	79,5
	Unidad de cribado	0	0	20,6	0	2	79,4
	Desarenador	0	0	20,6	0	2	79,4

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 1-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 11. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en la entrada a la PTAR y unidades preliminares

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Entrada a la PTAR	0	0	19,9	0	0	80,1
	Unidad de cribado	0	0	19,7	0	0	80,3
	Desarenador	0	0	19,7	0	0	80,3
10:00-11:00	Entrada a la PTAR	0	0	19,0	0	0	81,0
	Unidad de cribado	0	0	20,5	0	1	79,5
	Desarenador	0	0	20,6	0	0	79,4
11:00-12:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,2	0	2	79,8
	Unidad de cribado	0	0	19,9	0	2	80,1
	Desarenador	0	0	19,7	0	1	80,3
13:00-14:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,1	0	0	79,8
	Unidad de cribado	0	0	20,2	0	0	79,8
	Desarenador	0	0	20,2	0	0	79,8
14:00-14:30	Entrada a la PTAR	0	0	19,8	0	0	80,5

	Unidad de cribado	0	0	19,4	0	0	80,6
	Desarenador	0	0	19,5	0	0	80,5
14:30-15:00	Entrada a la PTAR	0	0	19,8	0	0	80,2
	Unidad de cribado	0	0	19,9	0	0	80,1
	Desarenador	0	0	20,0	0	0	80,0
15:00-16:00	Entrada a la PTAR	0	0	20,1	0	0	79,8
	Unidad de cribado	0	0	20,2	0	0	79,7
	Desarenador	0	0	20,3	0	0	79,7

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 2-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 12. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en la entrada a la PTAR y unidades preliminares

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Entrada a la PTAR	0	0	21,1	0	78,9
	Unidad de cribado	0	0	20,9	0	79,1
	Desarenador	0	0	20,8	0	79,2
10:00-10:45	Entrada a la PTAR	0	0	21,4	5	78,6
	Unidad de cribado	0	0	21,4	0	78,6
	Desarenador	0	0	21,4	0	78,6
10:45-11:15	Entrada a la PTAR	0	0	21,5	0	78,5
	Unidad de cribado	0	0	21,5	0	78,5
	Desarenador	0	0	21,5	0	78,5
11:15-11:50	Entrada a la PTAR	0	0	21,6	1	78,4
	Unidad de cribado	0	0	21,7	0	78,3
	Desarenador	0	0	21,7	0	78,3
11:50-12:20	Entrada a la PTAR	0	0	21,3	0	78,7
	Unidad de cribado	0	0	21,1	0	78,9
	Desarenador	0	0	21,2	0	78,8
12:20-13:00	Entrada a la PTAR	0	0	21,3	0	78,7
	Unidad de cribado	0	0	21,5	0	78,5
	Desarenador	0	0	21,6	0	78,4
13:00-13:45	Entrada a la PTAR	0	0	21,5	0	78,5
	Unidad de cribado	0	0	21,5	0	78,5
	Desarenador	0	0	21,6	0	78,4

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 3-Biogás PTAR Sonsón

6.2.4.2 Reactor UASB

En las mediciones realizadas en el reactor UASB durante las tres (3) caracterizaciones de biogás, se detectó que la cámara uno (1) presenta una menor emisión de subproductos de digestión anaerobia en comparación con la cámara dos (2), se presentaron concentraciones de H₂S en el rango de 1 a 33 ppm y 0 a 87 ppm respectivamente. El comportamiento de ambas cámaras ha sido diferente desde la puesta en marcha del reactor UASB, el cual se evidencia desde el cambio de color en el agua residual, resuspensión de natas, grasas y aceites y

residuos que llegan de las unidades preliminares (Londoño, 2020) ; la cámara uno (1) presenta un color negro (**Foto 33**), la cual es una condición normal de un proceso anaerobio, mientras que la cámara dos (2) presenta un color café (**Foto 34**) que podría ser debido a una digestión incompleta y ser causante de una mayor emisión de H₂S. También los canales de rebose trabajan a flujo libre, en este caso el canal de la cámara dos (2) presenta una mayor turbulencia lo que provoca que el H₂S pase de la fase líquida a la fase gaseosa. Los resultados pueden observar en la **Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15**.

Tabla 13. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en el reactor UASB

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,4	0	2	79,6
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,2	0	3	79,8
10:00-11:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,3	0	4	79,7
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,3	0	2	79,7
11:00-12:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,6	0	2	79,4
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,6	0	3	79,4
12:00-13:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	19,9	0	3	80,1
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,0	0	4	80,0
13:00-14:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,3	0	3	79,7
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,4	0	3	79,6
14:00-15:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,3	0	3	79,7
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,4	0	0	79,7
15:00-16:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,4	0	5	79,6
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,5	0	6	79,5
16:00-17:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,5	0	4	79,5
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,5	0	9	79,5

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 1-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 14. Caracterización de emisiones fugitivas O₂ de octubre de 2019 en el reactor UASB

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (ppm)	H ₂ S (ppm)	Balance N ₂ (%)
9:00-10:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	19,5	0	4	80,5
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	19,5	0	5	80,5
10:00-11:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,5	0	4	79,5
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,6	0	13	79,3
11:00-12:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	19,6	0	14	80,4
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	19,5	0	10	80,5
13:00-14:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,2	0	1	79,8
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,1	0	20	79,9
14:00-14:30	Cámara 1 reactor UASB	0	0	19,4	0	2	80,6
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	19,4	0	26	80,6
14:30-15:00	Cámara 1 reactor UASB	0,1	0	20,0	0	18	80,0
	Cámara 2 reactor UASB	0,1	0	19,9	0	79	80,0
15:00-16:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,3	0	33	79,7
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,3	0	87	79,7

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 2-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 15. Caracterización de emisiones fugitivas de gases O₆ de noviembre de 2019 en el reactor UASB

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	Balance N ₂ (%)
9:00-10:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	20,8	8	79,2
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	20,8	71	79,2
10:00-10:45	Cámara 1 reactor UASB	0	0	21,4	14	78,6
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	21,3	87	78,7
10:45-11:15	Cámara 1 reactor UASB	0	0	21,5	10	78,5
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	21,5	62	78,5
11:15-11:50	Cámara 1 reactor UASB	0	0	21,6	7	78,4
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	21,5	58	78,5
11:50-12:20	Cámara 1 reactor UASB	0	0	21,1	9	78,9
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	21,1	46	78,9
12:20-13:00	Cámara 1 reactor UASB	0	0	21,6	4	78,4
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	21,6	33	78,4
13:00-13:45	Cámara 1 reactor UASB	0	0	21,6	7	78,4
	Cámara 2 reactor UASB	0	0	21,6	42	78,4

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 3-Biogás PTAR Sonsón

6.2.4.3 Estructura de salida de los filtros anaerobios

La estructura de salida de los filtros anaerobios es el punto crítico de emisión de olores ofensivos, en las tres (3) caracterizaciones de biogás se

detectaron concentraciones de H₂S en el rango de 278 a 2209 ppm, en este punto se da una descarga turbulenta (**Foto 35**) de los filtros anaerobios hacia la estructura de entrega a la fuente receptora, lo que genera una aireación y a su vez el paso del H₂S de la fase líquida a la fase gaseosa. Por esta razón, este punto requiere intervención para minimizar las emisiones de H₂S. Los resultados se encuentran en la **Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18**.

