



*Diseños para la rehabilitación de la Planta de Tratamiento
de Aguas Residuales de la Universidad Autónoma Santo
Domingo - Recinto Santiago y Sabana Yegua*

República Dominicana



Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



El desarrollo de los diseños para la rehabilitación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Autónoma Santo Domingo - Recinto Santiago y Sabana fue liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) bajo el Proyecto GEF CReW+.

El GEF CReW+ es un proyecto de asociación financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) que está siendo implementado conjuntamente por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 18 países de la Región del Gran Caribe (RGC).

Este proyecto se basa en su anterior fase exitosa del proyecto “El Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales (CReW)” (2011-2017). CReW+ está siendo ejecutado por Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU) en nombre del BID y el PNUMA, respectivamente.

Los 18 países participantes en el CReW+ (Barbados, Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Panamá, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, St. Vincent and the Grenadines, Surinam, Trinidad y Tobago) varían geográficamente, desde grandes países continentales hasta pequeños estados insulares con contextos políticos, lingüísticos y culturales significativamente diferentes.

Sobre el GEF: el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) ha proveído de \$22 millones en donaciones y blended finance y ha movilizado cerca de \$120 billones en cofinanciamiento en más de 5200 proyectos y programas. El GEF es el fondo fiduciario más grande enfocado en permitir a países en desarrollo invertir en la naturaleza y apoya la implementación de convenios internacionales en biodiversidad, cambio climático, químicos y desertificación. Reúne 184 gobiernos, adicionalmente sociedad civil, organizaciones internacionales, sector privado y aliados.

| | |
|-----------------------|--|
| Publicado por: | <i>Proyecto GEF CReW+ Implementando soluciones para la gestión integrada del agua y las aguas residuales para un Caribe limpio y saludable</i> |
| Autores: | <i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH</i> |
| Diseño: | <i>Proyecto GEF CReW+</i> |
| Fecha: | <i>Diciembre 2022</i> |
| Encargado por: | <i>Grupo de Coordinación Inter-Agencial (IACG por sus siglas en Ingles)</i> |

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los/as autores/as y no necesariamente reflejan los puntos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) o los países que representan.

El uso comercial no autorizado de los documentos está prohibido y puede ser sancionado según las políticas de las agencias y/o las leyes aplicables.

Contents

| | |
|---|----|
| 1. El Proyecto GEF CReW+ | 1 |
| 2. Objetivo del Proyecto en República Dominicana | 4 |
| 3. Línea Base - Problemática y retos..... | 4 |
| 4. Actividad implementada: Rehabilitación de dos plantas de tratamiento de aguas residuales, incluyendo opción de reúso..... | 6 |
| 4.1. Resumen ejecutivo | 6 |
| 4.2. Implementación | 9 |
| Producto 3.1.2. Soluciones de baja tecnología de agua y saneamiento integrado e innovadoras a nivel rural y comunitario implementadas | 9 |
| 4.3. Lecciones aprendidas..... | 12 |
| 4.4. Próximos pasos..... | 13 |
| 4.5. Plan de Trabajo | 15 |
| 4.6. Puntos Focales y Socios Nacionales | 16 |
| 4.7. Estructura de Implementación del Proyecto | 17 |
| 5. Referencias..... | 19 |
| 6. Anexos..... | 20 |

Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Resumen ejecutivo de las actividades | 8 |
| Tabla 2. Puntos Focales y Socios Nacionales | 16 |
| Tabla 3. Estructura de implementación..... | 17 |

A decorative graphic at the top left of the page consists of three overlapping, wavy lines in shades of blue and green, extending from the left edge towards the center.

1. El Proyecto GEF CReW+

El GEF CReW+ es un proyecto de colaboración aprobado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (FMAM/GEF por sus siglas en inglés) que es co-implementado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 18 países de la Región del Gran Caribe: Barbados, Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, Granada, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Panamá, República Dominicana, Saint Kitts y Nevis, Santa Lucía, San Vicente y las Granadinas, Suriname y Trinidad y Tobago. El concepto fue aprobado en noviembre de 2017 por el Fondo del Fideicomiso del FMAM por un monto aproximado de 15 millones USD.

Este proyecto innovador tiene como base la exitosa fase anterior llamada "El Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales (CReW por sus siglas en inglés)" implementado entre el 2011 y 2016. El GEF CReW+ está siendo ejecutado en nombre del BID por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y la Organización de los Estados Americanos (OEA) y en nombre del PNUMA por la Secretaría del Convenio de Cartagena. El programa mundial de GIZ "Sanitation for Millions" ejecuta actividades en 12 países.

La región del Gran Caribe se enfrenta a múltiples desafíos en el sector del agua y del saneamiento. Alrededor del 70% de la población de la región carece de acceso a servicios de saneamiento manejados de manera higiénica, lo que implica riesgos diarios para la salud.

Como resultado de un marco legislativo y regulatorio débil en la gestión y la gobernanza de los recursos hídricos, así como de la falta de recursos para proveer de servicios de saneamiento sostenible, aproximadamente el 80% de las aguas residuales se vierten al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento. Lo anterior causa una grave contaminación de las aguas subterráneas, los suelos, las cuencas y finalmente del Mar Caribe. El Proyecto GEF CReW+ ofrece soluciones innovadoras y basadas en la naturaleza para mitigar los efectos de las aguas residuales no tratadas en el medio ambiente y la salud pública.

Al valorar el agua como un recurso escaso, el concepto de Gestión Integrada de los Recursos de Aguas Residuales (GIRH, IWWM en inglés) aplicado en el proyecto GEF CReW+ se basa en las cuatro R del enfoque de la economía circular: reducir, reutilizar, reciclar y recuperar. El proyecto considera las aguas residuales no como residuos, sino como un recurso valioso con potencial de reutilización en la agricultura, la industria y otros sectores comerciales. De esa manera, el proyecto GEF CReW+ contribuye directamente al logro de los objetivos estratégicos del desarrollo sostenible 3, 6, 11, 14 y 15.

En el ámbito institucional, el proyecto GEF CReW+ promueve la elaboración de normas, estrategias y políticas relacionadas a la gestión integrada de los recursos hídricos y las aguas residuales. Con el objetivo de proporcionar servicios a largo plazo, el proyecto identifica mecanismos de financiación sostenibles, como el pago por los servicios ambientales, la creación de incentivos y los fondos rotatorios. El suministro de soluciones técnicas del GEF CReW+ abarca el diseño, la construcción o rehabilitación de plantas de tratamiento de aguas residuales naturales e instalaciones sanitarias, conforme a los resultados de las evaluaciones específicas de cada país. Además, la gestión de conocimientos constituye una parte crucial del proyecto GEF CReW+, que incluye la elaboración de una estrategia de comunicación para los 18 países participantes y con inventarios exhaustivos de material sobre la infraestructura de

aguas residuales, la reutilización, la protección de las cuencas hidrográficas y los instrumentos de financiación tanto a nivel regional como nacional.

El GEF CReW+ no deja atrás a nadie y se adhiere a los principios de inclusión e igualdad. Las comunidades indígenas y las mujeres están incluidas y participan activamente en los procesos de planificación y ejecución.

Los asuntos de género son tomados en cuenta en el diseño, la aplicación y la supervisión de las medidas de la GIRH.

Todos los países participantes reciben el mismo trato, sin importar su idioma, comunidad, o pertenencia cultural.

En la marcha del proyecto GEF CReW+, se lograrán ajustes de los marcos legislativos, políticos y regulatorios para la GIRH en un mínimo de nueve países. La aplicación del concepto de economía circular conllevará a una mejor gestión del ciclo de vida del agua, lo que se traducirá en una mayor eficiencia en su suministro. Lo anterior, garantiza la protección de los recursos, así como un tratamiento adecuado de las aguas residuales y su reutilización.

Mediante la capacitación en las comunidades locales, el proyecto GEF CReW+ permitirá la aplicación y el mantenimiento sostenible de soluciones técnicas y financieras, así como una mejor comprensión de sus ventajas. Esas medidas no sólo contribuirán a mejorar considerablemente la situación sanitaria de las comunidades rurales y periurbanas, sino que también reforzarán su capacidad de resistencia a los efectos de las sequías y, de perspectiva más general, a las consecuencias del cambio climático y la variabilidad del clima en el sector hídrico.

2. Objetivo del Proyecto en República Dominicana

El objetivo del CReW+ es apoyar a República Dominicana en su desarrollo institucional reglamentario y sus capacidades de gestión frente a los retos del sector de agua y saneamiento, particularmente en la aplicación de mecanismos de sostenibilidad financiera (incluyendo estructuras tarifarias adecuadas) en los servicios que presta INAPA. Asimismo, se desarrollarán pilotos de innovación tecnológicas y de gestión, para el manejo de aguas residuales en centros de población de menor porte, contribuyendo así a cerrar la brecha en la dotación de servicios y elevar la calidad de los servicios que presta INAPA.

3. Línea Base - Problemática y retos

República Dominicana presenta grandes retos en materia de agua y saneamiento. Con respecto al agua, según los informes regionales presentados en el Foro Mundial del Agua en 2018, los operadores reportan deficiencias en cobertura y distribución, problema que se acentúa en los sistemas rurales pequeños. En cuanto a calidad del agua distribuida a la población, se estima que solo el 30-40% de las muestras de agua para el consumo humano cumplen con la normativa de calidad, lo cual denota fuertes deficiencias en procesos de potabilización y en la operación y continuidad del servicio de agua suministrada a los consumidores. En materia de saneamiento, según la propuesta de Estrategia Nacional de Saneamiento (INAPA, 2016), la cobertura de alcantarillado es limitada el país, con una prevalencia de sistemas aislados y descargas

abiertas al suelo y cuerpos de agua. A nivel nacional existen 37 sistemas de alcantarillado sanitario, de los cuales muchos de ellos están fuera de servicio, o requieren rediseños o rehabilitación. El caudal nominal que maneja el sistema nacional es de 9.5 m³/s, equivalente al 31% del producido. Se estima que únicamente 10% de las aguas residuales reciben algún tipo de tratamiento.

Desde el punto de vista institucional, de política de agua y de financiamiento, la legislación nacional (Ley 5994/62) le confiere al Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillado (INAPA) la responsabilidad de administrar diversas fuentes de recursos para la administración, operación y explotación de los sistemas de acueducto y de disposición de aguas residuales, incluyendo la reglamentación para la fijación de las tarifas y cargos de los servicios a cargo de los operadores. El reglamento de INAPA (Decreto 8955/62) establece la aplicación de tarifas y cargos como base para la sostenibilidad financiera de los sistemas, requiriendo que dichas tarifas y cargos cubran el funcionamiento, la administración, la operación y la construcción de nuevas obras. Las brechas que enfrenta INAPA para lograr esta sostenibilidad son bastas, e incluyen entre otras: la baja disponibilidad de información comercial (medición de consumos, pérdidas, etc.) y costos reales de inversión, operación y mantenimiento; la prevalencia de subsidios para funcionamiento e inversión, especialmente para cubrir costos de consumo de energía; la falta de metodologías y de experiencia en actualización de tarifas; y la falta de un régimen estructurado de subsidios que ayude a cubrir las brechas de acceso a servicios de agua y saneamiento entre los sectores sociales más desprotegidos.

Uno de los municipios donde se ha identificado la necesidad de mejorar la cobertura de servicios de saneamiento es el municipio de Sabana Yegua, el cual tiene un proyecto de reconstrucción y mejoramiento de la planta depuradora de su sistema de alcantarillado sanitario, la cual se encuentra fuera de servicio por más de treinta años. Se estima una población actual de 12,000 personas, y 14,80000 proyectada para el 2040, con una

descarga proyectada de 202,520 m³/d (Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillado, 2020). El proyecto incluye la necesidad de rehabilitar algunas secciones de la planta, e introducir sistemas naturales de tratamiento, como son lagunas/humedales de tratamiento con macrófitas.

Adicionalmente, en concertación con el país durante el mes de agosto de 2020, se identificó que la rehabilitación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas de la Universidad Autónoma de Santo Domingo, sede Santiago podría ser incluida dentro del proyecto, por su importancia en el país y por ser una alternativa factible dentro del presupuesto y duración del GEF CReW+, se estimó que tendría un impacto en 14.300 personas, además de tener el potencial de convertirse en un laboratorio práctico donde los estudiantes apliquen el conocimiento en tratamiento y reúso de aguas residuales, además de tener la posibilidad de analizar el aprovechamiento de lodos y biogás del sistema.

4. Actividad implementada: Rehabilitación de dos plantas de tratamiento de aguas residuales, incluyendo opción de reúso.

4.1. Resumen ejecutivo

Componente 3. Innovaciones tecnológicas de gestión integrada del agua y saneamiento a nivel rural.

Garantizar la sostenibilidad ambiental, económica y financiera en el largo plazo a través

de la reconstrucción y mejoramiento de la Planta Depuradora del Municipio de Sabana Yegua, ubicado en la Provincia de Azua; además de la posibilidad de incluir la rehabilitación del proceso anaeróbico de flujo ascendente e incorporación de un Humedal Artificial en la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)

Tabla 1. Resumen ejecutivo de las actividades

| Resultado | Producto | Indicador | Meta Física | Objetivo de las Actividades |
|--|---|---|-------------|--|
| Componente 3: Soluciones innovadoras a pequeña escala para la gestión integrada de recursos hídricos y aguas residuales a nivel local, periurbano y comunitario | | | | |
| 3.1 Mejor tratamiento de las aguas residuales, incluida la reutilización en lugares críticos rurales y periurbanos aplicando soluciones de baja tecnología para la gestión integrada de recursos hídricos y aguas residuales | 3.1.2 Soluciones de baja tecnología de agua y saneamiento integrado e innovadoras a nivel rural y comunitario implementadas | #Soluciones de baja tecnología implementadas que reducen la contaminación | 2 | Garantizar sostenibilidad ambiental, económica y financiera en el largo plazo a través de la reconstrucción y mejoramiento de Planta Depuradora del Municipio de Sabana Yegua, ubicado en la Provincia de Azua; además de la posibilidad de incluir la rehabilitación del proceso anaeróbico de flujo ascendente e incorporación de un Humedal Artificial en la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD) |

4.2. Implementación

Producto 3.1.2. Soluciones de baja tecnología de agua y saneamiento integrado e innovadoras a nivel rural y comunitario implementadas.

Agencia ejecutora: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH a través del programa global Sanitation for Millions



Actividad: Reconstruir y mejorar dos plantas de tratamiento de aguas residuales.

El proyecto inicialmente considerola (1) Reconstrucción y mejoramiento de Planta Depuradora del Municipio de Sabana Yegua, ubicado en la Provincia de Azua. Adicionalmente, y (2) la Rehabilitación del sistema de tratamiento de aguas residuales incluyendo un Humedal Artificial, ubicado en el Recinto Santiago de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD-Santiago) ubicada en La Barranquita, Santiago de los Caballeros.

Para ejecutar estas actividades, se describe a continuación las siguientes subactividades, dividido en 3 etapas:

Etapas 1: Desarrollo del anteproyecto (diagnostico técnico, presupuesto, diseños y permisos)

- + Identificación actores locales que deberían ser involucrados en el proceso de conceptualización del proyecto (especialmente asociación de agricultores, potencial usuario del efluente tratado).
- + Generación un proceso participativo para conocer la percepción del proyecto ante la comunidad, posibles retos operativos, entre otros.

