

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

EVALUACIÓN DE AGUA RESIDUAL EN PLANTAS DE TRATAMIENTO SECUNDARIO
Y Terciario PARA EL RIEGO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS NO COMESTIBLES EN
PUERTO RICO

Por
Stephanie Marie Rivera Cruz
© Derechos reservados, mayo 2021

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

Tesis presentada y aprobada como requisito parcial para completar el grado de Maestría en
Ciencias en Ciencias Ambientales

EVALUACIÓN DE AGUA RESIDUAL EN PLANTAS DE TRATAMIENTO SECUNDARIO
Y Terciario para el riego de cultivos agrícolas no comestibles en
PUERTO RICO

Stephanie Marie Rivera Cruz
Mayo 2021

Miembro del Comité Graduado:


Sra. Melitza Crespo Medina, Ph.D.
Directora de Tesis

17 de mayo de 2021

Fecha


Sra. Wilma Montalvo Rivera, M.S.
Co-director

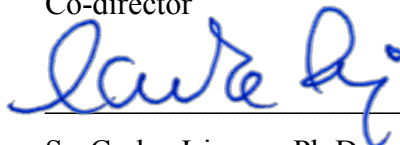
17 de mayo de 2021

Fecha


Sr. José Vera Serrano, Ph.D.
Co-director

19 de mayo de 2021

Fecha


Sr. Carlos Irizarry, Ph.D.
Director Escuela Estudios Graduados e Investigación

1 de junio de 2021

Fecha

Agradecimientos

Gracias a Dios por brindarme el enfoque para alcanzar cada una de mis metas propuestas. Le doy las gracias a mi esposo, mami, papi, hermanos, a mi gran familia, a cada uno de ellos por apoyarme incondicionalmente en todas las etapas de mi vida. Ellos son mi núcleo, mi motor, los que me enseñan y me motivan día a día a seguir adelante y no rendirme ante las situaciones, los amo.

Agradezco a el Ex - Director de Tesis el Dr. Miguel A. Rivas Vázquez, por los conocimientos otorgados desde el primer día, por el constante apoyo, por guiarme en la investigación y por creer en mí. Gracias a la Dra. Melitza Crespo Medina por la disponibilidad de ser parte de mi comité y luego pasar a ser la Directora de Tesis. Estoy muy agradecida por sus recomendaciones, guías, por su apoyo, e interés en mi proyecto. Gracias a los miembros del comité, Dr. José Vera Serrano y Sra. Wilma Montalvo Rivera por aceptar ser parte de mi proyecto y por brindarme los consejos necesarios para la investigación. Gracias a todos por creer en mi trabajo y su disponibilidad para mí. Estoy sumamente agradecida con todos, ya que cada uno tuvo una aportación en mi proyecto y me transmitieron sus conocimientos, los cuales sé que me ayudarán a ser mejor profesional.

Le agradezco grandemente a la Agencia de la Autoridad de Aguas y ^{17 de mayo de 2021} Alcantarillados, Región Oeste, especialmente al Sr. John Guzmán, Supervisor de Operaciones y al Sr, Kelvin Rivera, Técnico de Análisis de Agua; por concederme la oportunidad de realizar mi investigación en sus facilidades, por la instrumentación utilizada, por la ayuda necesaria para hacer posible la investigación y por sus enseñanzas hacia mí. Gracias a la Universidad Interamericana de Puerto Rico, Recinto de San Germán, por aceptar mi investigación y ser parte de ella.

Resumen

En ocasiones, los productores agrícolas carecen de sistemas de riego de agua, los cuales son necesarios diariamente y en especial en tiempos de sequías. La Autoridad de Acueductos y Alcantarillado de Puerto Rico (AAA) se dedica a realizar distintos tratamientos a las aguas residuales domésticas en los pueblos de Puerto Rico antes de descargarlas en los cuerpos de agua. Gran cantidad de agua residual doméstica es tratada a diario por la AAA, las cuales no se reutilizan para el sector agrícola, especialmente para cultivos no comestibles. Esta investigación evalúa si en ciertas plantas de tratamientos de la AAA estas aguas residuales domésticas tratadas pueden favorecer en un futuro a reutilizarse para el riego a cultivos agrícolas, en particular a cultivos no comestibles en Puerto Rico. Se recolectaron muestras en la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán y en la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas. Se realizaron pruebas para evaluar los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos. En los resultados, se presentaron algunos parámetros con altos niveles. Mediante los datos se identificó que no es recomendable reutilizar estas aguas residuales para riego a cultivos agrícolas no comestibles en Puerto Rico. Se deben crear más análisis antes de realizar estas prácticas de riego. Esta investigación puede servir de beneficios a la agencia, a los productores agrícolas y de referencia a futuros estudios y proyectos de reutilización del agua residual en el sector agrícola.

Palabras clave: *aguas residuales, reutilización, sector agrícola, plantas de tratamientos.*

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	1-3
Problema de investigación.....	3-6
Justificación del estudio.....	6-9
Propósito de la investigación.....	10-11
Preguntas de investigación.....	11
Hipótesis.....	11
REVISIÓN DE LITERATURA.....	12
Agua residual y sus tratamientos.....	12-17
Reutilización de aguas residuales domésticas.....	17-22
Prácticas agrícolas – Cultivos no comestibles.....	22-24
Presencia e importancia de nutrientes en aguas residuales.....	24-27
Microorganismos en aguas residuales.....	27-29
Reúso de aguas residuales en Puerto Rico y otros países.....	29-32
MÉTODOS.....	33
Introducción.....	33
Diseño de la investigación.....	33
Área de estudio.....	34-37
Fase administrativa del estudio.....	37
Recolección de muestras del estudio.....	38

Procedimientos para el análisis de las muestras.....	38-43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE DATOS.....	44-83
CONCLUSIÓN.....	84-86
RECOMENDACIONES.....	87-88
REFERENCIAS.....	89-99
TABLAS	
Tabla 1. Fechas de realización de muestreo en las plantas de tratamientos de la AAA	44
Tabla 2. Posibles factores que conllevan a los resultados obtenidos.....	83
ANEJOS.....	100-109
Anejo A. Carta de propuesta investigativa para la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.....	101-102
Anejo B. Autorización de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillado.....	103-104
Anejo C. Contrato entre partes concernientes: la Autoridad de Acueductos y Alcantarillado y la Universidad Interamericana de Puerto Rico, recinto de San Germán.....	105-109

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Localización planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	34
FIGURA 2. Localización planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas en Lajas.....	35
FIGURA 3. Zona geográfica del sector agrícola del municipio de San Germán.....	36
FIGURA 4. Zona geográfica del sector agrícola del municipio de Lajas.....	36
FIGURA 5. Resultados del pH en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	46
FIGURA 6. Resultados del pH en afluente y efluente de la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas	47-48
FIGURA 7. Resultados de temperaturas en afluentes y efluentes de planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán... ..	49
FIGURA 8. Resultados de temperaturas en afluentes y efluentes de la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas.....	50-51
FIGURA 9. Resultados de Sal (en unidad ppt) en afluente y efluente de la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas,.....	52-53
FIGURA 10. Resultados de Sal (ppm) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	54

FIGURA 11. Resultados de la conductividad (μS) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	55
FIGURA 12. Resultados de conductividad (mS) en afluentes y efluentes de la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas.....	56
FIGURA 13. Resultados de TDS (unidad: ppm) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	57
FIGURA 14. Resultados de TDS (en unidad de: ppt) en el afluentes y efluentes de la planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas en Lajas.....	58
FIGURA 15. Resultados de TSS en afluentes Vs. TSS efluente de planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	59
FIGURA 16. Resultados de TSS del afluentes Vs. TSS efluentes en planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas en Lajas.....	60
FIGURA 17. Resultados de TSS del Reactor 1 Vs. TSS de RAS en planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	61
FIGURA 18. Resultados de TSS del Reactor 1 Vs. TSS Reactor 2 en la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas.....	62-63
FIGURA 19. Resultados de COD (unidad mg/l) del afluente y efluente en planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	64
FIGURA 20. Resultados de COD (unidad mg/l) del afluente y efluentes de la planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas en Lajas.....	65
FIGURA 21. Resultados de Amonio (unidad mg/l) en el efluente de la planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas en Lajas Vs. en planta de tratamiento secundario en San Germán.....	66-67

FIGURA 22. Resultados de Fósforo en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	68
FIGURA 23. Resultados de Fósforo en el afluente y efluente de la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas.....	69-70
FIGURA 24. Resultados de Nitrito del efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	71
FIGURA 25. Resultados de Nitrato en el efluente de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	72-73
FIGURA 26. Resultados del VS Reactor 1 Vs. Ras de la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	74-75
FIGURA 27. Resultados del VS Reactor 1 Vs. Reactor 2 en la planta de tratamiento terciario de aguas domésticas en Lajas.....	74 - 75
FIGURA 28. Resultados del % VSS Reactor 1 Vs. % VSS Ras en la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	76
FIGURA 29. Resultados planta de tratamiento terciario de aguas doméstica en Lajas, VSS% Reactor 1 Vs. % VSS Reactor 2.....	77
FIGURA 30. Resultados de la densidad de Enterococos en la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán	78-79
FIGURA 31. Resultados de la densidad de Enterococos (MNP/100ML) – percentil 90 en la planta de tratamiento secundario de aguas domésticas en San Germán.....	78-79
FIGURA 32. Resultados de <i>E.coli</i> en la planta de tratamiento terciaria de aguas doméstica en Lajas.....	80

FIGURA 33. Resultados de la densidad de Enterococo en la planta de tratamiento terciario en Lajas.....	81-82
FIGURA 34. Resultados de la densidad de Enterococos (MNP/100ML) – percentil 90 en la planta de tratamiento terciario de Lajas.....	81-82

INTRODUCCIÓN

Trasfondo

El agua es un recurso natural y esencial para todo organismo viviente y, a su vez, para la agricultura sustentable de un país, de hecho, los sistemas de agua libre actúan como un ambiente de filtración natural (Servicio de información comunitaria sobre investigación y desarrollo [Cordis], s.f.). Cordis (s.f.) menciona que el agua se purifica a través de diversos procesos medioambientales naturales como infiltración y filtración de la vegetación. También, este indica que estos procesos reducen determinados factores como sólidos suspendidos totales, demanda biológica de oxígeno y coliformes fecales y totales, así como los niveles de nitrógenos y fósforos del agua.

Las aguas residuales pueden incluir compuestos nitrogenados, fosfatados, farmacéuticos, carbonos orgánicos, ácidos grasos volátiles, metales pesados y colorantes. Las aguas residuales contienen sólidos, sustancias disueltas y microorganismos (Wikiwater, 2013). Esta asociación indica que las aguas residuales (tratadas o no) contienen sustancias nutritivas para las plantas como nitrógeno, fósforo, potasio y oligoelementos (Wikiwater, 2013). Igualmente, Wikiwater (2013) señala que es necesario controlar periódicamente la cantidad de nutrientes presentes en el efluente para tener en cuenta las necesidades en fertilizantes de los cultivos regados.

Por otra parte, Céspedes Bernal (2019) menciona que la alta demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO_5) en las aguas residuales, representan una amenaza ambiental si no se tratan. Las aguas residuales sin tratar generan grandes cantidades de agentes patogénicos. De hecho, el riesgo de infección de origen hídrico por estos agentes patógenos depende de un conjunto de factores (Wikiwater, 2013). Estos son: sus concentraciones, que incluyen la dispersión en el agua, la capacidad de esos agentes intestinales

para sobrevivir en el medio y la calidad del tratamiento de depuración del agua y la dosis infecciosa, la exposición y la susceptibilidad de la población expuesta. Por lo tanto, esta asociación recomienda que es indispensable realizar tratamientos continuos para que el agua alcance su nivel de calidad.

El reúso de aguas residuales permite alcanzar varios beneficios. Entre los más destacados se encuentran: oportunidades de trabajo en las zonas rurales, más y mejores cultivos y minimiza el uso frecuente de fertilizantes químicos (Arnedo, Bracho, Díaz Suárez y Botero, 2008). Por otro lado, la agricultura es la responsable del 70% de las extracciones de agua (Wikiwater, 2013).

Por consiguiente, el 18% de las tierras aptas para la agricultura son irrigadas con aguas residuales (Passarini, Gamarra, Vanalle y Santana, 2012). La irrigación de cosechas con agua residual que no ha recibido un tratamiento adecuado crea problemas de salud pública, debido a las altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos causantes de enfermedades que estas aguas generan (Arnedo et al., 2008). Passarini et al. (2012) señalan que este reúso de agua residual permite aminorar los impactos ambientales a los componentes del agua residual.

Acorde con Cisneros Estrada, Saucedo Rojas y Rivas López (2013), las aguas residuales contribuyen al aprovechamiento hídrico en el sector agrícola, minimizan riesgos de contaminación de suelos, acuíferos y resguardan la salud pública. La conversión de la agricultura de secano a regadío puede aumentar el rendimiento de la mayoría de los cultivos entre un 100 a un 400% y permite cultivar distintos cultivos con un mayor valor económico (Winpenny, Heinz, y Koo-Oshima, 2013). Esto permite mayor productividad en ciertos cultivos; específicamente, en regiones donde las condiciones ambientales no son favorables. Por esta razón, el agua está en el epicentro del desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos (Organización de las

Naciones Unidas [ONU], s.f.). También, la ONU (s.f.), señala que el agua es parte crucial en la adaptación al cambio climático, y es el vínculo crucial entre la sociedad y el medioambiente.

En esta década, existen diferentes tipos de tratamientos para las aguas residuales. El tipo de tratamiento de estas aguas más utilizado es el método químico del cloro. Este tratamiento elimina bacterias patógenas y mantiene una concentración residual del cloro en el agua, pero es ineficaz contra virus y quistes de protozoos (Guerra Díaz, Gómez Infante y Sarmiento Sera, 2001). Otros tratamientos eficaces para estas aguas son los procesos de tratamientos de agua secundarios y terciarios. Por tanto, el tratamiento secundario tiene como objetivo reducir los niveles de contaminación química y biológica, en cuanto, para el tratamiento terciario se reducen los niveles de patógenos para desinfectar el efluente y complementar la remoción de materia contaminante del agua (Aguilar Escalante, 2019). Estos procesos biológicos se manejan para la remoción de contaminantes (Céspedes Bernal, 2019).

Problema de investigación

En varias ciudades del mundo existe una mezcla de agua efluentes domésticas y aguas industriales que constituye un factor de riesgo ambiental (León Suematsu, 1995). Por tanto, la falta de cumplimiento de regulaciones o parámetros para las aguas residuales puede provocar complicaciones en la práctica de reutilizar el agua residual, generando problemas al ambiente. Por ejemplo, al regar terrenos agrícolas con aguas residuales no tratadas provoca la migración de contaminantes obteniendo un impacto a corto o largo plazo en la salud y el ambiente.

Las aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause problemas (Rodríguez Pimentel, 2017). De hecho, Labatut (2017) indica que, a pesar del gran potencial que existe para la reutilización directa, segura y

planificada de aguas residuales en una región, la mayor parte de estas no se aprovechan, se vierten al mar o a los cursos de agua donde se reutilizan de manera indirecta y muchas veces no intencionada en cientos de miles de hectáreas de cultivos por toda la región lo que supone serios riesgos para la salud de las personas y del medio ambiente.

Según Kourous (2017), señala que la demanda creciente de alimentos y la escasez de agua, ha llegado el momento de dejar de tratar las aguas residuales como un desecho y gestionarlas como un recurso que puede utilizarse para cultivar y cubrir las necesidades de la agricultura. En las últimas décadas, el mundo se ha mostrado con cierta preocupación y está tratando de resolver los problemas relacionados con la disposición de los efluentes líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial de las aguas de abastecimiento (Rodríguez Pimentel, 2017). Este autor menciona que las aguas de desecho dispuestas en una corriente superficial (lagos, ríos, mar) sin ningún tratamiento, ocasionan graves inconvenientes de contaminación que afectan la flora y la fauna. Este problema es debido a que, las fuentes de agua han sido incapaces por sí mismas para absorber y neutralizar cargas contaminantes, por tanto, es importante lograr el equilibrio ecológico para preservar los cuerpos de agua (Rodríguez Pimentel, 2017).

En ocasiones en algunos países del mundo, en tiempos de escasez extrema, las autoridades nacionales, suelen optar por apartar el agua destinada para los agricultores y estas son entonces dirigidas hacia las ciudades, ya que entienden que el agua tiene mayor valor económico en el uso industrial y urbano que en la mayoría de los fines agrícolas (Winpenny, et al., 2013). Sin embargo, existen contradicciones en cuanto al uso del agua regenerada para la agricultura. Estos autores señalan que el uso de agua regenerada en la agricultura permite

conservar agua dulce para un fin de mayor valor económico y social y, al mismo tiempo, los agricultores reciben un suministro de agua fiable y rico en nutrientes.

Por otra parte, Según la búsqueda realizada por la investigadora, se identificó que Puerto Rico carece de proyectos innovadores o estudios investigativos en cuanto al agua residual tratada para ser utilizada en el sector agrícola; específicamente, en cultivos no comestibles.

Particularmente, no se encontró estudios investigativos en la zona suroeste por parte de AAA, la cual promueva que las plantas de tratamientos sean posibles fuentes de riego agrícola a cultivos no comestibles por medio de agua residual tratada.

Díaz Conde (2016) señala que, en la isla se genera una gran cantidad de galones de agua sanitaria tratada al día. Este autor indica que, en el 2006, las plantas de tratamiento de agua en la Corporación Pública de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico (AAA) descargaron aproximadamente 232 millones de galones diarios (mgd) de aguas sanitarias tratadas de diversa calidad a los cuerpos de aguas superficiales de la isla y al océano. Por ende, estas grandes cantidades de aguas tratadas provenientes de la AAA son alternativas para el sector agrícola en la isla. De hecho, estas pudiesen ser utilizadas nuevamente y factibles para adoptar su uso en el riego de cultivos.

Las aguas residuales tratadas suelen promover una aportación como, por ejemplo, de nutrientes, entre otros. En el área suroeste de la isla, específicamente los municipios de Lajas y San Germán presentan condiciones anormales, por ejemplo: sequías. Por tanto, el sector agrícola en estas zonas requiere de mayor cantidad de agua para sus cultivos.

En las zonas agrícolas de Puerto Rico, la gran mayoría de los productores agrícolas no tienen suficientes alternativas para cubrir la demanda de agua que sus fincas requieren. Por otra parte, las plantas de tratamientos de AAA no ejecutan un plan de reúso del agua residual para

riego agrícola una vez reciben el tratamiento adecuado. Año tras año, gran cantidad de aguas residuales tratadas por parte de esta agencia están siendo descargadas a los cuerpos de agua, sin otorgarle un reúso a la misma. Al no tener un programa de reutilización de estas aguas residuales domésticas tratadas hace que la agencia y los productores agrícolas no puedan obtener distintos beneficios.

Estas aguas residuales tratadas deben cumplir con ciertos parámetros para que estas cualifiquen para los regadíos de predios agrícolas, particularmente, los no comestibles. Es por esto, que la evaluación del agua residual tratada debe realizarse en las plantas de tratamientos antes de generar una segunda función a las aguas residuales tratadas.

Justificación del estudio

La reutilización de agua residual para riego de cultivos se presenta como una fuente adicional de suministro para tener en cuenta dentro de una gestión global de los recursos hídricos. Esto es debido por una parte a la limitación de los ya existente, y por otra, a la posibilidad de solucionar los problemas ecológicos asociados con el vertido de estos efluentes al medio natural (Segura Pérez, Contreras París, Granada García y Martín Expósito, s.f.). De hecho, los efluentes terciarios y secundarios que tienen un programa efectivo de pretratamiento de efluentes domésticos e industriales pueden aplicarse en los cultivos sin ninguna restricción si la cantidad usada está de acuerdo con los requerimientos de agua del cultivo (León Suematsu, 1995).

En este estudio se pretende lograr datos para futuros proyectos de reutilización del agua, esto como alternativa para conservar el recurso de agua y de cierto modo, para beneficiar a los agricultores, agencias y el medio ambiente. Por otro lado, la investigadora no encontró que en Puerto Rico existan investigaciones en que determinen la calidad de las aguas residuales

domésticas en plantas de tratamiento secundario y terciario para propósito de reúso en riego de cultivos agrícolas comestibles o no comestibles.

Para producir el doble de alimento que se requerirá en los próximos 30 años, la agricultura tendrá que incrementar de manera notable la eficiencia en el uso del agua; no sólo mejorar la eficiencia en el manejo de estas en la agricultura, sino promover su uso de manera sustentable (Salazar Moreno, Rojano Aguilar y López Cruz, 2014). Por tanto, una de las razones para la realización de esta investigación es, porque existe una necesidad aun no satisfecha sobre temas específicos relacionados con el uso del agua regenerada (Winpenny et al., 2013).

Por otro lado, entiendo que una de las dificultades que posiblemente existe para la reutilización del agua residual es el encontrar el procedimiento adecuado para la desinfección y el tratamiento que se suministra para estas aguas. Acorde con Hernández Acosta, Quiñones Aguilar, Cristóbal Acevedo y Rubiños Pant (2014), la desinfección y el tratamiento del agua residual es obligatoria, antes de utilizarse para riego agrícola. Por ende, esta investigación pretende determinar cuan eficiente puede ser las aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento secundario de aguas sanitarias domésticas localizada en San Germán, P.R. y la planta de tratamiento terciario de aguas sanitarias domésticas localizada en Lajas, P.R. para generar datos confiables que puedan demostrar una posible reutilización de estas aguas tratadas en el sector agrícola en la isla, particularmente, en los cultivos no comestibles.

Los productores, específicamente en el sector agrícola en Puerto Rico, deberán explorar vías que permitan la reutilización de aguas residuales tratadas para la agricultura (Sorderberg, 2016). En ocasiones, podría haber beneficios para los agricultores si logran evitar costos adicionales por extraer aguas subterráneas y, al mismo tiempo, permite obtener los nutrientes presentes para la producción de fertilizantes (Wikiwater, 2013; Winpenny et al., 2013).

Winpenny et al. (2013) especifican que, el uso de agua regenerada en la agricultura permite conservar agua dulce con el fin de adquirir mayor valor económico y social y, eventualmente, los agricultores reciben un suministro de agua fiable y rico en nutrientes. De hecho, la realización de un plan futuro de reutilización de agua residual proveniente de AAA en Puerto Rico podría promover la economía del país por medio de oferta, demanda y beneficios entre la agencia, los agricultores y otros. Por consiguiente, la reutilización de las aguas residuales es una opción importante en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Esta gestión se relaciona con los aspectos del ciclo hídrico para optimizar el uso del agua en todas sus formas (Winpenny et al., 2013). Estos autores indican que, entre países, existen problemas comunes como el aumento de la población, la demanda de alimento, la escasez de agua y las preocupaciones acerca de la contaminación ambiental. Por esta razón, teniendo en cuenta los factores antes mencionados, es sumamente importante la reutilización de las aguas residuales como un recurso potencial y valioso.

En la isla, son pocos los proyectos acerca de la reutilización del agua residual que han sido implantados, sin embargo, estos proyectos no están enfocados al sector agrícola, específicamente, en los cultivos no comestibles. Entre los proyectos que reutilizan aguas residuales en Puerto Rico se encuentran los complejos turísticos: Palmas del Mar en Humacao, Dorado Beach en Dorado y Río Mar Club en Río Grande. Estos complejos turísticos reutilizan las aguas sanitarias tratadas en los sistemas de riego de los campos de golf y áreas verdes (Díaz Conde, 2016). Por otro lado, es interesante mencionar que el estudio ‘‘ Percepción sobre la reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura en Puerto Rico’’, 2016, desarrollo una encuesta transversal para conocer la percepción de la comunidad, entre las preguntas establecidas se encuentra: si estaban de acuerdo con la reutilización de aguas tratadas, como resultado

obtuvieron un 75% para los usos de riego, pastos, gramas parques, entre otros. Por otra parte, se obtuvo solo un 49%, de acuerdo con el uso de aguas residuales tratadas para el riego de fruto comestibles. Se dice que, la comunidad percibe dudas sobre los contaminantes químicos en las aguas residuales y como afectan la salud (Calixta Ortiz, M. y Morales Agrinzoni, C.R., 2016).

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, los sistemas de riego eficientes pueden ayudar a reducir en gran medida la pérdida tanto de agua como de fertilizantes. Iniciar una alternativa acerca de las aguas residuales tratadas, fomentaría la seguridad alimentaria, igualmente, la reutilización del agua en la agricultura puede generar grandes beneficios para la salud, entre ellos, un mayor valor nutricional (Marjani Zadeh, Mateo Sagasta, Antoniou, A., Qadir, M., Chilton, J., Carrión Crespo, De Souza, M., Unver, O., Fattori, V., Zandaryaa, S. y Medlicott, K., 2017). Es por esto que, es de gran importancia impactar en el futuro la disponibilidad de los recursos, para garantizar la seguridad alimentaria; debido a que, se estima que para el 2030, el sector agrícola necesite un promedio de 84.2 mgd de agua para los sistemas de riego (Calixta Ortiz y Morales Agrinzoni, 2016). Por su parte, la generación de aguas residuales tratadas en la Isla se estima en 228 millones de galones por día, incluyendo 161 mgd tratadas a niveles primarios, 51 mgd a nivel secundario, y 16 mgd a nivel terciario, pero en su mayoría se descargan al océano y ríos, este volumen de agua es un recurso significativo que podría ser reutilizado para el riego agrícola y la recarga del acuífero (Calixta Ortiz y Morales Agrinzoni, 2016). Según Calixta Ortiz y Morales Agrinzoni, 2016, existe la oportunidad de reutilizar este recurso, pero aún no existe la política pública y los recursos en las agencias concernientes para desarrollar e implantar otras alternativas que se traduzcan en más proyectos reales de reutilización de aguas residuales tratadas para la agricultura.

Propósito del estudio

El propósito principal de este estudio es determinar la calidad de las aguas residuales en las plantas de tratamiento secundario y terciario para determinar un posible reúso en riego a cultivos agrícolas, específicamente, cultivos no comestibles. Además, en esta investigación se comparará la calidad de las aguas residuales entre las plantas de tratamiento secundario y terciario en Puerto Rico. Específicamente, se seleccionó la planta de tratamiento secundaria de aguas sanitarias doméstica de San Germán y la planta de tratamiento terciario de aguas sanitarias doméstica de Lajas, ambas plantas dirigidas por la AAA.

La aportación más significativa en este estudio es promover el reúso de aguas residuales tratadas procedentes de la planta terciaria de Lajas y la planta secundaria de San Germán de la AAA con el propósito de usar estas aguas tratadas para riego en cultivos no comestibles. Estas zonas en donde se encuentran las dos plantas de tratamientos fueron seleccionadas ya que existe un sector agrícola cercado a estas. Por consiguiente, no todos los del sector agrícola tiene fácil accesibilidad a agua para utilizarla en riego agrícola. Por cierto, en estas zonas seleccionadas ocurren en ocasiones sequías, que perjudican cualquier tipo de cultivos.

Este estudio ayudará a que, en un futuro, este sector agrícola posiblemente pudiese potencializar cualquier tipo de cultivos en momentos de sequías y también beneficiarse de los cultivos agrícolas en cualquier temporada del año. Es propio señalar que, en esta investigación, se pretende reutilizar el agua tratada en la agricultura del país, específicamente, para riego de las cosechas que no son para consumo humano; ej., pasto para ganado. Además, este proyecto científico potencialmente puede ser una guía para futuras alianzas y contribuciones entre la Asociación de Agricultores de Puerto Rico, la Corporación Pública de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico (AAA), el Departamento de Agricultura de Puerto

Rico (DAPR), la Junta de Calidad Ambiental (JCA) del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA) y la Universidad Interamericana de Puerto Rico (UIPR) para desarrollar y aumentar futuras investigaciones en el sector agrícola y ambiental, y el manejo de los recursos de agua y operaciones de unidades.

Preguntas de investigación

Este estudio pretende contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo varían los resultados de los parámetros biológicos, físicos y químicos en el agua residual de la planta de tratamiento secundario de San Germán y la planta terciaria de Lajas de la AAA?
2. ¿Cuán eficiente pueden ser las aguas residuales tratadas de la planta de tratamiento secundario de San Germán y la planta de tratamiento terciario de Lajas para determinar la reutilización de estas en riego de cultivos no comestibles en Puerto Rico?

Hipótesis

La hipótesis de este estudio es:

Es viable y factible el reúso de estas aguas tratadas para el riego en cultivos no comestibles en Puerto Rico.

REVISIÓN DE LITERATURA

Agua residual y sus tratamientos

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y microorganismos (Espigares García y Pérez López, s. f.). Rodríguez (2016) indica que existen diferentes tipologías del agua residual. Entre ellas se encuentran: las aguas residuales domésticas, las aguas residuales industriales y las aguas residuales urbanas.