Tabla 16. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en la estructura de salida de los filtros anaerobios

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Salida de los FAFA	1,6	2,3	19,0	0	1817	77,2
10:00-11:00	Salida de los FAFA	2,3	3,4	18,7	0	2131	75,6
11:00-12:00	Salida de los FAFA	2,8	3,6	18,4	0	2182	75,1
12:00-13:00	Salida de los FAFA	2,5	3,2	18,2	0	2196	76,2
13:00-14:00	Salida de los FAFA	1,7	2,5	19,1	0	1804	76,7
14:00-15:00	Salida de los FAFA	2,2	2,7	18,6	0	2209	76,5
15:00-16:00	Salida de los FAFA	1,6	2,0	19,1	0	1895	77,2
16:00-17:00	Salida de los FAFA	1,4	1,7	19,3	0	1781	77,6

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 1-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 17. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en la estructura de salida de los filtros anaerobios

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Salida de los FAFA	1,3	1,7	18,3	0	1156	78,7
10:00-11:00	Salida de los FAFA	1,6	2,1	19,5	0	1410	76,8
11:00-12:00	Salida de los FAFA	1,6	1,8	18,5	0	1328	78,1
13:00-14:00	Salida de los FAFA	1,0	1,2	19,1	0	986	78,7
14:00-14:30	Salida de los FAFA	1,0	1,1	18,7	0	954	79,2
14:30-15:00	Salida de los FAFA	1,2	1,2	19,2	0	1089	78,4
15:00-16:00	Salida de los FAFA	0,9	0,8	19,7	0	847	78,4

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 2-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 18. Caracterización de emisiones fugitivas 06 de noviembre de 2019 en la estructura de salida de los filtros anaerobios

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Salida de los FAFA	3,8	1,8	19,4	989	75,0
10:00-10:45	Salida de los FAFA	0,6	0,5	21,1	502	77,8
10:45-11:15	Salida de los FAFA	0,4	0,2	21,3	278	78,1
11:15-11:50	Salida de los FAFA	0,9	0,9	20,7	816	77,5
11:50-12:20	Salida de los FAFA	0,9	0,9	20,5	776	77,7
12:20-13:00	Salida de los FAFA	0,8	0,6	21,1	587	77,5
13:00-13:45	Salida de los FAFA	1,1	0,9	20,9	756	77,1

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 3-Biogás PTAR Sonsón

6.2.4.4 Lechos de secado

Las tres (3) caracterizaciones de biogás fueron realizadas en el lecho de secado # 3, en el cual se detectaron concentraciones de H₂S en un rango de 0 a 6 ppm, estos resultados (**Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21**) se deben a que en este lecho de secado es donde se deposita todo el material extraído de la unidad de cribado y del canal desarenador, el cual contiene materia orgánica en proceso de descomposición.

Tabla 19. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 21 de agosto de 2019 en el lecho de secado # 3

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,0	0	1	80,0
10:00-11:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,3	0	2	79,7
11:00-12:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,1	0	1	79,9
12:00-13:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,0	0	1	80,0
13:00-14:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,0	0	2	80,0
14:00-15:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,0	0	2	80,0
15:00-16:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,4	0	3	79,6
16:00-17:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,4	0	3	73,6

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 1-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 20. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en el lecho de secado # 3

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Lecho de secado # 3	0	0	19,1	0	2	80,9
10:00-11:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,4	0	6	79,6
11:00-12:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,1	0	0	79,8
13:00-14:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,0	0	0	80,0
14:00-14:30	Lecho de secado # 3	0	0	19,5	0	0	80,5
14:30-15:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,0	0	0	80,0
15:00-16:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,2	0	0	79,8

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 2-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 21. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en el lecho de secado # 3

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Lecho de secado # 3	0	0	20,9	1	79,1
10:00-10:45	Lecho de secado # 3	0	0	21,5	0	78,5
10:45-11:15	Lecho de secado # 3	0	0	21,6	1	78,4
11:15-11:50	Lecho de secado # 3	0	0	21,4	0	78,6
11:50-12:20	Lecho de secado # 3	0	0	21,1	0	78,9
12:20-13:00	Lecho de secado # 3	0	0	21,6	0	78,4
13:00-13:45	Lecho de secado # 3	0	0	21,7	0	78,3

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 3-Biogás PTAR Sonsón

6.2.4.5 Estructura de salida PTAR hacia la fuente receptora

Para la estructura de salida de la PTAR hacia la fuente receptora se realizaron dos (2) caracterizaciones de biogás, en las cuales se obtuvo un rango de H₂S de 113 a 364 ppm, estos valores se deben a que se realiza una entrega a la fuente receptora de manera brusca (**Foto 36**), lo que genera gran aireación y ocasiona que el H₂S que está en fase líquida pase a la fase gaseosa. Este también podría considerarse un punto crítico de emisión de H₂S, sin embargo, si se realiza la desorción del H₂S a la salida de los filtros anaerobios se solucionaría el problema de olores en el punto de descarga a la fuente receptora. Los resultados se encuentran en la **Tabla 22, Tabla 23.**

Tabla 22. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 02 de octubre de 2019 en la estructura de salida de la PTAR hacia la fuente receptora

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
10:00-11:00	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,2	0,2	19,9	0	275	79,6
13:00-14:00	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,2	0,2	19,6	0	272	80,0
14:00-14:30	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,2	0,2	19,3	0	302	80,3
14:30-15:00	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,3	0,2	19,8	0	321	79,7
15:00-16:00	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,3	0,2	20,1	0	360	79,5

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 2-Biogás PTAR Sonsón

Tabla 23. Caracterización de emisiones fugitivas de gases 06 de noviembre de 2019 en la estructura de salida de la PTAR hacia la fuente receptora

HORA	LUGAR DE MEDICIÓN	CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H2S (ppm)	Balance N2 (%)
9:00-10:00	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,1	0,1	21,1	171	78,7
10:00-10:45	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,1	0,1	21,4	128	78,4
10:45-11:15	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,7	0,3	21,3	209	77,7
11:15-11:50	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,4	0,3	21,0	364	78,3
11:50-12:20	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,1	0,0	21,1	141	78,8
12:20-13:00	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,2	0,1	21,3	235	78,4
13:00-13:45	Estructura salida PTAR hacia fuente receptora	0,1	0,0	21,4	113	78,5

Fuente: Elaboración propia basado en informe de caracterización 3-Biogás PTAR Sonsón

6.3 DIFICULTADES DETECTADAS DURANTE EL ARRANQUE Y OPERACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

La principal dificultad observada en las tres (3) plantas de tratamiento de agua residual doméstica fue el dimensionamiento de los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), todas las plantas cuentan con tres (3) filtros de 24 m³ cada uno, dicho volumen no es suficiente y adecuado para

realizar el pulimiento del efluente de los reactores UASB ya que el tiempo que permanece el agua residual en la unidad no es suficiente. (Chernicharo, 2007) sugiere un tiempo de retención hidráulico para los FAFA de cuatro (4) a ocho (8) horas.