- + Elaboración de un diagnóstico técnico, que permita validar: la memoria de cálculo, las modificaciones sugeridas a la planta y el presupuesto de la intervención; actividad para ambas intervenciones (1) y (2) en colaboración con las empresas consultoras de la República Dominicana: PROAMSA y Tecca Caribe.
- + Preparación, en colaboración con la contraparte local, la documentación requerida para la tramitología legal requerida para la realización de la obra (planos, memorias de cálculo, Autorización Ambiental, entre otros)

Etapas 2: Desarrollo del proceso de mejoras de las plantas de tratamiento de aguas residuales (no se implementó porque el presupuesto estimado alocado en el GEF CReW+ para la República Dominicana no es suficiente para financiar las intervenciones)

- + Desarrollo de los TdR, y la contratación de una empresa que, bajo un mecanismo de llave en mano, realice las obras solicitadas y acordadas por ambas partes. Las obras (de forma simplificada) que tentativamente se buscan realizar son las siguientes:
 - Planta depuradora Sabana Yegua:
 - a. Construir unidad de remoción y manejo de arenas
 - b. Reemplazar vertedero de laguna anaerobia existente por uno estratégicamente instalado para redireccionar flujos.
 - c. Reponer 5% encache del talud de las lagunas.
 - d. Limpieza y extracción de maleza en la zona periférica a la planta, en talud y fondo de las lagunas.
 - e. Reconstruir acera perimetral en berma en las lagunas
 - f. Rehabilitación de emisario descarga

- g. Rehabilitar caseta de operador, y construir verja perimetral
- h. Embellecimiento zona de planta
- i. Ajustar tren de tratamiento
- Planta depuradora UASD
 - a. Habilitar desarenador
 - b. Reinstalar todas las tuberías externas de PVC
 - c. Limpieza de la maleza en el exterior, en los reactores (externo), en los filtros (interno), y eliminación de árboles que pueda dañar las estructuras
 - d. Limpieza de sedimento en los reactores y la cisterna de efluentes
 - e. Limpieza y colocación de material filtrante de los filtros
 - f. Reconstrucción de sala de maquinas
 - g. Colocación de sistema de cloración (desinfección)
 - h. Instalación de protección perimetral (cerco de 160m)
 - i. Colocación de grava en zona de tránsito de personas
 - j. Electrificación e iluminación del área
- + Efectuar inspección a lo largo de la ejecución de las obras, documentar los avances, corregir defectos y supervisar el buen avance de la obra.

Etapas 3. Arranque de la PTAR y entrenamiento

No se realizó, debido a que el presupuesto necesario para la implementación de la construcción está por encima del presupuesto disponible para los trabajos. Hasta tanto no se pueda ejecutar no podrán realizarse las actividades de arranque de PTAR y entrenamiento en operación y mantenimiento.

4.3. Lecciones aprendidas

La identificación de sinergias con otros proyectos aumenta el valor añadido de la intervención y el impacto potencial durante la ejecución; Durante la ejecución inicial del proyecto, Sanitation for Millions identificó la posibilidad de colaborar con el proyecto [Nexus](#) de GIZ, ya que los temas de rehabilitación de las plantas de tratamiento y el reúso seguro del agua tienen una estrecha relación entre GEF CReW+ y Nexus. Esto permitió añadir valor a los productos entregados al vincular el reúso del agua con temas de energía sostenible (iluminación a través de paneles solares, riego por tubería para evitar pérdidas de agua, eficiencia de bombas de riego, entre otros), una visión más holística del reúso y la alimentación de los futuros beneficiarios, especialmente en Sabana Yegua y la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza con la rehabilitación de lagunas de oxidación (Sabana Yegua) y la inclusión de un humedal artificial para mejorar el tratamiento en la Universidad Autónoma de Santo Domingo. La construcción entre proyectos aumenta el valor de los productos entregados y permite integrar visiones en los resultados.

Promover la participación entre los actores tanto del gobierno central como los beneficiarios que permitan incorporar desde etapas tempranas de diseño características para mejorar el tratamiento y/o la operación del sistema, aumentando la sostenibilidad el mismo.

La identificación de actores clave que apoyan el proceso, facilita la toma de decisiones y el avance del proyecto, además de brindar un apoyo cercano a la realidad del país, aun

cuando no se tenga personal en el lugar.

Es importante incorporar en los diseños unidades de tratamiento que permitan obtener una calidad de agua superior a la exigida por el país para la descarga, especialmente si no se tiene una norma de reúso y es posible que los estándares cambien a medida que se desarrolla el proyecto. De esta manera la implementación de proyectos de reúso será factible desde la puesta en marcha del sistema, sin incurrir en sobrecostos por ajustes adicionales para el cumplimiento de normas adicionales.

Desde la planeación del proyecto GEF CReW+ debe tenerse en cuenta que los fondos requeridos para la implementación pueden llegar a ser mayores una vez se tenga el detalle del alcance de las obras, adicional de contar con posibles sobrecostos ocasionados por COVID o inflación adicional de plazos adicionales previendo cualquier imprevisto. Además, se recomienda que GEF y el BID chequen la factibilidad de las actividades propuestas por el país en el momento de alocar presupuestos para estos.

La importancia de asegurar un financiamiento realista de la medida de construcción, incluyendo la fase de planificación, diseño de detalle, construcción e inventoría, así como capacitación para operación y mantenimiento y actividades de sensibilización de la población beneficiada: La actividad de Sabana Yegua no se puede ejecutar en este momento porque GEF CReW+ no dispone de los fondos necesarios en el presupuesto alocado para la Republica Dominicana, se estima un presupuesto total de 2 mill ones USD para la realización de las 2 actividades propuestas por el país en el perfil de inepción.

4.4. Próximos pasos

Apoyo tanto a INAPA como a la UASD en la búsqueda de fuentes de financiamiento que permitan la implementación de los proyectos.

Entrega de la documentación lista para que apoyar al donante y a las contrapartes en iniciar el proceso de licitación de las obras, y acompañamiento técnico en el proceso dentro de la duración del proyecto de GIZ.



4.5. Plan de Trabajo

| Actividad | 2021 | | | | | | | | | | | | 2022 | | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
| Reconstruir y mejorar dos plantas de tratamiento de aguas residuales | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Etapa 1: Desarrollo del anteproyecto (diagnostico técnico, presupuesto, diseños y permisos) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Etapa 2: Desarrollo del proceso de mejoras de la(s) planta(s) de tratamiento de aguas residuales | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Etapa 3. Arranque de la PTAR y entrenamiento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.6. Puntos Focales y Socios Nacionales

Tabla 2. Puntos Focales y Socios Nacionales

| Nombre | Role en CReW+ | Organización | Correo electrónico |
|----------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| Ing. Silmer Gonzalez | Punto Focal | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Silmer.Gonzalez@ambiente.gob.do |
| María de Leon Pepen | Punto Focal Técnico | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Maria.DeLeonPepen@ambiente.gob.do |
| Nadia Martínez | Punto Focal Técnico | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Nadia.Martinez@ambiente.gob.do |
| Alicia Tavarez Jerez | Punto Focal Técnico | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales | alicia.tavarez@ambiente.gob.do |
| Elvira Segura | Punto Focal Técnico | Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados - INAPA | elvira.segura@inapa.gob.do |
| Alan Vásquez | Punto Focal Técnico | Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados - INAPA | alan.vasquez@inapa.gob.do |

4.7. Estructura de Implementación del Proyecto

Tabla 3. Estructura de implementación

| Agencia | Rol en el Proyecto | Contacto | Correo electrónico |
|--|---|--|----------------------------|
| Banco Interamericano de Desarrollo (BID) | Agencia Implementadora Líder | Rodrigo Riquelme Especialista Líder de Agua y Saneamiento, INE/WSA | rodrigor@iadb.org |
| Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) | Agencia Implementadora | Isabelle Van der Beck Directora Aguas Internacionales GEF División de Ecosistemas, Marina y Costera Unidad de Ecosistemas | isabelle.vanderbeck@un.org |
| | Grupo de Coordinación del Proyecto (PCG por sus siglas en Inglés) | Pedro Moreo Mir Coordinador Regional | pmoreo@oas.org |



| | | | |
|--|-------------------|--|---------------------------|
| Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH | Agencia Ejecutora | Bärbel Schwaiger Directora del programa <i>Sanitation for Millions</i> División Medio Ambiente, Clima e Infraestructura | baerbel.schwaiger@giz.de |
| Secretaría de la Convención de Cartagena (CAR/RCU) | Agencia Ejecutora | Christopher Corbin Oficial de Programas Subprogramas de Contaminación y Comunicaciones Secretaría del Convenio de Cartagena División de Ecosistemas | christopher.corbin@un.org |
| Organización de los Estados Americanos (OEA) | Agencia Ejecutora | Andres Sanchez Especialista Programas de Agua Secretaría Ejecutiva para el Desarrollo Integral (SEDI) Departamento de Desarrollo Sostenible (DDS) Sección de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) | asanchez@oas.org |

5. Referencias

Estrategia Nacional de Saneamiento (ENS), desarrollada por el INAPA en el

Informe de Actualización y/o Validación De Catastros De Usuarios, de septiembre de 2015 de la Consultoría para el Desarrollo Institucional y Desconcentración de los Servicios del INAPA. Consorcio ACE-SAFEGE-MCG.

La Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales, No. 64-00, promulgada el dieciocho (18) del mes de agosto

Ley del Distrito Nacional y los Municipios (Ley 176-07),

Ley General de Salud No. 42-01, promulgada en fecha ocho (8) del mes de marzo del año dos mil uno (2001), Gaceta Oficial No. 10075.

Ley Nacional 5994/62, que crea la INAPA

Ley No. 01-2012 sobre la Estrategia Nacional de de Desarrollo 2030

Ley No. 487 de 1969 que crea al Indrhi, sobre aguas subterráneas y fue modificada con la ley 64-00, para donde dice Indrhi diga medio ambiente

Plan Hidrológico Nacional (PHIN) 2020-2023

Proyecto "Reconstrucción y Mejoramiento de Planta Depuradora del Sistema de Alcantarillado Sanitario del Municipio de Sabana Yegua".

6. Anexos

6.1. Reporte de Viabilidad Técnica UASD Santiago



Viabilidad Técnica del Proyecto de Saneamiento del Universidad Autónoma de Santo Domingo – Recinto Santiago

REPORTE FINAL



Financiado por



fondo
para el medio
ambiente mundial
INVERSIÓN EN NUESTRO PLANETA

Co-implementado por



Co-ejecutado por



En alianza con



En colaboración con



El desarrollo de la Viabilidad técnica del Proyecto de Saneamiento de la Universidad Autónoma de Santiago – Recinto Santiago fue liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) bajo el Proyecto GEF CReW+.

El GEF CReW+ es un proyecto de asociación financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) que está siendo implementado conjuntamente por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 18 países de la Región del Gran Caribe (RGC).

Este proyecto se basa en su anterior fase exitosa del proyecto “El Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales (CReW)” (2011-2017). CReW+ está siendo ejecutado por Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU) en nombre del BID y el PNUMA, respectivamente.

Los 18 países participantes en el CReW+ (Barbados, Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Panamá, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, St. Vincent and the Grenadines, Surinam, Trinidad y Tobago) varían geográficamente, desde grandes países continentales hasta pequeños estados insulares con contextos políticos, lingüísticos y culturales significativamente diferentes.

Sobre el GEF: el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) ha proveído de \$22 millones en donaciones y blended finance y ha movilizó cerca de \$120 billones en cofinanciamiento en más de 5200 proyectos y programas. El GEF es el fondo fiduciario más grande enfocado en permitir a países en desarrollo invertir en la naturaleza y apoya la implementación de convenios internacionales en biodiversidad, cambio climático, químicos y desertificación. Reúne 184 gobiernos, adicionalmente sociedad civil, organizaciones internacionales, sector privado y aliados.

Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



Las opiniones expresadas en esta publicación son de los/as autores/as y no necesariamente reflejan los puntos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) o los países que representan.

El uso comercial no autorizado de los documentos está prohibido y puede ser sancionado según las políticas de las agencias y/o las leyes aplicables.

Resumen Ejecutivo

La Universidad Autónoma de Santo Domingo-Recinto Santiago se ubica en la ciudad de Santiago de los Caballeros, el segundo núcleo urbano más importante de la República Dominicana por cantidad de población. Este importante centro de formación universitaria cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales que ha sufrido un abandono importante desde el año 2005, fecha en que fue construido el recinto universitario y la planta de tratamiento. Sus aguas residuales son descargadas a un efluente del Río Yaque del Norte, una de las cuencas hidrográficas más importantes de la República Dominicana. A través del programa Sanitation for Millions (S4M) se analiza la viabilidad técnica para recuperar y rehabilitar este sistema de tratamiento, con el fin de reducir la contaminación, mejorar las condiciones de la población vecina y que el sistema de tratamiento funcione como un centro de investigación y transferencia de conocimiento para los estudiantes y población en general.

La planta de tratamiento está conformada por un tratamiento preliminar (rejas y desarenador), dos reactores UASB (Up Flow Sludge Blanket Reactor, por sus siglas en inglés) y un postratamiento mediante dos filtros FAFA (Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente, por sus siglas en español). El caudal de diseño del sistema de tratamiento es de 663,21 m³/día; sin embargo, para la población actual se estima que el caudal real es aproximadamente 221 m³/día. La revisión de los parámetros principales del sistema de tratamiento, evidencian que la planta de tratamiento cumple a nivel de tiempo de retención hidráulica en todas sus unidades para el caudal de diseño; sin embargo, su principal deficiencia radica en el diseño de sus estructuras internas (distribución de agua de entrada, separador trifásico, decantación, etc). Por igual, algunas mejoras deben ser implementadas en el filtro FAFA. También se observó que el sistema de tratamiento carece de unidades para el manejo de lodos y un cuarto de operación para llevar a cabo las actividades de operación y mantenimiento del sistema.

Como resultado de la consultoría, se recomienda la reconstrucción y rehabilitación de uno de los módulos de tratamiento para el caudal actual con base en las recomendaciones brindadas en este informe. La unidad que quedaría sin rehabilitación se recomienda mantenerla en el estado actual, ya que algunos resultados de análisis realizados por el Ministerio de Medio Ambiente han indicado resultados positivos que ameritan una investigación adicional. No se logró tener más detalle de estos o evaluar el desempeño del proceso, ya que, al momento de las visitas, el recinto mantenía muy pocas operaciones y con ello un caudal de agua residual prácticamente nulo. Por último, se propone la inclusión de un humedal construido de pequeña escala que permite realizar investigación en el campo del postratamiento de efluentes anaerobios.

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen Ejecutivo | 3 |
| Índice de Tablas | 6 |
| Contexto | 7 |
| Introducción | 9 |
| Antecedentes | 10 |
| Evaluación técnica del proyecto UASD | 14 |
| Estimación de caudal y carga orgánica..... | 14 |
| Proceso de tratamiento existente..... | 18 |
| Revisión de la capacidad del sistema existente | 19 |
| Revisión de propuesta de la contraparte | 36 |
| Calidad esperada del efluente una vez corregidos los problemas detectados..... | 37 |
| Diagrama de flujo de la PTAR y disposición final de los subproductos propuestos | 40 |
| Propuesta de conversión del FAFA a humedal construido | 41 |
| Costos estimados para la rehabilitación del proyecto | 45 |
| Requisitos legales | 48 |
| Indicadores | 49 |
| Referencias | 50 |
| Anexos | 51 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Estimación de la generación de aguas residuales. | 15 |
| Tabla 2: Análisis de agua residual en la planta de tratamiento del Recinto Santiago. | 16 |
| Tabla 3: Carga orgánica y de nutrientes que recibe el sistema de tratamiento. | 18 |
| Tabla 4: Dimensiones del desarenador, reactor UASB y el FAFA..... | 19 |
| Tabla 5: Revisión de parámetros de diseño básicos del desarenador. | 20 |
| Tabla 6: Revisión de parámetros de funcionamiento del reactor UASB..... | 20 |
| Tabla 7: Revisión de parámetros de funcionamiento del FAFA | 23 |
| Tabla 8: Concentraciones en el efluente y eficiencias de remoción típicas en sistemas anaeróbicos de reactor UASB + FAFA (Adaptado de Von Sperling, 2007). | 38 |
| Tabla 9: Síntesis de mejoras necesarias en el sistema y clasificación de su prioridad | 45 |
| Tabla 10: Costos estimados para la ejecución del proyecto. | 47 |
| Tabla 11: Trámites y requisitos legales previo a la realización del proyecto..... | 48 |

A decorative graphic consisting of three overlapping, wavy lines in shades of green, blue, and grey, positioned at the top left of the page.