Rodríguez (2016) señala que las aguas residuales industriales son aguas que han sido vertidas desde un lugar con finalidad comercial o industrial, mientras las aguas residuales urbanas, son aquellas que provienen de aguas domésticas e industriales, incluyendo las aguas que emanan de la corriente pluvial. Entre las diferentes tipologías de las aguas residuales domésticas o aguas negras se mencionan las que llegan de: las heces fecales y orina, aseo personal, limpieza de la cocina, lavado de la vivienda en general, etc. (Espigares García y Pérez López, s. f.). Según estos autores, las aguas residuales que produce una comunidad van en proporción al consumo de agua potable y al grado de desarrollo económico y social.

Los constituyentes convencionales presentes en aguas residuales domésticas son: sólidos suspendidos y coloidales (SS), materia orgánica e inorgánica medidas como demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO, respectivamente), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniacal, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus (Silva, Torres y Madera, 2008). En cuanto a los agentes físicos, se encuentran los sólidos suspendidos y el calor. Mientras que, los agentes químicos, se mencionan: el pH, las sustancias tóxicas, los nutrientes y las sustancias consumidoras de oxígenos disueltos.

Por último, los agentes microbiológicos que se detectan como contaminantes en las aguas residuales, se señalan: los virus, las bacterias, los helmintos y otros. En fin, la cuantificación de estos componentes antes descritos es de suma importancia para definir estrategias de tratamientos que garanticen la viabilidad de técnicas y, a su vez, costo efectivo, para lograr una calidad de agua residual tratada eficaz y minimizar el riesgo potencial para la salud pública y el ambiente (Silva et al., 2008).

En contraste, Ruiz Buehl (2006) puntualiza que la contaminación de las aguas se agrava por alto contenido de nutriente como los fosfatos y los compuestos nitrogenados provenientes de las aguas usadas, domésticas e industriales, y las actividades agrícolas. La contaminación de las aguas puede ser causada por: las descargas de aguas no tratadas en los ríos, descargas industriales en los cuerpos de agua, los cuales pueden contener metales como arsénico, cromo, cadmio, cobalto, mercurio, desechos de los animales, agua de escorrentía cargada de productos químicos utilizados en la agricultura, movimientos de terreno cerca de ríos y derrames de aceite o derivados de petróleo (Ruiz Buehl, 2006).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) determina que el 71% de las aguas residuales se desecha a través de un sistema de alcantarillado, el 9% se capta en instalaciones ‘‘in situ’’ y el 20% que resta no se recoge. Mientras que esta importante organización OMS, señala que el 76% de las aguas residuales domésticas recolectadas por medio de un sistema de alcantarillado son tratadas de manera adecuada.

Ruiz Buehl (2006) articula que se realizan diferentes procesos de tratamientos para las aguas residuales domésticas, estas son: primarios, secundarios y terciarios. Este autor menciona que los tratamientos primarios o físicos pueden remover hasta un 60% de sólidos suspendidos

(SS) y demanda bioquímica de oxígeno (DBQ), en los tratamientos secundarios o biológicos un 85% y, por último, en los tratamientos terciarios o avanzados aproximadamente un 90%.

En las plantas de tratamiento primario se efectúan la eliminación de materiales de fácil sedimentación y en algunos casos de las densidades (Céspedes Bernal, 2019). Mientras, las plantas de tratamiento secundario, se realizan la oxidación del material orgánico presente de las aguas residuales (Céspedes Bernal, 2019). Las plantas de tratamiento terciario se ejecutan la eliminación de varios compuestos inorgánicos disueltos, incluyendo nitrógeno y fósforo. En cuanto al tratamiento terciario, se maneja por medio de filtración y adsorción antes de una desinfección con radiación ultravioleta (UV) (Céspedes Bernal, 2019). Es propio indicar que, en el presente, la radiación UV es una de las mejores alternativas de desinfección del agua residual y potable (Véliz Flores, Aronés Medina, Palomino Malpartida y Huincho Rodríguez, 2018).

Por último, el método de luz UV provee una desinfección rápida y efectiva contra un gran espectro de microorganismos (Guerra Díaz, et al., 2001). León Suematsu (1995) expone que la inactivación de agentes patógenos por irradiación de rayos ultravioletas, desecación y depredadores biológicos naturales cuando se emplean efluentes para riego de cultivos y del suelo puede llevar a una reducción suplementaria de 90 a 99% de los agentes patógenos a los pocos días del empleo. Por otra parte, la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz, por tanto, el uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L (EPA, 1999). La eficacia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua residual, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación y la configuración del reactor (EPA, 1999). También, la efectividad depende de la dosis de UV, mientras que la dosis de UV

requerida varía según la calidad del agua (Centre for affordable wáter and sanitation technology, 2011). Entre las eficiencias de un tratamiento UV se encuentran que a nivel de bacterias, virus, helmintos y protozoos su eficiencia puede llegar a tener $> 99.99\%$ y para turbiedad y productos químicos su eficiencia de tratamiento es 0% (Centre for affordable wáter and sanitation technology, 2011).

En la guía de la EPA para la reutilización de aguas residuales para la agricultura (2012) establece que las concentraciones máximas de metales permisibles para aguas residuales tratadas de uso agrícolas, son las siguientes: aluminio 5mg/L, arsénico 0.1 mg/L, berilio 0.1 mg/L, boro 0.75mg/L, cadmio 0.01 mg/L, cinc 2mg/L, cromo 0.1mg/L, cobalto 0.05 mg/L, cobre 0.2 mg/L, fluoruro 1 mg/L, hierro 5 mg/L, litio 2.5 mg/L, manganeso 0.2 mg/L, molibdeno 0.01 mg/L, níquel 0.2 mg/L, plomo 5 mg/L, selenio 0.02 mg/L y vanadio 0.1 mg/L (Soderberg, 2016). León Suematsu (1995) indica que no cumplir con normas pueden ocasionar graves problemas de salud pública cuando se genera el riego con aguas residuales sin tratar, careciendo de reglamentación y a menudo ilegal, práctica muy difundida en los países en desarrollo para las aguas residuales. Además, este autor menciona que, los metales pesados pueden bioacumularse a través de la cadena alimentaria; por consiguiente, los productos generados con el uso de las aguas residuales pueden constituir riesgo para la salud de los consumidores si en los efluentes existe una concentración elevada de estos compuestos. Por lo que, el autor en el 1995 menciona que la extinción paulatina natural de los agentes patógenos sobre el terreno constituye otro valioso factor de seguridad para reducir los riesgos potenciales para la salud.

Por otra parte, Puerto Rico, cuenta con diferentes plantas de tratamiento de aguas usadas. Esta es administrada y operada por la AAA. Una de las ventajas que realiza esta corporación pública en cuanto a las plantas de tratamiento de aguas usadas es que gran parte del efluente

están ubicadas en zonas costeras; por lo cual, existen oportunidades de reutilización (Díaz Conde, 2016). Por consiguiente, las plantas de tratamientos terciarios en Puerto Rico buscan facilitar la reutilización de aguas sanitarias tratadas en la zona central de la isla, así como en áreas costeras (Díaz Conde, 2016). Por ejemplo, en el municipio de Lajas, P.R. se ubica la planta de tratamiento de aguas sanitarias doméstica terciaria y esta se utiliza para realizar el tratamiento al agua residual doméstica provenientes de áreas circundantes como Lajas y parte de Cabo Rojo. Luego del tratamiento de estas aguas, es liberada a una Quebrada nombrada Mondongo cumpliendo con los requisitos de permiso de sistema nacional de eliminación de descargas de aguas de escorrentías, (NPDES, por sus siglas en inglés). Esta planta de tratamiento terciaria se maneja y se trata 1.5 millones de galones por día (mgd) de agua residual y se recibe un flujo promedio de 0.350 mgd de afluentes sanitarios (AAA,2013). Según se estipuló en el manual de sistema de control de proceso de la AAA, esta planta cuenta con un ciclo típico de tratamiento: mezclado y llenado (75 min), reacción y llenado (105 min), reacción (75 min), asentamiento (60 min) y la decantación (45 min). Por ende, cada reactor completa cinco ciclos por día con un estándar de 360 min.

Conjuntamente, la planta de tratamiento de aguas sanitarias doméstica de San Germán es una planta secundaria y se realiza el tratamiento del agua residual doméstica proveniente de San Germán y Sabana Grande, luego el agua es liberada en el río Guanajibo, cumpliendo con los requisitos de permiso de sistema nacional de eliminación de descargas de aguas de escorrentías, (NPDES, por sus siglas en inglés) número PR0020818. La AAA (2013) menciona que la planta de alcantarillado sanitario de San Germán fue diseñada para manejar y tratar flujos, un flujo de 8 mgd de aguas usadas sanitarias. La planta de tratamiento de San Germán cuenta con dos clarificadores secundarios en donde proveen un tiempo suficientemente extenso para permitir y

promover la separación física de los sólidos (AAA, 2013). Como parte de la desinfección, la planta de San Germán cuenta con un sistema de desinfección utilizando radiación ultravioleta. De acuerdo con AAA (2013), la efectividad de este tipo de desinfección dependerá de las características que tengan las aguas residuales, de la intensidad de la radiación, cantidad de tiempo en los que los microorganismos estén expuestos y un largo de onda óptimo de 250 a 270 nm de rango.

Reutilización de aguas residuales domésticas

Winpenny et al. (2003) señala que las necesidades del agua en el mundo se dividen principalmente por categorías, según el orden encontramos: 1) agua potable, 2) agricultura y ganadería, 3) higiene y sanidad pública, 4) usos domésticos, 5) comercio y servicios, 6) industria, 7) actividad recreativas y turismo, 8) pesca comercial y 9) mantenimiento ecológico y conservación, y protección del medioambiente. Labatut (2017), establece que las aguas residuales urbanas todavía se consideran en gran parte como desechos, en lugar de ser vistas como una fuente potencial de suministro de agua que puede reducir sustancialmente la presión sobre el medio ambiente. En tanto que, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) indica que las aguas residuales deben considerarse una fuente sostenible de agua, energía, nutrientes y otros subproductos recuperables. Además, esta organización, señala que la gestión de las aguas residuales mediante el aumento de la recogida y el tratamiento (sistemas in situ o externos) puede contribuir al logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

La reutilización de las aguas depuradas es considerada como una opción de gran potencial e interés para muchos sectores (Guillemes Peira, 2014). Las aguas residuales pueden suponer un recurso hídrico fiable y rico en nutrientes para la irrigación de cultivos (Mateo - Sagasta, 2017). Gatto D' Andrea et al. (2014) profundiza que el uso de aguas residuales para

riego puede ser clasificado como directo (cuando se utiliza en el campo) o indirecto (cuando hubo una descarga previa en algún cuerpo de agua utilizado para riego). Wikiwater (2013) menciona que la reutilización de las aguas residuales es incluida como una alternativa eficaz para la escasez de agua, fuentes fiables para los agricultores ya que estas contienen nutrientes que permiten reducir los costos de fertilización, y una opción para disminuir el impacto medioambiental. Por esta razón, en los Estados Unidos reutilizan alrededor de 2.444 mgd (millones de galones diarios) de aguas residuales tratadas para diferentes propósitos, donde el 29% de estas aguas se reutilizan en el sector agrícola (Soderberg, 2016). En contraste, la AAA descarga una gran cantidad de agua residual tratada diarias, aproximadamente 232 mgd, pero estas son descartadas a los cuerpos de agua nuevamente.

Por otra parte, en Puerto Rico, es de suma importancia tener los conocimientos acerca de la implementación de los reglamentos para el reúso de agua residual tratada otorgados por la EPA. Esta agencia se encarga de cumplir las regulaciones y los parámetros para la reutilización y la calidad del agua. La EPA promueve la reutilización de aguas residuales tratadas para distintos usos, como: riego agrícola, procesos industriales, usos recreativos y reabastecimiento de acuíferos, y otras medidas para proteger la salud pública y el ambiente (Soderberg, 2016).

Según Soderberg (2016), menciona que cada estado y territorio tiene la potestad de desarrollar guías o reglamentos para la reutilización de aguas residuales tratadas, sin embargo, no están obligados a reglamentar la reutilización de aguas residuales tratadas. En el presente, treinta estados de los Estados Unidos han aprobado reglamentos para la reutilización de aguas residuales tratadas y quince estados y territorios han aprobado guías o normas de diseño para sistemas de reúso (Soderberg, 2016). Soderberg (2016) articula que la EPA establece parámetros para la utilización del agua residual en el riego de cosecha, (ej., en el cultivo de forraje). Estos

parámetros para el reúso de estas aguas dirigido a cultivos no comestible, específicamente para cultivo de forraje y para consumo del ganado vacuno, debe mostrar un pH de seis a nueve, un DBO menor o igual a 30 mg/L, un SST menor o igual a 30 mg/L, coliformes fecales menor o igual a 200/100mL y cloro residual = 1.

Entre algunas directrices para la interpretación de la calidad del agua para riego encontramos: los TDS estos deben estar entre 450 mg/L – 2,000 mg/L el cual se mantiene como interpretación ligeramente moderada, siendo así, cuando el TDS es mayor de 2,000 mg/L son interpretaciones severas para la calidad del agua para riego, también los nitratos deben resultar como interpretaciones moderadas entre 5mg/L – 30mg/L si los resultados sobrepasan los 30 mg/L conlleva a que es una interpretación severa para la calidad del agua que se dirigirá para riego (EPA, 2012). Igualmente, EPA (2012), menciona algunos parámetros típicos de la calidad del agua, por ejemplo: la amonía como N tiene un rango típico de 0mg/L – 0.4mg/L, para el fósforo como P, el rango tipo se encuentra entre 0.04mg/L – 0.4mg/L, nitrito como N debe estar en un rango típico de 0.01mg/L – 0.05mg/L. Por consiguiente, “Guidelines for water reuse” (2004), identifica un resumen de parámetros de calidad del agua por la preocupación de la reutilización del agua, en particular indica que el COD luego del tratamiento de agua debe estar con un resultado entre < 20mg COD/L – 90mg COD/L, asimismo, este resumen establece que el fósforo tiene que estar con un rango ideal luego del tratamiento en las aguas regeneradas menor de 1 mg P/L – 20mg P/L.

Monge Redondo (2017), indica que la reutilización del agua depurada se distingue por los siguientes tres grupos de cultivos en cuya producción puede intervenir el riego con aguas regeneradas: A) productos de consumo humano fresco, B) productos de consumo humano no fresco, consumo para animales, C) cultivos leñosos, ornamentales y cultivos no alimentarios.

También, Monge Redondo (2017) identifican los criterios de calidad que debe de tener el agua regenerada para el uso como agua para riego agrícola y las frecuencias mínimas de muestreos iniciales, que pueden verse modificadas por el organismo de cuenca, entre estos encontramos: 1) huevos nematodos intestinales (huevos/10 litros) deben estar < 1 en los grupos de cultivos [A,B y C} con una frecuencia mínima de muestreo quincenal, 2) *Escherichia coli* (UFC/100ml) para los cultivo [A] deben estar en < 100 , cultivo [B] $< 1,000$, y cultivo [C] $< 10,000$, con una frecuencia mínima semanal para las tres categorías de cultivos, 3) sólidos en suspensión (mg/l) en el cual deben estar para cultivo [A] < 20 y cultivos [B y C] < 35 con frecuencias mínimas semanales de muestreos 4) turbidez (UNT) deben mantenerse en cultivos [A] < 10 y [B y C] en estos no se fijan límites y su frecuencias mínimas de muestreos son semanales.

La EPA establece unas guías para la reutilización de aguas residuales para la agricultura en la cual se divide en tres categorías: riego de cultivos que se ingieren crudos, riego de cultivos que se procesan comercialmente y cultivo de cosechas que no son para consumo humano (ej. pasto para ganado), En el primero, los cultivos que se ingieren crudos se especifica un tratamiento secundario, filtración y desinfección. Mientras los cultivos que se procesan comercialmente y los cultivos de no consumo humano, la EPA estipula un tratamiento secundario y desinfección (Soderberg, 2016).

El riego agrícola con aguas residuales tratadas representa la mayor fracción del total de la demanda mundial de agua para el reúso (Gutiérrez Diaz, 2003). Entre los riegos agrícolas que utilizan aguas residuales en distintas áreas del mundo se destaca el Valle del Mezquital, en Hidalgo, México, en este valle existe la más grande y vieja región agrícola irrigada con agua residual urbana en el mundo (Vivanco Estrada, Gavi Reyes, Peña Cabriaes y Martínez Hernández, 2000). Esta agua proviene de la ciudad de México y área conurbana, y constituyen la

fuerza principal de agua para el desarrollo agrícola del valle, el cual se ve limitado en su disponibilidad de agua de primer uso (Vivanco Estrada et al., 2000).

La agricultura representa alrededor del 70% del uso mundial de agua, principalmente para la producción de alimentos y fibras, y para el procesamiento de productos agrícolas. Cuando las lluvias son insuficientes para mantener los cultivos, el riego se hace necesario y aumenta el costo de las operaciones agrícolas (Winpenney et al., 2003). En los últimos años el empleo de los fertilizantes sintéticos es cada vez más frecuente, pero los altos costos y los problemas de contaminación que generan cuando su uso es inadecuado, justifica la búsqueda de nuevas alternativas de fertilización (Pérez Gutiérrez, Dzul- Mukul, Borges Gómez, Latournerie Moreno, Ruiz Sánchez, y Ayora Ricalde, 2015).

Por otra parte, la recuperación de nutrientes a través de la reutilización de aguas residuales supone por tanto una oportunidad para ayudar a satisfacer la necesidad creciente de fertilizantes, especialmente en la agricultura urbana y peri-urbana, próxima a lugares de producción de aguas residuales, y donde las necesidades para producción agrícola (sobre todo hortícola) crecen especialmente rápido (Mateo Sagasta, 2017). Este autor señala que con una concentración media de nutrientes en aguas residuales en los cultivos o hectáreas podrían recibir un aporte de fertilizantes de 300 kg N/ha/año y 60 kg P/ha/año. En el artículo, ‘‘Uso potencial de las aguas residuales de criaderos de cerdos en la producción de *Capsicum chinense*’’ (Pérez Gutiérrez et al., 2015) se obtuvo resultados contundentes respecto a la eficiencia de abono o fertilizantes en suelo mientras se riegan plantas con excrementos líquido de los porcinos. Pérez Gutiérrez et al. (2015) lograron analizar el contenido de humedad del sustrato, las respuestas en las hojas como los potenciales hídricos, el crecimiento de las hojas, producción y tamaño de frutos y distribución de biomasa.

El impacto que ha tenido la sequía de La Niña en el PIB de Kenia entre los años 1998 y 2000 muestra el alto costo económico de la escasez de agua. En general, este hecho redujo el PIB en un 16% durante este periodo y las disminuciones fueron especialmente graves en la producción industrial (58%), hidroeléctrica (26%), agricultura (10%) y ganado (6%) (Winpenny et al., 2003). Conjuntamente, la EPA (Silva et al., 2008) clasificó el reúso de aguas residuales en ocho categorías de acuerdo con la calidad del agua. Estas son: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reúso indirecto potable.

Prácticas agrícolas - cultivos no comestibles

Los cultivos de cobertura están caracterizados por sus funciones más amplias y multi-propósitos, las cuales, incluyen la supresión de malezas, conservación de suelo y agua, control de plagas y enfermedades, alimentación humana y para el ganado (Pound, 1999). Silva et al. (2008), manifiestan acerca de algunos cultivos, como forrajes perennes, turbas y ciertas especies arbóreas y cultivos (maíz, sorgo y cebada), en donde requieren de una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual y mínima necesidad de control.

En el artículo ‘‘Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura’’ (Silva et al., 2008), se mencionan distintos rangos de consumos por cultivos. En el caso del rango de consumo de nutrientes destinados para forraje se encuentran: 1) alfalfa - nitrógeno consumido entre 225 – 538(kg ha año), fósforo entre 23 – 37(kg ha año), potasio entre 174 – 225(kg ha año), 2) trébol tiene un rango en nitrógeno consumido entre 178(kg ha año), fósforo entre 18(kg ha año), potasio entre 101(kg ha año), 3) Cultivo de estuca puede consumir un nitrógeno entre 152- 325(kg ha año), fósforo entre 30(kg ha año), potasio entre 300(kg ha año) y 4) cultivo ‘‘orchard

grass'' - nitrógeno entre 258 - 281(kg ha año), fósforo entre 23 - 56(kg ha año), y potasio entre 253 – 353(kg ha año).

Uno de los cultivos más utilizados para la práctica agrícola de forraje (pasto) es la alfalfa. La alfalfa es una fuente nutricional de proteínas, vitaminas y minerales (Lloveras, 1999). Por tal razón, este forraje requiere del recurso de agua y de plaguicidas. Según este autor, la alfalfa es un cultivo nombrado como energético económico, dado a que no requiere de máximos aportes nitrogenados y utiliza el medio ambiente para obtener energía. En algunos países, la alfalfa es el principal cultivo proteico la cual se cosecha durante todo el año, y en menor grado los cereales de otoño e invierno (por ejemplo: avena y triticale); (Reta Sánchez, Figueroa Viramontes, Serrato Corona, Quiroga Garza, Gaytán Mascorro y Cueto Wong, 2015).

Lloveras, (1999) señaló que, la alfalfa soporta periodos cortos de sequías, como consecuencia, este reduce la producción del pasto, pero el cultivo no llega a su muerte. Por otro lado, Plevich, Delgado, Saroff, Tarico, Crespi y Barotto, (2012) realizaron una investigación en la Universidad de Argentina, que consistió en estudiar la eficiencia y el valor nutritivo de la alfalfa por medio de riego de agua residual urbana, agua de perforación y precipitaciones, y producción de biomasa aérea. Los resultados de esta investigación arrojaron que la mayor producción del cultivo de alfalfa se obtuvo cuando se regó con agua residual urbana en torno al riego con agua de perforación y al cultivo en situación de secano. A la par, el riego con aguas residuales de origen residencial produjo un incremento en la eficiencia del uso del agua por parte del cultivo. Estos autores concluyeron que, el mayor valor del índice nutritivo relativo se alcanzó en el escenario del riego con aguas residuales urbanas.

En tanto, el efecto más importante de la falta de agua crea un déficit en la reducción del crecimiento. Por consiguiente, la cantidad de agua que se aporta en cada riego depende de la

humedad presente en el suelo, las necesidades del cultivo y de la eficiencia del sistema de riego utilizado (Lloveras, 1999). Por esta razón, las necesidades de agua pueden también variar según la eficiencia de riego (Lloveras, 1999).

Por otro lado, las gramíneas tropicales representan una menor concentración de proteína bruta, mientras que las leguminosas tropicales poseen mayor contenido de aminoácidos (Del Pozo, 2002). Este autor señala que no todos los tipos de pastos tienen igual valor óptimo de temperatura para cumplir como cultivos de forraje. Este indica que el valor óptimo fotosintético de las gramíneas tropicales es de unos 35 a 39 °C, en contraste con las leguminosas, que fluctúan entre los 30 a 35 °C.

Reta Sánchez et al. (2015) señalan que, en México, algunos forrajes bajo irrigación como alfalfa, maíz, sorgo y cereales de invierno son utilizados para nutrir al ganado. Estos autores mencionan que, en países como México, la producción de forraje es limitada por la baja disponibilidad de agua, salinidad en el suelo, alta temperatura ambiental y un número limitado de cultivos forrajero. Por tanto, es importante identificar alternativas que permitan incrementar la eficiencia de producción de forraje (Reta Sánchez et al., 2015). El exceso como el déficit de precipitaciones pueden provocar estrés en los cultivos forrajeros, por ejemplo, el estrés por sequía es más común en las regiones tropicales, el cual afecta el comportamiento fisiológico y morfológico de las plantas (Del Pozo, 2002). El exceso como el déficit de precipitaciones pueden provocar estrés en los cultivos forrajeros.

Presencia e importancia de nutrientes en aguas residuales

El reúso de agua y nutrientes es una actividad económica y ambiental, que muestra un beneficio económico por el reciclaje de residuos incrementando la producción agrícola, y un beneficio al medio ambiente al disminuir la carga de nutrientes y los riesgos de eutrofización a

un cuerpo de agua de uso recreativo (Gutiérrez Díaz, 2003). El reúso de agua residual es una opción al riego de terrenos agrícolas, ya que pudiese mantener la productividad de los suelos, mejorar el rendimiento de las tierras de cultivo, alimentar con nutrientes la tierra, controlar la contaminación del suelo, mantener la acidez correcta del suelo, entre otros (Centro de Servicios Agrícolas [CSA], 2019).

Por otro lado, según el estudio ‘‘La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada’’ Salazar Moreno, Rojano Aguilar y López Cruz, (2014), mencionan que para producir el doble de alimento que se requerirá en los próximos 30 años, la agricultura tendrá que incrementar de manera notable la eficiencia en el uso del agua. El reúso de aguas sanitarias tratadas representa un beneficio potencial económico cuando existe presencia de nutrientes en concentraciones que pueden reducir el uso de fertilizantes artificiales en cultivos donde se aplique el agua (Quiñones et al., y Guerrero, et. al. s.f.).

El uso de aguas residuales para la producción agrícola incrementa el contenido de materia orgánica y de nutrientes en los suelos cultivados, lo cual contribuye a mantener o mejorar la fertilidad del suelo, pero puede ocasionar efectos nocivos que deterioran su calidad (Ramón Zamora, Rodríguez Guevara, Torres Rodríguez y Yendis Colina, 2009). Estos autores apuntan que, la descomposición de la materia orgánica controla la disponibilidad de nutrientes e influye en la liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas enlazadas a la materia orgánica. De este modo, las plantas de tratamientos de aguas sanitarias domésticas deben realizarse constantes pruebas biológicas y químicas, y así, lograría un balance de nutrientes.

La remoción de nutrientes posee usualmente un bien ambiental, pero asociado a un incremento de costos por encima del tratamiento convencional de las aguas residuales (Gutiérrez Díaz, 2003). Según Quiñones, y Guerrero, (s.f.), señalan que añadir un sistema de reúso a una

planta de tratamiento de aguas residuales en operación puede no ser una opción factible por los costos de incorporar nuevas facilidades que garantice una mejor calidad del efluente.

Gutiérrez Díaz (2003) expone que, la remoción de nutrientes es recomendada para minimizar los riesgos de eutrofización cuando efluentes pobremente tratados y sin posibilidades de reúso se disponen a cuerpos de aguas protegidos. El Plan de reúso de aguas usadas en Puerto Rico, se indica que existe la posibilidad de calcular los beneficios económicos de los nutrientes aportados en el reúso agrícola utilizando las aguas residuales domésticas (Quiñones, y Guerrero, s.f.).

Vivanco Estrada et al., (2000), apuntan que el exceso de nitrógeno (N), es perjudicial para las plantas, ya que puede gasificarse (desnitrificación y volatilización) y contribuir al efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono y la lluvia ácida, o lixiviar en forma de nitrato, y contaminar las aguas subterráneas. También, este exceso de N en las plantas contribuye a la pérdida económica (Vivanco Estrada et al., 2000). Por otra parte, el autor Gutiérrez Díaz (2003) sostiene que un tratamiento extensivo de remoción de nutrientes (tratamiento avanzado o terciario) disminuiría el valor del agua reclamada.

La organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, (por sus siglas: FAO) en el año 1999 delimitó una Guía sugerida para aguas tratadas en el reúso agrícola y sus requerimientos de tratamiento. Esta organización presenta una opción de tratamiento secundario y desinfección para el reúso agrícola en cultivos que se consume y los no comestibles y los que se procesan comercialmente (Gutiérrez Díaz 2003). Unas de las deficiencias de nutrientes, se reflejan en el hinchamiento de fangos, formación de espuma, mala sedimentabilidad, eliminación ineficiente de sólidos en suspensión, olor, exceso de fango y eliminación ineficiente de DBO o DQO (Shawn Whitmer y Heather Jennings, (2015). Estos

autores en el 2015 expusieron que los problemas de formación de espuma e hinchamiento de fangos, se deben al exceso de bacterias filamentosas que prosperan en entornos con carencia de nutrientes e impiden la sedimentación.

Microorganismos en aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se diseñan para producir efluentes que garanticen el cumplimiento de estándares de calidad, de acuerdo con las reglamentaciones existentes y con el aprovechamiento potencial del efluente, minimizando los problemas de salud pública (Silva et al., 2008). Por otro lado, Monge Redondo (2017) articula que el parámetro de turbidez refleja el contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, donde suelen alojarse los microorganismos. Esto podría causar turbidez excesiva que puede proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección aplicada en el tratamiento de regeneración, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro a lo largo del sistema de distribución (Monge Redondo, 2017).

Algunos de los microorganismos que pueden estar presente en el agua y desarrollarse en la misma los son: las amebas, los ciliados y los rotíferos, entre otros. Estas formas de vida superior son necesarias para el tratamiento efectivo de las aguas residuales, ya que se alimentan principalmente de células bacterianas libres (Shawn Whitmer et al., 2015).

Por otro lado, la AAA (2013) menciona en el manual: ‘Manual del sistema de control de proceso en la planta de alcantarillado sanitario de San Germán, PR.’, que los organismos con las etapas del proceso de tratamiento biológico: ciliados de nado libre, flagelados, amibas y rotíferos ciliado de tallo libre pueden estar presente en un abultamiento, en buena sedimentación y flóculos finos. Esta planta de alcantarillado sanitario de San Germán, los sólidos o microorganismos se miden en el tanque de aireación. Estos sólidos suspendidos en el tanque son

llamados sólidos suspendidos de licores mixtos (SSLM) o sólidos suspendidos volátiles del licor mixtos.