6.3.1 Planta de tratamiento del municipio de Abejorral

Se tenía proyectada la fase de puesta en marcha, funcionamiento, monitoreo y control de la PTAR del municipio de Abejorral en septiembre de 2019, sin embargo, la entrega del sistema de tratamiento de aguas residuales por parte de las entidades competentes no fue efectiva debido a que no se obtuvieron los resultados esperados en las pruebas de estanqueidad realizadas, específicamente en el reactor UASB. En el tiempo comprendido entre septiembre de 2019 y febrero de 2020 fueron realizadas cuatro (4) pruebas de estanqueidad en las unidades de tratamiento, las cuales no tuvieron éxito para proceder con la alimentación de las unidades. Durante la primera prueba de estanqueidad (una semana después del llenado del reactor UASB) se evidenció humedad alrededor de las bridas de la tubería de distribución y válvulas toma de muestra; con el paso de los días, se presentaron fugas en las juntas de construcción de los muros y posteriormente se presentó desprendimiento y ruptura de algunos tramos de tubería que transporta el efluente del reactor UASB hacia los FAFA, esto debido posiblemente a la presión que ejerce el agua y a la falta de anclajes y abrazaderas de seguridad de las tuberías. Luego de evidenciar las fugas, el contratista de la obra aplicó un producto químico para sellar los espacios por donde se presentaron las fugas, sin embargo, las acciones realizadas por el personal contratista no fueron suficientes debido a que en las tres (3) pruebas de estanqueidad realizadas posteriormente se siguió evidenciando las fugas en el reactor UASB (Patiño, 2019).

Con lo sucedido en la PTAR del municipio de Abejorral se corrobora que la prueba de estanqueidad es indispensable para verificar que la construcción de las unidades de tratamiento esté acorde con el diseño proyectado, con esta prueba se verifica que las tuberías, válvulas, compuertas y demás accesorios instalados funcionen de manera adecuada, también, que las unidades de tratamiento donde se almacenará el agua residual (reactor UASB y FAFA) no presenten fugas y que puedan resistir las presiones ejercidas por el agua. Esta prueba de estanqueidad se debe realizar con agua limpia para que el personal de construcción pueda ingresar nuevamente a los tanques a realizar

cualquier adecuación y el agua debe permanecer en los tanques mínimo dos (2) semanas.

6.3.2 Planta de tratamiento del municipio de Argelia

En la PTAR del municipio de Argelia se detectó una dificultad con el vertedero lateral de excesos, el cual, no cumple con la altura requerida para evacuar el excedente cuando se supere el caudal de diseño de la planta, por lo tanto, para caudales menores al caudal de diseño se realiza vertimiento de agua sin tratar a la fuente receptora. También, se observó que las dimensiones de los cuatro (4) lechos de secado con los que cuenta la PTAR no están acordes con las dimensiones del reactor UASB, así que, al momento de realizar la purga del reactor podrían no ser suficientes para efectuar la deshidratación de los lodos.

6.3.3 Planta de tratamiento del municipio de Sonsón

La principal dificultad presentada en la operación de la PTAR del municipio de Sonsón es la emisión de olores ofensivos; para darle solución a esta problemática se realizaron caracterizaciones de emisiones fugitivas de gases con el fin de identificar el punto crítico de emisión de H_2S y proponer el diseño conceptual de un biofiltro, con el cual se reduce de manera significativa la emisión de olores ofensivos a la atmósfera.

El biofiltro propuesto tendrá como lecho o material de relleno una mezcla de compostaje y biosólidos provenientes de los lechos de secado de la PTAR, en el lecho se encuentran inmovilizados los microorganismos encargados de degradar el gas contaminante. El contaminante a depurar tendrá que pasar primero por una cámara de desorción, en la cual, debido a la turbulencia, el H_2S que se encuentra en el agua residual pasará a la fase gaseosa para luego ser transportado al biofiltro donde se hará la desodorización del gas, que será expulsado mediante un extractor a la atmósfera. Para que los nutrientes presentes en los biosólidos estén disponibles para los microorganismos es necesario realizar un riego periódico con el objetivo de proporcionar la humedad necesaria para la óptima biodegradación. La implementación de un biofiltro para el control de olores ofensivos tiene diversas ventajas como su diseño simple y flexible, bajos costos de operación, bajo consumo energético y altas superficies de contacto gas-líquido, y en cuanto a sus desventajas las más significativas serían la necesidad de humificación previa del aire a tratar y la necesidad de reemplazar el lecho cada pocos años.

6.4 DIMENSIONAMIENTO SIMPLIFICADO Y CONCEPTUAL: UNIDAD DE DESORCIÓN Y BIOFILTRO CONVENCIONAL DE COMPOST

6.4.1 Dimensionamiento de la unidad de desorción

El caudal de diseño de la PTAR Sonsón es de 30 L/s, para evitar el sobredimensionamiento de la cámara de desorción y teniendo en cuenta las limitaciones de espacio para la instalación de las unidades de tratamiento, se propone diseñar una unidad piloto bajo la condición de caudal promedio de tratamiento (m^3/min), el cual según el seguimiento realizado entre los meses de octubre de 2019 y febrero de 2020 es de 15 L/s aproximadamente.

6.4.1.1 Unidad de desorción

Para el caudal promedio de la PTAR Sonsón se tienen:

$$15 \frac{L}{s} * \frac{1 m^3}{1000 L} * \frac{60 s}{1 min} = 0,9 \frac{m^3}{min}$$

(Londoño, 2020) sugiere una carga de aplicación superficial de $0,90 m^3.m^2/min$, teniendo en cuenta este valor, el área superficial de la unidad de desorción es:

$$A = \frac{Q_{promedio}}{Carga\ superficial}$$

Donde:

$Q_{promedio}$: Caudal promedio en (m^3/min)

Carga superficial: Carga superficial en ($m^3.m^2/min$)

$$A = \frac{0,9m^3 \cdot min^{-1}}{0,90 m^3 \cdot m^2 \cdot min^{-1}} = 1,0 m^2$$

Para realizar la estimación de flujo de H_2S en la unidad de desorción, (Londoño, 2020) sugiere un valor de 2 a 10 para los cambios de aire. En el diseño se proponen 2 cambios de aire por hora en la unidad de desorción y biofiltración. El dispositivo de extracción se debe ubicar a la salida del biofiltro para proteger el equipo de la corrosión.

$$Q_g = rQ * Q_{promedio}$$

Donde:

$Q_{promedio}$: Caudal promedio en (m^3/min)

rQ : Cambios de aire por hora

Q_g : Flujo de gas (m^3/h)

$$Q_g = 2 * 0,9 \frac{m^3}{min} * \frac{60 min}{1 h} = 108 m^3 \cdot h^{-1}$$

Con las dimensiones actuales de la estructura de salida de los filtros anaerobios ($0,23 m^3$) no es viable realizar la desorción del H_2S por lo que se propone un volumen de una unidad cilíndrica, en fibra de vidrio, adicional para la unidad de desorción del H_2S de (Londoño, 2020):

$$V = \pi * r^2 * h$$

Donde:

V : Volumen en (m^3)

r : Radio de la unidad en (m)

h : Altura en (m)

Las dimensiones sugeridas teniendo en cuenta (Londoño, 2020) son:

- **Altura sugerida (h):** 1,2 m
- **Radio sugerido (r):** 0,5 m
- **Diámetro sugerido (D):** 1,0 m

$$V = \pi * (0,5 m)^2 * 1,2 m = 0,94 m^3 \approx 1,0 m^3$$

Entonces:

$$V_{ud} = E_E + E_p$$

Donde:

V_{ud} : Volumen total de la unidad de desorción en (m^3)

E_E : Estructura existente, salida de los filtros anaerobios en (m^3)

E_p : Estructura propuesta, instalación sobre la salida de los filtros anaerobios en (m^3)

$$V_{ud} = 0,23 m^3 + 0,94 m^3 = 1,17 m^3 \approx 1,2 m^3$$

Para la estimación de la velocidad de flujo de H₂S en la unidad de desorción se tiene que (Londoño, 2020):

$$V_s = \frac{Q_g}{A_s}$$

Donde:

Q_g : Flujo de gas en (m³/h)

V_s : Velocidad superficial en (m/h)

A_s : Superficie del lecho en (m²)

Área superficial de un cilindro:

$$A_s = 2 * \pi * r^2 + (2 * \pi * r * h)$$

Donde:

r : Radio de la unidad en (m)

h : Altura en (m)

$$V_s = \frac{108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{(2 * \pi * (0,5 \text{ m})^2) + (2 * \pi * 0,5 \text{ m} * 1,2 \text{ m})} = 20,22 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$$

En la **Ilustración 6** se presenta un esquema del detalle de la unidad de desorción para el biofiltro de la PTAR Sonsón.

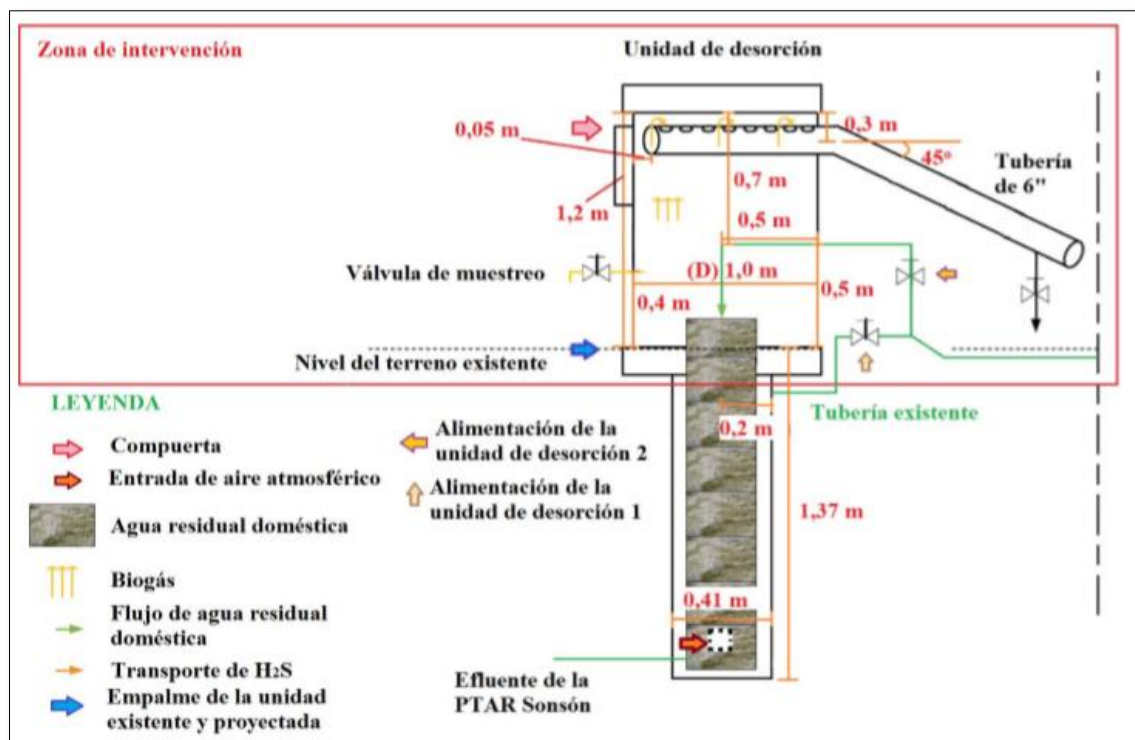


Ilustración 6. Representación esquemática del detalle de la unidad de desorción para el biofiltro de la PTAR Sonsón

Fuente: Elaborado por Santiago Londoño

6.4.2 Dimensionamiento del biofiltro de compost

Para el diseño del biofiltro de compost requerido para remover el flujo de H₂S, por medio de un tanque de configuración cilíndrica en fibra de vidrio, cerrado se usan los criterios de diseño presentados en (Londoño, 2020).

6.4.2.1 Consideraciones iniciales para el dimensionamiento del biofiltro de compost

- Porosidad del lecho: entre el 40% y el 80%.
- Asumir de 2 a 10 cambios de aire por hora para la unidad de desorción, se asume 1 cambio, y para la unidad de biofiltración otro cambio, dado que las concentraciones son bajas.
- Concentración de H₂S en el aire, en adición con otros compuestos: 3,07 g m⁻³ para la máxima, 0,39 g m⁻³ para la mínima, y 1,80 g m⁻³ para el promedio según los análisis de resultados de la caracterización de H₂S en la PTAR Sonsón.
- Asumir una tasa de eliminación de 45 g S/m³.h
- Temperatura: 25 °C

- pH óptimo operacional: entre 6 y 8
- Se propone que el material de empaque compost (en peso seco)

6.4.2.2 Estimación del flujo de aire requerido para ser removido

Retomando el flujo de H₂S de la unidad de desorción que viaja por la tubería al biofiltro

$$Q_g = 108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.3 Selección de la carga superficial (propuesta)

(Londoño, 2020) indica, que el rango de selección se encuentra entre 10 m³/m².h y 100 m³/m².h, por lo tanto, el área requerida para el lecho del biofiltro es:

$$A = \frac{Q_g}{\text{Carga superficial}}$$

$$A = \frac{108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{50 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}} = 2,16 \text{ m}^2 \approx 2,2 \text{ m}^2$$

$$\text{Carga superficial} = \frac{108 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}}{2,2 \text{ m}^2} = 49,09 \approx 50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.4 Selección de la profundidad del medio (propuesta)

Según (Londoño, 2020) se recomiendan alturas de 0,5 a 1,0 m. Se propone 0,9 m para la altura del lecho del biofiltro para la PTAR Sonsón.