Contexto

En el 2016, el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) como donante líder y la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) como entidad implementadora lanzaron Sanitation for Millions, una iniciativa multidonante para atender los problemas de agua y saneamiento y contribuir efectivamente en alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenibles 6, 4 y 3. Para mayor detalle <https://www.giz.de/en/worldwide/42666.html>

Sanitation for Millions tiene como objetivo proveer acceso adecuado y equitativo al saneamiento. Sus actividades se centran en las necesidades de grupos vulnerables y en desventaja como niños, mujeres y niñas, refugiados, personas con discapacidades y comunidades indígenas.

Sanitation for Millions busca soluciones sostenibles considerando la cadena de saneamiento y aplicando criterios para asegurar resultados a largo plazo, que sean económicamente viables y socialmente aceptables dejando a ninguna persona atrás. Siendo un programa global, Sanitation for Millions beneficia del intercambio de experiencias y de la gestión de conocimientos entre un país y otro.

El programa es apoyado por el BMZ como donante principal y cofinanciado por la Fundación Bill & Melinda Gates, el fondo de solidaridad británico Water Unite, el Ministerio de Asuntos Exteriores y Comercio de Hungría y, desde 2020, por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

La cooperación con el BID se desarrolla en el ámbito del Proyecto GEF CReW+, *“Enfoque integrado para el manejo del agua y de las aguas residuales usando soluciones innovadoras y*

promoviendo mecanismos de financiamiento en la Región del Caribe". CReW+ es financiado por el Fondo Mundial para el medio ambiente (GEF, por sus siglas en inglés), implementado por el BID y el Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente (PNUMA) ejecutado por la GIZ, la Secretaría del Convenio de Cartagena y la Organización de los Estados Americanos (OEA).

El GEF CReW+ se ejecuta bajo el marco de Sanitation for Millions hasta mayo de 2022 en 11 de los 18 países participantes: Belice, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Panamá, Surinam y Trinidad y Tobago.

Los objetivos específicos (y componentes) del proyecto son:

- 1) Fortalecimiento de la capacidad institucional a través de recomendaciones de políticas, regulación y creación de capacidad para la gestión integrada del agua y el saneamiento
- 2) Desarrollo de mecanismos de financiamiento innovadores y sostenibles para la gestión integrada del agua y las aguas residuales en zonas urbanas, periurbanas y rurales
- 3) Aplicación e implementación de "soluciones innovadoras a pequeña escala" para la gestión integrada del agua y las aguas residuales en comunidades rurales y periurbanas más pequeñas
- 4) Procesar, difundir e intercambiar conocimientos

En la fase de preparación hasta 2018, los 18 países participantes en el proyecto han indicado las regiones y sus preferencias para las intervenciones.

Introducción

La Universidad Autónoma de Santo Domingo es la principal Universidad Pública de la República Dominicana y cuenta con 19 recintos universitarios en la mayoría de las provincias del país. La UASD-Recinto Santiago se ubica en la ciudad de Santiago de los Caballeros, el segundo núcleo urbano más importante de la República Dominicana por cantidad de población.

A su vez, la ciudad de Santiago de los Caballeros es atravesada por el Río Yaque del Norte. Este es el río más largo de la República Dominicana, del cual 3.5% de su recorrido atraviesa la zona urbana que compone la ciudad (Plan Cuenca Santiago, 2014). Debido a esto, la calidad de las aguas residuales que se vierten en este cuerpo de agua impacta directamente la cuenca hidrográfica y de forma directa la calidad de agua de la Bahía de Montecristi, punto donde la cuenca hidrográfica desemboca en la costa norte de República Dominicana. Con base en ello, es de suma importancia para la UASD-Recinto Santiago contar con un sistema de tratamiento que logre reducir el impacto ambiental de sus operaciones, ya que sus aguas residuales son descargadas hacia el arroyo pastor y este a su vez desemboca al Río Yaque del Norte.

Actualmente, la UASD-Recinto Santiago cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales que requiere una serie de mejoras con el fin de reducir el impacto ambiental en la operación de sus instalaciones, y que a su vez funcione como un centro de investigación y transferencia de conocimiento a los estudiantes. Como parte de esto, la presente consultoría realiza un análisis del estado actual del sistema de tratamiento con miras a determinar la



Ubicación de la ciudad de Santiago de Los Caballeros

viabilidad técnica de su rehabilitación.

La visita a la UASD-Recinto Santiago se inició el día 19 de agosto. En la misma se realizó un recorrido de reconocimiento del área de la planta de tratamiento y sus alrededores. Se logró identificar las diferentes unidades que componen el sistema de tratamiento y el uso de suelo que se presenta en los alrededores. Se realizó un levamiento de perfil hidráulico de las unidades de tratamiento, mediciones e inspección visual de todas las unidades que componen el sistema de tratamiento de aguas residuales.

Antecedentes

La UASD-Recinto Santiago y la planta de tratamiento están ubicados en las coordenadas 318381.97 m E, 2148863.44 m N (Sector La Barranquita, Santiago de los Caballeros). El recinto y la planta misma iniciaron operaciones en el año 2005.

La planta de tratamiento se encuentra ubicada dentro del terreno del recinto universitario, el cual tiene un área aproximada de 30 Ha. Dentro de la propiedad se encuentran las siguientes edificaciones:

- 1 edificio de laboratorios.
- 4 edificios de aulas.
- 1 edificio administrativo.
- 1 cafetería.
- 1 estancia Infantil.
-



Ubicación de la planta de tratamiento dentro recinto Universitario UASD-Santiago

Adicional a estas edificaciones, próximo a la planta de tratamiento y dentro de la propiedad del Recinto, está asentada la Escuela Pública Isabel Rosario Torres y una segunda escuela en

fase de construcción. En cuanto a los actores del proyecto, el principal actor que se identifica es la población que asiste al recinto universitario; sin embargo, dentro de esta población se pueden ubicar otros actores:

1. Profesorado.
2. Personal administrativo y servicios.
3. Estudiantes de diversas carreras.

Es evidente el involucramiento que debe existir por parte de la comunidad del recinto universitario, ya que en primera instancia los responsables de dar seguimiento a las condiciones de la infraestructura que forma parte de recinto. Por otro lado, la planta de tratamiento puede funcionar cómo un centro de transferencia de conocimiento práctico entre el profesorado y los estudiantes, tanto del área de la ingeniería civil y sanitaria, así como otras disciplinas que se imparten dentro del recinto.

Durante la visita realizada se percibió que existe una motivación por parte de la comunidad del recinto en recuperar el sistema de tratamiento y convertir en el mismo en un centro de investigación en el área de saneamiento y con ello mejorar las condiciones de saneamiento de la zona.

Otros actores que son afectados por las condiciones de la planta de tratamiento son los siguientes:

1. Población de estudiantes de las escuelas y personal de las mismas.
2. Vecinos aleñados al sistema de tratamiento que pueden percibir molestias producto de la cercanía con el proyecto y su desconocimiento.
3. Agricultores que hace uso de los alrededores de la planta de tratamiento para la siembra y cultivo de productos agrícolas.

De acuerdo con los informes recibidos por parte de la contraparte y la información recabada en campo, se logró constatar que existió un abandono completo del sistema del tratamiento desde la fecha de su construcción (Año 2005). El abandono ocasionó que gran parte de la infraestructura estuviera cubierta de maleza y parte las estructuras fueron afectadas por quemas de los matorrales en los alrededores. En la sección de anexos se adjuntan los reportes de personal propio de la institución y el Ministerio de Medio Ambiente, donde se puede conocer más en detalle el estado en el que se encontraba el sistema de tratamiento.



Estado de abandono del desarenador de la planta de tratamiento



Crecimiento incontrolado de vegetación en los FAFA de la planta de tratamiento

Según se comentó con la contraparte, se pueden percibir varias razones del abandono:

1. No estaba claro quién era el responsable del sistema de tratamiento dentro de la organización administrativa.
2. Personal de servicios generales no estaba informado y poco capacitado.
3. Falta de concientización sobre los procesos de tratamiento de aguas residuales.

4. Se percibe que es responsabilidad de otras personas o empresas y ajeno a la operación del recinto académico (ayuntamiento, empresas de distribución de agua potable y saneamiento).

Durante la visita realizada a la planta de tratamiento se logró observar una mejora sustancial de las condiciones en los alrededores del sistema de tratamiento, lo que evidencia el esfuerzo realizado por el recinto universitario para la mejora de las condiciones del sistema.

Se deben tomar las acciones necesarias para evitar que el sistema de tratamiento vuelva a las condiciones pasadas. Según se comentó por la contraparte, se están gestionando los acuerdos de colaboración entre los beneficiarios del sistema de tratamiento para viabilizar la operación del sistema de tratamiento.

Con respecto a este punto, se comentó que la Corporación de Acueductos y Alcantarillado de Santiago (COORASAN), en virtud que es la empresa responsable por Ley de gestionar todos los temas de distribución de agua potable, alcantarillado y saneamiento en la provincia, asuma la operación del sistema de tratamiento. Ante esta perspectiva, se recomienda la inclusión de COORASAN durante las fases del proyecto, con el fin que se puede dar una preparación previa y acuerdos de operación claros entre los participantes que permitan definir las responsabilidades de cada una de las partes.



Vegetación controlada en la zona de los filtros

FAFA



condiciones de desarenador observados durante la visita

Evaluación técnica del proyecto UASD

Estimación de caudal y carga orgánica

Para los cálculos de capacidad del sistema de tratamiento se consideró un caudal promedio diario de diseño del sistema de tratamiento (663,21 m³/día de agua residual doméstica), aportadas de los 17,795 usuarios universitarios registrados en las diferentes áreas del recinto universitario. Este valor fue suministrado por la UASD-Recinto Santiago como parte del Informe de Rehabilitación del Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente incorporando de un Humedal Artificial para reúso de agua tratada y capacitación de diseñadores y operadores (Ver Anexo).

En cuanto a la población real del recinto, de acuerdo con la información suministrada por la contraparte, hay inscritos un total de 11.881 estudiantes; sin embargo, no toda esta población asiste de forma presencial a la institución. Aforos de ingreso de personas al recinto universitario realizados por estudiantes de la carrera de ingeniería civil, contabilizan que al recinto ingresan diariamente 5000 personas, entre personal, estudiantes y visitantes.

Adicional a la población del recinto universitario, dentro del mismo existen 2 escuelas públicas (una en operación y otra en construcción). Una de ellas se encuentra conectada a la planta de tratamiento y se prevé que la otra escuela también se conecta a la planta de tratamiento del recinto universitario. La escuela operativa maneja una población de 589 estudiantes en jornada de 8 am a 4 pm. En cuanto la escuela en construcción, no se tienen datos sobre la población, por lo que, se estimará que ambas escuelas corresponden a una población de 1500 alumnos de forma precautoria.

En la siguiente tabla se muestra un detalle de la estimación de producción de aguas residuales con base en los datos mencionados anteriormente. Para la estimación de la dotación de agua se utiliza la dotación establecida en el Reglamento Técnico para Diseño de Obras

Hidrosanitarias del Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados (INAPA). Este estable de una dotación de 40 L/alumno-día.

Tabla 1: Estimación de la generación de aguas residuales.

| Población | Dotación | Factor de retorno | Caudal (m ³ /día) |
|---|-----------------|-------------------|------------------------------|
| Estimación con base en población real | | | |
| 5000 | 40 L/alumno*día | 85% | 170 |
| 1500 | 40 L/alumno*día | 85% | 51 |
| | | Caudal calculado | 221 |
| Estimación con base en población de diseño del sistema de tratamiento | | | |
| 17.795 | 40 L/alumno*día | 85% | 605 |
| | | Caudal calculado | 605 |
| | | Caudal de diseño | 663.21 |

Cómo se observa en la Tabla 1, la estimación del caudal con base en la población que asiste al recinto universitario e incluyendo la conexión de ambas escuelas públicas, es mucho menor al caudal de diseño del sistema de tratamiento. En cuanto al crecimiento de la población e infraestructura de la UASD-Recinto Santiago, se tiene previsto la construcción de una nueva Facultad de Salud y un comedor estudiantil; sin embargo, no se espera tenga un impacto sustancial en la población que asiste al recinto universitario.

Con base en lo anterior, en la revisión de parámetros del sistema de tratamiento se hace una verificación de las unidades para el caudal de diseño de 663.21 m³/día y una segunda revisión para 300 m³/día, la cual ya contempla un margen de crecimiento respecto al caudal estimado con la población actual. Esta revisión se realiza de esta forma, ya que no se cuenta con datos claros sobre el aumento real de la población en el recinto universitario; sin embargo, esta

previsión de caudal permitiría crecer es un estimado de 2300 estudiantes.

Para el estudio de la carga orgánica se han utilizado los resultados incluidos como parte de un informe realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Cabe mencionar que se ha realizado una adaptación de los valores de nutrientes, ya que los resultados muestran valores muy elevados que no son típicos de aguas residuales domésticas.

Tabla 2: Análisis de agua residual en la planta de tratamiento del Recinto Santiago.

| Parámetro | Afluyente PTAR | Efluente PTAR | Valores medios del efluente reportados en literatura ^b | Norma (<5000 hab. Equi) | Valor considerado en el estudio (afluyente) |
|---|---------------------|---------------------|---|-------------------------------|---|
| pH | 7 | 7.38 | | 6-8.5 | 7.00 |
| Temperatura (°C) | 25 | 25 | | - | 25.0 |
| Demanda Química de oxígeno (mg/L) | 445 | 34 | 100-200 | 160 | 445.0 |
| Demanda Bioquímica de oxígeno (mg/L) | 306 | 21 | 40-80 | 50 | 306.0 |
| Sólidos suspendidos totales (mg/L) | 115 | 3 | 30-60 | 50 | 127 |
| Nitrógeno amoniaco (mg/L) ^a | 200 | 120 | >15 | | 50 ^a |
| Fosfato (mg/L) | 15 | 8.8 | >4 | | 15.0 |
| Coliformes totales (NMP/100mL) ^b | 7.8x10 ⁵ | 7.8x10 ⁴ | 10 ⁶ -10 ⁷ | 1000 | 1·10 ⁸ |

^a En el informe se da un valor de 200 mg/L, que es inusualmente para aguas residuales municipales. Se recomienda repetir el análisis de este parámetro. En este estudio se considera

un valor típico de 50 mg/L de nitrógeno amoniacal para el agua residual cruda. ^b En el informe se presenta un valor muy bajo para este parámetro, se ajusta para realizar las estimaciones de manera más segura.

^b Adaptado de Chernicharo, 2013.

Cómo se observa en la Tabla 2, este análisis reporta que la planta de tratamiento cumple los parámetros carga orgánica con valores muy bajos según lo esperado para este tipo de sistemas (DBO, DQO, SST) y solamente incumple los valores de coliformes. En cuanto a la remoción de nutrientes, la norma ambiental indica que no es un parámetro obligatorio, ya que el proyecto se cataloga como un proyecto menor a 5000 habitantes equivalentes. Los excelentes valores reportados en cuanto a la remoción de materia orgánica pueden guardar relación con el bajo caudal del proyecto y la formación de un “filtro verde tipo humedal” debido al crecimiento de plantas sobre los filtros anaerobios tal y como se pudo observar en algunos documentos, lo cual, podría actuar como un sistema de pulido del agua residual tratada.