Entre los organismos importantes encontrados en el proceso de un tratamiento hay dos tipos de ciliados: ciliados de nado libre y ciliado de tallos, existen diferencias entre ambos ciliados (AAA, 2013). Los ciliados de nado libre tienen movimientos por la particular característica de mantener cilios cortos. AAA (2013) establece, que los ciliados de nado libre están presente en lugares donde existen gran cantidad de bacterias, haciendo que los cilios trabajen para unas condiciones estables en el agua. Mientras que, los cilios de tallo se mantienen pegados a un tallo que se adhiere a sólidos, una vez el lodo aumenta su edad la presencia de los ciliados de tallos se multiplican significando un proceso de tratamiento como un tratamiento estable con efluentes de baja turbidez (AAA, 2013).

La EPA 2012, muestra algunas reducciones potenciales y los indicadores de microorganismos y patógenos entéricos durante distintos tratamientos de las aguas residuales para las bacterias, los protozoarios, los helmintos y los virus. Esta agencia (EPA), establece que en un tratamiento con (UV) se encuentran indicados de microorganismos como: *Escherichia coli* 2 a ≥ 6 y Phage 3 a ≥ 6 , microorganismos patogénicos: bacteria entérica 2 a ≥ 6 , virus entérico 1 a ≥ 6 , *Giardia lamblia* 3 a ≥ 6 y *Cryptosporidium parvum* 3 a ≥ 6 . Sin embargo, para un tratamiento secundario, las reducciones en el agua residual son distintas ya que tienen otro rango de reducciones. Entre estos, se mencionan indicadores de microorganismos: *Escherichia coli* 1-3, *Clostridium perfringen* 0.5 – 1 y Phage 0.5 – 2.5; entre los microorganismos patogénicos se establecen: bacteria entérica 1 – 3, virus entéricos 0.5 – 2, *Giardia lamblia* 0.5 – 1.5, *Cryptosporidium parvum* 0.5 -1 y Helmintos 0 – 2.

Por consiguiente, en el artículo “Detección de helmintos intestinales y bacterias indicadoras de contaminación en aguas residuales, tratadas y no tratadas” 2002, apunta a que el uso de agua residual en la agricultura en zonas tropicales representa un riesgo para la salud, debido a que, por la alta prevalencia de infecciones entéricas en humanos, estas aguas residuales contienen gran variedad y diversidad de microorganismos, entre ellos helmintos (Valbuena, Díaz Suárez, Botero Ledesma y Cheng Ng, 2002). Los helmintos causan problemas sanitarios al llegar a través del agua de riego contaminadas con aguas residuales (Valbuena, Díaz Suárez, Botero Ledesma y Cheng Ng, 2002). (Rodríguez Pastrana, s.f.) menciona que los pastos y las heces fecales del ganado son usualmente medios de transmisión comunes que utilizan los helmintos (gusanos redondos) para lograr completar su ciclo de vida. La presencia de huevos de helmintos es uno de los principales problemas de salud pública al reutilizar el agua residual (Valbuena et al., 2002). Valbuena, et al., 2002, indica que la Organización Mundial de la Salud, establece que la cantidad de huevos de helmintos intestinales humanos en agua residual debe ser menor a 1 huevo/L para que pueda ser usada en irrigación.

Reúso de las aguas residuales en Puerto Rico y otros países

Entre los estudios realizados en Puerto Rico, el artículo “Análisis de Veinte años en la lucha ambiental de Puerto Rico del 1,980 al 2,000”, pretende evaluar cuan efectiva ha sido la acción de las agrupaciones ambientalistas de Puerto Rico. En este se describe la evolución que ha tenido la ciencia ambiental en el país y como a pesar de los años aún queda mucho para luchar por el ambiente y por mantener una conciencia ambiental en las personas. El Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico, (por sus siglas DRNA) (2007), menciona que una implantación del Plan integral de recursos de agua de Puerto Rico podría aumentar la generación de aguas usadas, al incrementarse el volumen de esta como resultado de mejoras en

los abastos a los residentes de las zonas urbanas. El plan integral por parte de DRNA, tendrá un efecto positivo en el reúso de aguas usadas; igualmente se reconoce oportunidades para que esta agua se reutilice mediante estrategias como: sistemas de riego, sistemas de recarga a los acuíferos y reciclaje directamente hacia los embalses (DRNA, 2007). DRNA (2007) expone algunos impactos positivos que incluirán: promover el reúso de aguas usadas con el potencial irrigar campos de golf, aumentar flujos ambientales a humedales y estuarios.

En contraste, Cordero (2016) puntualiza que un proyecto de sistema de almacenamiento de aguas residuales en operaciones agrícolas, por ejemplo: todas las aguas que se generan producto de la limpieza de las vaquerías se recogen en una charca de almacenamiento o charca de oxidación, las cuales tienen una capacidad de almacenamiento de entre los 90 a 120 días equivalente a unos 840,000 galones de agua. Este sistema de recolección de aguas residuales requiere un plan de uso y de manejo de desperdicios preparado por el Servicio Nacional de Conservación de Recursos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Cordero, 2016). La estructura para almacenar los desprecios líquidos consiste en una charca de 100 pies de largo por 75 pies de ancho y una profundidad de 15 pies, además, se prepara un diseño para la finca para identificar las áreas de riego en donde este sistema de riego cubre aproximadamente 40 cuerdas de terreno (Cordero, 2016). Cordero 2016, establece que este nuevo sistema es una alternativa para la reutilización de aguas residuales producto de vaquerías en Puerto Rico, beneficiando el reciclaje de nutrientes para el cultivo y crecimiento nuevo de hierba en las áreas de pastoreo.

En el panorama mundial de la reutilización de aguas residuales tratadas existe un total de 60 países que reutilizan sus aguas residuales para riego agrícola (Soderberg, 2016). Entre estos países se encuentra: 1) México: reúsa 1,180 mgd de aguas residuales tratadas, 2) Israel: reutiliza

el 75%, 3) Sur de la Unión Europea: el 44% de los proyectos de reúso de aguas residuales tratadas están dirigidos al riego agrícola, 4) Australia: el 47% de los proyectos de reúso de aguas residuales tratadas están dirigidos al riego agrícola, 5) La Provincia de Mendoza de Argentina, se irrigan 39 mgd de aguas residuales tratadas y por último 6) Colombia: el 37% del riego agrícola en Colombia se lleva a cabo con aguas residuales tratadas (Soderberg, 2016).

Méndez, Ricardo, Pérez, Hernández y Campos (2006) mencionan que La Habana Cuba, ha incrementado su desarrollo agrícola en los últimos años. En este país ha recurrido al empleo de las aguas residuales disponibles en la ciudad, cuando tienen baja carga de contaminante, o una vez depuradas, constituye una alternativa para los cultivos agrícolas (Méndez et al., 2006). Estos autores instan que un mayor uso de las aguas de desecho beneficia fundamentalmente a cultivos que no se consuman frescos; dando los riegos necesarios. La investigación de estos autores concluye que, los análisis que realizaron a las aguas siguen estando a favor de su posible uso en la agricultura de regadío para los cultivos que no se consuman directamente, a menos que se le haga un tratamiento terciario a esta agua (Méndez et al., 2006). También, en los resultados toxicológico de elongación de la raíz, realizado a distintas semillas las cuales fueron humedecidas con agua residual, no se encontró toxicidad a ningún nivel de significación, sí, hubo un ligero incremento de los rendimientos agrícolas, cuando fue utilizada el agua residual; por consiguiente, se estima que esto puede deberse al valor fertilizante del agua residual en los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio (Méndez et al., 2006).

En la investigación ‘‘ Reúso de aguas residuales domésticas en la actividad agropecuaria: el caso de Cafayate, Salta’’ (Gatto D’ Andrea et al., 2014), se evaluaron la práctica de reúso de aguas residuales domésticas (ARD) para riego de cultivos en una finca privada. Luego de un relevamiento preliminar los investigadores identificaron diversas prácticas de reúso de ARD

efectuadas en forma directa e indirecta para riego de cultivos (alfalfa y pasturas) y utilizadas para bebida de ganado bovino, caprino y equino (Gatto D' Andrea et al., 2014). Esta finca consta de privada consta de un sistema de tratamiento que posee un punto de ingreso único del efluente cloacal con dimensiones 110 x 50 m y una profundidad de 1,5 m y un tiempo de retención hidráulica de dos días (Gatto D' Andrea et al., 2014). En fin, los autores presentaron como conclusión de este estudio, que el área de finca tiene déficit hídrico durante todo el año, por lo tanto, el efluente tratado representa un recurso necesario para la actividad agropecuaria (Gatto D' Andrea et al., 2014). Sin embargo, en el estudio se encontró elevados contenidos de bacterias coliformes fecales en el efluente tratado, en el cual exigen la toma de precauciones en la manipulación de las aguas residuales para minimizar los riesgos en la salud (Gatto D' Andrea et al., 2014).

Es muy poco lo que se ha hecho para impulsar la reutilización de las aguas residuales como parte del desarrollo económico en Puerto Rico. Una manera de observar algún avance en el tema de la reutilización de aguas residuales es, por ejemplo: el complejo residencial Palmas del Mar en Humacao. Este complejo utiliza un sistema de riego en los campos de golf y áreas verdes para reutilizar las aguas residuales. El sistema cuenta con una planta y cuatro estaciones de bombeo que tiene producción anual de 146,000,000 de galones de agua (Villeta Trigo, 2016). Según Villeta Trigo. 2016, las aguas residuales tratadas en la isla pueden servir de motor para el desarrollo económico de varios sectores.

MÉTODOS

Introducción

La irrigación de cultivos agrícolas con aguas residuales es una práctica común en algunos países latinoamericanos; especialmente, en regiones áridas, donde su uso se ha generalizado debido a la escasez de agua de buena calidad (Rivas Lucero, Nevárez Moorillón, Bautista Margulis, Pérez Hernández y Saucedo Terán, 2003). Por esta razón, el propósito que guía esta investigación es evaluar la calidad de las aguas residuales en las plantas de tratamiento secundario y terciario para su reúso en riego de cultivos no comestibles. Se seleccionó la planta de tratamiento secundaria de aguas sanitarias doméstica de San Germán y la planta de tratamiento terciario de aguas sanitarias doméstica de Lajas, ambas plantas dirigidas por la AAA.

Según la AAA (Acueductospr, s.f.) las plantas de tratamientos secundarias como San Germán, remueven y transforma químicamente por biodegradación aquellos sólidos no sedimentados y que permanecen disueltos en el agua. También, estas plantas de tratamiento convierten los sólidos no sedimentados en sustancias simples no degradables que no producen mal olor. Por otro lado, esta agencia indica que los tratamientos terciarios como la planta de tratamiento de Lajas mantienen un método sofisticado y costoso que remueve sustancias como los nitritos y nitratos (Acueductospr, s.f.). Estos compuestos nitrogenados deben ser removidos en casos especiales según lo establezca el permiso de descarga de la planta (Acueductospr, s.f.).

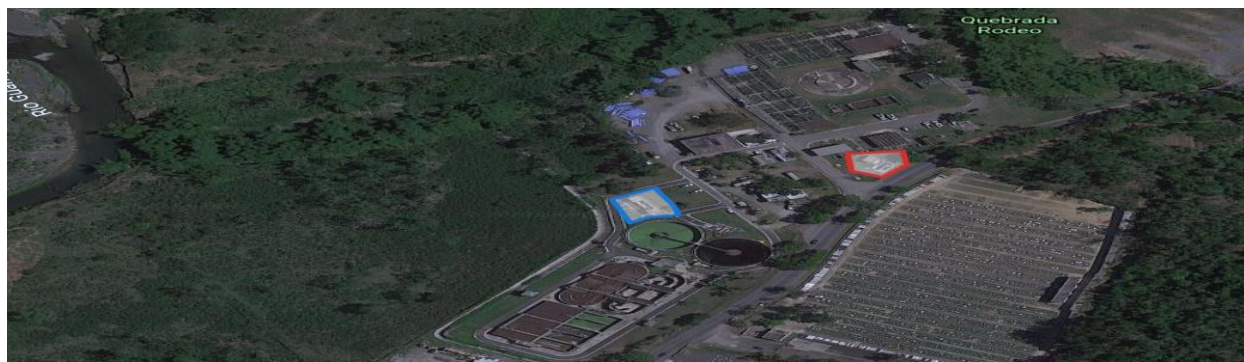
Diseño de la investigación

Esta investigación tendrá un diseño cuantitativo. Este diseño cuantitativo será de tipo experimental descriptivo. En esta investigación se incorporarán muestras, se recopilarán datos y observaciones para proporcionar el desarrollo del estudio.

Área de estudio

En Puerto Rico, la AAA cuenta con instalaciones, operaciones de tratamiento de agua, tuberías y accesorios que funcionan como una unidad para proveer servicio de acueducto a una comunidad (Romero García, 2003). Díaz Conde (2016) menciona que la AAA opera con 51 plantas de tratamientos de aguas sanitarias: 7 plantas de tratamiento primario, 39 plantas de tratamiento secundario y 5 plantas de tratamiento terciario. Para fines de este estudio, la investigadora seleccionó dos plantas de tratamiento de aguas sanitarias domésticas, una secundaria y otra terciaria. Estas están ubicadas en los municipios de San Germán y Lajas, respectivamente (véase la Figura 1 y 2). La Figura 1, planta de tratamiento secundaria de aguas sanitarias domésticas está ubicada en la carretera 360 Km 1 Bo. Guamá, San Germán P.R. Mientras, que la Figura 2. planta de tratamiento terciaria de aguas sanitarias domésticas está ubicada en la carretera 101 Km 0.5 Barrio Piedra Blanca, Lajas, P.R.

Figura 1. Localización - Planta de tratamiento secundaria de aguas domésticas de San Germán.



Adaptado de: Google. (s.f). [Foto Satelital Google Maps, localización de planta de tratamiento secundaria de aguas domésticas de San Germán, P.R.]. Recuperado: maps.google.com

Nota alcance: En la Figura 1, se muestra una foto satelital de la planta de tratamiento secundaria de aguas domésticas de San Germán, P.R. se observa un recuadro color rojo, en este se ubica el área de la entrada de aguas residuales hacia la planta de tratamiento. Mientras, que el recuadro color azul es el área de salida de aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento.

Figura 2. Localización - Planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas de Lajas.



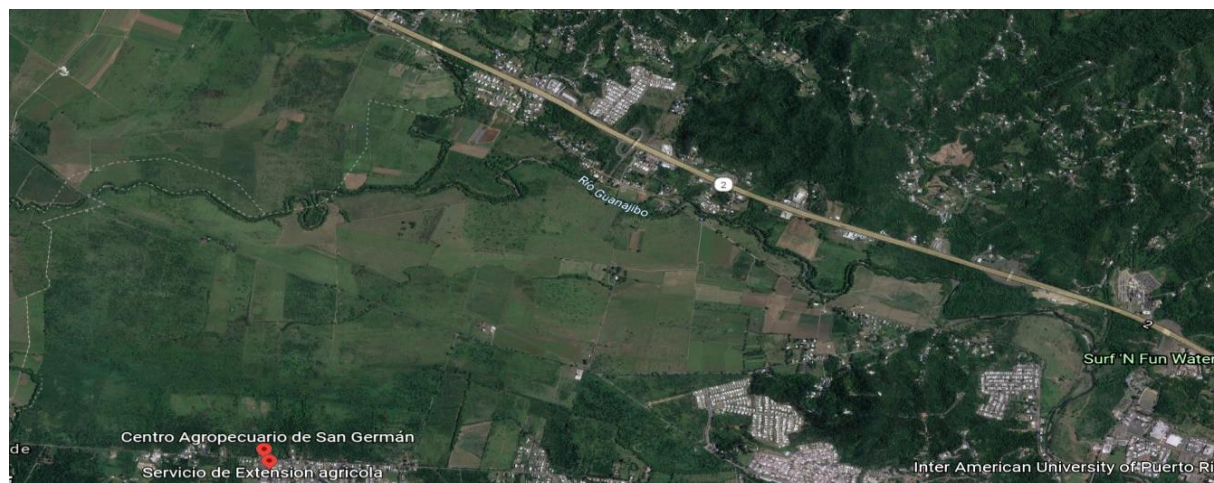
Adoptado de: Google. (s.f). [Foto Satelital Google Maps, localización de planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas de Lajas, P.R.]. Recuperado: maps.google.com

Nota alcance: En la Figura 2, se observa una foto satelital de la localización de la planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas de Lajas, en la cual el recuadro color rojo ubica la entrada de aguas residuales hacia la planta de tratamiento. Al otro extremo, se observa el área de la salida de aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento de color azul.

Estas plantas de tratamientos están en áreas cercanas a zonas agrícolas que se dedican mayormente a la siembra de cultivos, forraje e industria pecuaria (véase Figura 3 y 4). No obstante, con la cercanía de estas plantas de tratamiento de aguas residuales, el sector agrícola no utiliza estas aguas para propósitos de riego agrícolas en fincas de cultivos no comestibles.

Figura 3.

Localización de zona geográfica del sector agrícola del municipio de San Germán, P.R.



Adoptado de: Google. (s.f). [Foto Satelitar Google Maps, localización de zona geográfica del sector agrícola del municipio de San Germán, P.R.]. Recuperado: maps.google.com

Figura 4.

Localización de zona geográfica del sector agrícola del municipio de Lajas, P.R.



Adoptado de: Google. (s.f). [Foto Satelitar Google Maps, localización de zona geográfica del sector agrícola del municipio de Lajas, P.R.]. Recuperado: maps.google.com

La Planta de tratamiento de San Germán recibe aguas servidas en este municipio y áreas adyacentes. La planta de tratamiento secundario; específicamente San Germán, realiza una remoción biológica de nutrientes y desinfección por radiación ultravioleta y actualmente recibe un flujo promedio de 1.5 mgd (AAA, 2013). Mientras, la planta de tratamiento terciaria de Lajas recibe agua residual doméstica de la municipalidad de Lajas y parte de Cabo Rojo. A diferencia de la planta de tratamiento de San Germán, esta planta de tratamiento terciario tiene a la disposición dos unidades de filtración/ desinfección, haciéndolo un sistema terciario, en el cual remueve los sólidos suspendidos del efluente secundario por medio de la filtración y, luego pasa por el proceso de radiación.

Fase administrativa del estudio

Para garantizar los procedimientos en la recopilación de los datos de este estudio, se realizó un comunicado solicitando autorización para llevar a cabo la investigación en las facilidades de las plantas de tratamiento secundario y terciario en San Germán y Lajas, respectivamente, administrada por la AAA (véase Anejo A). Se recibió una carta de autorización de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados para llevar a cabo la investigación en las facilidades de las plantas de tratamiento secundario y terciario en San Germán y Lajas (véase Anejo B). También, la comunicación fue aprobada por el Director Regional del Oeste de la AAA bajo un contrato entre las partes concernientes; entiéndase, un acuerdo entre la AAA y la UIPR, Recinto de San Germán (véase Anejo C).

Luego de lograr el permiso para realizar la investigación, se comenzó el procedimiento de la recolección de las muestras. El estudio se efectuó desde el 3 de febrero de 2020 hasta el 6 de julio del 2020 para un total de 11 días de muestreos.

Recolección de las muestras del estudio

Las recolecciones de las muestras se realizaron con la colaboración del técnico a cargo del laboratorio de San Germán de la planta de tratamiento secundaria de aguas domésticas. Las muestras se recolectaron en ambas plantas de tratamientos, a partir del 3 de febrero del 2020 hasta el 6 de julio de 2020. Se utilizaron instrumentos asépticos y de seguridad al momento de recolección, por ejemplo: batas, gafas de seguridad, guantes, mascarilla y zapatos cerrados, entre otros. Estas muestras se recolectaron durante horas de la mañana. En cada planta de tratamiento se recolectaban las muestras en botellas de plásticos de polietileno. Una vez embotelladas las muestras se colocaron en una nevera portátil para el transporte hacia el laboratorio antes mencionado para realizar las pruebas físicas y químicas.

Procedimientos para el análisis de las muestras

Para realizar las pruebas físicas de estas aguas residuales se utilizó el instrumento digital ‘‘Microprocessor Water Quality Tester 6 in 1’’, modelo M0199720. Este instrumento digital se emplea para medir múltiples parámetros. Este microprocesador incluye una guía en el área de las instrucciones en donde indica especificaciones de rangos entre estos se encuentran:

Conductividad: 0 – 2000 μ S, 2.00 – 20.00mS, TDS: 0 – 1300ppm, 1.30 – 13.00ppt, Salinidad: 0 – 1000ppm, 1.00 – 12.00ppt. Entre los parámetros que el instrumento mide se encuentra: la salinidad, la temperatura, conductividad, el pH y sólidos totales disuelto. Estas lecturas se realizaron en las aguas residuales domésticas (afluentes y efluentes) de la planta de tratamiento de San Germán y en las aguas residuales domésticas (afluentes y efluentes) de la planta de tratamiento de Lajas.

La Corporación Publica A.A.A, facilitó sus instrumentos y áreas para ejercer las pruebas que se analizarán en el laboratorio de la corporación. Entre las pruebas químicas que se

realizaron se encuentran: Demanda Química de Oxígeno (COD), Nitrito, Nitrato, Amonio, Fósforo, Sólidos Totales Suspendidos (TSS) y Sólidos Suspendidos Volátiles (VS). Entre la instrumentación para las pruebas químicas están: probeta, tubo de ensayo, matraz Erlenmeyer, horno de 300 y 500 grados Celsius, embudo, gradilla, botellas de plásticos, espectrofotómetro, papel absorbente, máquina de filtrado, pipeta, filtros previamente pesados, platos para filtros, balanza digital y "COD Reactor". Los reactivos químicos utilizados fueron los siguientes: "Potassium Persulfate Reagent", hidróxido de sodio (NaOH), "Phosphate Reagent", "Ammonium Salicylate Reagent", "Ammonium Cyanurate Reagent", Nitrate Reagent B. Estos reactivos mencionados anteriormente fueron proporcionados por la AAA.

Se analizaron los parámetros físicos y químicos del agua residual para ambas plantas.

En cada una de las plantas de tratamiento se extrajo una cantidad representativa de agua residual doméstica aproximadamente 200 a 300 ml en puntos estratégicos de las plantas de tratamientos. Las muestras se recogieron en botellas plásticas previamente identificadas. Por consiguiente, fue recolectada el agua residual domésticas en la entrada y salida de cada planta de tratamiento.

Pruebas Físicas:

Para las pruebas físicas, Se utilizo el microprocesador digital anteriormente descrito para realizar las lecturas de medición. Las lecturas de medición se realizaron para: temperatura, salinidad, conductividad, pH, sólidos totales disueltos. El instrumento microprocesador se colocaba dentro de los envases de agua recolectadas proveniente de la entrada y también de la salida de las plantas de tratamientos. El microprocesador hace la lectura en unos pocos segundos luego de colocarlo dentro del envase. Los envases contenían aproximadamente 200 ml a 300 ml de agua recolectada.

Pruebas Químicas:

- Demanda Química de Oxígeno

Se realizaron pruebas para la demanda Química de Oxígeno (COD). En cuanto al procedimiento, se procede a la preparación del blanco: 2ml de agua destilada en un tubo de ensayo (vial), este tubo (vial) incluye un reactivo, una solución digestiva para el COD para que pueda reaccionar. Luego se agita y se calienta por dos horas a 150°C en el COD Reactor. Luego de las dos horas se procede a enfriar y a leer en espectrofotómetro.

Mientras, en un tubo de ensayo aparte se coloca 2ml de agua de muestra, ya el tubo de ensayo (vial) tiene el reactivo, el vial tiene una solución digestiva para el COD. Luego se agita y se introduce en el COD Reactor por dos horas a 150°C. Una vez concluya el tiempo de dos horas de calentamiento, comienza un tiempo de reposo en donde se enfría hasta llegar a los 120°C. Una vez se enfríe a temperatura ambiente sin luz, se agita la muestra y se sitúa en el espectrofotómetro para obtener la medición de lectura.

- Fósforo

Las pruebas de fósforo se completarán para las muestras de entrada y salida de ambas plantas de tratamientos. En primer lugar, se preparará el blanco de la prueba, se empleará en una probeta 5ml de agua destilada y añadir “Potassium Persulfate Reagent”, se introduce al tubo de ensayo y se agita. Se procede a colocar la muestra por 30 minutos a 150°C en el COD Reactor. Luego se deja enfriar a temperatura ambiente, una vez a temperatura ambiente, adiciona 2ml de NaOH, junto al reactivo “Phosphate Reagent” y se agita. Para terminar con la preparación del blanco, se leerá en el espectrofotómetro.

Por otra parte, para la prueba de fósforo se toma 5ml de la muestra de agua recolectada y el reactivo “Potassium Persulfate Reagent”, una vez mezclado, se deja por 30 minutos en el

COD Reactor a 150°C. Luego se deja enfriar a temperatura ambiente, para que el tubo de ensayo se enfríe. Una vez a temperatura ambiente se complementará adicionando 2ml de NaOH y el reactivo ‘‘Phosphate Reagent’’. Por último, se agita la muestra y se espera 3 minutos para proceder a llevar las pruebas al espectrofotómetro y obtener la medición de lectura.

- Amonio

Otra prueba que se llevó a cabo lo es amonio para las muestras de agua residual obtenidas en ambas plantas de tratamientos, pero solo las proveniente de las salidas de las plantas. Se realiza la preparación del blanco para las pruebas de Amonio, esto con lleva incluir en un tubo de ensayo 2ml de agua destilada, adicionando el reactivo ‘‘Ammonium Salicylate Reagent’’ y el reactivo ‘‘Ammonium Cyanutare Reagent’’. Una vez se incluyen estos reactivos es importante mezclar, es por esto, que necesita una buena agitación. Luego del mezclado se debe de esperar unos 20 minutos para obtener la lectura en el espectrofotómetro. Una vez realizado el blanco, se prepara la prueba con 2ml de muestra de agua anteriormente recolectada, debe agregarse ‘‘Ammonium salicyte Reagent’’ y ‘‘Ammonium Cyanurate Reagent’’. Luego de ser mezclado esperar alrededor de unos 20 minutos para introducirlo al espectrofotómetro y obtener las medidas de lecturas.

- Nitrato

Las pruebas de nitrato se realizaron en las muestras de agua de la salida en la planta de tratamiento secundaria, en primer lugar, se preparó un blanco con 1ml de agua destilada, Nitrate Reagent B. Una vez mezclado el reactivo debe agitarse el tubo de ensayo (vial) 10 veces en forma invertida. El tiempo de espera es unos cinco minutos aproximadamente para entonces ser leído en el espectrofotómetro. Luego de preparar el blanco, se realiza la prueba en donde se

mezcla el (vial) con 1ml de la muestra de agua y Nitrate Reagent B. La mezcla se agita en 10 ocasiones en forma invertida, se espera cinco minutos para luego leer en el espectrofotómetro.

- Nitrito

En la preparación del blanco de Nitrito, es primordial agregar al tubo de ensayo (vial) 5ml de agua destilada junto con el reactivo y esperar 20 minutos a el proceso de mezclado para eventualmente ser leído en el espectrofotómetro. Para las pruebas de nitrito se trabajó con muestras de agua proveniente de la salida de la planta de tratamiento secundario. Se añade 5 ml de la muestra de agua al vial el cual ya incluye el reactivo y se comienza a agitar, luego se tomará un tiempo de espera de unos 20 minutos para que posteriormente la muestra se ha colocada en el espectrofotómetro y tomar la medida de lectura.

- Sólidos totales suspendidos, Solidos suspendidos volátiles y el porciento de solidos suspendidos volátiles:

Los sólidos totales suspendidos (TSS) se completaron en muestras recolectadas en la entrada y salida de ambas plantas de tratamientos. También se recolectaron muestras en el reactor 1(licor mixto) y RAS en la planta de tratamiento secundario, mientras que, en la planta de tratamiento terciario se recolectó muestras del reactor 1 y reactor 2. Para estas pruebas se utilizó 8 papel de filtro, máquina de filtro y 8 platos de laboratorios previamente pesados. Se identifica cada plato con las muestras ya filtradas. La cantidad a muestrear para el proceso de filtración depende del agua recolectada, a continuación se indican los máximo que debe agregar para la filtración: se agrega del efluente de ambas plantas de tratamiento hasta un máximo de 250 ml, para el afluente de ambas plantas de tratamiento hasta un máximo de 50 ml, para el reactor 1 (licor mixto) de planta de tratamiento secundario, se agrega 10 ml (máximo), El Ras de la planta

de tratamiento secundario, se agrega hasta un máximo de 10 ml y por último, para el Reactor 1 y Reactor 2 de la planta de tratamiento terciario, agregar hasta un máximo de 10 ml.