6.4.2.5 Estimación de la carga volumétrica

De acuerdo con (Londoño, 2020) se propone un rango entre 5 m³.m³/h y 500 m³.m³/h. Normalmente los biofiltros son cerrados y tienen una configuración cilíndrica. Estos sistemas consisten en una torre parecida a las torres de lavado, y tienen una o varias etapas. Estos sistemas pueden consistir en una sola torre o varias torres o unidades en serie o en paralelo. En un esfuerzo por evitar problemas de compactación, el diámetro de la torre se recomienda entre 1 y 2 m y la altura entre 1 y 1,5 m (Londoño, 2020). Por lo tanto, el diámetro sugerido del lecho es de 1,6 m.

$$V_{lecho} = \pi * r^2 * h = \pi * (0,8 \text{ m})^2 * 0,9 \text{ m} = 1,8 \text{ m}^3 \approx 2,0 \text{ m}^3$$

$$\text{Carga volumétrica} = \frac{108 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}}{2,0 \text{ m}^3} = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.6 Estimación de la concentración de H₂S de (ppm_v) a (g.m⁻³)

Según los resultados obtenidos en las tres caracterizaciones de H₂S en la PTAR Sonsón, se obtuvieron valores del orden de 278 ppm_v (min), 2209 ppm_v (máx) y 1261 ppm_v promedio.

Pasando de ppm_v a g.m⁻³ el valor promedio es:

$$C_{Gi} (\text{ppmv}) = \frac{C_{Gi} (\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) * (0,082 * (273,15 + T(^{\circ}\text{C}))) (L \cdot \text{mol}^{-1}) * 10^3 \text{ mL}}{Pm (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}) * 1 L}$$

Donde:

C_{Gi} : concentración inicial del contaminante (ppmv o g/m³)

T : temperatura de la corriente de aire (25 °C)

Pm : peso molecular del contaminante (34 g/mol)

$$C_{Gi} (\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{34 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} * 1 L * 1261 \text{ ppm}_v}{(0,082 * (273,15 + 25 \text{ }^{\circ}\text{C})) (L \cdot \text{mol}^{-1}) * 10^3 \text{ mL}} = 1,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

6.4.2.7 Estimación de la carga másica (superficial)

$$A_s = 2 * \pi * r^2 + (2 * \pi * r * h)$$

$$A_s = 2 * \pi * (0,8 \text{ m})^2 + (2 * \pi * 0,8 \text{ m} * 0,9 \text{ m}) = 8,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Carga másica (superficial)} = \frac{Q_g * C_{Gi}}{A_s}$$

$$\text{Carga másica superficial} = \frac{108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} * 1,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}}{8,5 \text{ m}^2} = 23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.8 Estimación de la carga másica (volumétrica)

$$\text{Carga másica (volumétrica)} = \frac{Q_g * C_{Gi}}{V_{lecho}}$$

$$\text{Carga másica (volumétrica)} = \frac{108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} * 1,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}}{2,0 \text{ m}^3} = 97 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.9 Tiempo de retención con el lecho vacío (EBRT)

En biofiltración se utiliza el tiempo de residencia sin considerar el relleno (EBRT: empty bed residence time), el cual se define como la relación entre el volumen del lecho y el caudal volumétrico del gas que ingresa al sistema, sin embargo, para el diseño es necesario utilizar el tiempo de residencia real (τ), el cual indica el tiempo que realmente el gas permanece en el biofiltro y se obtiene multiplicando el EBRT por la porosidad del lecho (θ). El rango recomendado para el tiempo de residencia sin considerar el relleno está entre 30 y 60 s (Londoño, 2020).

$$EBRT = \frac{V_{lecho}}{Q_g}$$

Donde:

Q_g : Flujo de gas en (m^3/h)

V_{lecho} : Volumen del lecho en (m^3)

EBRT: Tiempo de retención con el lecho vacío en (s)

$$EBRT = \frac{2,0 \text{ m}^3}{108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 66,7 \text{ s}$$

Teniendo en cuenta la porosidad y según lo presentado en (Londoño, 2020) donde por medio de experimentación para la caracterización de compost se determinan porosidades total del orden de 79,27%, 81,97% y 79,84%, por lo que se adopta el promedio de porosidad total de 80,36%.

$$\tau = \frac{V_{lecho} * \theta}{Q_g}$$

Donde:

Q_g : Flujo de gas en (m^3/h)

V_{lecho} : Volumen del lecho en (m^3)

θ : Porosidad total del lecho (%)

$$\tau = \frac{(2,0 \text{ m}^3) * (0,8036)}{108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 53,6 \text{ s} \approx 54 \text{ s}$$

6.4.2.10 Estimación de la velocidad de flujo de H₂S a través del lecho del biofiltro

$$V_s = \frac{Q_g}{A_s * \theta}$$

Donde:

Q_g : Flujo de gas en (m³/h)

V_s : Velocidad superficial en (m/h)

A_s : Superficie del lecho en (m²)

θ : Porosidad total del lecho

$$V_s = \frac{108 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}}{(8,5 \text{ m}^2) * (0,8036)} = 15,8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1} \approx 16 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.11 Adición de agua en el biofiltro convencional de compost

Para garantizar la funcionalidad adecuada del biofiltro se propone garantizar una humedad relativa del 50% por lo que se requiere utilizar un higrómetro de jardinería para evaluarla, agregando agua abriendo manualmente la válvula que comunica la tubería del efluente del filtro anaerobio al biofiltro (Londoño, 2020).

6.4.2.12 Estimación de la eficiencia de remoción teórica

Según el rango presentado por (Londoño, 2020) de 60% a 100% se propone tomar el valor de 80%, por lo tanto:

$$RE = \frac{(C_{Gi} - C_{Gf})}{C_{Gi}} * 100$$

Donde:

C_{Gi} : concentración inicial del contaminante en (ppmv o g/m³)

C_{Gf} : concentración final del contaminante en (ppmv o g/m³)

$$RE = \frac{1,80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} - 0,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}}{1,80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}} * 100 = 77,7\% \approx 80\%$$

Teniendo en cuenta, que el valor de la concentración final es sugerido por (Londoño, 2020)

6.4.2.13 Estimación de la capacidad de eliminación teórica

Se plantean en (Londoño, 2020) capacidades de eliminación del orden de 80-130 mg/m³.h para biofiltros que utilicen como medio de soporte el compost.

$$EC = \frac{(C_{Gi} - C_{Gf}) * Q_g}{V_{lecho}}$$

Donde:

C_{Gi} : concentración inicial del contaminante en (ppmv o g/m³)

C_{Gf} : concentración final del contaminante en (ppmv o g/m³)

Q_g : Flujo de gas en (m³/h)

V_{lecho} : Volumen del lecho en (m³)

$$EC = \frac{(1,80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} - 0,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}) * 108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{2,0 \text{ m}^3} = 75,6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1} \approx 76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$$

6.4.2.14 Verificación del volumen vacío del lecho

(Londoño, 2020) propone un volumen vacío del lecho del biofiltro del 50% y teniendo en cuenta las recomendaciones presentadas, se enuncian valores de 0,35 m para la zona entre la bandeja y la entrada del H₂S y de la entrada del H₂S hacia la zona de purga de 0,35 m. Por tanto, la altura sugerida de la cámara de aire es 0,35 m.