Para la realización de este informe no se logró observar la planta de tratamiento en operación, debido a que el Recinto Universitario no tiene operaciones normales producto de la pandemia provocada por el COVID 19, por lo que no se puede emitir un criterio definitivo al respecto sobre los resultados. Adicional a ello, tampoco se cuenta con datos de caudal medido durante el muestreo y un rango más amplio de analíticas del afluente y efluente que permitan emitir un criterio acertado. Por otro lado, los excelentes resultados que se obtuvieron en el muestreo ameritan una revisión detallada de las condiciones bajo las que se obtuvieron y determinar si son reproducibles y sostenibles en el tiempo, por lo que podría ser sujeto de investigaciones futuras.

En la Tabla 4 se presentan las cargas orgánicas y nutrientes que tendría el sistema de tratamiento bajos dos escenarios de caudal.

Tabla 3: Carga orgánica y de nutrientes que recibe el sistema de tratamiento.

| Escenario | Carga orgánica (kg DBO/día) | Carga de Nitrógeno (kg N/día) | Carga de Fósforo (Kg P/día) |
|---|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Caudal real estimado (221 m ³ /día) | 67.6 | 11 | 3.3 |
| Caudal de diseño (663.2 m ³ /día) | 202.9 | 33 | 10 |

Proceso de tratamiento existente

Actualmente no existe un destino claro para el efluente tratado (algunos elementos están fuera de servicio). Posiblemente, como parte del diseño original, se previó el desfogue del agua tratada

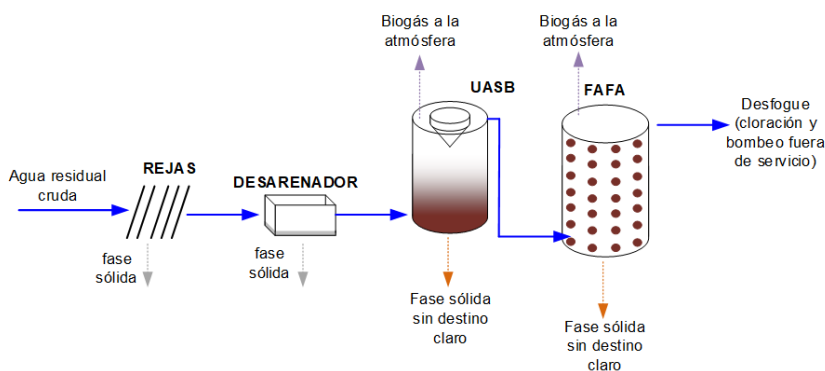


Diagrama de flujo del proceso existente en la PTAR UASB

mediante bombeo; sin embargo, la ausencia de estos equipos resulta en que el efluente rebose de la planta de tratamiento por el terreno hasta llegar la cañada próxima. Adicionalmente, el sistema no posee un sistema de descarte de lodo de los procesos biológicos (reactor UASB y Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente, FAFA), ni un proceso de tratamiento (deshidratación de este subproducto). Por último, el biogás generado es liberado a la atmósfera, práctica nociva para el ambiente, pues el biogás es rico en metano (CH₄), el cual tiene un impacto de calentamiento global de hasta 28 veces el del CO₂. Estos elementos serán revisados en detalle en esta evaluación.

Revisión de la capacidad del sistema existente

En esta sección se presenta la capacidad del reactor anaeróbico de flujo ascendente con manto de lodo (reactor UASB por sus siglas en inglés) y el Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA) existentes según las recomendaciones de la literatura técnica especializada. La **Tabla 4** presenta las dimensiones principales según lo dispuesto en los planos constructivos.

Tabla 4: Dimensiones del desarenador, reactor UASB y el FAFA

| Parámetro / Dimensión | Unidad | Desarenador | Reactor UASB | FAFA |
|--|----------------|-------------|--------------|--------|
| Número de unidades | - | 2 | 2 | 2 |
| Largo (L) | m | 4 | 5.00 | 7.75 |
| Ancho (b) | m | 0.6 | 5.00 | 8.40 |
| Profundidad Total (H_T) | m | 0.9 a 1.2 | 4.50 | 3.35 |
| Profundidad Útil (H_U) | m | - | 4.00 | 2.50 |
| Profundidad de lecho de piedra en FAFA | m | | - | 1.50 |
| Volumen útil (para todas las unidades) | m ³ | | 200.00 | 325.50 |

i. Revisión del desarenador

Cómo criterios para la revisión del desarenador se utilizó la tasa de flujo superficial recomendada de entre 600 y 1600 m³/m²-día y una velocidad en la sección transversal de 0.30 m/s (Mendonça, 2000).

Tabla 5: Revisión de parámetros de diseño básicos del desarenador.

| Caudal | Valor (m3/día) | Área de sección transversal (m2) | Velocidad transversal (m/s) | Área sección longitudinal (m2) | Tasa de flujo superficial |
|--|-------------------|--|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Cauda máximo instantáneo (2 veces QDM) | 1326 | 0.06 | 0.25 | 2.4 | 552 |
| Caudal Medio Diario (QMD) | 663 | 0.06 | 0.12 | 2.4 | 276 |
| Caudal actual | 221 | 0.06 | 0.04 | 2.4 | 92 |

Cómo se puede apreciar en la tabla anterior, el desarenador tiene un sobredimensionamiento, por lo que no se considera necesario ampliar esta unidad. Si se considera importante equiparlo con los siguientes accesorios:

- Rejas en acero inoxidable y bandeja de sólidos.
- Vertedero para control de altura y cuantificación de caudal (vertedero triangular o Parshall, por ejemplo).
- Compuertas para la operación individual de los mismos.

En vista del sobredimensionamiento de esta unidad, se puede proponer una extracción manual de las arenas por medios mecánicos y su transporte hasta un área de secado.

ii. Revisión de la capacidad del reactor UASB

Los criterios de revisión del reactor UASB fueron tomados de Chernicharo y Bressani (2019), y el resultado de evaluación para cada uno de ellos se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Revisión de parámetros de funcionamiento del reactor UASB.

| Criterio | Ecuación | Rango recomendable | Revisión 663,21 m ³ /d | Revisión 300 m ³ /d | Observaciones |
|----------------|------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Carga orgánica | COV = CO/V | COV ≤ 3.5 kg | COV = 1.48 | COV = 0.66 | Volumen suficiente |

| | | | | | |
|---|--|---|---|---|--|
| volumétrica | | DQO/m ³ -d | kgDQO/m ³ -d | kgDQO/m ³ -d | |
| Tiempo de retención hidráulica | TRH = V/Q | TRH ≥ 7.0 h (T de 22 a 25°C) | TRH = 7.2 h | TRH = 16 h | Volumen suficiente |
| Velocidad ascensional | v = Q/At | v entre 0,5 y 0,7 m/h | v = 0.55 m/h | v = 0.25 m/h | Parámetro satisfactorio |
| Profundidad H _u | - | H _u entre 4.0 y 6.0 m | H _u = 4.0 m | H _u = 4.0 m | Profundidad adecuada |
| Profundidad del compartimiento de digestión H _D | - | H _D ≥ 2.5 m | H _D = 3.20 m | H _D = 3.20 m | Profundidad adecuada |
| Densidad de tubos de alimentación, D _{al} | D _{al} = n. tubos entre área de fondo | 2.0-3.0 m ² / unidad | D _{al} = 25 m ² / 4 = 6.25 m ² / unidad | D _{al} = 25 m ² / 4 = 6.25 m ² / unidad | Cantidad de tubos de distribución insuficiente |
| Ángulo de inclinación del separador trifásico, α | - | α ≥ 50° | α = 40° | α = 40° | Inclinación insuficiente |
| Profundidad del compartimiento de decantación, H _s | - | H _s ≥ 1.5 m | H _s = 1.0 m | H _s = 1.0 m | Profundidad insuficiente |
| Velocidad en las aberturas de paso al decantador secundario | Q / área de paso | v _{paso} menor a 2.0 m/h | Área de paso = 0.88 m ² v _{paso} = 31.4 m/h | Área de paso = 0.88 m ² v _{paso} = 14.2 m/h | Velocidad muy elevada para cualquier condición |
| Tasa de aplicación hidráulica TAH del decantador secundario | Q / área superficial de decantación | 0.6 a 0.8 m ³ /m ² -h | Área superficial de decantación = 23.0 m ² TAH = 1.20 m ³ /m ² -h | Área superficial de decantación = 23.0 m ² TAH = 0.54 m ³ /m ² -h | TAH muy elevada para diseño original, adecuada para caudal real estimado |
| Traslape de los deflectores | - | 0.15 – 0.20 m | Inexistentes | Inexistentes | No hay deflectores |



COV: carga orgánica volumétrica (kgDBO/m³-d)

CO: Carga orgánica afluente (kgDBO/d);

V: volumen útil de la laguna (m³);

v: velocidad ascensional

TRH: Tiempo de retención hidráulica (d);

Q: caudal promedio diario de diseño (m³/d).

La Tabla 6 muestra que los reactores UASB cuentan con volumen suficiente para la carga hidráulica. Sin embargo, existen fallas en el área de decantación y separador trifásico de la unidad.

1. El compartimiento de decantación es muy pequeño para el valor de caudal del diseño original.
2. No hay deflectores que separen el compartimiento de digestión del de decantación
3. La velocidad de paso entre ambos compartimientos es extremadamente elevada.

Estos factores producirán una retención de la biomasa pobre, con la posibilidad de que exista arrastre de lodo constante, o peor aún, que ni siquiera sea posible su crecimiento en el sistema. Es necesario corregir estos problemas de diseño, como se muestra en la sección siguiente. A nivel hidráulico; no se cuenta con un sistema de reparto y distribución en toda el área de reactor. De igual forma, los canales de recogida del agua tratada deben ser reconstruidos para poner permitir una hidráulica correcta en los reactores.

iii. Revisión de la capacidad del Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

El Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA) recibirá el efluente del reactor UASB, con el objetivo de remover sólidos y materia orgánica adicional. La revisión de las dimensiones de

esta unidad se muestra en la

Tabla 7, según lo dispuesto en Chernicharo (2007). Para las estimaciones se asume una eficiencia de remoción de materia orgánica en el reactor UASB de 70% de DBO y 65% de DQO, resultando en cargas orgánicas afluentes al FAFA de 60.9 kg DBO/d y 103.3 kg DQO/d, respectivamente.

Tabla 7: Revisión de parámetros de funcionamiento del FAFA

| Criterio | Ecuación | Rango recomendable | Revisión 663,21 m ³ /d | Revisión 300 m ³ /d | Observaciones |
|--|--|--|---|---|------------------------------|
| Carga orgánica volumétrica total | $COV = CO/VT$ | COV entre 0.15 a 0.50 kg DBO/m ³ -d | COV = 0.19 kg DBO/m ³ -d | COV = 0.085 kgDBO/m ³ -d | Volumen útil adecuado |
| Tiempo de retención hidráulica | $TRH = V/Q$ | TRH entre 5 a 10 h | TRH = 11.8 h | TRH = 26.1 h | Volumen ligeramente excedido |
| Profundidad del medio de soporte HF | - | HF entre 0.8 y 3.0m | HF = 1.5 m | HF = 1.5 m | Profundidad adecuada |
| Carga orgánica volumétrica en medio de soporte de piedra | $COVp = CO/VP$ | COV entre 0.25 a 0.75 kgDBO/m ³ -d | Volumen de piedra = 97.7 m ³ COVp = 0.62 kg DBO/m ³ -d | Volumen de piedra = 97.7 m ³ COVp = 0.28 kg DBO/m ³ -d | Volumen útil adecuado |
| Tasa de aplicación hidráulica TAH | $Q / \text{área superficial del filtro}$ | 6 a 10 m ³ /m ² -d | Área superficial de decantación (130.2 m ²) TAH = 5.10 m ³ /m ² *h | Área superficial de decantación (130.2 m ²) TAH = 2.31 m ³ /m ² *h | TAH adecuada |



COV: carga orgánica volumétrica (kgDBO/m³-d)

CO: Carga orgánica afluente (kgDBO/d);

V: volumen útil de la laguna (m³);

v: velocidad ascensional

TRH: Tiempo de retención hidráulica (d);

Q: caudal promedio diario de diseño (m³/d).

La Tabla 7 muestra que el FAFA cumple con todos los requisitos necesarios a nivel de criterios de diseño. El TRH ligeramente superior al rango recomendado no supondrá ningún problema. Por lo tanto, no sería necesario implementar obras adicionales extensas para recuperar esta unidad.

Los principales problemas de esta unidad son los siguientes:

1. Ausencia de losa superior, por lo que los gases son emitidos de forma libre a la atmósfera.
2. Los canales de recogida construidos en la zona superior fueron instalados en tubería en PVC perforada y están totalmente deteriorados.
3. No hay mecanismos para el retiro de lodos de la zona inferior del fondo falso del FAFA.



Filtros FAFA sin losa superior

Revisión de elementos necesarios para el buen funcionamiento de las unidades existentes

Durante la visita técnica, y al estudiar los planos del proyecto, pudo constatar una serie de elementos recomendados para la buena operación de las PTARs, y más particularmente, para los reactores anaeróbicos (reactor UASB y FAFA) son inexistentes en el sistema. Estos elementos son analizados en esta Sección. Se usó como referencia principal lo establecido en Chernicharo y Bressani (2019), y Chernicharo (2007).

– Tratamiento preliminar

El sistema cuenta con un tratamiento preliminar antes de los reactores anaeróbicos. Esta unidad es necesario recuperarla. Se recomienda instalar rejillas de desbaste de limpieza manual en acero inoxidable (barras de sección rectangular, no circular), con un tamaño de paso un máximo de 1cm. Además, es necesario colocar una bandeja de escurrimiento para que el operador arrastre los sólidos retenidos por medio de un rastrillo.



Ausencia de compuertas y rejillas en desarenador actual

Adicionalmente, el sistema cuenta con dos canales desarenadores que pueden recuperarse, una vez que se coloque una nueva compuerta de cierre. Estos canales no cuentan con una descarga de fondo para el descarte de arena, lo que se recomienda instalar en una etapa posterior o evaluar su limpieza manual. Estas mejoras deben ser cuidadosamente definidas durante la etapa de diseño final de la propuesta de remodelación.