Una vez completada la filtración debe pesar el papel de filtro de cada muestra. Estas muestras deben ser colocadas al horno a 150°C y se mantiene en el horno por una hora. Una vez llegado a temperatura se deja reposar a hasta llegar a temperatura ambiente. Se debe de tomar el peso del papel del filtro. Luego con los datos se realiza un cálculo para obtener los sólidos totales suspendidos (TSS). Por consiguiente, se coloca en el horno de 500°C por 30 minutos, solo los reactores 1 y 2 de la planta de Lajas, el reactor 1 y RAS de la planta de San Germán, esto para obtener los sólidos suspendidos volátiles (VSS) y el porcentaje de sólidos suspendidos volátiles (%VSS). Una vez completado el tiempo, se deja en reposo hasta que se enfríen las muestras. Por último, para los resultados de VSS, se toma el peso del papel de filtro con la muestra y se realiza un cálculo para obtener el resultado para cada muestra. Con el resultado de VSS y TSS, se realiza un cálculo de división: $VSS \div TSS$, de esta forma se obtiene el porcentaje de VSS.

- Bacteriológicas

En cuanto a las pruebas bacteriológicas, el personal de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados son los encargados de la preparación de las muestras. Estas muestras son enviadas por personal de AAA hacia el laboratorio bacteriológico de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillado para ser trabajadas. Una vez trabajadas la investigadora de este estudio presentará los resultados. Este laboratorio bacteriológico no se encuentra ubicado en las mismas instalaciones de la planta de tratamiento de San Germán ni Lajas, se ubican en San Juan.

Resultados y Discusión de Datos

Como parte de la investigación se realizaron muestreos físicos y químicos y se monitorearon muestras microbiológicas. La recolección de las muestras de aguas residuales (afluentes y efluentes) fueron tomadas de la Planta de tratamiento secundario de aguas sanitarias domésticas, localizada en San Germán y la Planta de tratamiento terciario de aguas sanitarias domésticas en Lajas durante dos periodos: 1) semanas del 3 de febrero de 2020 al 9 de marzo de 2020 y 2) semanas del 15 de junio del 2020 hasta el 6 de julio del 2020. Es propio señalar que a causa de la Pandemia COVID – 19 se hizo una pausa en la investigación. Se realizaron los muestreos antes de la primera orden ejecutiva del gobierno de P.R. por causa de la pandemia Covid -19, primer periodo. Un segundo periodo de muestreo fue realizado luego de un permiso otorgado por parte de AAA para la continuación de recolección de muestras (véase tabla 1).

Tabla 1. Fechas de la realización de muestreo en las plantas de tratamientos de la AAA

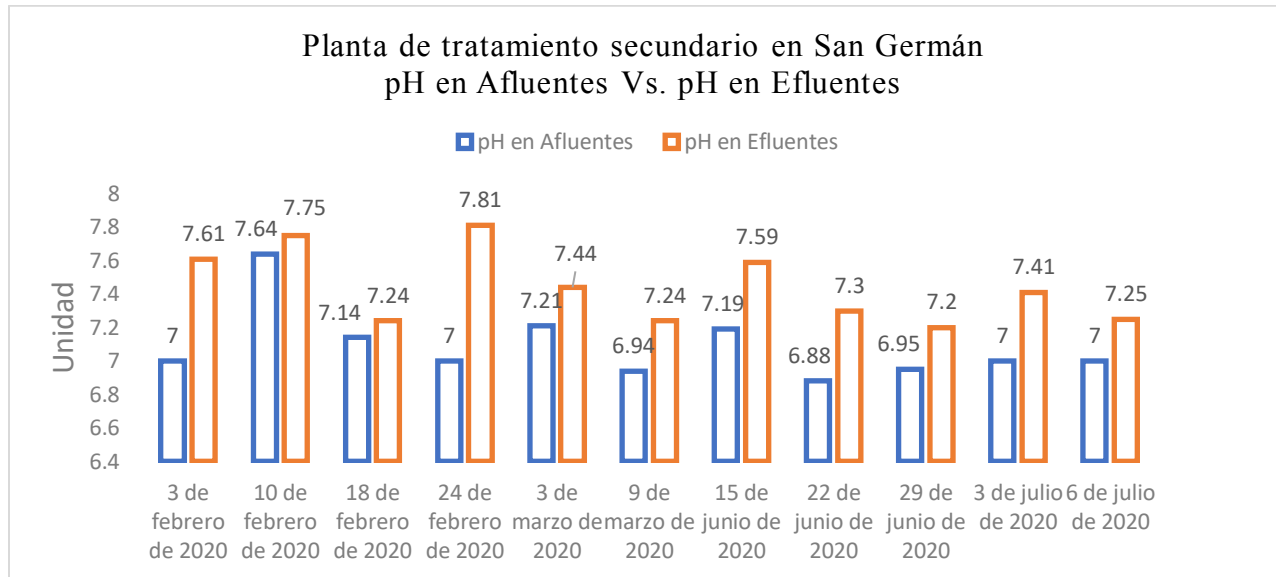
Periodo 1	Periodo 2
3 de febrero del 2020	15 de junio del 2020
10 de febrero del 2020	22 de junio del 2020
18 de febrero del 2020	29 de junio del 2020
24 de febrero del 2020	3 de julio del 2020
3 de marzo del 2020	6 de julio del 2020
9 de marzo del 2020	

Los monitoreos que se realizan en las plantas de tratamientos de AAA son importantes para la medición del funcionamiento y eficiencia de estas. Esto es debido a que los efluentes de las aguas residuales, una vez son sometidos a los tratamientos adecuados, son depositados a los

cuerpos de aguas y el ambiente. Cada monitoreo en las plantas de tratamientos de la AAA debe llevar en efecto un seguimiento continuo en cuanto a los reportes y los reglamentos establecidos por la EPA. El personal asignado a las plantas de tratamientos tiene responsabilidad de efectuar los reportes. Es importante señalar que estas dos plantas de tratamientos tienen algunos permisos distintos estipulados sobre los niveles de parámetros. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en torno a los parámetros biológicos, físicos y químicos. Se evaluarán datos de los parámetros según los requerimientos para la reutilización de agua residual para riego agrícolas, cultivos no comestibles.

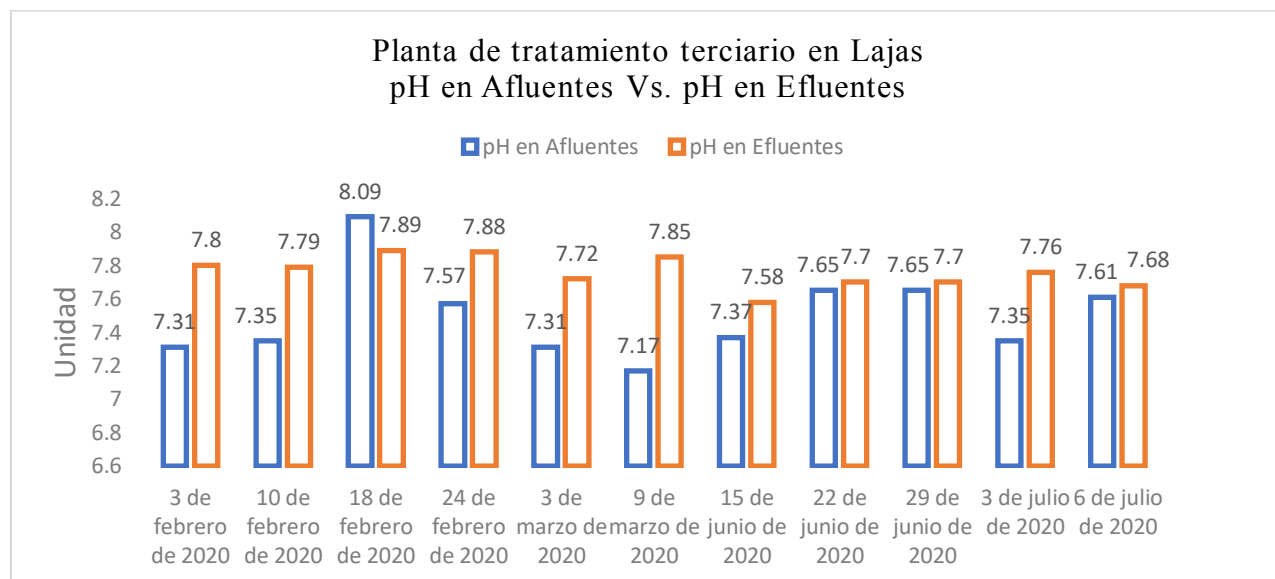
pH.

Figura 5. Resultados del pH en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario en San Germán.



En esta gráfica se observa como en el transcurso de los días de muestras los resultados se mantuvieron en el rango establecido para el pH de aguas residuales domésticas. El día 10 de febrero del 2020 fue el día en que se obtuvo un pH más elevado, pero este no sobrepaso los límites establecidos. En el efluente de la planta de San Germán se observa que los resultados de la medición de lectura fueron variados. Estos no reflejaron un exceso del límite establecido. Entre los días de muestreo, el pH más bajo fue el día 29 de junio del 2020 con un pH de 7.2 mientras que el más alto llego a un pH de 7.81.

Figura 6. Resultado del pH en el afluente y efluente de la planta de tratamiento terciario en Lajas



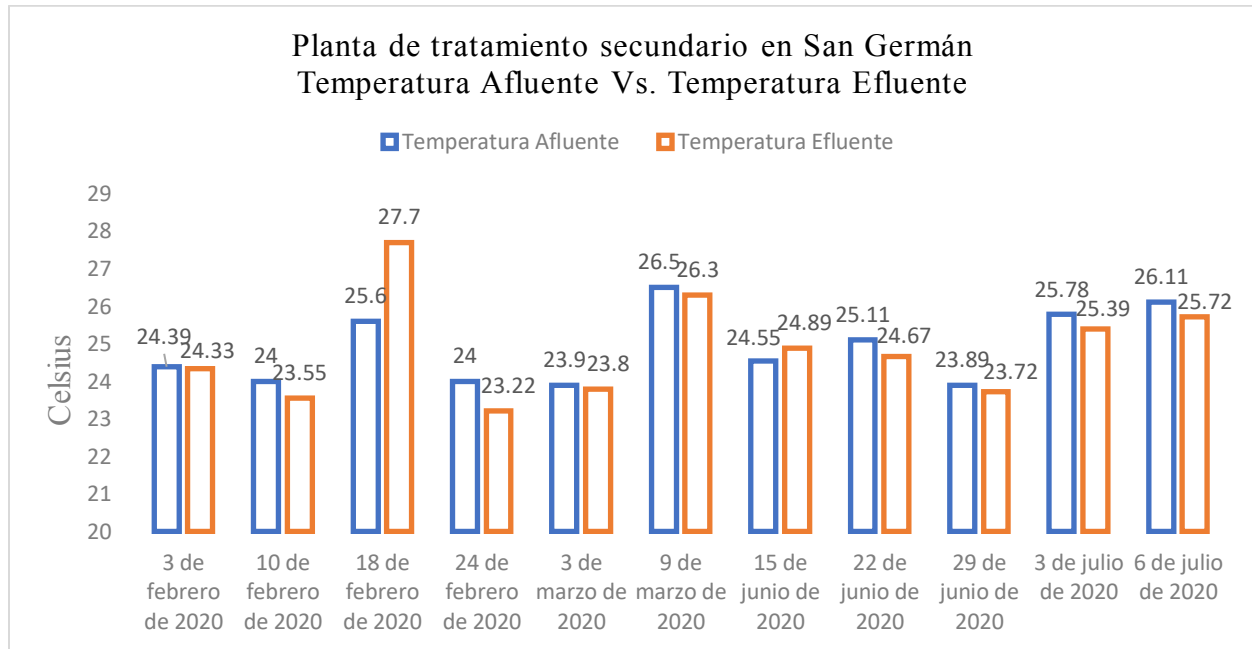
Estos resultados del afluente de la planta de Lajas, P.R. mostraron un alto pH el día 18 de febrero del 2020. Este resultado no es negativo para la planta ya que no es un resultado de agua residual acídica. Todos se muestran con rango de pH de neutral hasta básica. El pH en el efluente de la planta de Lajas, P.R. reflejó un pH en el rango menor de 7.58 a uno mayor de 7.89, estos en distintos días de muestras. Las fechas de muestras con pH más alto fue para el 18 de febrero del 2020 y el más bajo para la fecha del 15 de junio del 2020. Se identificó que estas aguas residuales domésticas tratadas cumplían con el límite establecido del pH para su descarga.

El parámetro establecido por la EPA indica que el pH aceptable debe ser de un rango de 6 – 9. Los resultados para el pH entre las semanas que se realizaron los análisis presentaron un pH en el rango del 6.88 al 7.64 (unidad estándar). Entre las semanas analizadas, se obtuvo el resultado más alto del pH 8.09 en el afluente de la planta de tratamiento terciario de Lajas. El resultado más bajo para el pH fue de 6.88 en la planta de San Germán en fuentes afluentes. Por ende, estos resultados aciertan a que las plantas estuvieron cumpliendo con límites establecidos para el pH en aguas afluentes y efluentes para riego agrícola de no consumo. Ambas gráficas

tuvieron variaciones en los resultados, los datos muestran que en el proceso de tratamientos no hubo grandes cambios en el pH. Estos resultados determinan que las aguas afluentes y efluentes de ambas plantas de tratamiento fueron mayormente de neutral a básicas o alcalinas, es positivo al momento de disponer de ellas.

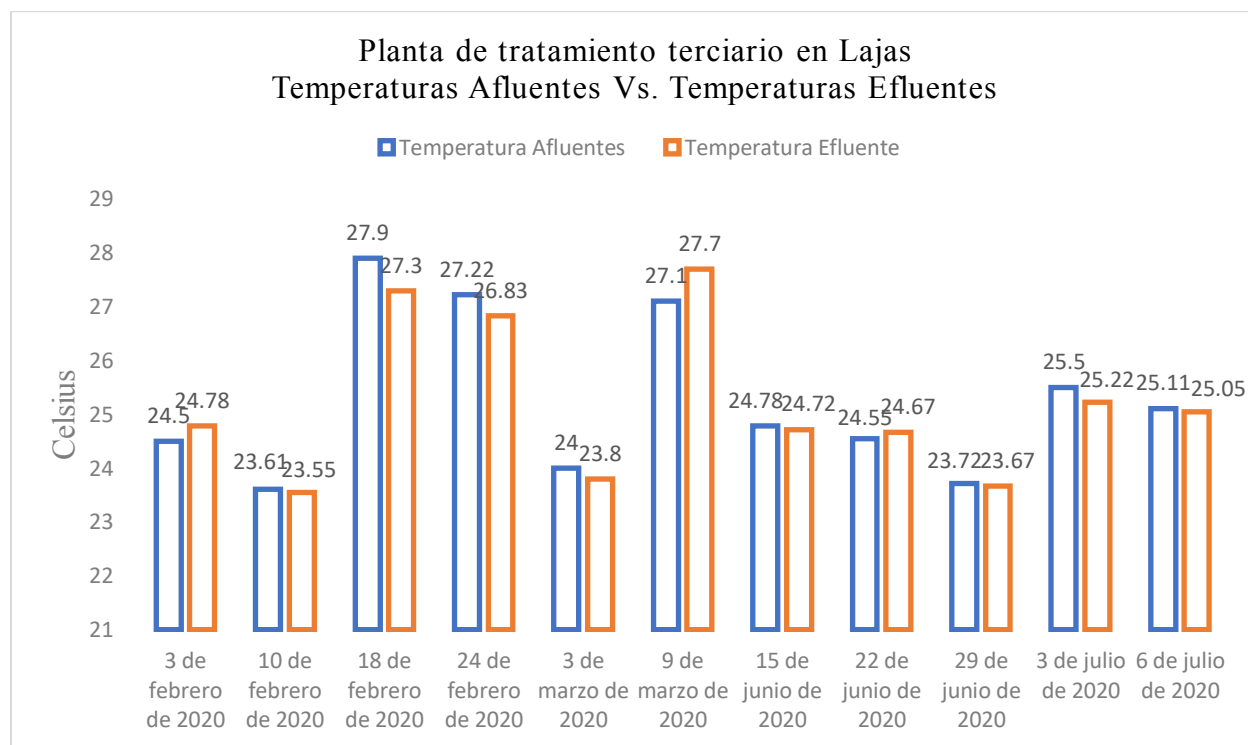
Temperatura.

Figura 7. Resultado de temperaturas en afluentes y efluentes de planta de tratamiento secundario en San Germán



Las temperaturas del agua residual doméstica en el punto de entrada de la planta de San German arrojaron temperaturas estables, según los límites establecidos. El día 9 de febrero de 2020 se identificó la temperatura más elevada 26.5°C. En dos ocasiones distintas se presentó una temperatura de 24 °C, esto en los días 10 de febrero del 2020 y el 24 de febrero del 2020. Las temperaturas reportadas entre el 3 de febrero del 2020 al 6 de julio del 2020 para las aguas residuales domésticas ya tratadas fueron estables para la descarga de esta agua. Las temperaturas fueron desde un rango mínimo de 23.22°C a un máximo de 27.7°C.

Figura 8. Resultados de las temperaturas en afluentes y efluentes de la planta de tratamiento terciario en Lajas



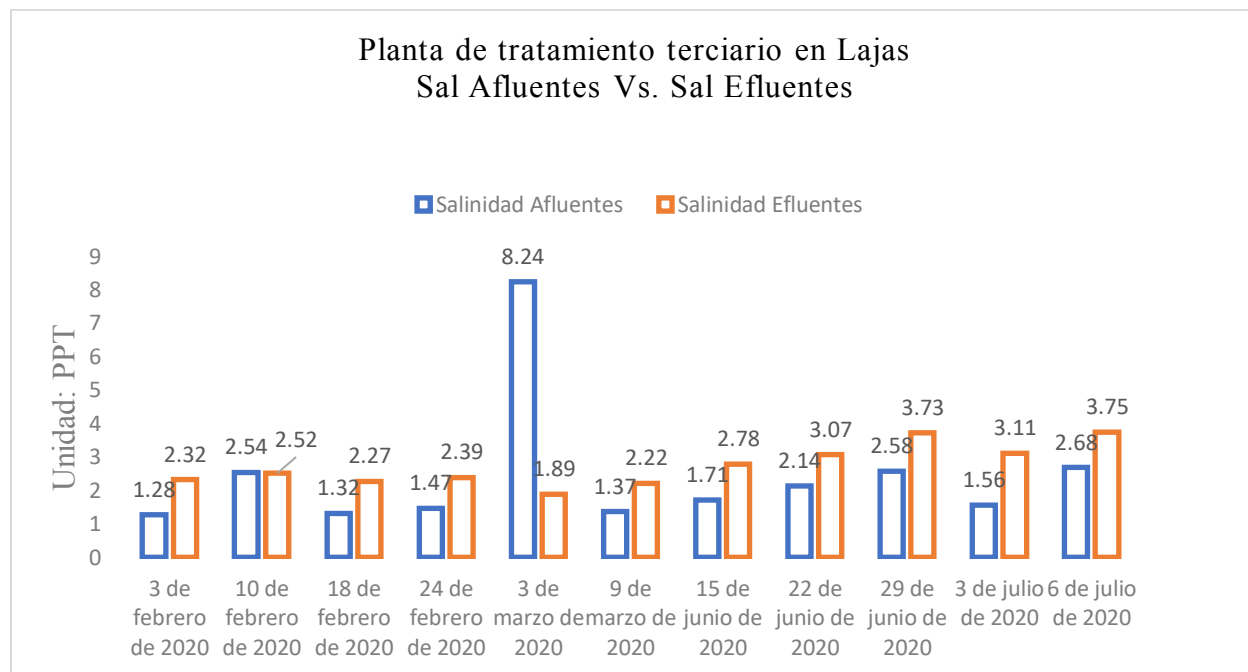
Estos resultados en el afluente de agua residual en Lajas muestran una variación de temperaturas reflejadas entre 23.61°C identificado el 10 de febrero del 2020 al 9 de marzo del 2020 con una temperatura de 27.1°C. Las temperaturas que presentó el efluente de Lajas se mantienen entre los 23.55°C a 27.7°C. Todos los resultados obtenidos fueron por debajo del límite máximo de temperatura establecido. Por ende, estos resultados de los efluentes de Lajas se encuentran dentro del parámetro de temperatura máxima diaria (32.2°C) que debe tener los efluentes antes de la planta de tratamiento hacer la descarga.

En cuanto a la temperatura de las aguas residuales en la planta de Lajas, se exige al menos un máximo diario de 32.2 grados Celsius, con una frecuencia de monitoreo una vez al día. Las temperaturas para las dos plantas de tratamientos se mantuvo una temperatura entre los 23.22°C como mínimo y 27.9 °C máximo en las muestras realizadas. Estas muestras arrojaron

unas temperaturas que no sobre pasaron el nivel máximo recomendado. Por consiguiente, si las temperaturas de las aguas residuales tratadas cumplen con el reglamento de la EPA pueden ser descargadas sin un mayor efecto al ambiente. Sin embargo, si las temperaturas fueran altas y las aguas estuvieran ácidas pudiese traer consecuencia en la flora y fauna al momento de descargar el agua. Según los datos presentados, puede que las temperaturas óptimas mantengan una relación con el pH y que por tal razón los muestreos del pH se mantuvieron óptimos entre 6 a 8.09, ya que no hubo unas variaciones grandes en las temperaturas, refiriéndonos a muy altas o a muy bajas. Por ejemplo, si hubiese un escenario de variación de temperaturas, en donde unas temperaturas se encuentren altas tiene efecto en el pH y este puede bajar, también esto puede ocurrir viceversa, si las temperaturas son bajas, el pH aumentaría, por ende, los cambios en los pH pueden ser a causas de las distintas variaciones de temperaturas. Según Quercuslab (2018), la temperatura puede afectar a la medida del pH porque modifica la actividad de los iones de la solución muestra, de los buffers y a la solubilidad de los ácidos o bases débiles; el pH es una medida de la concentración de protones su modificación por efecto de la temperatura modificará la medida de pH.

Salinidad

Figura 9. Resultado de sal (en la unidad ppt) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento terciario en Lajas.

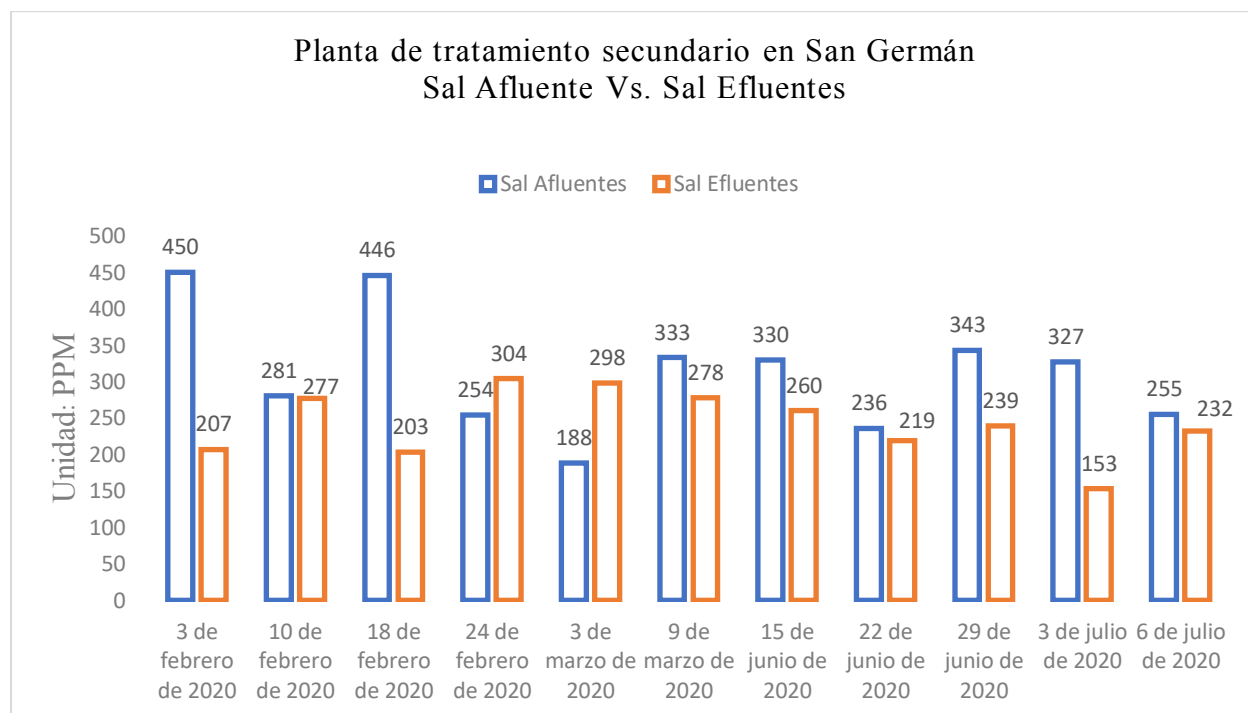


En el monitoreo de la sal se obtuvieron resultados variados, los resultados de la planta de Lajas para los afluentes se presentó un mínimo: 1.28ppt de sal y un máximo de 8.24ppt. Es importante mencionar que días antes del 3 de marzo de 2020 hubo lluvias extremas, la cual posiblemente puede ser una de las causas por las que se obtuvieron resultados altos para esa fecha. Por otro lado, cuando existe sal en el agua residual, esta puede provenir de lugares como industrias, canales agrícolas o fuentes en los que utilicen gran cantidad de químicos o pesticidas. Según Pérez Díaz, Peña Cervantes, López Cervantes y Hernández Torres, 2016, la alta concentración de sales solubles causa efectos perjudiciales a los cultivos, dichos efectos dependen del cultivo y tipo de sal.

En la planta de Lajas, P.R. se observó unos resultados para los efluentes entre 1.89ppt a 3.75 ppt. Siendo el resultado más bajo para la sal: 1.89ppt, y como resultado mayor 3.75ppt.

También se identifica que, al recibir el tratamiento terciario en la planta, el resultado de 8.24ppt del afluente para el 3 de marzo del 2020 en la planta de tratamiento terciario, resultó para el efluente una reducción de 1.89ppt. Podemos observar que los resultados de los efluentes de la planta de tratamiento terciario tuvieron aumentos en los datos al compararlos con el afluente de la misma planta. Existen varias aseveraciones en las que las sales en los suelos pueden afectar el rendimiento de los cultivos, por otra parte, indican que las sales pueden contener elementos necesarios para el desarrollo del cultivo, es por eso que, aconsejan que cumpla con los estándares de calidad para proveer una oportunidad para utilizar el agua ya tratada para un riego agrícola (Pérez Diaz et al., 2016).

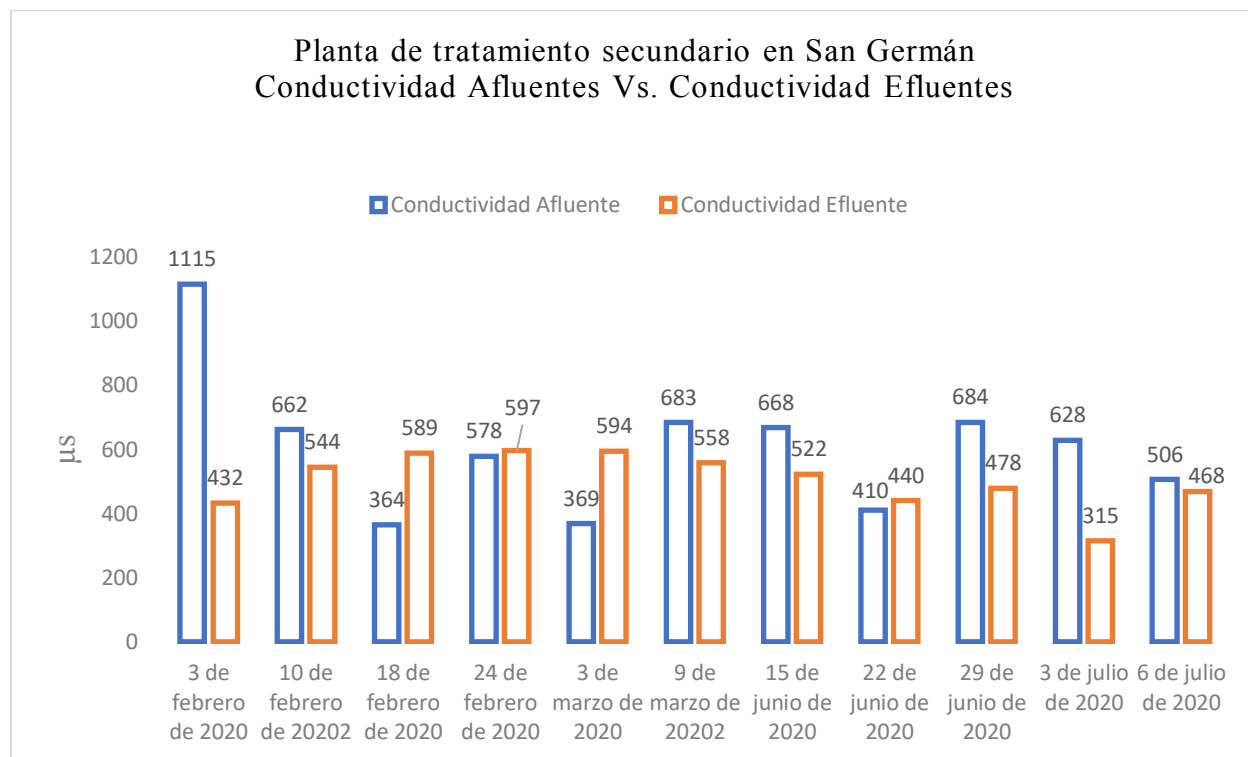
Figura 10. Resultado de sal en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario en San Germán



Entre los resultados más altos presentados en los afluentes de la planta de San Germán, P.R. fueron mostrados en la fecha del 18 de febrero del 2020 (446 ppm) y el 3 de febrero del 2020 (450 ppm). Entre los resultados bajos se presentó el 3 de marzo del 2020 (188 ppm). Al realizar una comparación entre cada semana se observa una estabilidad entre 207 ppm al 304 ppm. Como resultados de sal en los efluentes de la planta de San Germán, el día en donde se mostró el resultado más bajo fue el 3 de julio del 2020 con 153 ppm. Se logra identificar que la mayoría de los afluentes al recibir el tratamiento secundario generan una reducción de sales..