Estimación del volumen sugerido de la totalidad del biofiltro convencional:

$$V_{biofiltro\ convencional} = \pi * r^2 * altura$$

$$V_{biofiltro\ convencional} = \pi * (0,8 \text{ m})^2 * (0,9 \text{ m} + 0,7 \text{ m} + 0,7 \text{ m}) = 4,6 \text{ m}^3$$

En la **Ilustración 7** se presenta un esquema del biofiltro de compost para la PTAR Sonsón

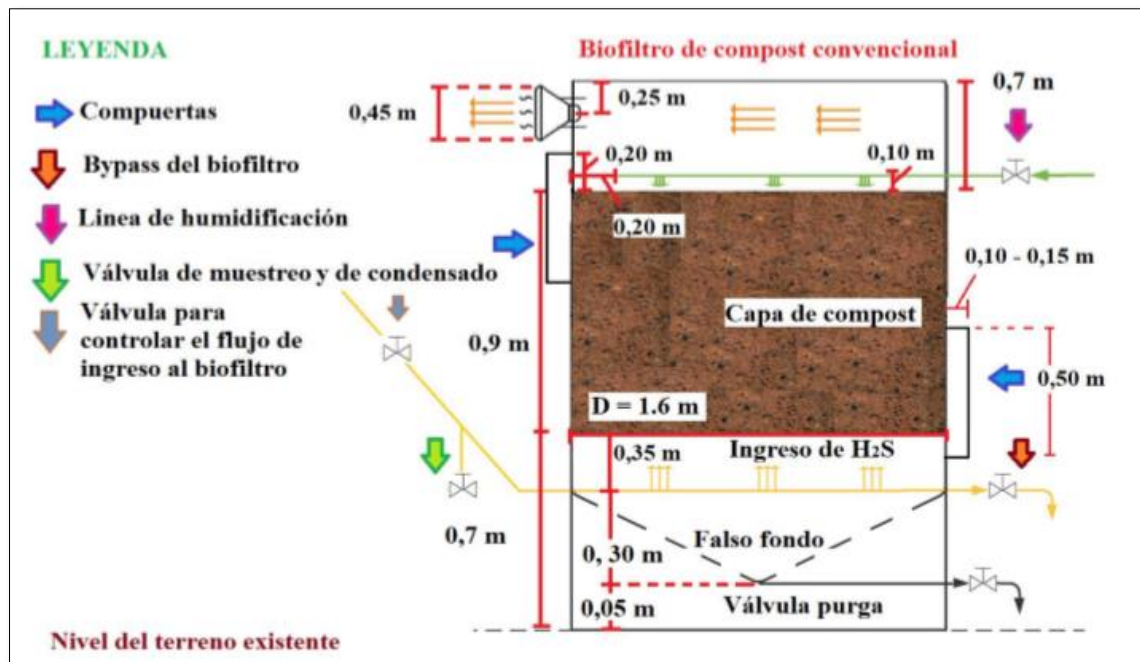


Ilustración 7. Representación esquemática del biofiltro de compost para la PTAR Sonsón

Fuente: Elaborado por Santiago Londoño

Y en la **Ilustración 8** se presenta la unidad de desorción y el biofiltro convencional de compost para la PTAR Sonsón

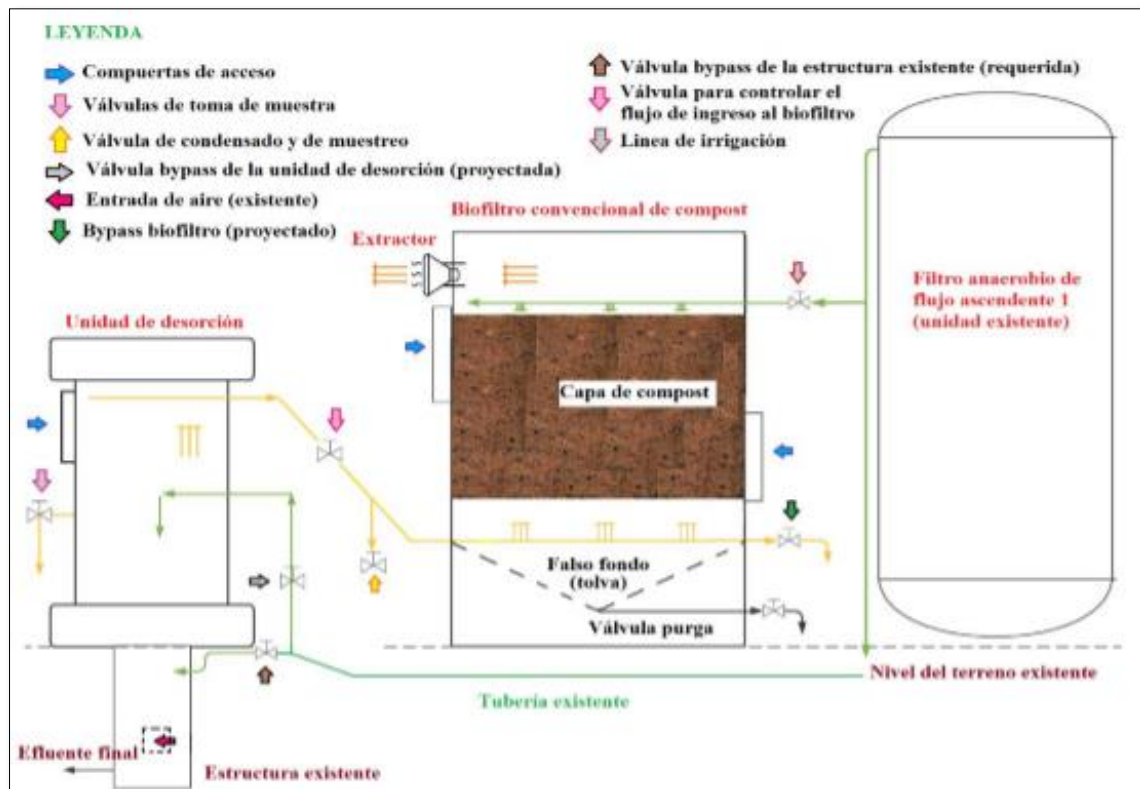


Ilustración 8. Representación esquemática de la unidad de desorción y el biofiltro convencional de compost para la PTAR Sonsón