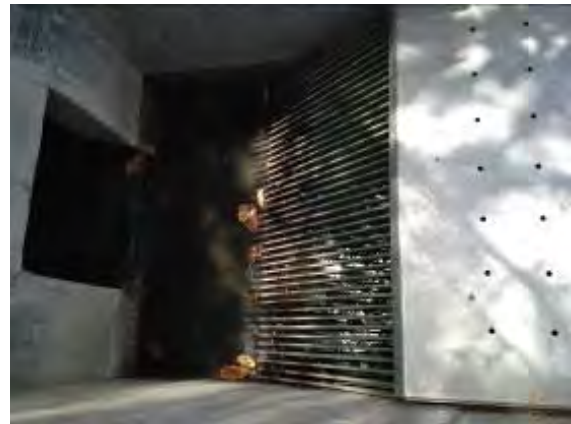


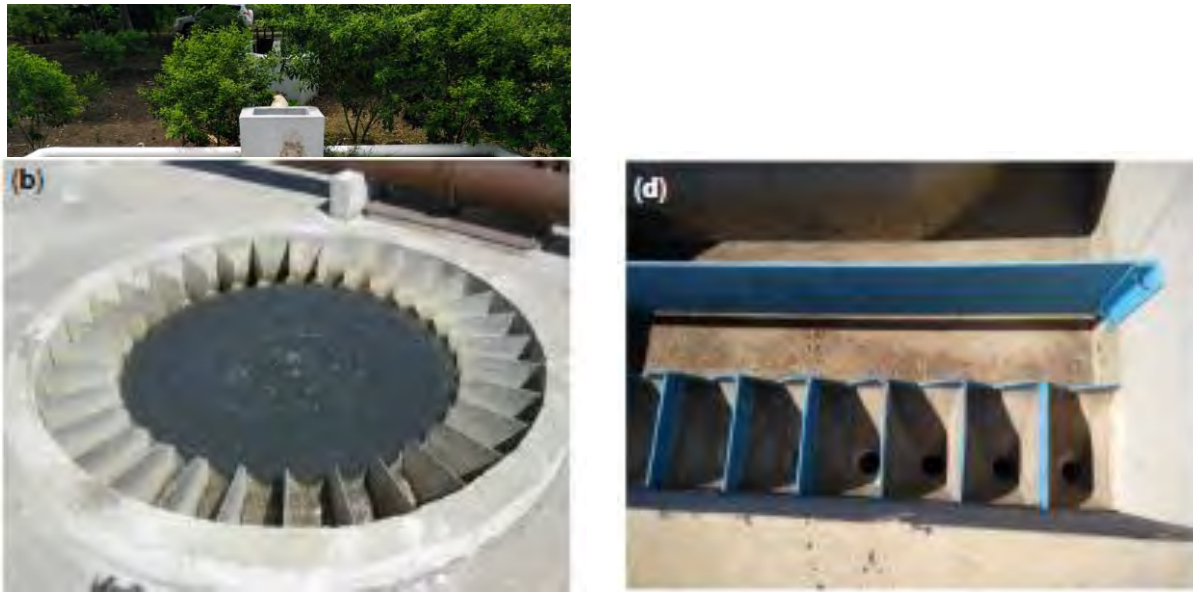
Imagen ilustrativa de una caja de rejas manual

– Elementos de distribución del afluente en el reactor UASB

Durante la visita técnica pudo verificarse que las cajas de distribución de alimentación no garantizan una adecuada distribución del afluente, además de que no se cuenta con la cantidad suficiente de tubos de alimentación en el fondo. Estos elementos son necesarios para garantizar un comportamiento hidráulico adecuado en el reactor UASB (mezcla completa) que promueva el contacto entre el sustrato y la biomasa anaeróbica.



Fotografías de
UASD-Recin



Ejemplos de sistemas de distribución de caudal para reactores UASB (Chernicharo y Bressani, 2019)

Como se observa en la imagen superior, para garantizar una distribución homogénea del afluente, las cajas de distribución hidráulica deben usar elementos de simetría combinados con vertedores. Una sección sumergida garantiza un nivel hidráulico idéntico para cada vertedor. Además, un único tubo de alimentación en el fondo está conectado a la salida de cada vertedor.

En relación con los tubos de alimentación, en la sección anterior se mostró que su número es insuficiente. Estimando una densidad de alimentación entre 2.0 a 3.0 m² de área de reactor UASB por tubo de alimentación, puede verificarse que para los sistemas de la UASD se requieren aproximadamente 20 tubos de alimentación (10 para cara unidad). Se recomienda usar tubos de PVC de 75 mm anclados directamente en el fondo del reactor, 10-20cm sobre el mismo.

- Elementos para la inspección y mantenimiento del separador trifásico (STF) del reactor UASB

Durante la inspección pudo verificarse que los reactores UASB tienen una tapa de inspección en uno de los costados. Es necesario garantizar que estas tapas son herméticas, colocando un sello de caucho o algún dispositivo similar. Esto es importante para evitar la fuga de biogás por este punto. Además, las tapas deben ser suficientemente ligeras para que los operadores puedan levantarlas y dar mantenimiento al interior de los STF. Esto es indispensable para remover la nata que se acumula en el interior de esta unidad con el tiempo. Otras opciones de limpieza de la nata optimizadas son posibles (Lobato et al., 2018), y pueden ser definidas durante la fase de diseño final de la propuesta.

- Materiales del interior del separador trifásico (STF).

Pudo observarse que el interior de los STF es de concreto no revestido. En reactores UASB operando adecuadamente, la generación de sulfuro de hidrógeno (H_2S) llega a producir un biogás con concentraciones de este compuesto tan elevadas como 2000 ppmv. Cuando este compuesto entra en contacto con oxígeno de la atmósfera, puede crear ácido sulfúrico, el que reacciona con el concreto y el acero, con un fuerte impacto de corrosión.



Afectación de hormigón no revestido en reactores UASB operativos (Chernicharo y Bressani, 2019)



Fotografía del estado del hormigón al interior de los reactores de la UASD-
Recinto Santiago

Durante la visita no se observó ninguna afectación de este tipo en el sistema, lo que puede deberse a que los reactores UASB nunca operaron de manera adecuada (poca actividad biológica por problemas de retención de la biomasa, o liberación directa del biogás a la atmósfera, ver siguiente punto).

Para su protección, se recomienda revestir el interior de los STF de concreto (y también el borde libre de los reactores, de ser posible) con una capa de resina epóxica bituminosa de al menos 0.4mm.

También se detectó la instalación de la tubería de recogida de gases utiliza parte de las tuberías de ingreso de agua cruda. A nivel de diseño se debe tomar en cuenta que la tubería de gas debe ser un sistema completamente separado y no es posible utilizar la misma tubería para ambas operaciones (ingreso de agua y recogida de gases).

- Elemento para medición de caudal y muestreo a la salida del sistema

Se recomienda instalar una caja de muestreo y medición del efluente a la salida del sistema (FAFA o humedal). Para ello se puede colocar una caja con un vertedor triangular.

Captación, almacenamiento y quema del biogás generado

Al revisar los planos constructivos del proyecto, pudo verificarse que el biogás generado en el reactor UASB era directamente emitido hacia la atmósfera. Esto debe corregirse en el mejoramiento del sistema, sellando los tubos de comunicación del STF con

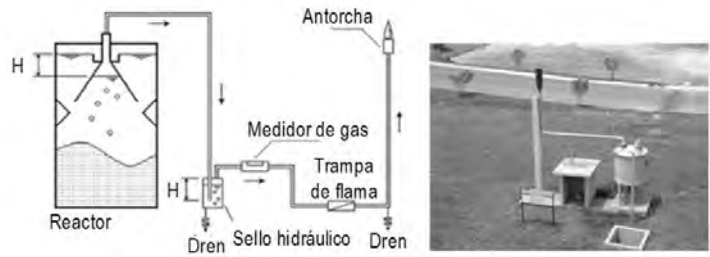
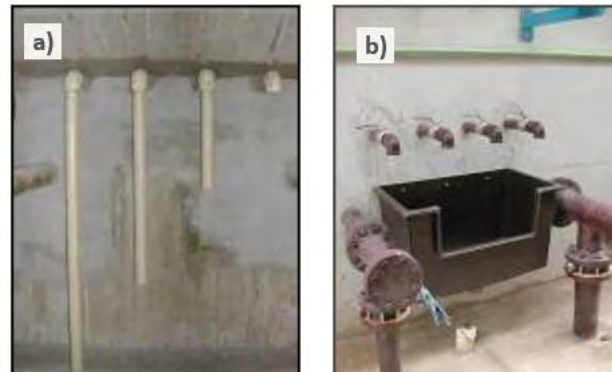


Diagrama y ejemplo de un sistema antorcha para quemado de biogás

el ambiente, y dirigiendo este gas hacia el STF, para luego conectarlo por medio de una tubería a un sello hidráulico y una antorcha para su destrucción térmica. De este modo se dejará de emitir CH₄ hacia la atmósfera. En el caso del FAFA este no cuenta con losa superior, por lo que los gases son emitidos de forma directa a la atmósfera. Esta situación debe corregirse mediante la construcción de la losa y la conexión de una salida de gases para su posterior quemado o reúso. Para la antorcha, se recomienda un sistema semi abierto con adecuada protección contra el viento y la lluvia, y un sistema eléctrico de ignición alimentado con energía solar.

- Elementos para control operacional de nivel del manto de lodo en el reactor UASB

Durante la visita técnica y revisión de los planos del proyecto pudo observarse que el reactor UASB no posee un sistema de tuberías para la medición operacional de la altura del manto de lodo. Esto es importante para una buena operación del sistema y se recomienda su instalación durante la remodelación del sistema.

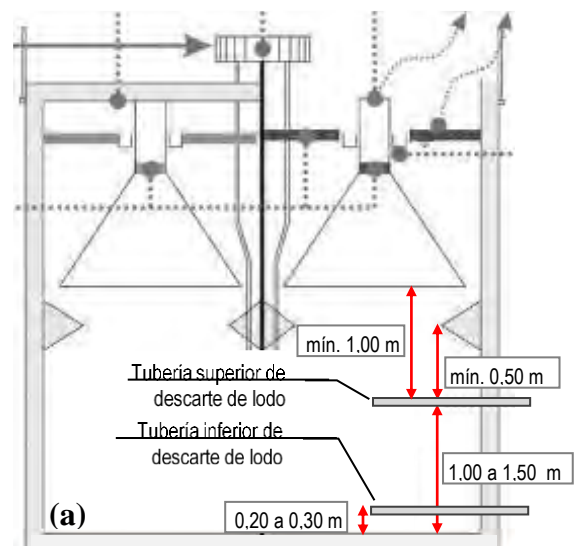


Ejemplo de sistema de muestreo de lodos: a) interno b) externo (Lobato et al, 2018).

Se recomienda instalar una válvula a cada 50cm de altura del reactor UASB, comenzando a 20-30cm del fondo, y hasta la altura de separación entre los compartimientos de digestión y decantación de la unidad. Puede usarse tubería de PVC de 50mm de diámetro, e instalar un juego de control de nivel por reactor UASB.

– Elementos para descarte de lodo

En planos constructivos y en sitio se observó lo que parece un sistema de descarte de lodo del fondo del FAFA, aunque no quedó claro hacia donde son enviados estos subproductos. Debería hacerlo hacia un sistema de deshidratación del lodo (ver sección).



Ejemplo de sistema de descarte de lodos

siguiente

En el caso de los reactores UASB, no se observó un sistema de descarte de lodo, lo que debe

ser corregido en el sistema.

Se requiere de un sistema de descarte de lodo para cada reactor UASB. Cada tubería debe ser de 75 mm de diámetro como mínimo, y descargar el lodo de purga en el sistema de deshidratación de lodo (ver siguiente Sección).

En vista que la construcción de un sistema de muestreo y descarte de lodos puede ser compleja, esto debido a la mayoría del reactor se encuentra bajo nivel de suelo; se propone la instalación de un sistema por bombeo. Bajo este concepto, es posible instalar las diferentes tuberías a las alturas recomendadas, de forma que, mediante una bomba de desplazamiento positivo y apta para el manejo de lodos, se puede realizar la extracción de los lodos hacia los secaderos y a su vez el muestro de los mismos. La misma bomba podría ser aprovechada para la purga de lodos desde el filtro FAFA.

– Proceso de deshidratación de lodo descartado

Existe la falsa creencia que los sistemas anaeróbicos no generan lodo, lo cual es un error. En una mucho menor medida que los sistemas aeróbicos (hasta una quinta parte de la generación de los sistemas aeróbicos), los sistemas anaeróbicos generarán lodo anaeróbico, el cual tiene un aspecto similar al petróleo y se encuentra estabilizado (baja relación SV/ST que garantiza que no tendrá olores fuertes ni atraerá vectores durante la fase de deshidratación). Normalmente este lodo presenta concentraciones de sólidos entre 2 a 5 % (valor elevado en comparación con menos de 1% para los sistemas de lodos activados).

En el caso de la PTAR de la UASD, la estimación aproximada de lodo se muestra a continuación, considerando datos de la literatura. También se muestra una propuesta de dimensionamiento de lechos de secado.

a) Estimación de la producción de lodo anaeróbico (100% caudal de diseño)

Coefficiente de producción de lodo en el reactor UASB (0,10 a 0,20 kg ST/kg DQO aplicada): $Y = 0,20$

Masa específica del lodo (usualmente en el orden de 1.020 a 1.040 kg ST/m³) = 1.020 kg ST/m³

Carga aplicada en reactores UASB: 295.1 kg DQO/d.

Producción diaria de lodo en el reactor (P_{lodo})

$P_{\text{lodo}} = Y \times CO$: $P_{\text{lodo}} = 0,20 \text{ kg ST/kg DQO aplicada} \times 295.1 \text{ kg DQO/d} = 59.0 \text{ kg ST/d}$

Establecimiento de la rutina de descarte de lodo y tiempo del ciclo (t_c) de los lechos de secado

Considerando:

Frecuencia de descarte - f_d : 7 días

Tiempo del ciclo de lechos de secado – t_c : 14 días (2 semanas)

El tiempo del ciclo de lechos de secado debe ser definido en función de las condiciones climáticas del sitio y aspectos operacionales de cada PTAR.

Concentración esperada para el lodo (C_{lodo}): 3% (30.000 mg ST/L)

$V_{\text{lodo}} = (P_{\text{lodo}} \times f_d) / (\gamma \times C_{\text{lodo}}) = (59.0 \text{ kg ST/d} \times 7 \text{ d}) / (1.020 \text{ kg ST/m}^3 \times 3\%) = 13.5 \text{ m}^3$

Por lo tanto, el volumen de lodo a descartar cada 7 días sería de 13.5 m³ (6.75 m³ de cada reactor UASB)

b) Dimensionamiento de los lechos de secado

Altura de lámina de lodo en el lecho de secado $H_{lechos} = 0.35 \text{ m}$.

Área necesaria para cada lecho de secado (A_{lechos}):

$$A_{lecho} = V_{lodo}/H_{lecho} = (13.5 \text{ m}^3)/(0.35 \text{ m}) = 38.6 \text{ m}^2$$

Considerando tiempos de secado de dos semanas, se recomienda adoptar 3 lechos de secado de 38,6m² (uno unidad para descarte, y los otros en el proceso de secado). El total de área de lechos de secado debe aumentarse aproximadamente un 25% para considerar los descartes de los FAFAs. El área total de lechos de secado requerido estaría en torno de 150 m² (3 unidades de



Posible espacio para la construcción de lechos de secado

50m²). Un cálculo más preciso puede realizarse durante la fase de diseño final del proyecto, sin embargo, este valor da una estimación conservadora de los requerimientos del sistema de deshidratación para el 100% de capacidad del sistema de tratamiento, además de que muestra claramente que la generación de lodo no es nula. Los lechos de secado son una opción simple y económica para la deshidratación del lodo, por lo que se recomienda su uso en este proyecto. El lodo una vez seco puede plantearse su reúso como mejorar de suelos en los cultivos alrededor del proyecto o su disposición final en relleno sanitario.

– Sistema de disposición del agua tratada

Actualmente no hay un método o tubería para el desfogue del agua residual efluente del sistema de tratamiento. Existe un tanque de almacenamiento y caseta donde se encontraba instalado un sistema de bombeo; sin embargo, al momento de la realización de la visita estos equipos no se encuentran y la caseta de equipos presenta condiciones mínimas.