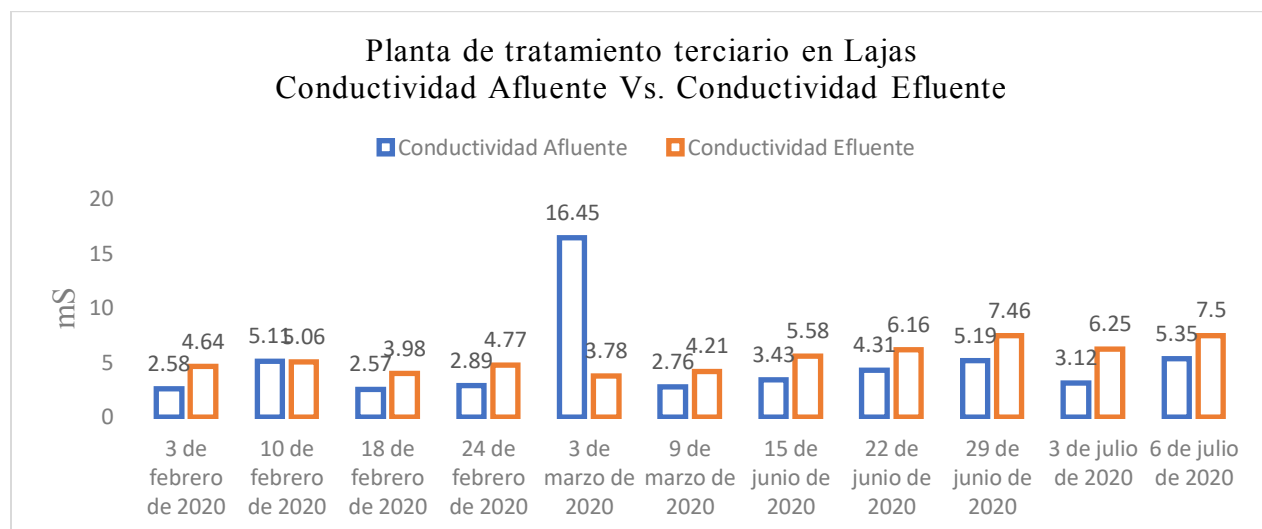
Conductividad

Figura 11. Resultado de la conductividad (μS) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario en San Germán



La conductividad en este análisis se colocó en un rango de $364\mu\text{S}$ resultando el día más bajo el 18 de febrero del 2020 a $1115\mu\text{S}$ como resultado más alto. Este valor de conductividad depende de factores influyentes como lo son la temperatura, las sales, gases disueltos, sólidos disueltos, pH entre otros. La conductividad reflejada en los resultados indica que se mantiene una salinidad consistente en cada prueba realizada. Los resultados arrojaron que en efecto el efluente mantiene una conductividad. En la planta de San Germán se obtuvieron resultados en el efluente en donde al pasar las semanas, se muestran resultados constantes entre los días 18 de febrero del 2020 con $589\mu\text{S}$ al 3 de marzo del 2020 con $594\mu\text{S}$. Luego, a partir del 9 de marzo del 2020 se presenció una decreciente de $558\mu\text{S}$ al 3 de julio del 2020 con $315\mu\text{S}$.

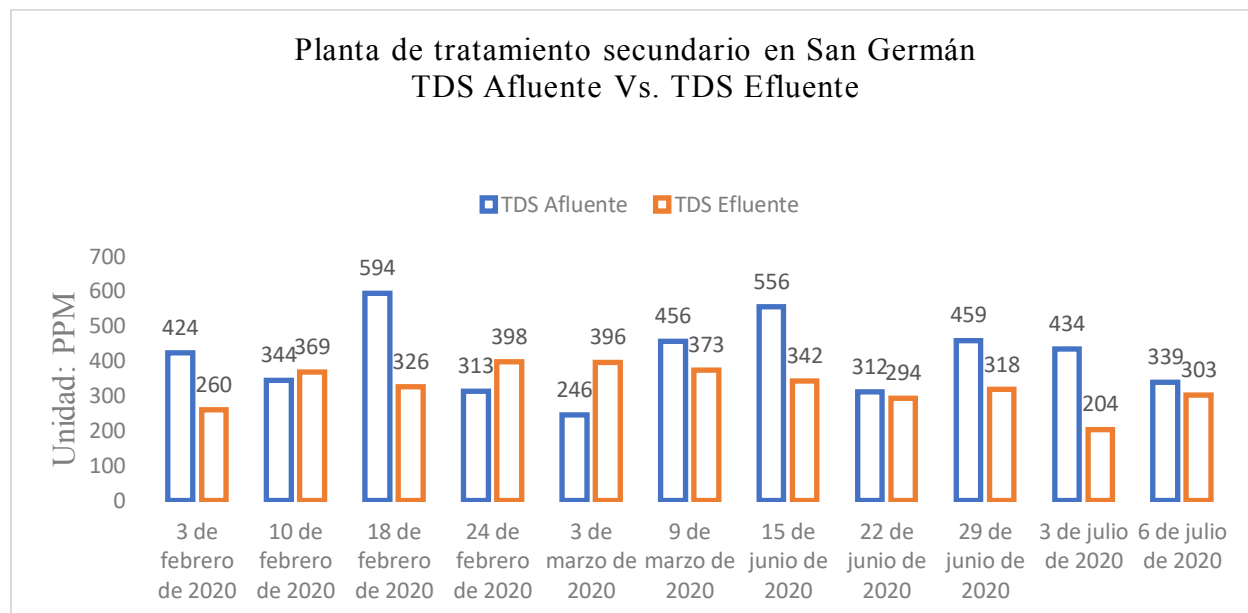
Figura 12. Resultado de conductividad (mS) en afluentes y efluentes de planta de tratamiento terciario en Lajas



Entre los resultados se identificó gran variedad. A diferencia de la unidad reportada para los resultados de la planta de tratamiento secundario: μS , la planta de tratamiento terciaria mantuvo una unidad de medida reportada en el instrumento microprocesador de: mS . Entre los resultados más elevados fue $16.45mS$ para el 3 de marzo del 2020 por parte del afluente, ese día y el día antes hubo lluvias extremas. El resultado más bajo para estas muestras del afluente fue $2.57mS$. Se observa que, a partir del 24 de febrero del 2020, hubo un aumento como resultado fue el 3 de marzo del 2020 para un $16.45mS$, mientras que así mismo para el 9 de marzo del 2020 se reflejó una disminución consistente. En esta gráfica de la planta de Lajas, podemos determinar que los resultados de los efluentes fueron más constantes a diferencia de los afluentes de esta misma planta. Estos resultados de los efluentes se mantuvieron entre los $3.78mS$ al $7.5mS$. Siendo $7.5mS$ el resultado más alto, el día 6 de julio del 2020. La conductividad, puede depender de las sales disueltas que se presentan en el agua, por ende, para el sector agricultura, esta medición debe ser de importancia para identificar los beneficios o efector que puede causar al cultivo o suelo.

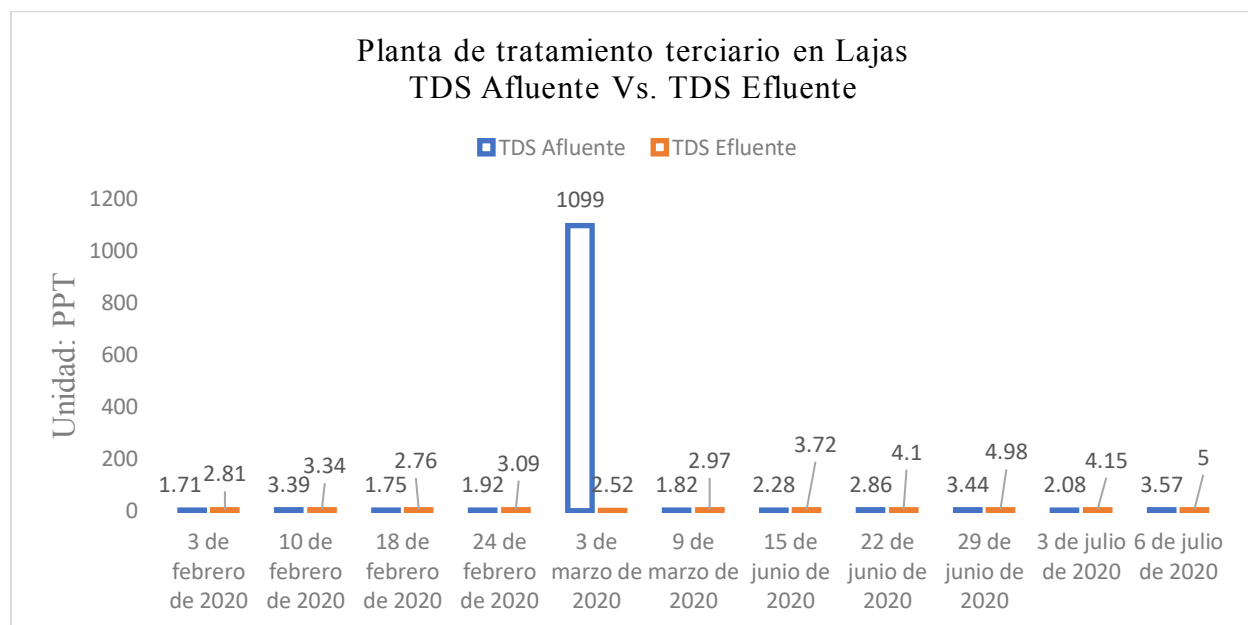
TDS

Figura 13. Resultado de TDS (unidad: ppm) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario en San Germán



Las pruebas de sólidos disueltos totales (TDS) se realizan en el agua para determinar la concentración total de las sales y la materia disuelta en el agua. Esta prueba puede determinar si las aguas residuales domésticas tratadas en las plantas se vinculan a aguas contaminadas o aguas fuera de contaminación. En la Planta de San Germán se observó el afluente del agua con resultados variados. Estos en un rango de 246 ppm a 594 ppm. El día 3 de marzo del 2020 fue el día en que se reflejó un TDS más bajo. En el efluente de la planta de tratamiento de San Germán los resultados se muestran en un rango entre 204 ppm para el día 3 de julio del 2020 al 398 ppm para el día 24 de febrero del 2020. Al verificar los rangos determinados para riego agrícola por parte de la EPA: 450mg/l – 2,000mg/, se identifica que al realizar la conversión de ppm a mg/l los resultados de los afluentes están dentro del rango ligeramente moderado. De acuerdo con los rangos de la EPA los efluentes reflejan datos bajos, los cuales se entiende que si se encuentran en cumplimiento.

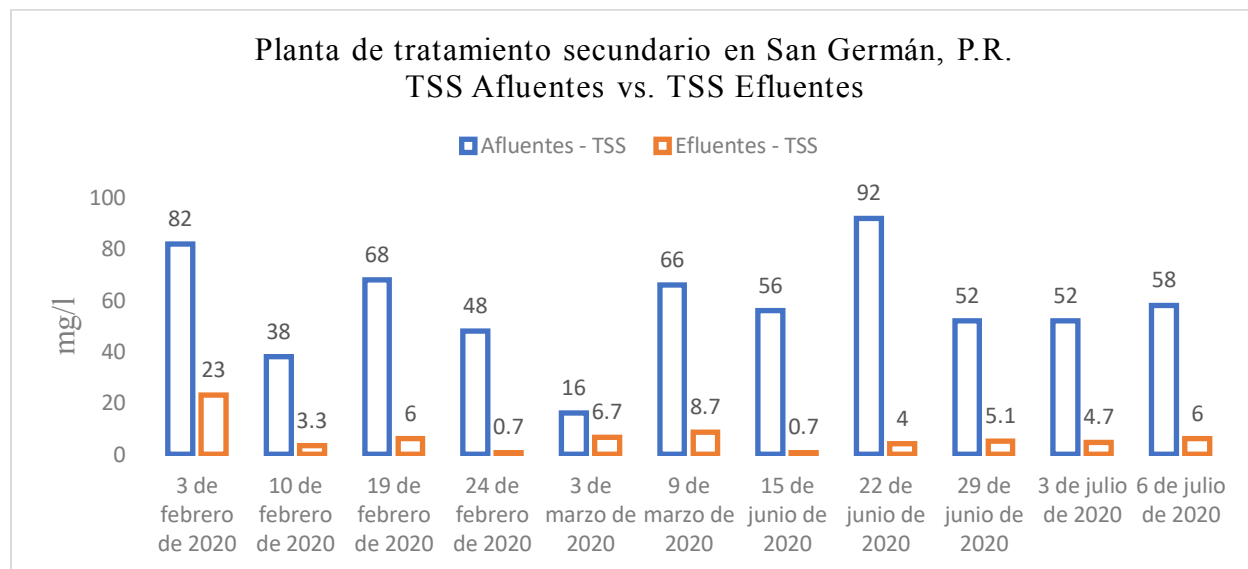
Figura 14. Resultados de TDS (en unidad de: ppt) en afluentes y efluentes de la planta de tratamiento terciario en Lajas P.R.



El resultado de TDS en el afluente de la planta de tratamiento de Lajas arrojó resultados con la unidad de medida en (ppt), los datos demuestran que se encuentran en el rango de 1.71ppt a 1099ppt. Entre estos resultados existe un máximo de 1099 ppt. Al parecer, el día 3 de marzo del 2020 hubo una diferencia en los resultados, en la cual se puede observar en la gráfica. Entre los resultados del TDS se produjo un mínimo de 2.52 ppt y máximo de 5 ppt para los efluentes. En general, esta prueba de TDS demuestra que la planta de tratamientos remueve efectivamente la materia que se encuentra en el agua residual, es reflejado en la mayoría de los datos del efluente de la planta terciaria. Por medio de los resultados y gráficas de ambas plantas de tratamientos se identifica que, aunque existe una variación de resultados, estas plantas remueven mayor concentración de la materia, esto, para mantener un efluente con baja materia en el agua. La causa del dato del afluente reportado el 3 de marzo del 2020 tal vez puede ser debido a daños en los motores o lluvias extremas que provocan la entrada de concentración grande de materia a las plantas de tratamientos, entre otros.

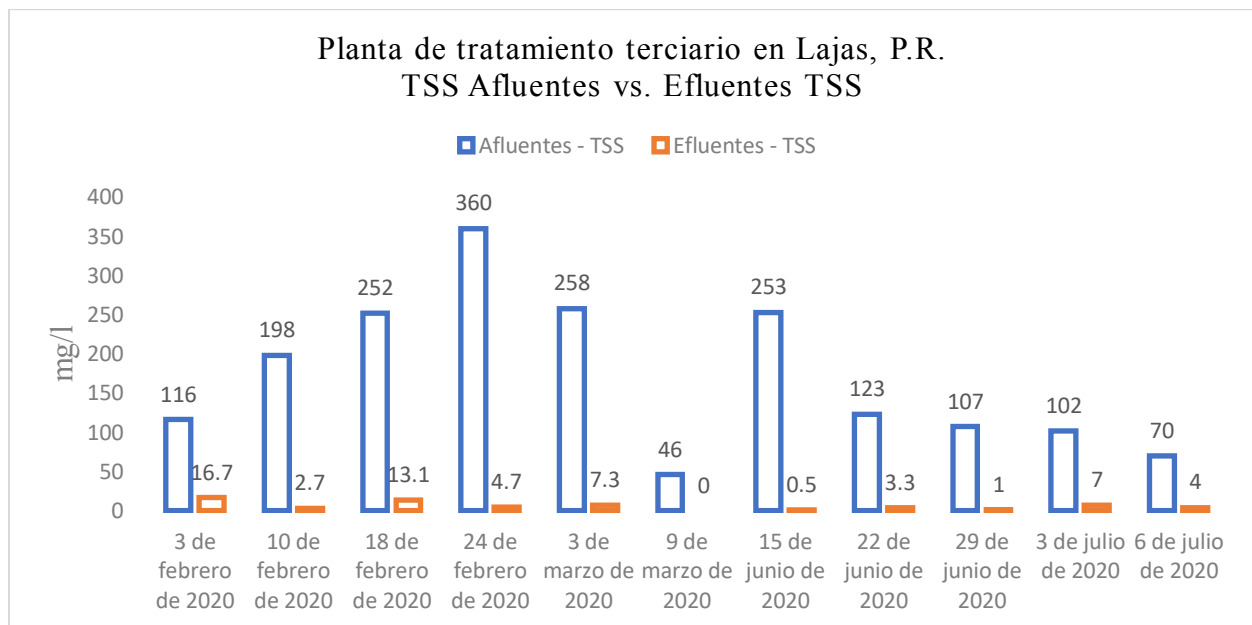
TSS.

Figura 15. Resultados de TSS en afluentes (unidad: mg/l) vs. TSS en efluentes (unidad: mg/l) de la planta de tratamiento secundario en San Germán



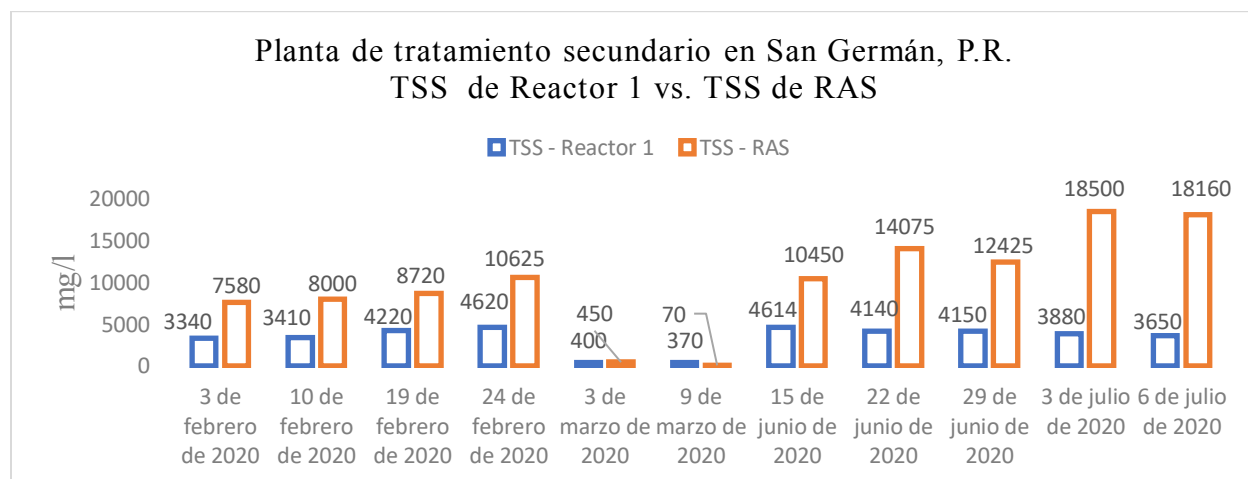
Las pruebas para los sólidos totales suspendidos (TSS) fueron realizados en ambas plantas, en la planta de tratamiento de San Germán los afluentes obtuvieron como resultados un mínimo de muestra de 16mg/l a un máximo de 92mg/l. En cuanto a los efluentes, de la misma planta reflejaron un mínimo de 0.7mg/l a 23mg/l. Se identifica que la mayoría de los afluentes que entraron a la planta de tratamientos contenían unos niveles altos de TSS, ya que según los rangos de la EPA para riego a cultivos agrícolas no comestibles deben estar menor o igual a 30 mg/l. Se observa que al ejecutar el proceso de la planta de tratamiento secundario todos los niveles de TSS bajaron para los efluentes, de esta manera sí cualifican en el rango estipulados por la EPA para riego agrícola, a cultivos no comestible.

Figura 16. Resultados de TSS afluentes (unidad: mg/l) vs. TSS efluentes (unidad: mg/l) de la planta de tratamiento terciario de Lajas



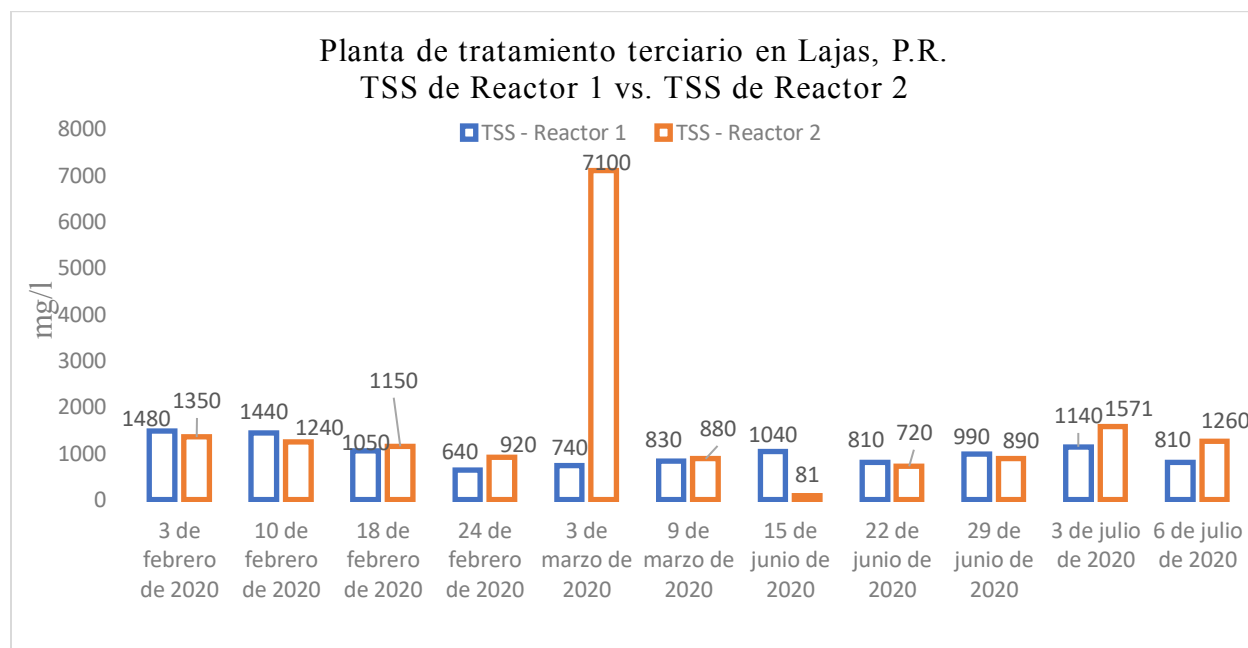
Mientras tanto, los resultados en la planta de tratamiento de Lajas en el afluente 46 mg/l (mínimo) a 360 mg/l (máximo). Para el efluente de la planta de tratamiento de Lajas resultó como dato mínimo: 0 mg/l y un resultado máximo de: 16.7mg/l. Según los resultados graficados para ambas plantas, observamos que una vez el agua residual es pasada por un tratamiento para aguas residuales hubo una reducción en los resultados, minimizando la cantidad de sólidos totales suspendidos en las aguas residuales tratadas, esto antes de ser arrojados a un cuerpo de agua, lo que es positivo para los cuerpos de aguas receptores y para el sector agrícola.

Figura 17. Resultado de TSS de reactor 1 (unidad: mg/l) vs. TSS de RAS (unidad: mg/l) en planta de tratamiento secundario en San Germán



El reactor 1 (licor mixto) de San Germán es proveniente de un tanque en donde se realiza el proceso anaeróbico de la planta de tratamiento secundario en San Germán, por tanto, el agua residual para determinar los TSS del reactor 1 es recolectada en dicho tanque. En el reactor 1(licor mixto) en la planta de San Germán resultó con un mínimo de 370 mg/l a un máximo de 4620 mg/l. El RAS se encuentra en el área del calificador en la planta de tratamiento secundario en San Germán. El agua muestreada de RAS se recolecta en lo profundo del tanque de clarificador en donde está el exceso de lodo en el agua, de esa manera se puede identificar cuando exceso de lodo existe en el tanque y si se necesita procesarlo hacia la microprensa. En cuanto para en RAS, el resultado mínimo fue de 70mg/l y el resultado máximo fue de 18500 mg/l. En los resultados se identifica que para las fechas del 3 de marzo del 2020 y el 9 de marzo del 2020 hubo en ambas plantas de tratamientos datos mínimo. Según los datos obtenidos en algunas fechas de análisis el RAS tuvo unos resultados altos, el cual debería el operador de la planta ejecutar alguna acción como descartar exceso de RAS y llevarlo a la microprensa. En cuanto a los datos del Reactor 1 se observan consistentes, los operadores pueden determinar el tiempo de retención para los procesos.

Figura 18. Resultado de TSS de reactor 1 (unidad: mg/l) vs. TSS reactor 2 (unidad: mg/l) en la planta de tratamiento terciario en Lajas



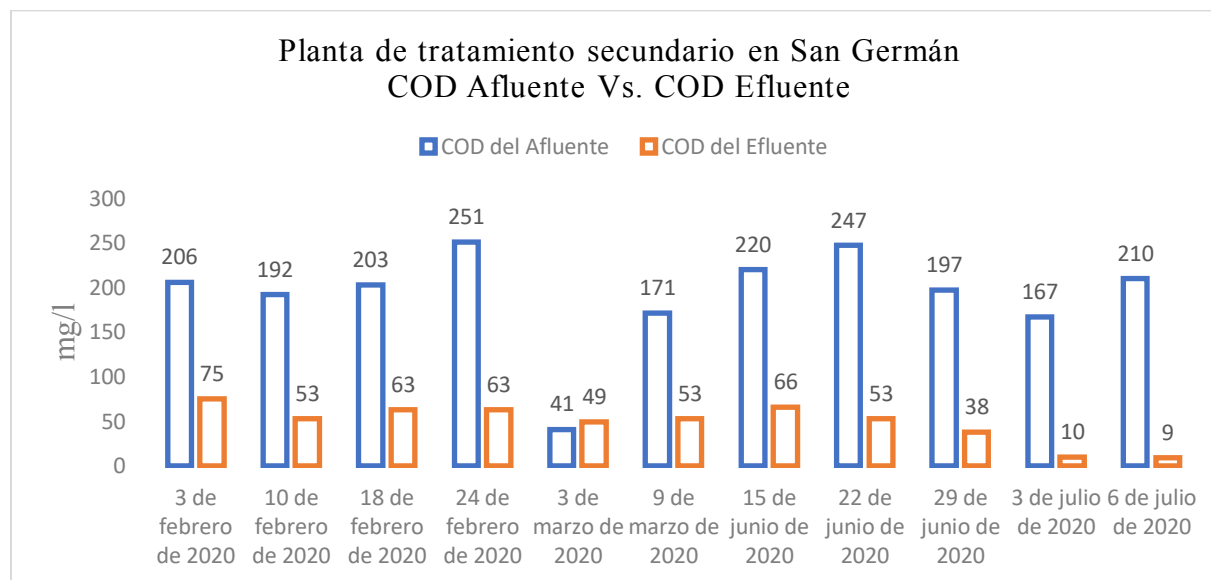
El reactor 1 (SBR1) y el reactor 2 (SBR 2) de la planta de tratamiento terciario en Lajas son dos tanques el cual son llenados de las aguas residuales para comenzar el proceso de la planta; entre estos el mezclado, reacción, entre otros. El reactor 1 y reactor 2 realizan los mismos procesos, pero en distintos tiempos de retención. Por ejemplo, cuando el tanque reactor 1 se va llenando de agua residual para comenzar el proceso, el otro tanque reactor 2, va terminando el proceso y decantando su agua residual del tanque, dirigiendo el agua hacia el área de cámaras de UV. En la planta de tratamiento de Lajas el reactor 1 arrojó un mínimo de 640mg/l a máximo de 1480mg/l. Mientras que, el reactor 2 tuvo como resultado 7100mg/l (máximo) a 81mg/l (mínimo). Estos datos obtenidos para los reactores de ambas plantas de tratamientos, demuestran objetivamente que las partículas de sólidos suspendidos en las plantas, pudieron estar presentes en altas concentraciones en algunos de los días analizados. Esto resultados pueden ser por efectos de grandes cantidades de materia entrada a la planta, desperfectos mecánicos o

climatología. En la gráfica se puede observar una diferencia en los resultados, los sólidos suspendidos totales en ambas plantas de tratamientos se pudieron haber controlado tal vez aún más con una intensidad o un mayor tiempo de retención de los procesos. Estas acciones ayudan a evitar descargar al ambiente las aguas residuales tratadas con alta concentración de TSS, dado a que los TSS en concentraciones altas puede ocasionar una señal de peligrosidad para el medio ambiente.