Fuente: Elaborado por Santiago Londoño

7. CONCLUSIONES

- La caracterización de emisiones gaseosas fugitivas durante el arranque y estabilización de las plantas de tratamiento de agua residual doméstica permiten detectar de manera temprana los puntos de emisión de olores ofensivos, los cuales pueden ser controlados desde el diseño y arranque del sistema.
- Los análisis fisicoquímicos de agua residual doméstica y el monitoreo de variables como pH y alcalinidad permiten determinar de manera acertada el funcionamiento de las unidades de tratamiento y son una herramienta para realizar correcciones durante el arranque y estabilización de la PTAR.
- El diseño de un biofiltro permite controlar de manera sencilla y acertada los problemas de emisión de olores ofensivos, debido a que no presenta mayor inversión y se obtiene disminución de la contaminación de manera considerable.
- La capacitación del personal encargado de la operación de la PTAR es parte fundamental, debido a que se les proporcionan las bases necesarias para tomar decisiones y realizar de manera adecuada la operación de la planta de tratamiento de agua residual.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akunna, J. (2018). *Anaerobic waste-wastewater treatment and biogas plants*. Taylor & Francis Group.
- Akunna, J. (2018). *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants*. Taylor & Francis Group.
- Alcaldía Abejorral, A. (2019). *Alcaldía de Abejorral (Ant)*. Recuperado el 6 de febrero de 2020, de <http://www.abejorral-antioquia.gov.co/>
- Alcaldía Argelia, A. (2019). *Alcaldía Argelia*. Recuperado el 6 de febrero de 2020, de <http://www.argelia-antioquia.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Álvarez, A., Jiménez, J., & Camargo, Y. (septiembre de 2011). *Biofiltración para la remoción de sulfuro de hidrógeno en la estación de bombeo norte de aguas residuales*. Recuperado el 15 de enero de 2020, de <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/281/271>
- Amy, G., Ekama, G., & Lieber, J. &. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. Beijing: IWA Publishing.
- Antioquia, G. d. (2019). *Población total según grupos de edad, sexo y zona de subregiones y municipios- Antioquia*. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://www.dssa.gov.co/index.php/estadisticas/poblacion>
- Arriagada, A. (2012). *Tecnologías para el tratamiento de olores en aguas servidas*. Santiago de Chile: Académica Española.
- Chernicharo, C. (2007). *Biological wastewater treatment series volume four: Anaerobic reactors*. Minas Gerais: IWA Publishing.
- Cornare, C. A. (2009). *Capacitación, Planificación y formulación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica de la quebrada Llanadas en el municipio de Argelia*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de POMCA LLANADAS: http://www.cornare.gov.co/POMCAS/Documentos/POMCA_Q_%20LLANADAS_ARGELIA.pdf
- Cornare, M. d. (2019). *Referentes ambientales para la construcción de los planes de desarrollo en los municipios de la jurisdicción Cornare*. Recuperado el 13 de enero de 2020, de http://www.cornare.gov.co/SIAR/REFERENTES_AMBIENTALES/2019-2023/SONSON.pdf
- Díaz, E., & Palacios, C. (2012). *Olores en aguas residuales: ¿cómo controlarlos de manera eficiente por el gestor?* Recuperado el 18 de octubre de 2019, de <https://www.malosolores.org/pdf/cliente/edarguadalhorce.pdf>
- E.W. Rice, R. A. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.
- Empresa de Acueducto, A. y. (noviembre de 2010). *Criterios técnicos, recomendaciones y especificaciones generales de diseño de los mecanismos y sistemas de control de emisión de olores y calidad*

del aire y la posible ubicación de las unidades Incluidas en el proceso de ampliación de la PTAR Salitre. Recuperado el 4 de marzo de 2020, de <https://www.orarbo.gov.co/es/el-observatorio-y-los-municipios/criterios-tecnicos-recomendaciones-y-especificaciones-generales-de-diseno-de-los-mecanismos-y-sistemas-de-control-de>

Facultad salud pública, U. d. (noviembre de 2019). *Caracterización del biogás generado por el funcionamiento de la PTAR de la empresa aguas del páramo de Sonsón s.a.s.e.s.p.* Recuperado el 18 de octubre de 2019

Fuentes, G. (octubre de 2018). *Ajustes a los diseños de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas municipio de Argelia-Antioquia.* Recuperado el 26 de febrero de 2020

Galeano, L., & Rojas, V. (2016). *Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Velez-Santander.* Recuperado el 23 de octubre de 2019, de Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13930/4/PROPOSTA%20DE%20DISE%C3%91O%20DE%20UNA%20PTAR%20PARA%20EL%20MUNICIPIO%20DE%20VELEZ%20SANTANDER..pdf>

Geotech. (s.f). *GEM5000 OPERATING MANUAL.* Recuperado el 23 de octubre de 2019, de <https://www.geotechuk.com/site/wp-content/uploads/2016/03/GEM5000-Operating-Manual-5.pdf>

IDEAM. (10 de septiembre de 2007). *Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales.* Recuperado el 17 de octubre de 2019, de http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428

Jiménez, E., & Villegas, A. (junio de 2005). *Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno.* Recuperado el 25 de febrero de 2020, de Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia): http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372005000100002

Londoño, S. (5 de febrero de 2018). *Informe diagnóstico de la PTAR Sonsón.* Recuperado el 28 de enero de 2020

Londoño, S. (agosto de 2019). *Informe preliminar: visita técnica a la PTAR Abejorral.* Recuperado el 24 de octubre de 2019

Londoño, S. (21 de junio de 2019). *Procedimiento resumido para la medición de alcalinidad en afluentes y efluentes.* Recuperado el 17 de octubre de 2019

Londoño, S. (25 de marzo de 2020). *Informe de diseño conceptual de unidad de desorción y biofiltro convencional de compost.* Recuperado el 10 de abril de 2020

Londoño, S. (28 de enero de 2020). *Segundo informe de control de olores en la PTAR Sonsón.* Recuperado el 5 de marzo de 2020

Lorenzo, Y., & Obaya, C. (1 de abril de 2006). *La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades.* Recuperado el 21 de octubre

- de 2019, de Instituto cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar:
<https://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>
- Márquez, M. (2011). *Reactores anaerobios de flujo ascendente*. Recuperado el 15 de octubre de 2019, de Centro tecnológico Aragón, laboratorio de ingeniería ambiental:
http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/11619/mod_resource/content/0/RAFA.pdf
- Medellín, E. p. (16 de abril de 2008). *Planta de tratamiento de aguas residuales Bello*. Recuperado el 15 de octubre de 2019, de https://www.grupo-epm.com/site/Portals/22/Docs/documentos_de_interes/ptar_bello/hta-a-rp-01-10-c02-r2.pdf?ver=2015-06-16-124545-913
- Mesa, L. (22 de noviembre de 2019). *Informe diagnóstico de la PTAR Argelia*. Recuperado el 24 de enero de 2020
- Mesa, L. (septiembre de 2019). *Segundo informe técnico de seguimiento y control PTAR Argelia*. Recuperado el 6 de febrero de 2020
- Metcalf, & Eddy. (2002). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. McGraw Hill.
- Ministerio de vivienda, c. y. (8 de junio de 2017). *Resolución 0330 de 2017*. Recuperado el 2 de marzo de 2020, de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>
- Molina, F., & Rodríguez, D. (2011). *Procesos biológicos*. Medellín: Reimpresos, duplicación de textos y documentos académicos de la Universidad de Antioquia.
- Molina, F., Díaz, C., & Espitia, S. (junio de 2002). *Digestión anaerobia: una aproximación a la tecnología*. Recuperado el 22 de febrero de 2020, de Universidad Nacional de Colombia:
http://www.uneditorial.net/uflip/Digestion_Anaerobia_una_aproximacion_a_la_tecnologia/pubData/source/Digestion_anaerobia_unal.pdf
- Mozo, B. (diciembre de 2011). *Instalación de biofiltro en la E.D.A.R "Guadalete" de Jerez de la frontera para la desodorización de gases*. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de Proyecto final de carrera de Ingeniería Química, Universidad de Cádiz:
<https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/14953>
- Noyola, A., Revah, S., & Morgan, J. (2000). *Malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales: su control a través de procesos biotecnológicos*. Recuperado el 21 de octubre de 2019, de Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM:
https://pdfs.semanticscholar.org/cc4d/5f3560e4e50f97dffbd85359b2c4eda874f1.pdf?_ga=2.13809527.1153981888.1580483266-1815999153.1580483266
- Parra, L. (noviembre de 2006). *Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente hasta alcanzar el estado estable*. Recuperado el 17