Caseta de bombeo del agua tratada

Debido al poco o nulo caudal que presenta el sistema de tratamiento no hay un efluente; sin embargo, en caso de aumentar los caudales el agua residual tratada desbordaría del tanque de almacenamiento y escurriría hacia la cañada de forma natural. Ante esta situación se debe rehabilitar el sistema de bombeo y las líneas de riego para permitir el reúso del agua tratada. También se debe considerar que el momento de la visita no hay una acometida eléctrica, por lo que se debe contemplar la ejecución de esta partida. Actualmente se desconoce el estado del sistema de riego; por lo que se recomienda la ubicación de estas y evaluar su posible reparación y utilización. En caso contrario, sería necesario el diseño y construcción de un nuevo sistema de riego.

Revisión de propuesta de la contraparte

A nivel general, la propuesta para la rehabilitación del sistema de tratamiento propone los siguientes cambios:

1. Habilitación de desarenador
2. Reinstalación de tuberías dañadas
3. Limpieza de malezas en reactores UASB y filtros FAFA
4. Limpieza de sedimentos en rector, filtros y cisterna de agua tratada.
5. Colocación de medio filtrantes filtros FAFA
6. Reconstrucción de sala de máquinas.
7. Colocación de sistema de cloración.
8. Protección perimetral.
9. Colocación de grava en los alrededores.
10. Eliminación de árboles que ponen en riesgo las estructuras.
11. Electrificación de cuarto de bombeo (acometida, controles) e iluminación interior y exterior.

Todas estas partidas o actividades están de acuerdo con los trabajos que se requieren para la puesta en servicio del sistema de tratamiento; sin embargo, se debe prestar atención a los puntos centrales mencionados en esta consultoría y que no están incluidos en las actividades.

A modo de resumen se debe evaluar las siguientes partidas adicionales:

1. Sistema de ingreso de agua cruda a los reactores.
2. Rehabilitación completa del separador trifásico (STF), mamparas internas y canales de recogida. Evaluar construcción en hormigón armado o prefabricado.
3. Reforma de filtros FAFA mediante inclusión de losa superior, canales de recogida bajo la losa y puntos de acceso para limpieza de lodos.
4. Sistema de monitoreo de manta de lodos y descarte de lodos para el Reactor UASB.
5. Construcción de lechos de secado para deshidratación de lodos.

6. Sistema de tuberías para recolección de gases y quema de los mismos.
7. Tubería de vertido a cuerpo receptor.
8. Sistema de irrigación (Tuberías).
9. Construcción de humedales artificiales como sistema de postratamiento.

Todas estas partidas requieren de un diseño específico previo a su evaluación económica. También guardan una relación con el caudal de diseño final del sistema de tratamiento; sin embargo, en la siguiente sección se presenta una estimación de los costos que puede conllevar el proyecto con base en la experiencia previa en otros proyectos. Más adelante en esta consultoría se hace una revisión un poco más detallada de las necesidades y cálculos estimados para la implementación de esta solución.

Adicionalmente, se propone la construcción de un humedal artificial de pequeña escala (20 m²) que permite evaluar el desempeño de esta solución previo a la instalación de un sistema para el 100% de la capacidad de tratamiento.

Calidad esperada del efluente una vez corregidos los problemas detectados

La Tabla 8 muestra la concentración del efluente esperable una vez que el sistema de

tratamiento sea recuperado.

Tabla 8: Concentraciones en el efluente y eficiencias de remoción típicas en sistemas anaeróbicos de reactor UASB + FAFA (Adaptado de Von Sperling, 2007).

| Parámetro | Concentraciones en efluente (mg/l) | Eficiencias de remoción | Norma de vertido |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------|
| DBO | 40-80 | 75% - 87% | 50 |
| DQO | 100-200 | 70% - 80% | 160 |
| SST | 30-60 | 80% - 90% | 50 |
| Amonio | > 15 | < 50% | |
| Nitrógeno Total | > 20 | < 60% | |
| Fósforo Total | > 4 | < 35% | |
| Coliformes Fecales | 10^6 - 10^7 | 1-2 log | 1000 |
| Huevos de helminto | > 1 | - | |
| Cloro residual Libre | - | 0.05 | |

Cómo se puede observar en la Tabla 8, este tipo de sistemas pueden llegar a cumplir la norma de vertido con relación a la carga orgánica (DBO, DQO, SST), sin embargo, para ello deben mantener una eficiencia en el rango superior, de ahí que un buen diseño y control operativo son indispensables para lograr las normas de vertido. En cuanto a la remoción de coliformes fecales no es posible cumplir estos límites de vertido, por lo que se deben agregar procesos adicionales para lograr el objetivo de coliformes fecales.

Tomando en cuenta lo anterior, y como parte de los procesos de investigación y la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, se proponen complementar el sistema existente con la instalación y operación de humedales artificiales que mejoren la calidad del efluente final. Por otro lado, bajo el esquema de la normativa actual que restringe la cloración como método de desinfección (0.05 ppm cloro residual libre) y la alta eficiencia

que se debe lograr para cumplir los límites de coliformes previo al vertido (10^3 NPM/100 mL), se debe plantear el uso de sistemas de desinfección por luz ultravioleta como una alternativa. En caso de optarse por métodos de desinfección por luz ultravioleta (UV) se debe prestar atención a la calidad del efluente final de los filtros anaerobios. Los sistemas de desinfección por luz UV ameritan bajos valores de sólidos suspendidos y baja turbiedad, para lograr una desinfección correcta del efluente tratado, lo que usualmente no es viable lograr por medio de FAFAs. Bajo este esquema, la normativa local de vertido limita la aplicación soluciones naturales, ya que la consecución de los niveles de coliformes exigida resulta difícil.

Las referencias de tratamiento terciario de efluentes anaerobios son limitadas, ya que, cómo se mencionó anteriormente, no es usual que logren una adecuada remoción de sólidos y materia orgánica. A nivel de esta consultoría, se recomienda cómo mínimo, la inclusión de un sistema de filtración por anillas, de forma que se puede realizar un pulido y filtrado del efluente de los filtros FAFA. Posterior al sistema de filtración, se puede llevar a cabo la instalación de un sistema de desinfección UV que asegure dosis de radiación de acuerdo con el tipo de agua (baja transmitancia) y que permita una reducción mínima de 4 unidades logarítmicas.



Ejemplo de un sistema de filtración por anillas

Diagrama de flujo de la PTAR y disposición final de los subproductos propuestos

Como se mencionó en las secciones anteriores, el sistema recuperado (UASB+FAFA) no cumpliría con los límites de vertido a cuerpo hídrico receptor establecidos en la reglamentación dominicana (Coliformes fecales) y puede cumplir con los límites de materia orgánica si es diseñado

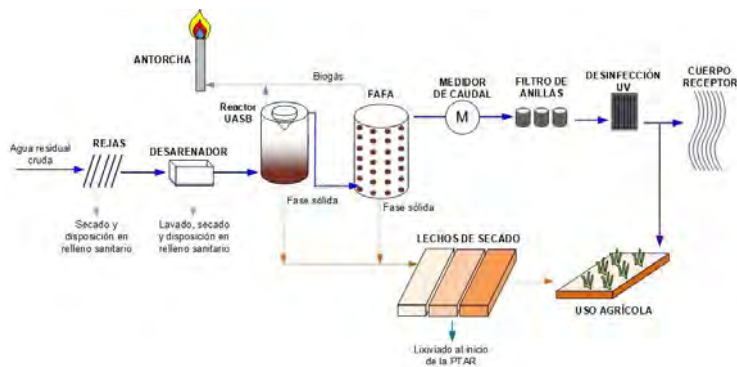


Diagrama de procesos propuesto para el sistema de tratamiento de aguas residuales de la UASD- Recinto Santiago

y operado de forma correcta. Sin embargo, el proyecto tiene un gran potencial para que el tipo de disposición final del agua sea el reúso por irrigación, como lo propone la contraparte.

El tipo de reúso, según las normas de la OMS (1989) sería el agrícola Tipo C “Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles” en los cuales los trabajadores y el público no están expuestos. Para este tipo de disposición final la OMS recomienda al menos un tratamiento primario, y en esta propuesta se tendría un tratamiento secundario / biológico, superando el mínimo de la OMS.

En cuanto al sistema de disposición del agua tratada, en caso de que se debe detener el riego del agua tratada, se inclusión del sistema de filtración y desinfección UV permitiría lograr la disposición del efluente tratado de acuerdo con la normativa local y evaluar el rendimiento de este tipo de sistemas como postratamiento de los sistemas anaeróbicos.

Propuesta de conversión del FAFA a humedal construido

La aplicación de los sistemas anaeróbicos de alta tasa, tales como los reactores UASB, es práctica común y aceptada en los climas tropicales para el tratamiento de aguas domésticas. Cuando las condiciones ambientales y de operación son favorables, presentan grandes ventajas, tales como:

1. Bajo costo operativo (no hay consumo eléctrico)
2. Simplicidad operativa
3. Baja producción de lodos

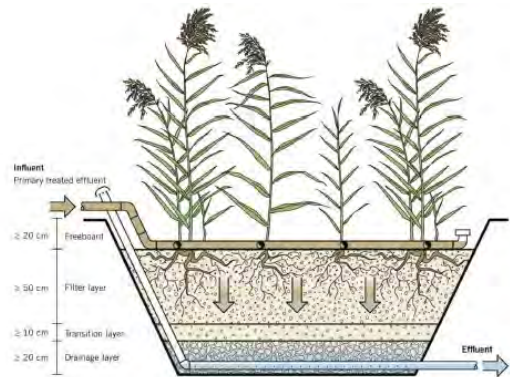
A pesar de ello, presentan el inconveniente que la calidad del efluente no es lo suficiente buena para cumplir con las normativas de vertido. Es por ello, que se requiere la aplicación de sistema de postratamiento para mejorar la calidad del efluente final en términos de remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos, para adaptarse a las normas de vertido de acuerdo con cada regulación local.

Dentro de este marco conceptual, existen varias soluciones de postratamiento, tanto aeróbicas, anaeróbicas y de origen natural. Cada una de ellas presente ventajas y desventajas, que deben ser analizadas para cada caso en particular.

En uno de los documentos suministrados por la contraparte, se propone convertir el FAFA en un humedal construido (constructed wetland). Esta opción requiere de un análisis minucioso, ya que existen numerosas configuraciones de este tipo de proceso. Adicionalmente, en la documentación recibida, no está claro el objetivo del humedal construido a nivel de tratamiento: remoción de materia orgánica adicional, de sólidos suspendidos, nitrificación del efluente, remoción de microorganismos patógenos, entre otras opciones. Como se discutió

anteriormente, el efluente del sistema UASB con FAFA ya cumpliría con requerimientos de la OMS para reúso agrícola tipo C. Dependiendo del tipo de configuración del humedal, es posible nitrificar el efluente, y remover materia orgánica y sólidos en suspensión adicionales. Aunque lo anterior no es un requisito reglamentario, sí mejoraría el aspecto del efluente y permitiría una aceptación más sencilla por parte de los agricultores. Por otro lado, es posible que el efluente del humedal siga sin cumplir con los requerimientos de vertido a cuerpo de agua por causa de los coliformes fecales (esperando llegar hasta 4-5 unidades logarítmicas de remoción en todo el sistema, todavía el efluente estaría en el límite o por encima de 1000 NMP/100 mL).

Los humedales de flujo vertical tienen como principal objetivo la nitrificación del efluente (Dotro et al., 2017), y normalmente funcionan de manera intermitente (no se envía el efluente de manera continua a la misma unidad, sino que se turna la alimentación de la fase líquida entre distintas unidades). La alimentación intermitente garantiza que el sistema trabajará en condiciones no saturadas



Esquema de humedal de flujo vertical (Dotro et al, 2017)

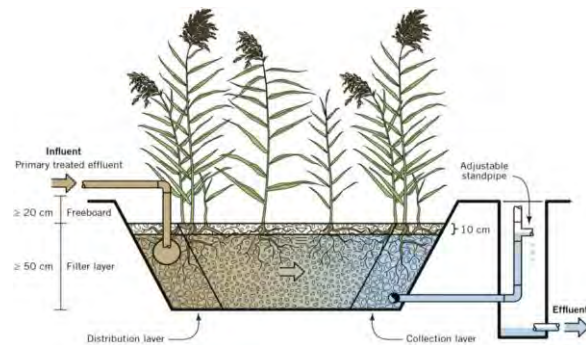
con agua, con presencia de aire en el material filtrante, lo que permite la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrato (nitrificación). A continuación, se discuten algunos aspectos relacionados con esta propuesta.

Estos sistemas tienen una granulometría variable, y que la alimentación se da en la parte superior (de manera intermitente). Diferentes normas de diseño (Dotro et al., 2017) recomiendan que el material superior sea arena con diámetro efectivo entre 0.06-4 mm, y una profundidad entre 50 y 100cm. Este estrato estaría sobre una capa de grava con diámetro de 4 a 8mm. El FAFA actual no cumple con esta granulometría, por lo que habría que reemplazar

el material de relleno, verificando los niveles y condiciones hidráulicas del sistema.

Adicionalmente, la carga orgánica de diseño de estos sistemas varía entre 20 a 27 gr DQO/m²-d, y una carga hidráulica máxima de 0.80 m³/m²-d, e intervalos entre alimentaciones de por lo menos 6 horas (Dotro et al., 2017). Para la carga orgánica afluente de DQO (aproximadamente 103.3 kg DQO/d), el área requerida rondaría aproximadamente 3800 a 5000 m² para la totalidad del efluente. De manera similar, según el criterio de carga hidráulica, para el caudal medio de 663.21 m³/d, el área mínima requerida sería de 830 m² (más el área requerida para las pausas de alimentación). El área disponible de FAFAs es de solamente 130 m², muy por debajo del requerido de más de 3500 m² (rige criterio de carga orgánica).

Otra opción sería convertir el sistema en un humedal de flujo horizontal subsuperficial, otra configuración de humedal construido. De manera preliminar, para el 100% del caudal de diseño se estima que para dicho sistema se requeriría un área estimada de 2000 a 4000 m² (para obtener una DBO en el efluente de 25 mg/L, considerando una DBO afluente al humedal entre 50-100 mg/L). El humedal construido requeriría de una profundidad total de unos 0.65 m (0.50 m útiles), con medio de soporte de piedra de 10 mm de diámetro (los primeros 3 m de humedal deberían ser con piedra de 40 mm de diámetro para evitar problemas de colmatación. Esta configuración tampoco sería posible de adecuar en el FAFA actual.



Esquema de humedal de flujo horizontal
(Dotro et al, 2017)

total

Para ambas configuraciones de humedal construido el área disponible de FAFA no es suficiente para dar tratamiento a la totalidad del efluente del reactor UASB y cumplir con los criterios técnicos de cara hidráulica y orgánica, además sería necesario modificar los medios filtrantes. En caso de construir un humedal artificial para fines



Área propuesta para construcción de humedal artificial

académicos y de investigación, se recomienda construirlo fuera del FAFA y siguiendo las recomendaciones de la literatura. A nivel preliminar, en un área de 40 m² sería posible tratar unos 0.6 a 4.3 m³/día procedentes del reactor UASB (Carga orgánica superficial de 2 a 13 g DBO/m²-día).

Tal cómo se ha explicado, la conversión del FAFA en un humedal construido no se apega a los criterios normales, ya que el flujo en un FAFA ocurre de abajo hacia arriba. Sin embargo, en vista de los resultados observados en el muestreo del que se tiene referencia, la necesidad de seguir aportando a la investigación en el área de postratamiento de efluentes anaerobios y que la planta de tratamiento se encuentra subutilizada, se plantea el siguiente esquema:

1. Derivar parte del caudal efluente del reactor UASB y construir un nuevo humedal de flujo subsuperficial de 40 m².
2. Reconstrucción de uno de los FAFA según especificaciones y recomendaciones.
3. Mantener uno de los FAFA actuales en las condiciones actuales y evaluar su comportamiento mediante un control de caudal a la entrada de este.
4. Instalación de un sistema de filtración y desinfección UV para el caudal actual.
5. Instalación de sistema de bombeo para reúso del agua tratada.