COD.

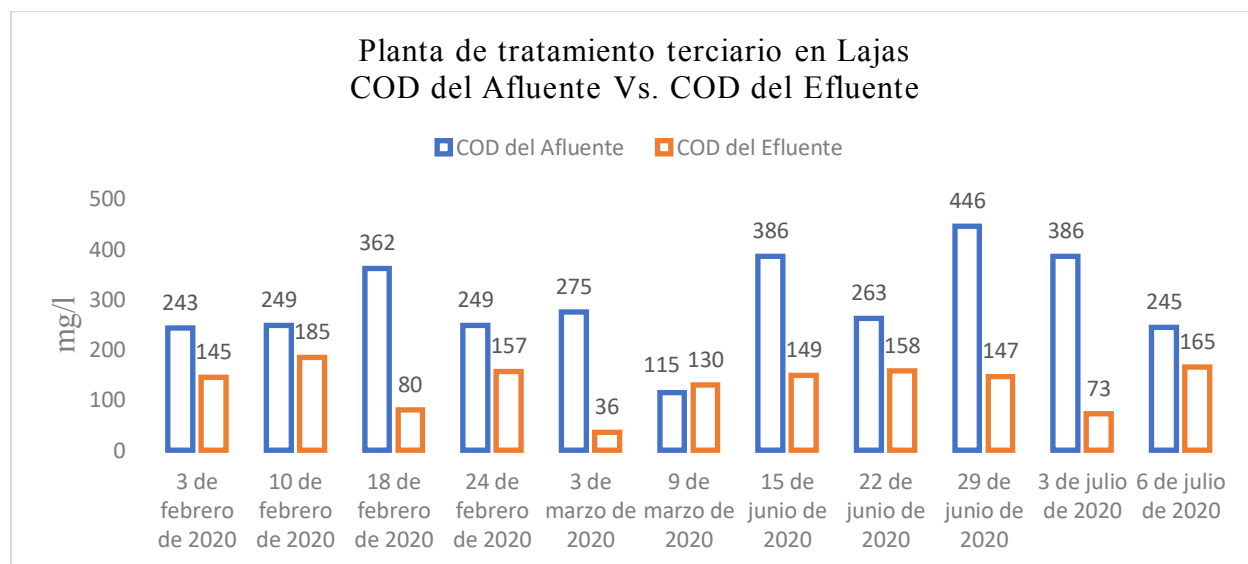
Figura 19.

Resultados de COD (unidad: mg/l) del afluente y efluente en la planta de tratamiento secundario en San Germán



Los resultados de los afluentes en la planta de tratamiento secundario de San Germán fluctúan entre un rango de 41mg/l a 251mg/l. Se observa que el 3 de marzo del 2020 se obtuvo el resultado más bajo de demanda química de oxígeno (COD) con 41mg/l. Por otra parte, en los efluentes de la planta de tratamiento secundario de San Germán se observaron que los resultados fueron más bajos en comparación con los resultados de los COD del afluente de la mencionada planta de tratamiento. En los resultados reportados del COD de los efluentes en la planta de tratamiento secundario, el COD más bajo lo fue en la fecha del 6 de julio del 2020 con 9mg/l mientras que, el resultado más alto obtenido lo fue el 3 de febrero del 2020 con 75mg/l. Es de importancia mencionar que de acuerdo con los datos obtenidos los efluentes del COD están dentro del rango óptimo de COD, esto según los rangos establecidos por “Guidelines for water reuse” en el 2004, en donde indican como rango óptimo: 20 mg/l – 90mg/l.

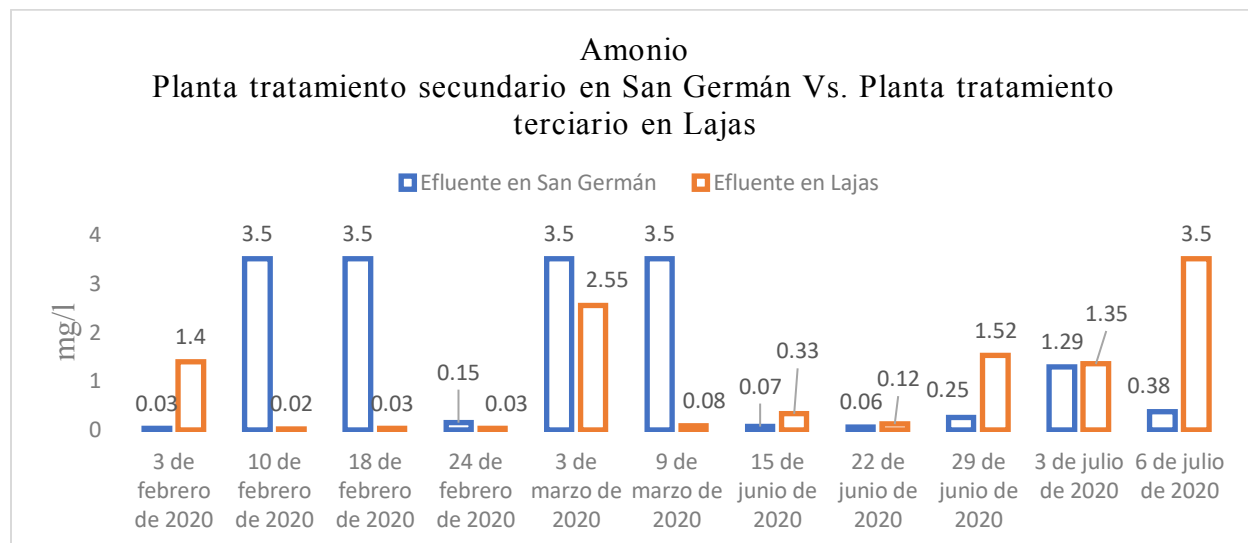
Figura 20. Resultado de COD (unidad mg/l) del afluente y efluente en planta de tratamiento terciario en Lajas



Los resultados para el parámetro de la demanda química de oxígeno (COD) en los afluentes de la planta de Lajas fueron identificado dentro de un rango de 115mg/l a 446mg/l. Hubo una variación en los resultados dependiendo del día en que se efectuaron las pruebas, siendo el día 9 de marzo del 2020 con un 115 mg/l, el COD más bajo en los afluentes. Para los parámetros de COD en los efluentes de la planta de tratamiento de Lajas, se obtuvieron resultados entre un mínimo de 36 mg/l a 185 mg/l. En el efluente resulto un máximo de COD de 185 mg/l, esto para el día 10 de febrero del 2020. Según los resultados podemos indicar que los COD en el afluente y en el efluente se mantuvieron en un rango típico en las aguas residuales domésticas ya que según Ozonotech.com, las aguas residuales domésticas están en un rango típico de 100 – 450 mg /l. Cuando utilizamos los rangos indicados por ‘‘Guidelines for wáter reuse’’ en el 2004, los cuales son de 20 mg/l - 90 mg/l observamos que algunos días los efluentes sobrepasaron el rango estipulado.

Amonio.

Figura 21. Resultados de Amonio (unidad: mg/l) en el efluente de la planta de tratamiento terciario en Lajas Vs. planta de tratamiento secundario en San Germán

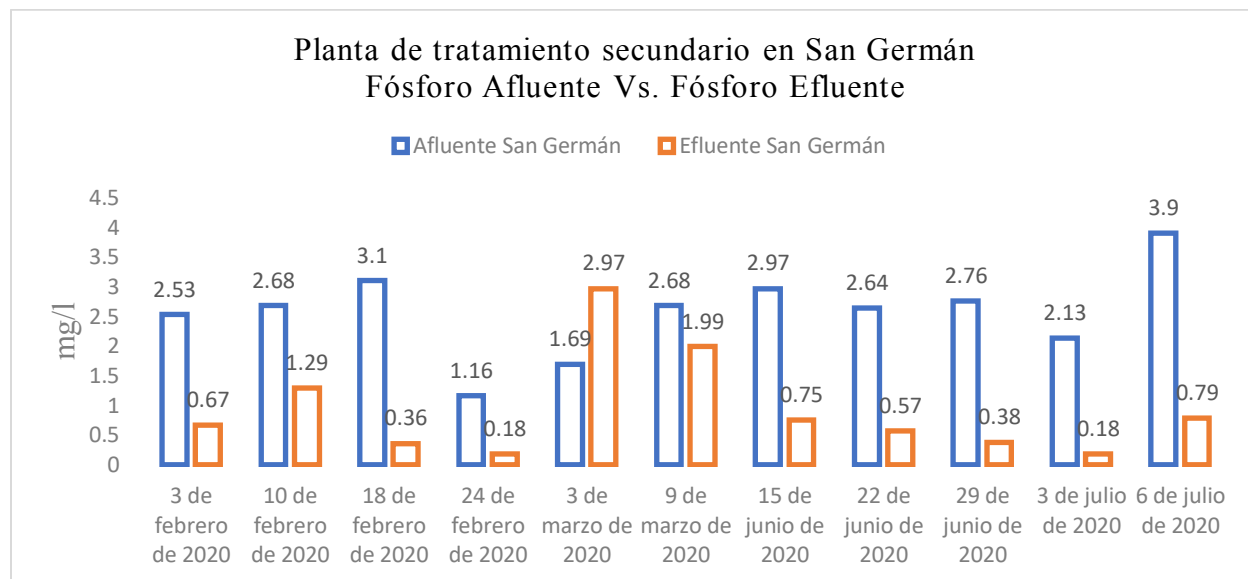


Las pruebas para el amonio se realizaron solo en los efluentes de las plantas de tratamientos de San Germán y Lajas, según la AAA solo se muestrea para los efluentes de ambas plantas de tratamientos. Los efluentes de la planta de tratamiento de Lajas arrojaron resultados entre 0.02 mg/l a 3.5 mg/l. Como resultados altos, se observaron: 1.4mg/l para la fecha del 3 de febrero del 2020, 2.55mg/l en el día 3 de marzo del 2020 y 3.5mg/l para el 6 de julio del 2020, siendo este el resultado más alto en el total de muestras. Por otro lado, los resultados de amonio en los efluentes de la planta de tratamiento de San Germán se muestran resultados con nivel mínimo de 0.02 mg/l a un nivel máximo de 3.5 mg/l. Un nivel máximo (parámetro alto) surge cuando el amonio se presenta en las pruebas de aguas residuales tratadas con un nivel de 3.5 mg/l o más. Estos resultados demuestran que algunos días de análisis se reflejaron un alto nivel de amonio: 3.5 mg/l. En los parámetros de NPDES No. PR0020575, específicamente para la planta de tratamiento terciario de Lajas, P.R., el total de amonio puede ser hasta llegar a un rango máximo de 6mg/l. Según la EPA (2012), los parámetros típicos de amonio para la calidad del

agua están entre 0mg/l – 0.4mg/l. Los niveles altos pueden ser debido a desperfectos mecánicos como rotores y motores en las plantas de tratamientos o grandes flujos de aguas residuales que hayan entrado a la planta de tratamiento ejemplos: por lluvias extremas que arrastran todo tipo de materia orgánica, excrementos humanos, abonos, químicos de industrias. Cuando las descargas del efluente son realizadas con un alto nivel de amonio puede crear conflicto con el medio ambiente debido a que alta cantidad de amonio impulsa a que se desarrollen algas.

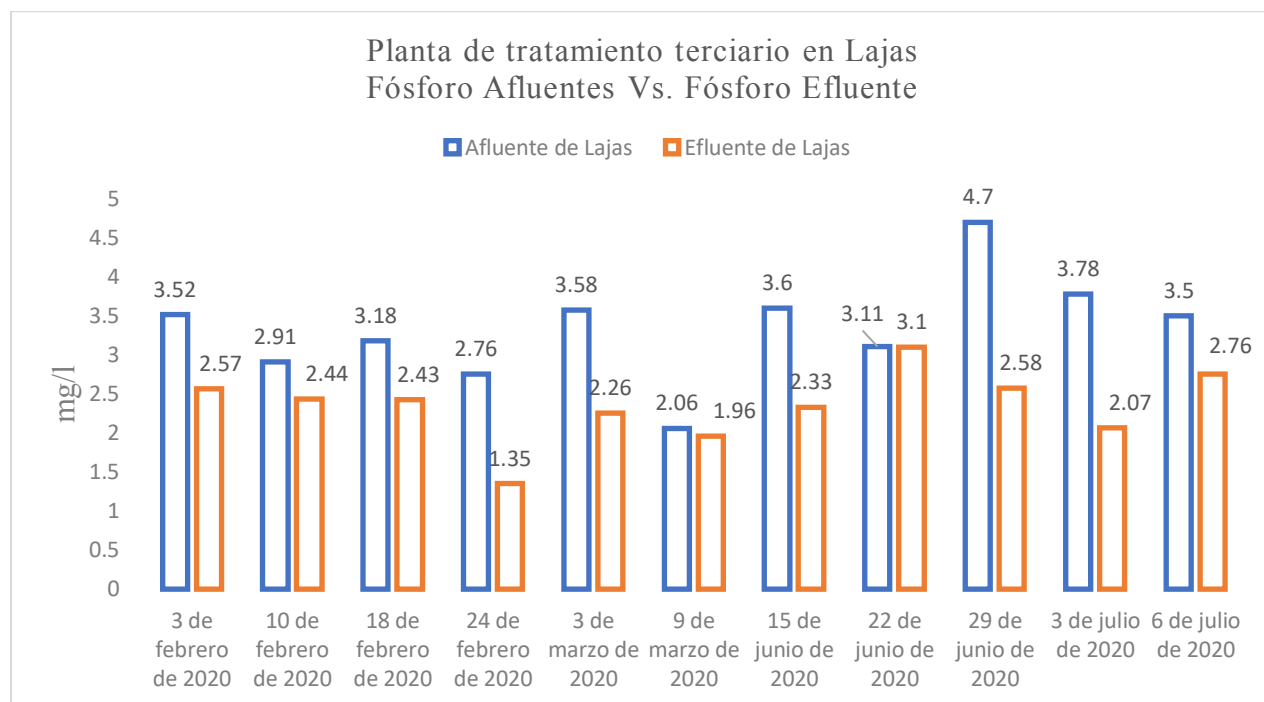
Fósforo.

Figura 22. Resultado de fósforo (unidad: mg/l) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento secundario en San Germán



La EPA en el 2012 estableció que uno de los parámetros típicos para la calidad de agua en fosforo es 0.04mg/l – 0.04mg/l. En las pruebas para determinar el fósforo en los afluentes de la planta de San Germán, se encontró un rango de: 1.16 mg/l a 3.9 mg/l. El día en el que se observó un cambio alto en los resultados fue el día 6 de julio del 2020, presentando un 3.9 mg/l de fósforo. Los resultados determinados para el fósforo en la planta de San Germán fueron entre 0.18 mg/l a 2.97 mg/l en los efluentes. En esta gráfica se observa que hubo un aumento de las pruebas desde el 24 de febrero del 2020 (0.18 mg/l) al 3 de marzo del 2020 (2.97 mg/l) en los efluentes. Sin embargo, luego de la fecha del 3 de marzo del 2020 fue disminuyendo los resultados al paso en que se realizaban más pruebas para la determinación del fósforo. Entre los afluentes y efluentes de la planta de tratamiento de San Germán se observa que los resultados del fósforo en los efluentes fueron más bajos, positivamente.

Figura 23. Resultado de fósforo (unidad: mg/l) en el afluente y efluente de la planta de tratamiento terciario en Lajas



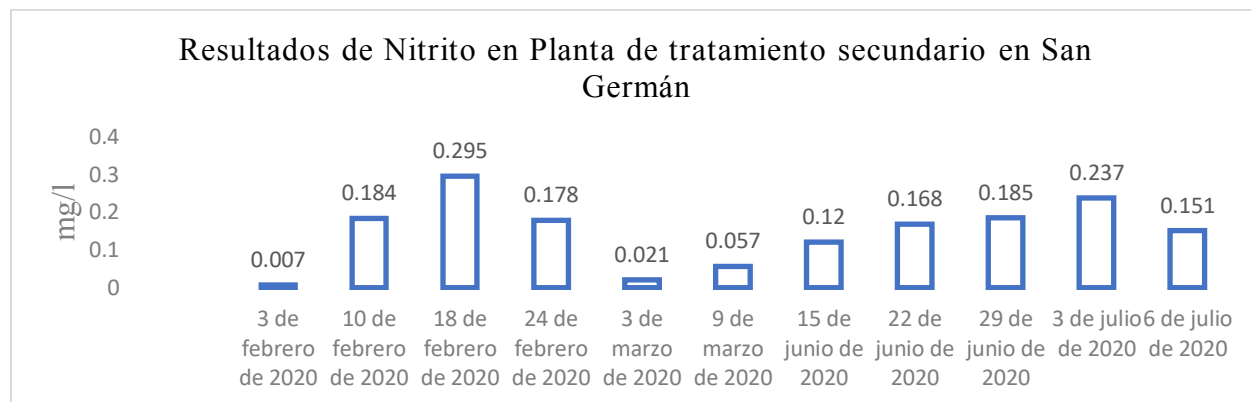
Cuando nos centramos en los resultados para el fósforo de la planta de tratamiento de Lajas, los afluentes tuvieron resultados entre 2.06 mg/l a 4.7 mg/l. Mediante estos resultados se identifica que los afluentes dirigidos hacia ambas plantas de tratamiento tienen un volumen de fósforo un poco altos en algunos días en que fueron analizados. Estos resultados también demuestran que las aguas residuales arrastran materia orgánica y en su transcurso a la planta de tratamiento, pueden irse descomponiendo. Estas acciones provocan que exista un alto potencial de nutrientes entrando a las plantas de tratamientos, entonces entre estos nutrientes podemos encontrar los fósforos. Es por esto que, en P.R. se realizan tratamiento para las aguas residuales, analizando los parámetros para una descarga apropiada al medio ambiente.

Los efluentes de Lajas se mantuvieron entre los 1.35 mg/l a 3.1 mg/l. Los resultados arrojan que, una vez las aguas residuales son dirigidas a un tratamiento, los efluentes son

identificados con bajo resultado de fósforo para estas plantas de tratamientos en la mayoría de los días analizados. Por otro lado, la planta de tratamiento terciario en Lajas tiene un permiso NPDES No. PR0020575 de máximo de fosforo de 1mg/l, pero estos resultados en el efluente sobrepasan la cantidad. Por tanto, el fósforo (P) puede ser visto como el nutrimento limitante; en consecuencia, su eliminación en las corrientes de agua repercutiría en la prevención de la eutroficación de los cuerpos acuáticos receptores Luna Pabello, V.M. y Ramírez Carrillo, H.F., (2004).

Nitrito.

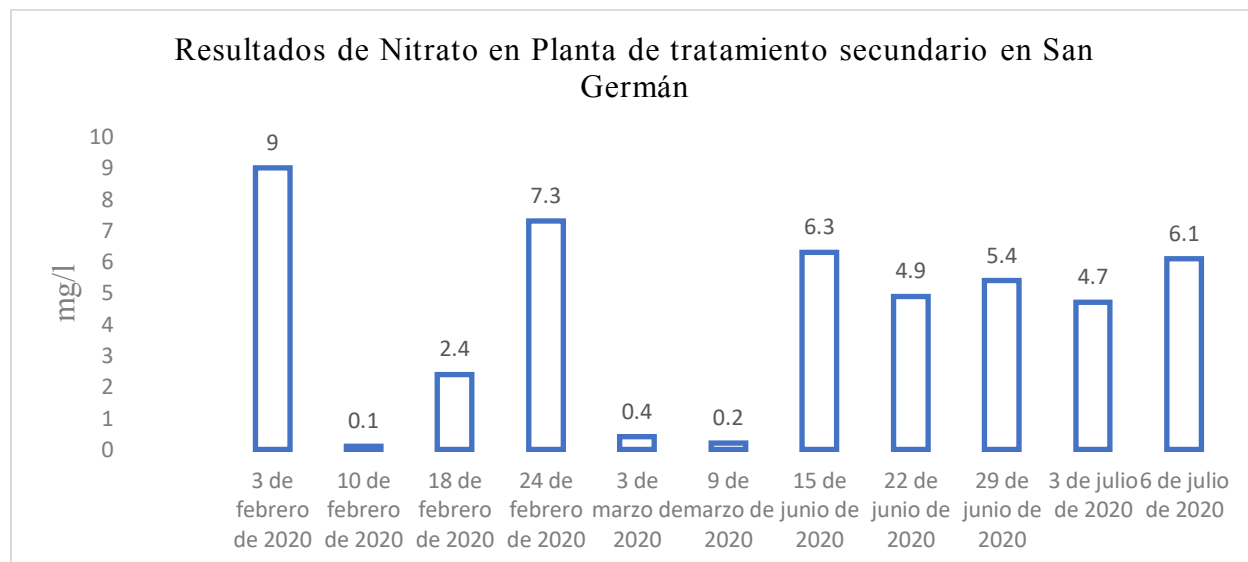
Figura 24. Resultado de Nitrito (unidad: mg/l) en los efluentes de la planta de tratamiento secundario en San Germán



Los efluentes analizados en la planta de San Germán arrojaron un rango entre 0.007 mg/l a 0.295 mg/l, siendo este último el resultado más alto que se presentó para el Nitrito. La prueba de nitritos solo se realizó en la planta de tratamiento secundario de San Germán, según la planta de tratamiento esta prueba no se realiza en la planta de tratamiento terciario en Lajas. Según W. Adam Sigler and Jim Bauder, S.F., el estándar de nitrito-N es 1.0 mg/L en el agua potable, estos autores indican, que, en el ambiente, el nitrito (NO_2^-) generalmente se convierte a nitrato fácilmente (NO_3^-). El nitrito (NO_2^-), es oxidado con facilidad por procesos químicos o biológicos a nitrato, o bien reducido originando diversos compuestos (Bolaños Alfaro, J.D, Cordero Castro, G., y Segura Araya, G., 2017). La EPA en el 2012, establecieron que el rango óptimo para nitrito puede estar entre 0.01 mg/l – 0.05 mg/l, por consiguiente, observando los resultados podemos identificar que algunos días de análisis sí se encuentran dentro esos rangos. Por otro lado, una parte de los datos muestra que los resultados no pasan de 0.295 mg/l de nitrito, aun así, es un resultado bastante bajo. Cuando existen resultados altos de nitritos como por ejemplo: 1 mg/l, pueden causar problemas en el ecosistema y pueden también convertir el agua en toxica.

Nitrato.

Figura 25. Resultado de Nitrato (unidad: mg/l) en los efluentes de la planta de tratamiento secundario en San Germán



En cuanto, a los nitratos en el efluente de la planta de tratamiento de San Germán se determinó un nivel de mg/l desde 0.1 mg/l a 9 mg/l. Los resultados nos indican que en algunos días de pruebas el nivel llegó entre 0.1 mg /l a 0.4 mg/l, con estos resultados prácticamente no existe una presencia de nitrato, en ocasiones esto puede provocar acción positiva. Los altos niveles de nitratos para los días en que se analizaron los efluentes pueden estar relacionados a lluvias extremas, rotores o maquinaria dañada, entre otras condiciones. El resultado con el nivel más alto para el nitrato fue el día 3 de febrero del 2020 con 9mg/l. La EPA (2012), estipula que un nitrato moderado debe estar en el rango de 5mg/l – 30mg/l, al verificar los resultados concuerda con el rango estipulado. El nitrato es encontrado naturalmente en el suelo y agua, pero usualmente a relativa bajas concentraciones, menos de 4 mg/L en agua (Sigler, A. y Bauder, J., s.f.). Los nitratos son altamente solubles y es transportado fácilmente cuando fuentes contaminantes entran en contacto con el agua (Sigler, A. y Bauder, J., s.f.).

La prueba de nitratos solo se realizó en la planta de tratamiento secundario de San Germán según la planta de tratamiento esta prueba no se realiza en la planta de tratamiento terciario en Lajas. En su mayoría, los resultados de nitratos para los distintos días en que se realizaron las prueba demuestran niveles constantes entre 4.7 mg/l a 9 mg/l. En La Agencia de Protección Ambiental se estipula que para agua de calidad para beber y no afectar la salud humana debe presentar una remoción del nutriente nitrato de 10 mg/l. Estos resultados se concentran en ser indicativos de que el nitrato controlado puede mantenerse en bajos niveles en el agua. Los abonos suelen contener una cantidad importante de compuestos nitrogenados, como los nitratos, que en proporciones adecuadas mejoran el crecimiento de las plantaciones y aumentan su rendimiento, sin embargo, cuando estos compuestos se encuentran en cantidades demasiado altas para que sean absorbidos por las plantas, se infiltran a través del suelo y alcanzan las aguas subterráneas, contaminando pozos y acuíferos (Palomares, A.E., s.f.). Así que, es posible que la presencia de los nitratos en altos niveles en los efluentes pudiese crear efectos negativos a la hora de irrigar los predios en una operación agrícola.

VS.

Figura 26. Resultados de VS de reactor 1 (unidad: mg/l) Vs. RAS (unidad: mg/l) de la planta de tratamiento secundario en San Germán

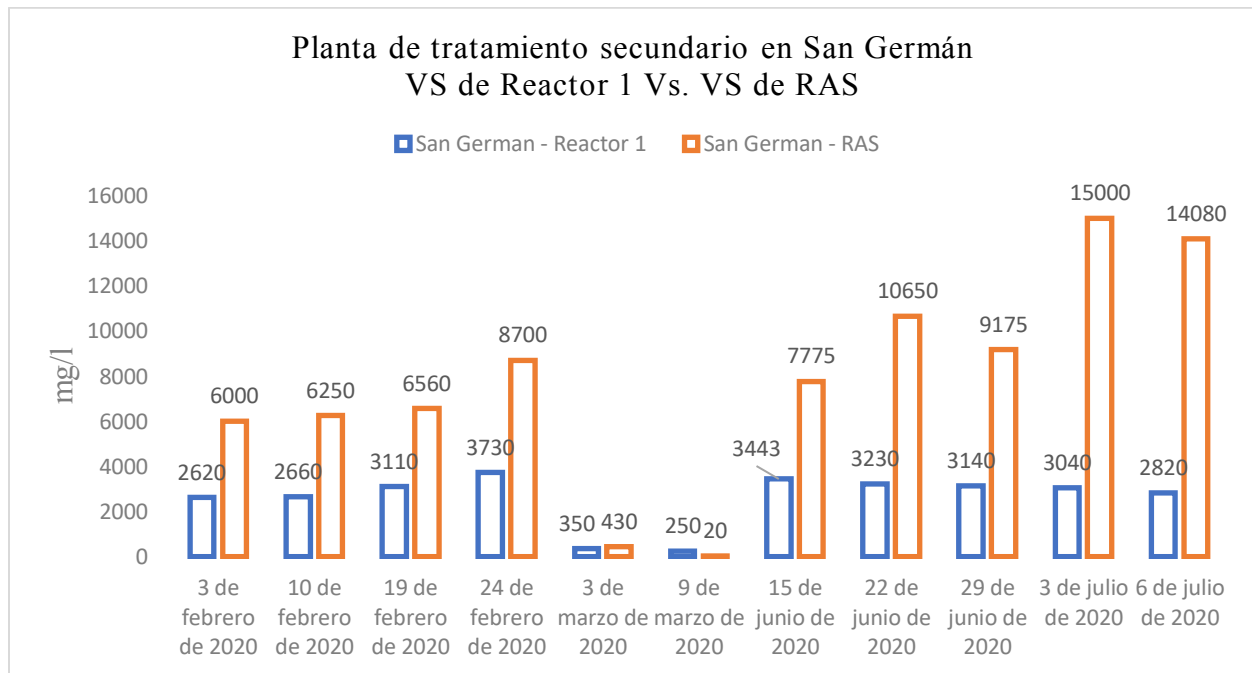
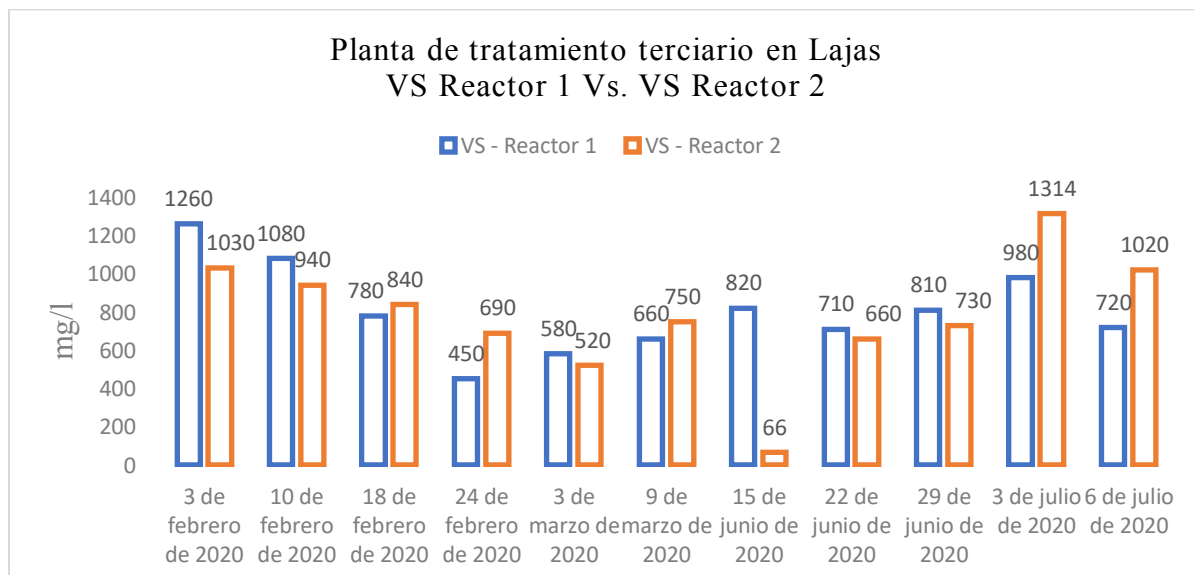


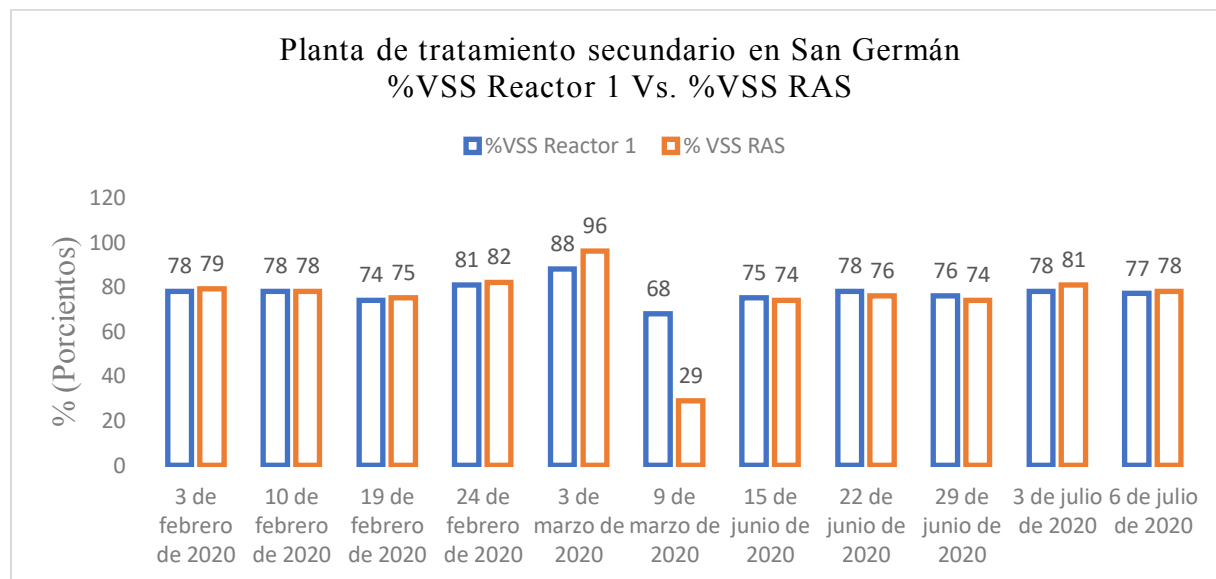
Figura 27. Resultados de VS de reactor 1 (unidad: mg/l) vs. Reactor 2 (unidad: mg/l) en la planta de tratamiento terciario en Lajas



En las pruebas del sólido suspendido volátiles (VS), en las plantas de San Germán se identificó que los datos obtenidos para el RAS fueron más cambiantes que los obtenidos por el reactor 1. Para el RAS hubo un rango de datos entre un mínimo de 20 mg/l y 430 mg/l a un máximo de hasta 15,000 mg/l. En cuanto para Reactor 1 los rangos estuvieron entre mínimo de 250 mg/l y 350 mg/l a un máximo de 3,730 mg/l. Si se obtuvo altos datos de los sólidos suspendidos volátiles, es posible ajustar o actuar en la retención del tiempo de retención al momento de recirculación para que pueda bajar estos resultados. En contraste con la planta de San Germán, los datos contenidos para la planta de Lajas para el reactor 1 fueron de 450 mg/l a 1,260 mg/l. Para el reactor 2 de Lajas su rango en datos fue entre 66 mg/l a 1,314 mg/l.