- de octubre de 2019, de Universidad nacional de Colombia:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/1178/1/linamarcelaparrarodriguez.2006.pdf>
- Patiño, L. (21 de noviembre de 2019). *Informe diagnóstico de la PTAR Abejorral*. Recuperado el 21 de febrero de 2020
- Patiño, L. (16 de diciembre de 2019). *Segundo informe técnico de seguimiento y control PTAR Abejorral*. Recuperado el 21 de febrero de 2020
- Perez, A., & Torres, P. (06 de noviembre de 2008). *Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables*. Recuperado el 21 de febrero de 2020, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co:8080/bitstream/10893/1636/1/vol.10%20no.2%20art.3.pdf>
- Pública, L. d. (septiembre de 2019). *Informe de caracterización 1- Biogás PTAR Sónson*.
- Sonsón, A. d. (2019). Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <http://www.sonson-antioquia.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Sonsón, A. d. (2019). *Sonsón progresa 2016-2019*. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <http://www.sonson-antioquia.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionControl/Plan%20de%20Desarrollo%20-%20Sons%C3%B3n%20Progresa.pdf>
- sostenible, M. d. (17 de marzo de 2015). *Resolución 0631 de 2015*. Recuperado el 28 de febrero de 2020, de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
- Sperling, V. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal: volume one*. Minas Gerais: IWA Publishing.
- Stuetz, R., Parsons, S., & P, G. (2001). *Odour measurements for sewage treatment works*. Water Research.

8. ANEXOS

8.1 FOTOS



Foto 1. Canal de entrada con disipadores de energía
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 2. Vertedero de excesos
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 3. Unidad de cribado (sin canastillas ni pasarela)
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 4. Unidad de desarenadores
Tomada por: Laura Patiño



Foto 5. Canaleta Parshall de 6''
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 6. Vertedero lateral después de unidades preliminares
Tomada por: Laura Patiño



Foto 7. Reactor UASB y quemador de biogás
Tomada por: Santiago Londoño

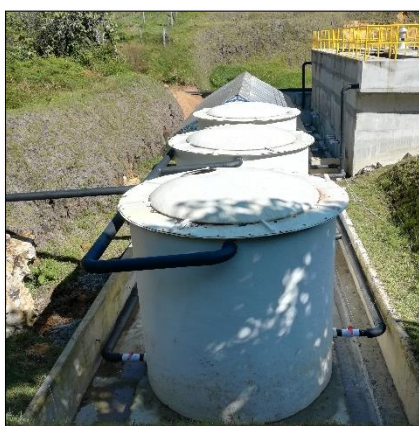


Foto 8. Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)
Tomada por: Maria Camila Gómez



Foto 9. Lechos de secado
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 10. Canal de entrada
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 11. Vertedero lateral o de excesos
Tomada por: María Camila Gómez

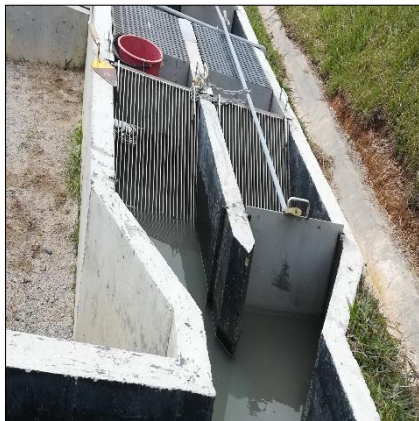


Foto 12. Unidad de cribado con pasarela y canastillas
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 13. Canales desarenadores
Tomada por: Maria Camila Gómez



Foto 14. Rejilla fina
Tomada por: Lizeth Mesa

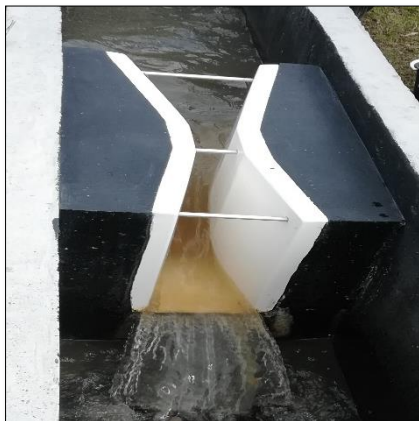


Foto 15. Canaleta Parshall de 3'
Tomada por: Maria Camila Gómez



Foto 16. Vertedero lateral después de unidades preliminares
Tomada por: María Camila Gómez

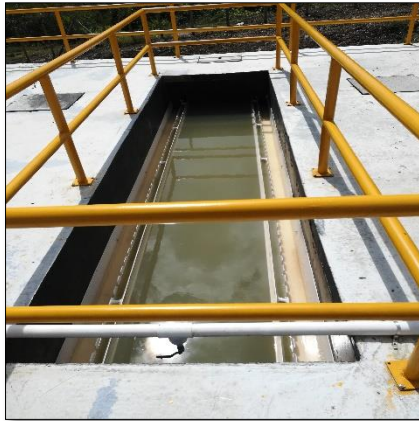


Foto 17. Reactor UASB
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 18. Quemador de biogás
Tomada por: Lizeth Mesa



Foto 19. *Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)*
Tomada por: *María Camila Gómez*



Foto 20. *Vertedero triangular con un ángulo de 90 grados*
Tomada por: *María Camila Gómez*



Foto 21. *Lechos de secado*
Tomada por: *María Camila Gómez*



Foto 22. Alcantarillado combinado
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 23. Canal de entrada
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 24. Vertedero de excedentes (Aliviadero)
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 25. Unidad de cribado (con pasarela y canastillas)
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 26. Canales desarenadores
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 27. Canaleta Parshall de 6''
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 28. Reactor UASB
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 29. Quemador de biogás
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 30. Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 31. Lechos de secado
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 32. Tanque séptico y filtro anaerobio
Tomada por: Santiago Londoño



Foto 33. Cámara 1 reactor UASB PTAR Sonsón
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 34. Cámara 2 reactor UASB PTAR Sonsón
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 35. Estructura de salida filtros anaerobios PTAR Sonsón
Tomada por: María Camila Gómez



Foto 36. Estructura de descarga a la fuente receptora PTAR Sonsón
Tomada por: María Camila Gómez