Costos estimados para la rehabilitación del proyecto

La Tabla 9 resume las mejoras requeridas en el sistema existente, según las secciones anteriores, junto con una clasificación de su importancia para la recuperación del sistema.

Tabla 9: Síntesis de mejoras necesarias en el sistema y clasificación de su prioridad

| # | Mejora necesaria |
|----|---|
| 1 | Recuperar sistema de tratamiento preliminar |
| 2 | Construcción de caja de reparto de caudales con válvulas de compuerta 6" para reparto de caudal a UASB a rehabilitar y UASB para investigación |
| 3 | Construcción de canal de reparto de caudales para distribución homogénea en el reactor y tuberías de reparto internas |
| 4 | Limpieza de reactor a rehabilitar (100 m3) |
| 5 | Corregir baja capacidad de compartimiento de decantación en reactores UASB, demolición, limpieza y reconstrucción de separador trifásico (Se puede realizar primero en una unidad). |
| 6 | Aumentar área de paso entre compartimiento de digestión y compartimiento de decantación en reactor UASB a rehabilitar |
| 7 | Colocar deflectores para separar compartimiento de digestión de decantación en reactor a rehabilitar |
| 8 | Colocar protección contra la corrosión en el interior del STF y borde libre del reactor UASB (Uno de los reactores). |
| 9 | Colocar sistema de control de nivel del manto de lodo en reactores UASB (Ambos reactores) |
| 10 | Colocar sistema de descarte de lodo en reactores UASB y FAFA (Todas las unidades) |
| 11 | Construir sistema de tratamiento de lodo anaeróbico de descarte (lechos de secado) |
| 13 | Sellar puntos de fuga de biogás (tuberías pasantes y tapas de registro) |
| 12 | Instalar sistema de captación, transporte y quema de biogás generado en reactores UASB y FAFAs |
| 13 | Limpiar de maleza y lavar FAFAs |
| 14 | Construcción de losa superior de FAFAs y canales de recogida o tubos de recogida y colocar capa de grava superior |
| 15 | Construir caja de registro a la salida para muestrear y medir caudal efluente |
| 16 | Instalación de sistema de filtración por anillas y desinfección UV |

| | |
|----|---|
| 17 | Diseñar e instalar un sistema apropiado para disponer de efluente tratado mediante riego |
| 18 | Construcción de un área para el operador del sistema de tratamiento y futuras investigaciones |

La Tabla 9 muestra una lista de actividades que son necesarias para una recuperación plena del sistema existente en la PTAR UASD. Estas deberán ser consideradas durante la etapa de diseño final de la propuesta de reestructuración de la PTAR.

Para la mayoría de estos puntos es necesario un diseño específico de la propuesta de mejora que use como punto de partida lo expuesto en este documento, complementado con la literatura técnica correspondiente. Los puntos señalados como indispensables no deberían dejarse de lado bajo ningún motivo, mientras puntos con prioridad muy alta y alta son muy recomendables para que el sistema pueda ser adecuadamente operado. Los puntos con prioridad media son recomendables para extender la vida útil de sistema y mejorar el proceso.

Se debe prestar atención al rediseño del separador trifásico, es muy probable que implique una demolición de estructuras, instalación de vigas de apoyo, ampliación de pasantes, etc. Si el presupuesto fuera suficiente, sería recomendable evaluar cambiar por completo los STF y colocar unidades de un material más resistente a la corrosión, que cumplan el criterio de inclinación mínima y que sean más ligeros (polipropileno o fibra de vidrio), incluyendo también un sistema de descarte de nata hidrostático (Lobato et al., 2018).

A nivel de esta consultoría y en consecuencia con la idea que el sistema de tratamiento funcione como una unidad de investigación y capacitación técnica; se recomienda, como mínimo, intervenir uno de los reactores y filtro anaerobio con todas las observaciones planteadas. Se podría plantear una segunda fase de intervención en el segundo reactor en caso de que se prevea un aumento de la población del recinto.

La segunda unidad del sistema de tratamiento se propone mantenerla en el estado existente, de forma que se pueden establecer investigaciones y corroborar los resultados obtenidos en análisis previos. Esto también sería muy útil para transferir conocimientos a la población de estudiantes y que funcione cómo un caso real de análisis y poder comparar el funcionamiento de las unidades.

También se recomienda la inclusión y construcción de una caseta de operación y laboratorio, de forma que se mejoren las condiciones actuales y se propicie un mantenimiento correcto del sistema de tratamiento y un espacio que se preste para las labores de investigación.

En la siguiente tabla se presenta un estimado de los costos para la implementación del proyecto.

Tabla 10: Costos estimados para la ejecución del proyecto.

| Unidad | Cantidad estimada | Costo estimado (USD) |
|--|-------------------|----------------------|
| Rehabilitación de tratamiento preliminar | Global | 8,000 |
| Rehabilitación de 1 reactor UASB | Global | 20,000 |
| Rehabilitación 1 filtros FAFA | Global | 18,000 |
| Construcción de caseta de operación y laboratorio | Global | 10,000 |
| Construcción de lechos de secado (80 m ²) | Global | 25,000 |
| Instalación de tuberías de muestreo y purga de lodos mediante bomba de desplazamiento positivo | Global | 20,000 |
| Sistema de bombeo agua tratada a riego | Global | 6,000 |
| Sistema de filtración por anillas y desinfección UV | Global | 15,000 |
| Humedal artificial para investigación | Global | 5,000 |
| Sistema de manejo y quema de gases | Global | 20,000 |
| Sistema de filtración y desinfección UV | Global | 15,000 |

| | | |
|--|-------------------------|---------|
| Observaciones: no se contempla la acometida eléctrica y ni el sistema de riego | Subtotal | 162,000 |
| | Costos indirectos (30%) | 48,600 |
| | Total | 210,600 |

Requisitos legales

En la siguiente tabla se presentan las diferentes instituciones que deben ser involucradas para realizar los trámites correspondientes previo a las obras de remodelación. Se debe tomar en cuenta que esta tramitología es la realizada para la realización de proyectos particulares; sin embargo, al tratarse de una obra ya construida y propiedad de INAPA se pueden mediar los acuerdos de colaboración entre todas las instituciones para reducir los tiempos indicados.

Tabla 11: Trámites y requisitos legales previo a la realización del proyecto

| Institución | Trámite | Tiempo estimado | Referencia |
|--|---|---|---|
| INAPA (Instituto Nacional de Aguas Potables) | Aprobación de documentación técnica | 30 días laborables | https://www.inapa.gob.do/index.php/proyectos/category/26-reglamentos-y-requerimientos-de-proyectos# |
| COORASAN (Corporación de Acueductos y Alcantarillados) | Evaluación de proyecto particulares | No hay tiempo estimado. Tomar referencia de 30 días | https://www.coraasan.gob.do/index.php/servicios-m/item/410-evaluacion-proyectos-particulares |
| Ministerio de Ambiente | Modificación de cambio de procesos y corta de árboles en caso necesario | 60 a 120 días laborales | https://ambiente.gob.do/autorizaciones-ambientales-2/ |
| Ministerio de Obras Públicas | Licencia de construcción | 45 días laborables | https://www.mopc.gob.do/servicios/direcci%C3%B3n-oficina-central-de- |

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | tramitaci%C3%B3n-de-planos/emisi%C3%B3n-de-licencia-de-construcci%C3%B3n/ |
|--|--|--|---|

Indicadores

Para el cálculo de los indicadores del proyecto se ha utilizado el dato de caudal calculado con base en la población actual (221 m³/día). El valor de DBO en el agua cruda se ha utilizado una de 306 mg/L. Los valores de nutrientes en el agua cruda se han utilizado los reportados en la Tabla 1 y una eficiencia de 60% y 35% de remoción de nitrógeno y fósforo respectivamente, las cuales son usuales en sistemas lagunares como el propuesto.

- + Número de soluciones de baja tecnología: 5
 - Caja de rejas y desarenador.
 - Reactor UASB.
 - FAFAs
 - Humedal construido
 - Reúso de agua tratada.
 -
- + Volumen de agua residual a tratar anualmente (2021): 80655 m³
- + Población beneficiada: 6500 estudiantes (1127 Habitantes equivalentes).
- + Reducción de la contaminación:
 - DBO eliminada anualmente: 20,650 kg DBO/año
 - Nitrógeno evitado: 6,630 kg NT/año (60% de remoción).
 - P evitado: 680 kg PT/ año (35% de remoción).

Referencias

Chernicharo, C. A. L. (2007). *Anaerobic Reactors*. Belo Horizonte, Brasil: Editora IWA.

Chernicharo, C. A. L. y Bressani, T. (Editores). (2019). *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*. IWA Publishing.

<https://doi.org/10.2166/9781780409238>

Lobato, L. C. S., Ribeiro, T. B., Silva, B. S., Flórez, C. A. D., Neves, P. N. P. y Chernicharo, C. A. L. (2018) Contribución para el perfeccionamiento del diseño, la construcción y la operación de reactores UASB aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas – Parte 3: Gestión del lodo y la nata. *Revista DAE*, 66 (214), 30–55.

OMS (1989). Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Reporte técnico Serie 778. Geneva: Organización Mundial de la Salud.

Sperling, Von M., 2007. *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*, 1st ed, IWA Publishing. London. <https://doi.org/10.2166/9781780402086>

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., von Sperling, M. (2017). *Treatment Wetlands*, 1st ed, IWA Publishing.

6.2. Reporte de Viabilidad Técnica Sabana Yegua



Viabilidad técnica de proyecto de saneamiento del Municipio de Sabana Yegua

REPORTE FINAL



Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



En alianza con



En colaboración con



El desarrollo la Viabilidad Técnica del proyecto de saneamiento del Municipio de Sabana Yegua fue liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) bajo el Proyecto GEF CReW+.

El GEF CReW+ es un proyecto de asociación financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) que está siendo implementado conjuntamente por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 18 países de la Región del Gran Caribe (RGC).

Este proyecto se basa en su anterior fase exitosa del proyecto “El Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales (CReW)” (2011-2017). CReW+ está siendo ejecutado por Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU) en nombre del BID y el PNUMA, respectivamente.

Los 18 países participantes en el CReW+ (Barbados, Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Panamá, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, St. Vincent and the Grenadines, Surinam, Trinidad y Tobago) varían geográficamente, desde grandes países continentales hasta pequeños estados insulares con contextos políticos, lingüísticos y culturales significativamente diferentes.

Sobre el GEF: el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) ha proveído de \$22 millones en donaciones y blended finance y ha movilizó cerca de \$120 billones en cofinanciamiento en más de 5200 proyectos y programas. El GEF es el fondo fiduciario más grande enfocado en permitir a países en desarrollo invertir en la naturaleza y apoya la implementación de convenios internacionales en biodiversidad, cambio climático, químicos y desertificación. Reúne 184 gobiernos, adicionalmente sociedad civil, organizaciones internacionales, sector privado y aliados.

Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



Las opiniones expresadas en esta publicación son de los/as autores/as y no necesariamente reflejan los puntos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) o los países que representan.

El uso comercial no autorizado de los documentos está prohibido y puede ser sancionado según las políticas de las agencias y/o las leyes aplicables.

Resumen ejecutivo

El municipio de Sabana Yegua tiene la necesidad de contar con un sistema de tratamiento de aguas residuales para su núcleo urbano y evitar que las mismas sean descargadas de forma directa a los cuerpos de agua. Actualmente, se cuenta con un alcantarillado sanitario que ha sido ampliado y mejorado; sin embargo, la planta de tratamiento ha permanecido fuera de servicio desde el año de 1990.

A través del programa Sanitation for Million (S4M) se pretende evaluar la viabilidad técnica de recuperar el sistema de tratamiento lagunar existente y dar una solución que reduzca el impacto ambiental dentro del enfoque de la economía circular.

La evaluación de la infraestructura existente, de las cargas actuales y futuras proyectadas para la PTAR de Sabana Yegua indican que es posible recuperar el sistema lagunar para que opere como un proceso de laguna anaeróbica seguido por una laguna facultativa, con el objetivo de aprovechar el agua tratada para el reúso en los campos agrícolas adyacentes al proyecto.

La laguna anaeróbica debe incrementar su profundidad para ajustarla a los parámetros de diseño usuales, mientras que la laguna facultativa estaría muy ajustada en relación con la carga orgánica superficial recomendada en la literatura. Los cálculos preliminares indican que esta laguna operaría dentro de los límites recomendados para la población actual, pero su capacidad sería sobrepasada con el aumento de la población luego del año 2023 en caso de que la DBO sea mayor 200 mg/l. (horizonte de diseño, año 2040). Para este cálculo se ha tomado en cuenta la tasa de crecimiento media del país; sin embargo, se espera que sea menor para esta población. Esto indica que una evaluación del crecimiento de la población y la carga orgánica será indispensable para asegurar la operación del proyecto dentro de criterios de diseño aceptables durante su vida útil.

En caso de recuperarse el proyecto, el efluente del sistema no cumplirá con los límites de vertido a cuerpo hídrico establecidos en la reglamentación dominicana. En ese sentido, la recomendación de esta consultoría es optar por disponer las aguas residuales tratadas en reuso agrícola, por medio de la técnica de fertiirrigación, aprovechando la cercanía de amplias extensiones de plantaciones de plátano y pasto para forraje. Se propone utilizar como referencia las normas dictadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) ante la ausencia de una norma local para tal fin.

Este sistema deberá ser debidamente dimensionado (determinar el número de hectáreas que pueden recibir el agua tratada y el modo de aplicación) durante la fase de diseño final del proyecto, y es necesario contar con la participación de todos los actores durante la fase de diseño, construcción y operación del sistema de tratamiento y fertiirrigación. Este tipo de solución promovería los principios de economía circular en la comunidad de Sabana Yegua.

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen ejecutivo | 3 |
| Contenido | 5 |
| Índice de Tablas | 7 |
| Contexto | 8 |
| Introducción | 10 |
| Antecedentes..... | 12 |
| Ubicación del proyecto..... | 12 |
| Identificación de actores del proyecto..... | 13 |
| Historia del proyecto y causas abandono | 15 |
| Estado actual del proyecto | 17 |
| Evaluación técnica del proyecto..... | 19 |
| Estimación de caudal y carga orgánica..... | 19 |
| Revisión del perfil hidráulico y alcantarillado | 22 |
| Revisión de tratamiento preliminar | 24 |
| Revisión del sistema lagunar | 25 |
| Gestión de lodos del sistema lagunar | 36 |
| Revisión de propuestas y planos de la contraparte | 41 |
| Costos estimados..... | 43 |
| Recomendaciones para reúso del agua tratada..... | 46 |
| Disposición del efluente tratado en el suelo para reúso agrícola..... | 48 |
| Recomendaciones futuras para el sistema lagunar | 52 |
| Requisitos legales | 56 |
| Indicadores del proyecto..... | 58 |
| Referencias | 59 |
| Anexos | 60 |
| Minuta de reunión inicial | 60 |
| Minuta de revisión informe preliminar | 60 |
| Información de contacto de actores del proyecto..... | 60 |
| Reportes de inspección del Ministerio de Medio Ambiente | 60 |
| Reportes de inspección del INAPA | 60 |

| | |
|---|----|
| Propuesta de rehabilitación preparada por INAPA..... | 60 |
| Planos de rehabilitación PTAR Sabana Yegua preparados por INAPA | 60 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Análisis de agua residual cruda planta de tratamiento Sabana Yegua ⁽¹⁾ | 20 |
| Tabla 2: Escenarios de caudal y carga orgánica proyectados para la planta de tratamiento de Sabana Yegua. | 21 |
| Tabla 3: Perfil hidráulico de la sección de final de la conducción hacia la planta de tratamiento y cotas respecto a nivel de referencia..... | 23 |
| Tabla 4: Dimensiones de las lagunas de la planta de tratamiento de Sabana Yegua. | 28 |
| Tabla 5: Cotas y perfil hidráulico propuesto para el sistema lagunar de Sabana Yegua. | 29 |
| Tabla 6: Revisión de parámetros de funcionamiento de la laguna anaeróbica..... | 30 |
| Tabla 7: Calidad esperable del efluente de la laguna anaeróbica..... | 31 |
| Tabla 8: Revisión de parámetros de funcionamiento de la laguna facultativa secundaria | 32 |
| Tabla 9: Estimación de la calidad del efluente de la laguna facultativa en términos de materia orgánica y coliformes fecales. | 34 |
| Tabla 10: Concentraciones en el efluente y eficiencias de remoción típicas en sistemas lagunares formados por lagunas anaeróbicas y facultativas ¹ | 35 |
| Tabla 11: Límites permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de biosólidos según su disposición final | 40 |
| Tabla 12: Costos estimados para ejecución de actividades de remodelación del sistema de tratamiento. | 43 |
| Tabla 13: Parámetros adoptados para la determinación del área requerida..... | 49 |
| Tabla 14: Parámetros de vertido a cumplir en el cuerpo receptor..... | 56 |
| Tabla 15: Trámites y requisitos legales previo a la realización del proyecto..... | 57 |

A decorative graphic consisting of three overlapping, wavy lines in shades of blue and green, positioned at the top left of the page.