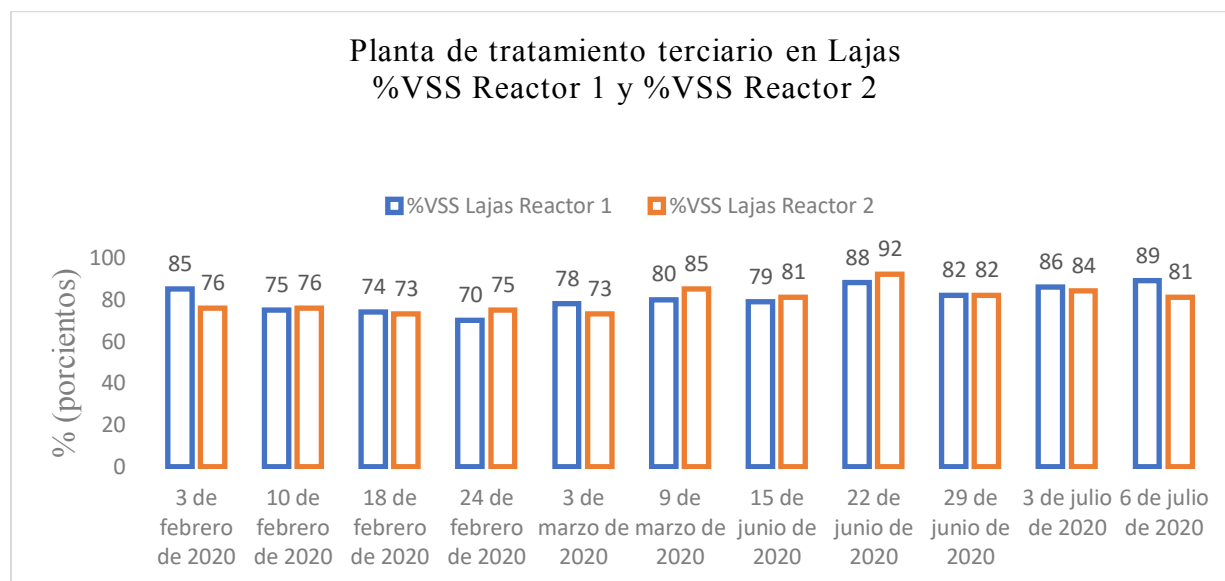
%VSS

Figura 28. Resultados en la planta de tratamiento secundario en San Germán, VSS% reactor 1 vs. VSS% RAS



El porcentaje de sólidos en suspensión volátiles (VSS%) incurrió en resultados de: 68% a 88% para el reactor 1 en la planta de San Germán, por el contrario, los VSS%, para el RAS en la planta de San Germán fueron desde 29% a 96%. Estos resultados muestran un porcentaje de VSS que indica la remoción de estos sólidos. Obtener un porcentaje de 68% y 29% no es beneficioso para el momento en que se descargue el agua, tendría que haber por parte del operador de la planta un reajuste en los procesos de la planta de tratamiento, Debe de haber un alto porcentaje de remoción.

Figura 29. Resultados en la planta de tratamiento terciario en Lajas, VSS% reactor 1 vs. VSS% reactor 2



En la planta de Lajas el VSS% del reactor 1 arrojó 70% a 88% mientras que, para el reactor 2 en la planta de Lajas mostraron un porcentaje de remoción entre 73% a 92%. Estos resultados muestran que en los diferentes días de muestras ambas plantas de tratamientos han arrojado un porcentaje similar en la acción de remoción en aguas residuales. El porcentaje más bajo de remoción de sólidos suspendidos volátiles (VSS% RAS) fue identificado en la planta de San Germán el día 9 de marzo del 2020 con un 29%, esto pudo haber sido por un desperfecto mecánico el cual no ayudó en el proceso. Por otra parte, el 3 de marzo del 2020, la planta de tratamiento de San Germán, presentó un porcentaje alto en la remoción de sólidos suspendidos volátiles (VSS% RAS) con 96%, mientras que en los resultados para la planta de tratamiento de Lajas hubo el más alto nivel de 92% para los %VSS reactor 2, esto en la fecha del 22 de junio del 2020. Cuando se comparan ambas plantas de tratamiento se observa una mejor remoción en base a los datos del porcentaje en la planta de tratamiento terciario.

Enterococo

Figura 30. Resultados de la densidad de Enterococo en la planta de tratamiento secundario en San Germán

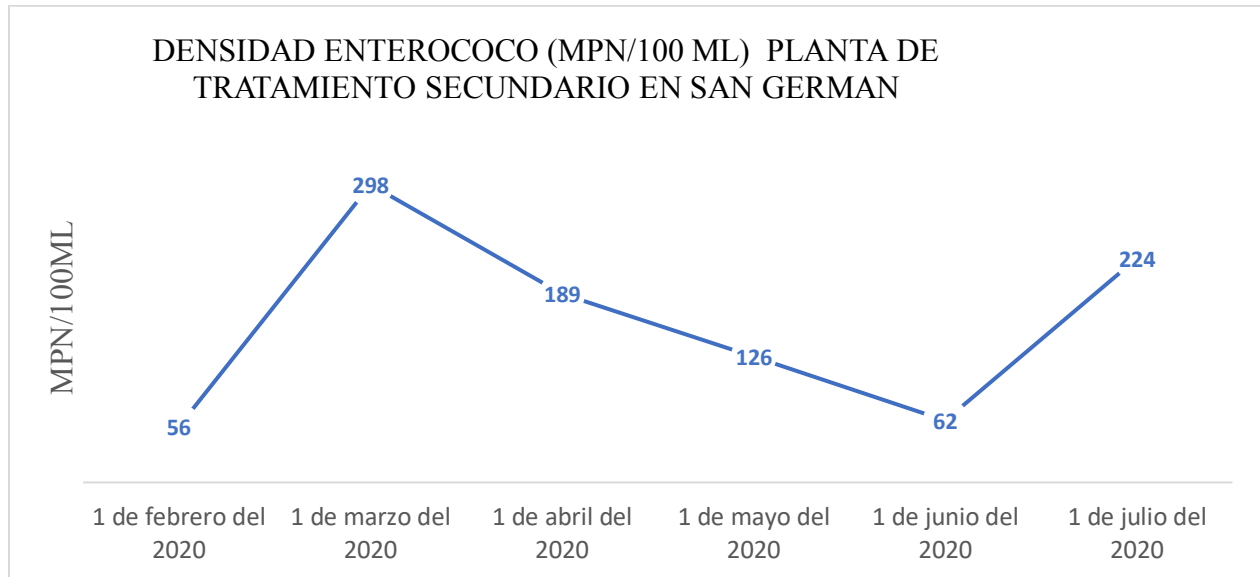
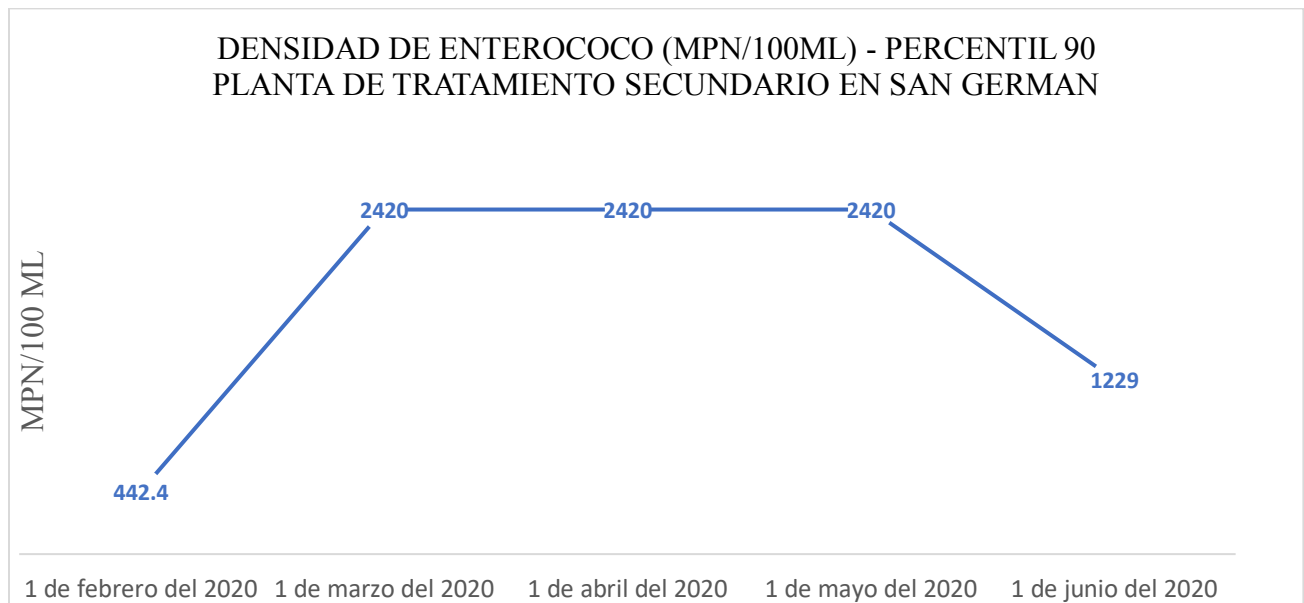


Figura 31. Resultados de densidad de Enterococo (MPN/100ml) – percentil 90, en planta de tratamiento secundario en San Germán



Los resultados bacteriológicos fueron obtenidos de análisis de muestras de las descargas de la planta de alcantarillados y potables por parte de Laboratorio Central de Caguas, P.R (A.A.A.). Entre los resultados de la Figura 30., se observó que hubo un máximo de densidad en los enterococos de 298 MPN/100 ml. En esa figura se identificó que en el mes de febrero del 2020 fue el momento en que se presentó un mínimo de densidad de enterococos. También una baja densidad de enterococos se reflejó en el mes de junio del 2020 con un resultado de 62 MPN/100 ml. Es importante identificar la presencia de los enterococos en los datos, esta bacteria no es segura, ya que pueden traer problemas al medioambiente y a la salud humana. Es una bacteria fuerte que puede aguantar condiciones fuertes en el agua y el ambiente, es por esto que, es necesario tomar precaución a la hora de reusar el agua para propósitos agrícolas ya que el agricultor puede contraer una enfermedad por la bacteria y continuar contaminando.

La gráfica de la Figura 31. demuestra los resultados realizados por parte de A.A.A., Laboratorio Central de Caguas P.R., en esta gráfica se observa que de los meses de marzo 2020 a mayo 2020 hubo un consistente parámetro de 2420 mpn/100ml. Luego se observa que disminuyó para el mes de junio como resultado 1229 mpn/100ml, por lo tanto, estos datos también señalan presencia de bacterias en el agua.

E.coli.

Figura 32. Resultados de *E.coli* en planta de tratamiento terciario en Lajas



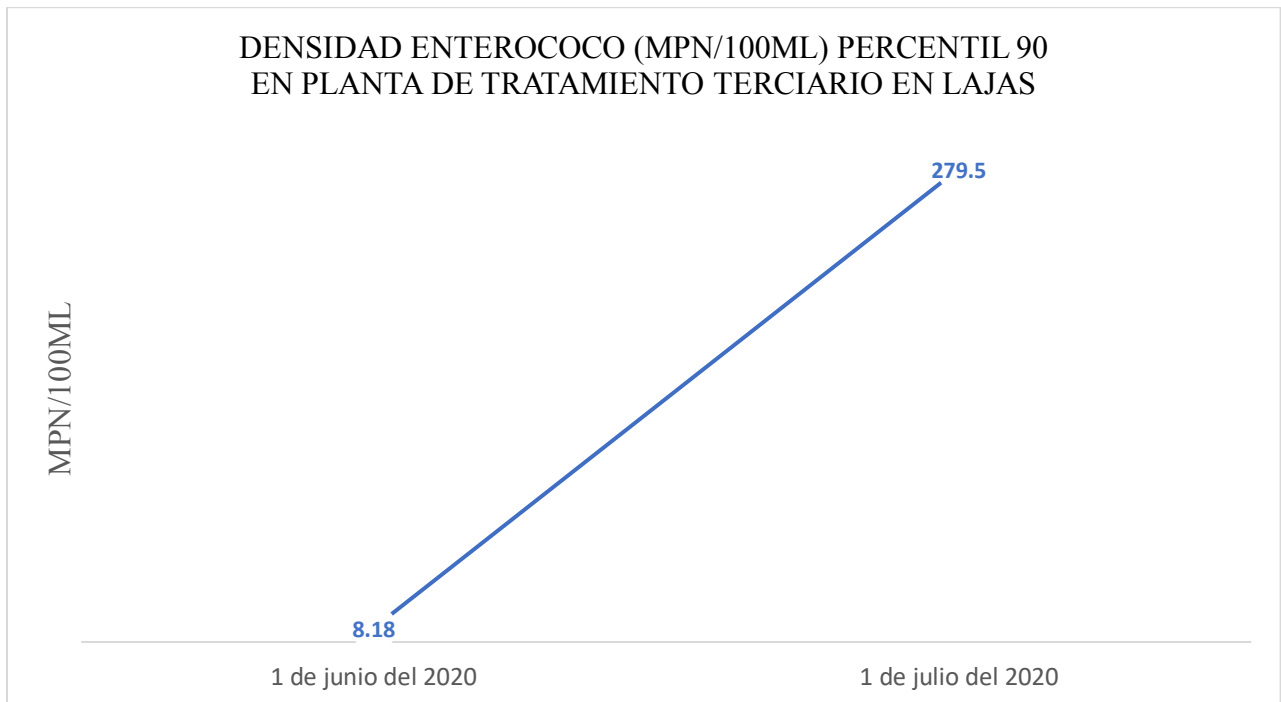
Esta gráfica demuestra los resultados realizados por parte de A.A.A., Laboratorio Central de Caguas P.R. Estos resultados identifican que hubo presencia de *E.coli* en las aguas residuales de Lajas, las muestras fueron realizadas en zonas de descargas. Se observó que las pruebas para *E.coli* fueron realizadas en las fechas de febrero a mayo, una por cada mes. Las pruebas no fueron ejecutadas para las fechas de junio y julio dado a que los permisos para la planta de Lajas fueron cambiados en esas fechas. El permiso para muestrear las aguas destinadas a la descarga fue cambiado para realizar pruebas de Enterococos. La gráfica presenta resultados beneficiosos para la descarga solo en los meses de febrero, abril y mayo. En el mes de marzo se determinó que obtuvo un porcentaje de *E.coli* de 20%. Este gran cambio de resultado altera el constante resultado de 0% *E.coli* en la descarga.. Una posible razón del gran cambio reflejado en los resultados, pudo ocasionarlo algún problema mecánico, problemas en la cámara de UV o tal vez el tiempo de retención de luz ultravioleta.

Enterococo

Figura 33. Resultado de la densidad de Enterococo en la planta de tratamiento terciario en Lajas



Figura 34. Resultados de la densidad de Enterococo (MPN/100ML) – Percentil 90, en la planta de tratamiento terciario en Lajas



En la gráfica de la densidad de Enterococo (MPN/100ML) en la planta de tratamiento de Lajas, muestra los resultados obtenidos de análisis de muestras de las descargas de las plantas de alcantarillados y potables por parte de Laboratorio Central de Caguas, P.R (A.A.A.). Los resultados reflejan una densidad baja de Enterococos en la planta de tratamiento de Lajas. Solo se obtuvo información del mes de junio y julio 2020, dado a que a partir del mes de junio cambiaron los permisos de descargas en la planta de Lajas. En estos resultados existe la presencia de Enterococos en las aguas residuales tratadas de la planta de tratamiento de Lajas, pero se identifica que el mes de junio fue el resultado más bajo que julio. Los resultados se presentaron en un rango de 7 MPN/ml a 27 MPN/ml. Por otra parte, en la gráfica de densidad de Enterococo – percentil 90, se muestra para los meses de junio y julio del 2020 presencia de esta bacteria lo cual debe de haber precaución al momento de manejar estas aguas. Entre los dos meses, para el mes de Julio del 2020 es el mes que obtuvo un resultado más alto.

Tabla 2. Posibles factores que conllevan a los resultados obtenidos

1) Climatología: Por ejemplo: - Lluvias extremas
2) Desperfectos mecánicos: Por ejemplo: - Daños en motores - Daños en rotores - Daños en bombas
3) Tiempo de retención en los procesos realizados en las plantas de tratamiento
4) Problemas en la cámara de luz ultravioleta: Por ejemplo: - Bombillas de luz ultravioleta defectuosas - Baja intensidad en la cámara de luz ultravioleta
5) Descargas ilícitas por parte de ciudadanos

Conclusión

Los resultados presentados anteriormente muestran algunos parámetros con altos niveles, por lo que, al momento de considerar reusar el agua residual tratada para propósitos de una irrigación agrícolas tendrían que tomarse en cuentas los datos anteriormente presentados. En algunas ocasiones surgieron contratiempos en ambas plantas de tratamientos, por ejemplo, lluvias extremas, climatología, cambios en los tiempos de retenciones, desperfectos mecánicos como: rotores, bombas o motores dañados y la gran cantidad de afluentes entrado a las plantas de tratamientos con alta materia orgánica y altos nutrientes arrastrados por escorrentías. No se descarta que haya habido descargas ilícitas en algún momento en ese periodo de tiempo por parte de la ciudadanía, esto puede ser un factor para los resultados obtenidos. Por consiguiente, estos factores pudieron haber sido causantes de que en algunos días de análisis los resultados generaron datos fuera del rango establecido, primordialmente en los efluentes de ambas plantas de tratamientos que son los que son dirigidos a los cuerpos de agua. Es clave que la operación mecánica este apta dando un buen servicio en la operación de las plantas, ya que al ocurrir daños mecánicos promueve a obtener resultados no beneficiosos. Por tanto, antes de realizar futuras práctica de reúso es necesario identificar fallas en la operación de la planta de tratamiento.

Es importante destacar que hubo presencia de las bacterias *E.coli* y Enterococos en el agua. *E.coli* estuvo presente en la planta de tratamiento terciario de Lajas y Enterococos estuvo presente en ambas plantas de tratamientos. Los enterococos pueden adaptarse fácilmente a distintos lugares, por lo que, no es beneficioso que el agua que se utilice en un futuro para irrigación contenga alta concentración de microorganismos. Es por esto que, los enterococos presentes en el agua sirven de alerta a posibles contaminaciones ya que estas bacterias suelen ser resistentes a ambientes extremos, por tanto, son desarrolladoras de enfermedades en los humanos

y en el ambiente. La planta de tratamiento terciario de Lajas resultó con una leve presencia de esta bacteria entre los meses de junio a julio, a diferencias de los resultados en la planta de tratamientos de San Germán, los cuales se observan datos más elevados.

Por otra parte, las aguas residuales tratadas pueden satisfacer algunas necesidades en el mundo ya que es un recurso valioso, siempre y cuando cumplan con los rangos establecidos para cada país. Es importante seguir manteniendo un sistema de tratamiento para las aguas residuales, dado a que, estos tratamientos ayudan al medio ambiente, a la salud humana y será beneficioso si en un futuro se utiliza la irrigación de aguas residuales para cultivos forrajeros o para otras operaciones en el ámbito agrícola.

A pesar de que hubo resultado en los que sobrepasaron el límite de rango en algunos de los días analizados, podemos destacar que ambas plantas de tratamientos son efectivas al momento de eliminación de materia orgánica; TSS, VSS y TDS en los efluentes. En su mayoría se obtuvieron resultados de una buena remoción. Como versión positiva, se destacaron varios parámetros en los que se mantuvieron en cumplimiento con los rangos establecidos por la EPA, para el reusó del agua: pH, temperatura, conductividad, nitrato, sales, entre otros.

Se demostró que, en ocasiones, ambas plantas de tratamientos descargan con bajos nutrientes a los cuerpos de agua, esto si no ocurre una situación que altere el proceso de tratamiento o la capacidad del afluente entrando a la planta. Considerando que los nutrientes como el nitrato y nitrito en las aguas residuales se puede controlar en gran cantidad, esto puede ser beneficioso para continuar futuros estudios acerca de la irrigación de agua residual tratada para operación agrícola de cultivos no comestibles. Es posible que los bajos niveles de nitratos que se encuentren en las aguas residuales ya tratadas (efluentes), pueden actuar como fertilizantes para los cultivos agrícolas, dado a que los cultivos una vez sembrados requieren de

agua y de nutrientes para sobrevivir y desarrollarse, por ende, estas aguas residuales tratada tiene ambos requerimientos (agua y nutriente) necesarios para el cultivo, pero sería importante y necesario seguir evaluando y estudiando esta hipótesis.

Por último, con los resultados obtenidos se concluye que al momento que se realizaron las pruebas estas aguas no estaban completamente aptas para el reúso inmediato a riego agrícolas para cultivos no comestibles. Hubo ciertos parámetros en distintas fechas de muestreo los cuales no estuvieron dentro de los rangos establecidos para reúso de agua residual y hubo presencia de bacterias, lo cual no es saludable para el ambiente. Por otra parte, para poder completar una decisión es necesario obtener datos en pruebas de cloro residual, demanda bioquímica del agua y coliformes totales, los cuales no se realizaron en este estudio. Incluso, es importante antes de comenzar este tipo de riego agrícola, poder realizar en un futuro más estudios investigativos y análisis de muestras para que de esta manera haya suficientes datos que sustenten la práctica de reúso de agua residual para riego agrícola en cultivos no comestibles.

Recomendaciones

Se recomienda que ambas plantas de tratamientos mantengan un monitoreo constante del mantenimiento de los equipos, por ejemplo: motores, rotores, luces ultravioletas, entre otros para evitar los contratiempos y que estos no afecten los resultados de los análisis y en cierto modo la eficiencia de la planta. Entre las recomendaciones, verificar la intensidad en las luces ultravioletas y si es necesario aumentar la intensidad para que estas puedan actuar aún más efectivas al momento de la desinfección. También, es importante crear una retención de tiempo adicional para los tratamientos en ambas plantas cuando estas lo ameriten.

En cuanto a recomendaciones para los ciudadanos, es importante tomar conciencia acerca de la utilización del agua. Además, es necesario orientar a los ciudadanos acerca de cómo utilizar el agua para un mejor futuro ambiental. También, se debe educar a los ciudadanos acerca de la reutilización del recurso de agua, para un futuro seguro.

Algunas recomendaciones primarias son: realizar al presente estudio un análisis estadístico, también, enfatizar nuevas pruebas bacteriológicas, pruebas para el cloro residual y para el DBO. Entre futuros estudios una vez terminada esta tesis, se pueden crear proyectos investigativos acerca de los costos y la inyección económica que puede provocar la venta de estas aguas residuales en Puerto Rico. Por consiguiente, si en un futuro se efectúa el proveer o vender las aguas residuales tratadas a agricultores y a otras áreas, es adecuado desarrollar foros educativos, directrices, plan económico y reglamentos o manual para un mejor aporte.

También es importante ejecutar estudios futuros en donde conlleven la irrigación de aguas residuales tratadas en muestras de suelo agrícola para que de esta manera se pueda detectar sus efectos positivos y negativos en el suelo y en el rendimiento del cultivo. Otros estudios que pudiesen ser realizados en un futuro es análisis y comparación de datos en ambos periodos de

pruebas: pruebas realizadas antes del cierre total del país a causa de la pandemia Covid-19 y
pruebas realizadas después de la reapertura del país tras el paso del Covid-19.

REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2016). *Agua - contaminación por nutrientes*. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutriente>
- Aguilar Escalante, S. (2019). Tratamiento primario, secundario y terciario en la depuración del agua residual. *AxisIMA®*. Recuperado de <http://axisima.com/tratamientos-primario-secundario-y-terciario-en-la-depuracion-de-agua-residual/>
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados [AAA]. (s.f.). Sistemas de alcantarillado. *Acueductospr*. Recuperado de <http://www.acueductospr.com/sistema-de-alcantarillados>
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico [AAA]. (2013). *Manual sistema de control de proceso, planta de alcantarillado sanitario de San Germán* (NPDES Núm. PR0020818). Puerto Rico: ETAG Corporation.
- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico [AAA]. (2013). *Manual sistema de control de proceso, planta de alcantarillado sanitario de Lajas* (NPDES Núm. PR0020575). Puerto Rico: ETAG Corporation.
- Arnedo, I., Bracho, M., Díaz Suárez, O., y Botero, L. (2008). Técnicas para la detección de *Cryptosporidium* sp. en sistemas de tratamiento de agua residual. *Kasmera*, 36(2), 120 – 128.
- Ayers, R. S., y Westcot, D. W. (1994). Water quality for agriculture. *FAO irrigation and drainage paper*. 29 (1).

- Bolaños - Alfaro, J. D., Cordero - Castro, G., y Segura - Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27. doi: <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- Calixta Ortiz, M. y Morales - Agrinzoni, C.R. (2016). Percepción sobre la reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura en Puerto Rico. *Perspectiva en Asuntos Ambientales*, 5, 83-95. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/313877723_percepcion_sobre_la_reutilizacion_de_aguas_residuales_tratadas_en_la_agricultura_en_puerto_rico
- Céspedes Bernal, D. N. (2019). Tratamiento terciario de aguas residuales no domésticas empleando a *Chlorella* sp. y conversión de la biomasa microbiana por pirolisis lenta. Bogotá D.C: *Pontificia Universidad Javeriana*, 1-134. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/43200>
- Centre for affordable water and sanitation technology [CAWST]. (2011). Introducción al tratamiento del agua a nivel domiciliario y su almacenamiento seguro. *CAWST*, 1-270. Recuperado de https://www.paho.org/par/index.php?option=com_docman&view=download&alias=502-introduccion-al-tratamiento-del-agua-a-nivel-domiciliario&category_slug=contaminacion&Itemid=253
- Centro de Servicios Agrícolas [CSA]. (s.f.). *Acondicionamiento de suelos*. Recuperado de <https://www.centrodeserviciosagricolas.com/info/acondicionamiento-de-suelos>

- Cisneros Estrada, O. X., Saucedo Rojas, H. E. y Rivas López, H. (2013). Guía de referencia para el reúso de las aguas residuales en riego agrícola. *Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA)*, 1 -28.
- Cordero, H. (2016). Proyecto de riego de pasto con aguas residuales de vaquerías. *Perspectivas en asuntos ambientales, Ponencia 73*, 74 – 76.
- Del Pozo Rodríguez P. P. (2002). Bases ecofisiológicas para el manejo de los pastos tropicales. *Pastos*. 32 (2), 109 – 137.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico [DRNA]. (2007). Declaración de impacto ambiental estratégica actualizada plan integral de recursos de aguas de Puerto Rico. *DRNA*. Recuperado de <https://bibliotecalegalambiental.files.wordpress.com/2013/12/plan-de-aguas-2007.pdf>
- Díaz Conde, A. (2016). Plan de reúso de aguas usadas en Puerto Rico. *Perspectivas en asuntos ambientales*, 5, 22 – 26.
- Díaz Pérez, P. M., Zhurbenko, R., Lobaina Rodríguez, R. T., Quiñones Pérez, P. D., y Rodríguez, M. C. (2014). Determinación cuantitativa de enterococos en aguas utilizando un método cromogénico alternativo. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 33(1). 1-11.
- Espigares García, M. y Pérez López, J. A. (s.f). *Aguas residuales composición*. Recuperado de 15/12/2017 Recurso:http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

- Gatto D' Andrea, M. L., Garcés, V., Salas Barboza, G., Liberal, V. I., Rodríguez Álvarez, S. y Seghezze, L. (2014). Reúso de aguas residuales domesticas en la actividad agropecuaria: El caso de Cafayate, Salta. *Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2, 1.31-1.40.
- Google. (s.f). [Foto Satelitar Google Maps, localización de planta de tratamiento secundaria de aguas domésticas de San Germán, P.R.]. Recuperado: maps.google.com
- Google. (s.f). [Foto Satelitar Google Maps, localización de planta de tratamiento terciaria de aguas domésticas de Lajas, P.R.]. Recuperado: maps.google.com
- Google. (s.f). [Foto Satelitar Google Maps, localización de zona geográfica del sector agrícola del municipio de San Germán, P.R.]. Recuperado: maps.google.com
- Google. (s.f). [Foto Satelitar Google Maps, localización de zona geográfica del sector agrícola del municipio de Lajas, P.R.]. Recuperado: maps.google.com
- Guerra Díaz, L., Gómez Infante, D. y Sarmiento Sera, A. (2001). Desinfección del agua con luz ultravioleta y energía solar fotovoltaica. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 22(4), 1- 4.
- Guillemes Peira, A. (2014). Aplicación de la oxidación avanzada en la desinfección de aguas residuales. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 35(3), 60 – 72.
- Gutierrez Diaz, J. (2003). Reuso de agua y nutrientes. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*. 3(4).
- Hernández Acosta, E., Quiñones Aguilar, E. E., Cristóbal Acevedo, D. y Rubinos - Panta, J. E. (2014). Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 20 (1), 89 – 100. Recuperado de <https://www.chapingo.mx/revistas/>

Kourous, G. (2017). Explora nuevos usos para las aguas residuales en la agricultura.

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura [FAO].

Recuperado de <http://www.fao.org/news/story/es/item/463465/icode>

Labatut, B. (2017). Reutilización de aguas residuales urbanas puede favorecer a la agricultura y

disminuir presión sobre los recursos naturales. *Organización de las Naciones Unidas*

para la alimentación y la agricultura [FAO]. Recuperado de

<http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/853862/>

León Suematsu, G. (1995). Parámetros de calidad para el uso de residuales. Guías de

calidad de efluentes para la protección de la salud. *CEPIS/OPS*, 1 – 13. Recuperado de

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/LE%C3%93N%201995.%20Par%C3%A1metro%20de%20calidad%20para%20el%20uso%20de%20aguas%20residual%20es.pdf

Lloveras, J. (1999). *El cultivo de la alfalfa y su relación con el medio ambiente*. Pastos 29 (2),

145-167. Recuperado de

<http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/viewFile/1265/1269>

Luna Pabello, V. M.; Ramírez Carrillo, H. F. (2004). Medios de soporte alternativos para la

remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista Internacional de Contaminación*

Ambiental, 20 (1), 31-38.

Marjani Zadeh, S., Mateo Sagasta, J., Antoniou, A., Qadir, M., Chilton, J., Carrion

Crespo, C., De Souza, M., Unver, O., Fattori, V., Zandaryaa, S. y Medlicott, K. (2017).

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos

2017, Aguas residuales el recurso no explotado. *UNESCO*, 86-94. Recuperado de

http://agricultura.gencat.cat/web/.content/de_departament/de02_estadistiques_observatori

s/27_butlletins/02_butlletins_nd/documents_nd/fitxers_estatics_nd/2017/0191_2017_MA
_RecursosHidrics_Aigues-residuals-mon-2017.pdf

Mateo - Sagasta, J. (2017). Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe: Estado, principios y necesidades. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, Chile [FAO]. Recuperado de <http://www.fao.org/3/i7748s/i7748s.pdf>

Méndez F. et al. (2006). Uso de las aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas, en la agricultura urbana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15 (3), 17 - 21.

Monge Redondo, M. A. (2017). *Riego agrícola con agua regenerada. iagua*. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/riego-agricola-agua-regenerada>

Noticias ONU. (2017). Recuperado de <https://news.un.org/es/>

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (s.f.). *Agua*. Recuperado de <https://www.un.org/es/global-issues/water>

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura [FAO]. (2017). Reutilización de aguas residuales urbanas puede favorecer a la agricultura y disminuir presión sobre los recursos naturales. *FAO*. Recuperado de <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/853862/>

Organización Mundial de la Salud (2018). *Agua limpia y sanamiento, procesos en el tratamiento de las aguas residuales*. Organización Mundial de la Salud.

Palomares, A.E. (s.f.) Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento. Instituto de Tecnología Química (UPV – CSIC), Ministro de Economía y Competitividad Gobierno de España. Recuperado <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>

- Passarini, K. C., Gamarra, F. M. C., Vanalle, R. M. y Santana, J. C. C. (2011). Reutilización de las aguas residuales en la irrigación de plantas y en la recuperación de los suelos. *Información tecnológica*, 23 (1), 57 – 64.
- Pérez Díaz, J.P., Peña Cervantes, E., López Cervantes, R. y Hernández Torres, I.M. (2016). Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada. *Idesia (Arica)*, 34 (1), 19 - 25.
- Pérez Gutiérrez, A., Dzul Mukul, C.R., Borges Gómez, L.del C., Latournerie Moreno, L., Ruiz Sánchez, E. y Ayora Ricald, G. (2015). Uso potencial de aguas residuales de criaderos de cerdo en la producción de *Capsicum chinense*. *Rev. Fitotec.Mex*, 38 (4), 383 - 387.
- Pound, B. (1999). Cultivos de cobertura para la agricultura sostenible en América Latina. En: M.D. Sánchez, y M. Rosales, editores, Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica. *FAO, Roma, ITA*, 143-166.
- Plevich, J. O., Delgado, A. R. S., Saroff, C., Tarico, J. C., Crespi, R. J., y Barotto, O. M. (2012). El cultivo de alfalfa utilizando agua de perforación, agua residual urbana y precipitaciones. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (12), 1353 - 1358.
- Quercuslab. (2018). Efectos de la temperatura en la medida del pH. *Quercusblog*. Recuperado de <https://quercuslab.es/blog/efectos-de-la-temperatura-en-la-medida-del-ph/>
- Quiñones, F. y Guerrero, R. (s.f.) *Plan de reúso de aguas usadas de Puerto Rico*. Recuperado de https://www.recursoaguapuertorico.com/InformeReuso_Plan_Aguas_22nov_04.pdf
- Ramón Zamora, F., Rodríguez Guevara, N. J., Torres Rodríguez, D. G. y Yendis Colina, H. J. (2009). Uso de agua residual y contenido de materia orgánica y biomasa microbiana en suelos de la llanura de Coro, Venezuela. *Agric. Tec. Mex*, 35 (2), 211 – 218.

Reta Sánchez, D. G., Figueroa Viramontes, U., Serrato Corona, J. S., Quiroga Garza, H. M.,

Gaytán Mascorro, A., y Cueto Wong, J. A. (2015). Potencial forrajero y productividad del agua en patrones de cultivos alternativos. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 6 (2), 153 -170. Recuperado de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242015000200003&lng=es&tlng=es

Rivas Lucero, B. A, Nevares Moorillon, V. G., Bautista Margulis, R. G., Pérez Hernández, A. y

Saucedo Terán, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. *Agrociencia*, 37 (2), 157 – 166. Recuperado de

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237206>

Rodríguez, C. (2016). Tipos de aguas residuales: por qué es importantes conocerlas. *Hidrotec*.

Recuperado de <https://www.hidrotec.com/blog/tipos-de-aguas-residuales/>

Rodríguez Pastrana, H. I. (s.f). Época de lluvias, ¿época de parásitos? *Universidad de Puerto*

Rico, Recinto de Mayagüez, Colegio de Ciencias Agrícolas, Departamento de Industrias Pecuarias, Servicios de Extensión Agrícolas. Recuperado de

http://academic.uprm.edu/rodriguezh/HTMLobj-107/Carta_Circular_Mayo_Par_sitos.pdf

Rodríguez Pimentel, H. (s.f). Las aguas residuales y sus efectos contaminantes. *iagua*.

Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>

- Rodríguez Vida, F.J. (2003). Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. *Madrid, España. Díaz de Santos, S.A.* Recuperado de https://books.google.com.pr/books?hl=es&lr=&id=xAvNbixfFpcC&oi=fnd&pg=PA13&dq=tratamiento+agua+ozono&ots=NeGcj17Ux_&sig=R58ikIBbR82MAmkog9EnbB7F1-s&redir_esc=y#v=onepage&q=tratamiento%20agua%20ozono&f=false
- Ruiz Buehl, L. M. (2006). Las Ciencias Ambientales en Puerto Rico. *Escuela de Ciencias y Tecnología Universidad del Turabo*, 7 – 77.
- Salazar Moreno, R., Rojano Aguilar, A., & López Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y ciencias del agua*, 5 (2), 177 – 183.
- Segura Pérez, M. L., Contreras París, J. I., Granados García, M. R. y Martín Expósito, E. (s.f.). Utilización de agua residual depurada en fertiirrigación de cultivos hortícolas. *Andalucía: Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera*. Recuperado de www.juntadeandalucia.es
- Servicio de información comunitario sobre investigación y desarrollo [Cordis]. (s.f.). *Riego de cultivos con aguas residuales*. Recuperado de <https://cordis.europa.eu/article/id/80805-irrigating-crop-production-with-wastewater/es>
- Shawn Whitmer, PE y Heather Jeanning, PE. (2015). Cambios en los nutrientes de las aguas residenciales generan ahorros para los dueños de plantas de papel. *Pulp & Paper International*.
- Sigler, W. A. y Bauder, J. (s.f.). Educación en el agua de pozo, nitrito y nitrato. *Universidad Estatal de Montana, Programa de extensión en calidad del agua departamento de la tierra y ciencias ambientales*. Recuperado http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Nitrate%202012-11-15-SP.pdf

- Silva, J., Torres Lozada, P. y Madera, C. (2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. *Agronomía Colombiana* 26 (2) 347 – 359.
- Sorderberg, C. A. P., (2016). Guía de EPA - 2012 para la reutilización de aguas residuales para la agricultura. *Perspectivas en Asuntos Ambientales*, 5, 13 – 21
- Tratamiento BOD y COD con ozono (s.f). Recuperado <https://www.ozonetech.com>
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, desinfección con luz ultravioleta. *EPA*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf>
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (s.f.). Introducción a la ley de agua limpia. *Watershed Academy Web, 1 - 101*. Recuperado de https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion_a_la_Ley_de_Aqua_Limpia.pdf
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (2004). Guidelines for water reuse. *National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development Cincinnati, Ohio*, 1 – 450
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (2012). Guidelines for water reuse. *National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development Cincinnati, Ohio*, 1 – 643.
- Valbuena, D., Díaz Suárez, O., Botero Ledesma, L. y Cheng Ng, R. (2002). Detección de helmintos intestinales y bacterias indicadoras de contaminación en aguas residuales, tratadas y no tratadas. *Asociación Interciencia*, 27 (12), 710 - 714.

- Veliz Flores, R. R., Arones Medina, E. G., Palomino Malpartida, Y. G., Huincho Rodríguez, R. (2018). Desinfecciones del efluente secundario de la planta de agua residual de Ayacucho con radiación ultravioleta para su reutilización en riego agrícola. *Rev.Soc.Quím. Perú*, 84 (1), 41 – 56.
- Villeta Trigo, J. A. (2016). El impacto económico de la reutilización de las aguas residuales. *Perspectivas en asuntos ambientales. Ponencia 51*, 1 - 6.
- Vivanco Estrada, R. A., Gavi Reyes, F., Peña Cabriaes, J. J. y Martínez Hernández J. de J. (2000). Flujos de nitrógeno en un suelo cultivado con forrajes y regado con agua residual urbana. *Terra* 19, 301 - 308.
- Wikiwater (2013). *E56 - El riego por reciclaje de aguas residuales. Wikiwater*. Recuperado de https://wikiwater.fr/spip.php?page=article_pdf&id_article=299
- Winpenny, J., Heinz, I. y Koo-Oshima, S. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Informe sobre temas hídricos. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]*, 35. Recuperado de <http://www.fao.org/3/i1629s/i1629s.pdf>
- World Health Organization. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: policy and regulatory aspects. *World Health Organization*. (1), 1 - 100. Recuperado de <http://www.who.int>
- Zayas Oliveras, H. (2006). Análisis de Veinte años en la lucha ambiental de Puerto Rico del 1,980 al 2,000. *Universidad Interamericana de Puerto Rico, Recinto de San German*, 1-162.

ANEJOS

Anejo A.

Carta de propuesta investigativa para la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados:



5 de marzo de 2019

Ing. Joel Lugo Rosa
Director Región Oeste
Autoridad de Acueductos y Alcantarillados
Gobierno de Puerto Rico

Estimado Ingeniero Lugo:

Mi nombre es Stephanie M. Rivera Cruz. En el presente, curso estudios en el Programa de Maestría en Ciencias Ambientales en Recursos de Agua y Operaciones de Unidades del Departamento de Biología, Química y Ciencias del Ambiente de la Universidad Interamericana de Puerto Rico del Recinto de San Germán.

Me encuentro en la elaboración del proyecto investigativo (tesis) titulada "Evaluación de agua residual tratada en planta de tratamiento terciario de Lajas para uso de riego agrícola". Los objetivos que dirigirán el estudio son las siguientes: evaluar el agua residual tratada en planta de tratamiento terciario de Lajas, identificar las posibles fuentes de contaminación química o biológica y determinar la eficiencia de esta para ser reusada en riego agrícola.

La finalidad de esta comunicación es solicitar los permisos requeridos para utilizar las facilidades en la planta de tratamiento terciario de Lajas (recopilar muestras de agua) y los laboratorios para realizar las pruebas fisicoquímicas y biológicas en la dependencia que usted dirige. Se efectuarán las siguientes pruebas químicas: pH, fósforo, metales pesados, amonio, nitrato, nitrato, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno. En cuanto, a la prueba biológica que se desea analizar, se encuentra: la determinación de coliformes totales fecales. Es propio señalar que se tomarán todas las medidas de seguridad y asépticas para la recolección y el análisis de las muestras. Asimismo, se le proveerá el permiso para realizar investigaciones y el seguro de accidentes suministrado por la universidad.

La metodología que se empleará para el análisis de la calidad de agua será la siguiente: a) se recolectará muestras de agua (200 ml a 300 ml), durante los meses de agosto a septiembre del corriente año, una vez por cada semana (cinco semanas), b) se formalizará en dos puntos estratégicos: charca principal de la planta de tratamiento en donde se encuentran las aguas residuales y al finalizar el tratamiento terciario, c) se introducirá el agua recolectada en botellas de polietileno previamente identificadas y se colocarán en una nevera portátil, y d) se trasladarán las muestras al laboratorio para realizar las pruebas fisicoquímicas y biológicas.

Este estudio pretenderá la colaboración entre esta prestigiosa agencia gubernamental y la universidad que represento, para desarrollar y aumentar futuras investigaciones en el sector

agrícola y ambiental, y en el manejo de los recursos de agua y operaciones de unidades. La aportación más significativa de este estudio es promover la reutilización de esta agua residual tratada para propósitos de riego agrícola; específicamente, en las cosechas que no son para consumo humano (ej. pasto para ganado) y entablar alianzas entre la Autoridad de Acueductos y Alcantarillado (AAA) con el Departamento de Agricultura (DA), la Asociación de Agricultores (AAPR) u otras identidades agrícolas interesadas en Puerto Rico.

Será un privilegio realizar este estudio en las áreas antes mencionadas y agradezco todo su tiempo y disposición. Si tiene alguna pregunta o duda, favor de comunicarse con la suscribiente | mediante llamada telefónica al: 787- 955-2053 o a través del correo electrónico: stephanie.rivera37@upr.edu

Cordialmente;

Stephanie M. Rivera Cruz
Investigadora

Vo. Bo. Dr. Miguel A. Rivas Vázquez
Director Comité de Tesis

Anejo B.

Autorización de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.

Autorización para llevar a cabo la investigación en las facilidades de las plantas de tratamiento secundario y terciario en San Germán y Lajas, respectivamente, administrada por la AAA:



GOBIERNO DE PUERTO RICO

Autoridad de Acueductos y Alcantarillados

16 de agosto de 2019

Dr. Miguel A. Rivas Vazquez
Director Comité de Tesis
Universidad Interamericana
Recinto de San Germán
miguel_rivas@intersg.edu

RE: PRACTICA ESTUDIANTEL DE MAESTRIA STEPHANIE M. RIVERA CRUZ

Hacemos referencia a la solicitud nos solicita autorización para que la estudiante **Stephanie M. Rivera Cruz** realice práctica estudiantil como parte del Curso de Tesis de Maestría, como parte de su maestría en Ciencia Ambiental, Recursos de aguas y operaciones de unidades en el Departamento de Biología, Química y Ciencias del Ambiente.

Estamos de acuerdo en su propuesta y ansiosos por llevar a cabo este tipo de intercambio. Dicha práctica se podrá realizar en la **Planta de Alcantarillado de San Germán y Lajas** localizada en la Carr. 360, km. 1.4, Barrio Guamá, San Germán y Carr.101, km. 0.5 Bo. Piedras Blancas de Lajas.

La persona contacto en PAS San Germán y PAS Lajas, será el Gerente de Planta el Sr. Jorge Hernandez, puede comunicarse con el Sr. Hernandez al 787-207-4163

Para continuar con los trámites, solicitamos haga llegar los seguros correspondientes y un itinerario de trabajo donde se desglosen las 90 horas de práctica al Departamento de Recursos Humanos Regional y/o llamando al 787-620-2277, Ext. 3349 para orientación.

Nos reiteramos siempre a su orden.

Cordialmente,

Ing. Joel Lugo Rosa, PE. MECE.
Director Regional Ejecutivo
Región Oeste

cfm



Centro Regional de Operaciones OESTE: Urbanización Sultana, Calle Tenerife número 10, Mayagüez, PR 00680

Anejo C.

Contrato entre las partes concernientes; entiéndase, un acuerdo entre la AAA y la UIPR,

Recinto de San Germán:

**Estado Libre Asociado de Puerto Rico
Autoridad de Acueductos y Alcantarillados**

ACUERDO PARA PROYECTO INVESTIGATIVO

—DE LA PRIMERA PARTE: LA AUTORIDAD DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS DE PUERTO RICO, una corporación pública creada por la Ley Núm. 40 de 1 de mayo de 1945, representada en este acto por *Héctor René Rivera Acevedo*, Director de Recursos Humanos de la Región Oeste, casado, mayor de edad y vecino de Mayagüez, Puerto Rico, de aquí en adelante denominado "LA AUTORIDAD".

—DE LA SEGUNDA PARTE: Universidad Interamericana de Puerto Rico, Recinto de San Germán, representada en este acto por la Prof. Agnes Mojica, Rectora, y Dr. Miguel A. Rivas Vázquez, Director de Tesis, # empleado E00341379, compareciendo en su carácter de "Coordinador", mayor de edad y vecino de San Germán, Puerto Rico, de aquí en adelante "LA INSTITUCIÓN ACADÉMICA".

—DE LA TERCERA PARTE: *Stephanie M. Rivera Cruz*, número de estudiante E00534251, mayor de edad, soltera y vecina de Mayagüez, Puerto Rico, de aquí en adelante "LA ESTUDIANTE".

—POR CUANTO: Las partes aquí comparecientes están legalmente capacitados para otorgar el presente Acuerdo y lo llevan a efecto de común acuerdo sujeto a las siguientes:

-----CLASULAS Y CONDICIONES-----

—PRIMERA: LA AUTORIDAD admitirá en Planta Alcantarillado Sanitario de Lajas, Puerto Rico, en adelante Centro de Investigación, a LA ESTUDIANTE, quien realizará el proyecto investigativo para la obtención del grado de maestría en ciencias ambientales de acuerdo a su currículo y autorización académica bajo la supervisión de personal de LA AUTORIDAD. El proyecto investigativo se realizará de octubre 2019 a mayo 2020. LA ESTUDIANTE realizará el proyecto investigativo en un término no mayor de 7.5 horas diarias, ni mayor de 5 días a la semana. El horario de conveniencia para el proyecto investigativo se estipulará por acuerdo entre las partes. Véase Anejo A.

Am

---SEGUNDA: Los horarios y/o el método en que LA ESTUDIANTE realizará el proyecto investigativo será determinado por LA INSTITUCION ACADEMICA en común acuerdo con el empleado designado por LA AUTORIDAD; estableciéndose que durante la realización del proyecto investigativo LA ESTUDIANTE siempre estará acompañada por algún supervisor designado, o su representante.

---TERCERA: LAS PARTES, por mutuo acuerdo, han seleccionado a LA AUTORIDAD como Centro de Investigación por entender que dispone de las facilidades requeridas que permiten ofrecer a LA ESTUDIANTE las experiencias necesarias para lograr los objetivos del curso. Las condiciones del centro, así como las experiencias educativas que se proveerán, permitirán que LA ESTUDIANTE:

- a. Pueda realizar sus tareas en un ambiente de confidencialidad;
- b. logre o alcance los objetivos del proyecto investigativo; e,
- c. integre y aplique el conocimiento teórico del curso.

---CUARTA: El COORDINADOR le asignará a LA ESTUDIANTE aquellas funciones que estime pertinentes de manera que se cumpla con el propósito de los requisitos exigidos por LA INSTITUCION ACADEMICA.

---QUINTA: LA AUTORIDAD designará un miembro de su personal para que coordine con el COORDINADOR de LA INSTITUCION ACADEMICA las experiencias académicas de LA ESTUDIANTE.

---SEXTA: Toda información recopilada por LA ESTUDIANTE en el ejercicio de sus deberes bajo este contrato y la documentación preparada a tales efectos, serán confidenciales y propiedad de la AUTORIDAD, no pudiéndose publicar por ningún medio de comunicación, (incluyendo, pero sin limitarse a, las redes sociales), o ponerse a disposición de otras personas u organizaciones, sin que medie previo consentimiento por escrito del Presidente Ejecutivo o de la persona que para tal propósito éste designe, excepto para dar cumplimiento al objetivo del Programa del Proyecto Investigativo, según lo acordado en el presente contrato. LA ESTUDIANTE no podrá utilizar dicha producción para propósitos ajenos a LA AUTORIDAD.

---SÉPTIMA: LA AUTORIDAD se reserva el derecho a solicitar a LA INSTITUCION ACADEMICA la separación de LA ESTUDIANTE cuando a juicio de LA AUTORIDAD se requiera acción inmediata por la violación a las normas establecidas.

Qm

—**OCTAVA: LA INSTITUCION ACADEMICA**, en coordinación con el operador de la planta o el supervisor designado a esos fines, asignarán a **LA ESTUDIANTE** las funciones que le corresponda realizar para cumplir con el requisito del Proyecto Investigativo y realizarán las evaluaciones correspondientes.

—**NOVENA: LA AUTORIDAD y LA INSTITUCION ACADEMICA** informarán al **LA ESTUDIANTE** sobre las normas que rigen en **LA AUTORIDAD**, así como las normas que regirán el proyecto investigativo.

—**DÉCIMA: LA INSTITUCION ACADEMICA y/o LA ESTUDIANTE** producirán y proveerán aquellos materiales que sean necesarios para la planificación, coordinación, desarrollo y evaluación del proyecto investigativo.

—**UNDÉCIMA: LA INSTITUCION ACADEMICA** será responsable de cualquier reclamación que surja contra **LA AUTORIDAD** como consecuencia de actos y omisiones de **LA ESTUDIANTE**. **LA AUTORIDAD** no se hace responsable por cualquier daño que pueda sufrir **LA ESTUDIANTE** mientras se encuentre en sus predios ni por cualquier daño o perjuicio que pueda causar a terceros. **LA INSTITUCION ACADEMICA** proveerá a **LA ESTUDIANTE** el seguro que corresponda y relevará a **LA AUTORIDAD** de toda reclamación presentada por **LA ESTUDIANTE**. **LA INSTITUCION ACADEMICA** proveerá una póliza de responsabilidad pública a favor de **LA AUTORIDAD**.

—**DUODÉCIMA: LA ESTUDIANTE** no adquirirá ningún tipo de interés propietario respecto a la posición en que se adiestra. Tampoco se interpretará la participación en este Programa de proyecto investigativo como una promesa de empleo futuro una vez concluida la participación de **LA ESTUDIANTE** en el Programa.

—**DECIMOTERCERA: LAS PARTES** se mantendrán en constante comunicación para la coordinación necesaria del Programa de Proyecto Investigativo a los fines de facilitar su integración con miras a ajustarlo a las necesidades que surjan, sin menoscabo de las cláusulas establecidas en el presente Acuerdo.

—**DECIMOCUARTA: LAS PARTES** reconocen que el objetivo principal de este acuerdo es ayudar a **LA ESTUDIANTE** a cumplir con el Proyecto Investigativo para obtener el grado de maestría en ciencias ambientales.

—**DECIMOQUINTA:** Este acuerdo estará vigente a partir de la firma de las partes y vencerá una vez el estudiante culmine el periodo dispuesto en la Cláusula **PRIMERA** del presente

Am

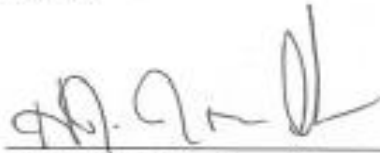
acuerdo. Cualquiera de las partes que desee dar por terminado el presente Acuerdo deberá notificar su intención a la otra **PARTE** dentro del período que antecede a los treinta (30) días antes de la fecha de terminación deseada.

—**DECIMOSEXTA:** Este documento contiene todos los términos del Acuerdo entre las partes. Ninguna parte ha sido objeto o ha descansado en otra representación que las recogidas en este Acuerdo. Ningún agente, empleado o representante de cualquier parte está facultado para alterar cualquiera de estos términos a menos que se haga por escrito bajo la firma del representante autorizado de cada parte.

—**DECIMOSÉPTIMA:** **LAS PARTES** hacen constar que no habrá discrimin por razones de edad, sexo, raza, color, nacimiento, origen o condición social, impedimento físico o mental, creencias políticas o religiosas o status de veterano en las prácticas de empleo, contratación y subcontratación.

—**DÉCIMOCTAVA:** Este acuerdo se regirá e interpretará de acuerdo a las leyes del Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

—**LAS PARTES** comparecientes suscriben y otorgan el presente acuerdo por ajustarse a lo convenido, en Mayagüez, Puerto Rico, hoy 31 de octubre de 2019.



Héctor R. Rivera Acevedo
Director de Recursos Humanos
Región Oeste
Autoridad de Acueductos y Alcantarillados



Agnes Mojica, Rectora
Universidad Interamericana
de Puerto Rico
Recinto de San Germán



Dr. Miguel A. Rivas Vázquez
Director de Tesis
Programa Tesis en
Ciencias Ambientales