Contexto

En el 2016, el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) como donante líder y la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) como entidad implementadora lanzaron Sanitation for Millions, una iniciativa multidonante para atender los problemas de agua y saneamiento y contribuir efectivamente en alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenibles 6, 4 y 3. Para mayor detalle <https://www.giz.de/en/worldwide/42666.html>

Sanitation for Millions tiene como objetivo proveer acceso adecuado y equitativo al saneamiento. Sus actividades se centran en las necesidades de grupos vulnerables y en desventaja como niños, mujeres y niñas, refugiados, personas con discapacidades y comunidades indígenas.

Sanitation for Millions busca soluciones sostenibles considerando la cadena de saneamiento y aplicando criterios para asegurar resultados a largo plazo, que sean económicamente viables y socialmente aceptables dejando a ninguna persona atrás. Siendo un programa global, Sanitation for Millions beneficia del intercambio de experiencias y de la gestión de conocimientos entre un país y otro.

El programa es apoyado por el BMZ como donante principal y cofinanciado por la Fundación Bill & Melinda Gates, el fondo de solidaridad británico Water Unite, el Ministerio de Asuntos Exteriores y Comercio de Hungría y, desde 2020, por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

La cooperación con el BID se desarrolla en el ámbito del Proyecto GEF CReW+, “Enfoque integrado para el manejo del agua y de las aguas residuales usando soluciones innovadoras y promoviendo mecanismos de financiamiento en la Región del Caribe”. CReW+ es financiado por el Fondo Mundial para el medio ambiente (GEF, por sus siglas en inglés), implementado por el BID y el Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente (PNUMA) ejecutado por la GIZ, la Secretaría del Convenio de Cartagena y la Organización de los Estados Americanos (OEA).

El GEF CReW+ se ejecuta bajo el marco de Sanitation for Millions hasta mayo de 2022 en 11 de los 18 países participantes: Belice, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Panamá, Surinam y Trinidad y Tobago.

Los objetivos específicos (y componentes) del proyecto son:

1. Fortalecimiento de la capacidad institucional a través de recomendaciones de políticas, regulación y creación de capacidad para la gestión integrada del agua y el saneamiento
2. Desarrollo de mecanismos de financiamiento innovadores y sostenibles para la gestión integrada del agua y las aguas residuales en zonas urbanas, periurbanas y rurales
3. Aplicación e implementación de "soluciones innovadoras a pequeña escala" para la gestión integrada del agua y las aguas residuales en comunidades rurales y periurbanas más pequeñas
4. Procesar, difundir e intercambiar conocimientos

En la fase de preparación hasta 2018, los 18 países participantes en el proyecto han indicado las regiones y sus preferencias para las intervenciones.

Introducción

Sabana Yegua es un Municipio de la República Dominicana perteneciente a la provincia de Azua. El mismo está conformado por el Municipio Cabecera de Sabana Yegua y 3 Distritos Municipales: Proyecto 4, Ganadero, Proyecto 2-C.

El municipio y sus distritos tienen en una extensión de 113.8 km² y una población total de 19,020 personas según el Censo Nacional del año 2010 (ONE, 2010). Según este mismo censo, más de la mitad de la población total del Municipio de Sabana Yegua se ubica en el municipio cabecera y ciudad de Sabana Yegua, lo que convierte a esta zona en el



Localización del Municipio de Sabana Yegua en la República Dominicana y conformación del municipio

principal foco de contaminación por aguas residuales domésticas del municipio. Actualmente, las aguas residuales generadas por la población están siendo recolectadas mediante un alcantarillado sanitario; sin embargo, la planta de tratamiento donde estas aguas residuales deberían recibir su tratamiento está fuera de servicio, ocasionando una descarga directa de aguas residuales sin tratamiento al ambiente. Debido a ello, el principal objetivo de esta consultoría es analizar la viabilidad técnica del proyecto de saneamiento y rehabilitación de la planta de tratamiento de Sabana Yegua.

Cómo parte integral de la realización de este informe, se realizó un reconocimiento del área de Sabana Yegua los días 23, 24 y 25 de agosto con personal de la Dirección de Ingeniería del Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados (INAPA), cómo ente organizador y rector en este ámbito para la República Dominicana y contraparte para la implementación del proyecto de rehabilitación.



Punto de descarga de aguas residuales del alcantarillado de Sabana Yegua previo a la llegada del sistema de tratamiento (Arrovo Copev)

Durante el recorrido realizado se logró constatar la reciente construcción y rehabilitación del alcantarillado sanitario de la ciudad de Sabana Yegua por parte del INAPA; sin embargo, las aguas residuales que son recogidas por el mismo son descargadas sin tratamiento al Arroyo Copey, ya que la planta de tratamiento se encuentra fuera de operación desde hace 30 años.

Es de vital importancia la rehabilitación sistema de tratamiento, ya que las aguas residuales sin tratamiento impactan negativamente la salud de la población. Este arroyo a su vez desemboca en el Río Tábara hasta su llegada a la Bahía de Jura, ubicada dentro del Mar Caribe.

Antecedentes

Ubicación del proyecto

El proyecto de saneamiento de Sabana Yegua abarca el municipio cabecero del mismo nombre. Este tiene una extensión territorial de 1.6 km², lo que representa el 1.4% de la extensión total del municipio; sin embargo, su población de 10,313 personas representa el 54% de la población que habita el municipio (ONE, 2010). El municipio se ubica al lado de la Carreta Sanchez, la cual marca el límite sur de la población. Al Oeste se encuentra delimitado por la Calle Altagracia y al Este por la Calle 19 de marzo. En la zona Norte se encuentra delimitado por el Canal de riego Yzura. La planta de tratamiento se ubica al sur Sabana Yegua, a unos 750 metros de la calle principal, en las coordenadas geográficas (Zona 19Q Datum WGS84) 306602 m E 2040681 m N. Como se puede observar en imagen superior anterior, el municipio corresponde a una zona densamente poblada con una gran cantidad de áreas de cultivo en los alrededores.



Ubicación del Municipio de Sabana Yegua y la planta de tratamiento.



Imagen satelital del sistema lagunar para el tratamiento de aguas residuales de Sabana

Identificación de actores del proyecto

A nivel legal, los principales actores involucrados en el desarrollo del proyecto los constituyen el Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillado (INAPA) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La Ley 5994 del año 1992 mediante la cual fue creado el INAPA indica en su Artículo 3 lo siguiente:

“El INAPA tendrá `por objeto la realización de los fines expuestos en los motivos contenidos en el preámbulo de esta ley, con absoluta sujeción a las normas y determinaciones de la Junta Nacional de Planificación, organismo que tiene a su cargo la programación integral del desarrollo del país, para lo cual:

1. Formulará el plan general de los sistemas de abastecimiento de agua para consumo doméstico, industrial y comercial, y de los **sistemas de disposición de aguas residuales** y pluviales, en sus aspectos rural y urbano.
2. Tendrá a su cargo la ejecución de dichos planes, dentro del marco de sus actividades.
3. Señalará al Poder Ejecutivo los casos en los cuales deberá proceder a expropiaciones por causa de utilidad pública, necesarias para la ejecución de sus programas, en conformidad con las leyes de expropiación.
4. Coordinará las demás actividades relacionadas con sus fines “

EL Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la República Dominicana, cómo principal actor para el resguardo de la Ley 64-00 (Ley General sobre el Medio Ambiente y Recursos Naturales), dentro de la cual se establece a este Ministerio como la entidad facultada

para el establecimiento de las normas de vertido de desechos líquidos. Es decir, esta entidad es la encargada de dictar los parámetros vertido que deben ser cumplidos con el fin de garantizar una protección del medio ambiente y la población.

El municipio de Sabana Yegua se encuentra inmerso dentro de un área de vocación agrícola. Se identificó la presencia de varios reservorios y canales de riego, los cuales son utilizados por los agricultores para el riego de distintos productos agrícolas, tales como plátano, yuca y forraje animal. Próximo al camino de acceso a la planta de tratamiento, se observó una toma de agua en un canal que discurre paralelo a la Carretera Sánchez, desde el mismo se logró observar cómo los productores agrícolas hacen uso de canales artesanales para hacer llegar el agua de riego a los distintos cultivos (Figuras superior e inferior).

Lo planteado anteriormente se analiza como oportunidad para que los agricultores de la zona próxima a la planta de tratamiento reutilicen de forma segura del agua residual tratada. Desde esta perspectiva se debe involucrar al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y la Junta de Regantes respectiva con el fin proponer un reúso ordenado y planificado de las aguas residuales.



Cultivos cercanos a la planta de tratamiento



Canales de riego artesanales en los campos de cultivo próximos a la planta de tratamiento

Para referencia, en la sección de Anexos se presenta información detallada del personal de contacto en cada una de las instituciones mencionadas. Se recomienda avanzar con la inclusión del personal de INDHRI y las Juntas de Regantes, ya que son un eje fundamental para lograr un proyecto que tenga un impacto positivo dentro del enfoque de la economía circular.

Historia del proyecto y causas abandono

La planta de tratamiento de Sabana Yegua fue diseñada y puesta en operación en el año de 1979, por lo que tiene una historia de más de 40 años. Al momento de la realización del presente informe no se logró obtener información sobre el estado y funcionamiento de la planta de tratamiento desde su fecha de construcción.

A nivel histórico, un registro de visita en el año 1995 por parte del INAPA indica que la planta de tratamiento tenía un lapso de 5 años fuera de servicio. Es importante mencionar que al momento de la visita el agua residual no estaba llegando a la planta de tratamiento, sino que, previo a la misma, el agua cruda era redireccionada mediante un canal hacia las parcelas de cultivo aledañas.

Esta anotación se considera relevante, ya que surge la duda de porque se intervenía en un punto anterior a la llegada a planta de tratamiento y no se practicaba un reúso del efluente del sistema de tratamiento. Ante esta situación se miran varios posibles escenarios que deben ser tomados en cuenta en miras de una posible rehabilitación del sistema de tratamiento:

1. La mala operación del sistema de tratamiento generaba olores, vectores y molestias hacia los usuarios alrededor del sistema de tratamiento, prefiriendo intervenir el agua residual y evitar que esta llegara a la planta de tratamiento.
2. Debido a la construcción artesanal del talud las lagunas, las mismas presentaban filtraciones que disminuyen o imposibilitaban el reúso del agua. Tomando en cuenta que la planta de tratamiento es previa a la construcción de los sistemas de riego, podría existir presión para el reúso del agua sin tratar y evitar que la misma de infiltrar en las

lagunas sin posibilidad de reúso.

Más allá de los supuestos mencionados anteriormente, debido a la antigüedad del sistema de tratamiento, su largo periodo fuera de operación y los cambios en las autoridades responsables, no se logró determinar las causas puntuales que llevaron a la situación actual; sin embargo, cualquiera de las causas denota que poca vinculación de las autoridades respecto a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Para más detalles de la historia del proyecto, se adjunta en la sección de Anexos los distintos informes que han sido presentados por INAPA y El Ministerio Medio Ambiente en distintas visitas que han sido realizadas al proyecto.

Por otra parte, otras causas mencionadas por la contraparte sobre las causas de abandono en general de los sistemas de aguas residuales en República Dominicana son las siguientes:

1. Se le ha dado mayor importancia al tema de agua potable en comparación al saneamiento, y se ha descuidado la recolección de aguas residuales a nivel de país.
2. En términos operativos, la recaudación económica no es suficiente, debido a un costo del servicio muy bajo.

Tomando en cuenta lo anterior, se debe prestar vital importancia a la capacitación de los diferentes niveles directivos y operativos que tiene relación con la rehabilitación del sistema de tratamiento de aguas residuales de Sabana Yegua. De momento, la oficina regional del INAPA encargada de la operación y supervisión del sistema de tratamiento cuenta con un ingeniero y operarios con menor entrenamiento técnico, por lo que es de suma importancia la capacitación de este personal y evaluar con los responsables la incorporación y capacitación de nuevo personal.

Ante este panorama, se prevé el uso de tecnologías de bajo coste y simplicidad operativa. Adicionalmente, se recomienda realizar alianzas con los posibles beneficiarios de este proyecto (Ayuntamiento de Sabana Yegua, Agricultores) con el fin de evaluar los recursos que tienen disponibles tanto a nivel de mano de obra, como equipos mecánicos, de forma que se logre viabilizar el proyecto en el largo plazo.

Estado actual del proyecto

Desde el año 2013 el INAPA ha realizado varias inversiones en el sistema de tratamiento, tanto en la infraestructura física del sistema de tratamiento, así como en el alcantarillado sanitario que recoge las aguas en el Municipio de Sabana Yegua. Algunas de las inversiones se detallan a continuación:

1. Ampliación de redes de alcantarillado en zonas Norte y Sur de Sabana Yegua
2. Cambio de tuberías a PVC y limpieza de registros en Alcantarillado antiguo.
3. Cambio del colector principal desde la Carretera Sánchez en Sabana Yegua hasta ubicación de la planta de tratamiento (750 metros).
4. Limpieza de vegetación, lodos y alrededores del área de las lagunas.

A pesar de las intervenciones, actualmente, el agua residual no llega hasta la planta de tratamiento, sino que es descargada hacia el Arroyo Copey unos 250 metros antes de la llegada a la planta de tratamiento. Cabe mencionar que desde el punto de descarga de las aguas residuales hasta la planta de tratamiento no hay acceso vehicular, por lo que se debe ingresar caminando.

La planta de tratamiento únicamente está compuesta por dos lagunas de operación en serie.

Algunas deficiencias observadas son las siguientes:

- + Camino de acceso: no está concluido.
- + Tratamiento preliminar: carece del mismo.
- + Desfogue: la tubería de desfogue no alcanza el punto de vertido.
- + Metodología constructiva: no asegura la impermeabilización y evitar filtración al subsuelo.
- + Caseta de operador: muy mal estado, abandono.
- + Manejo de lodos: carece de unidades destinadas para esta operación.
- + Alrededores: no hay delimitación del área del sistema de tratamiento.



Punto de acceso a la planta de tratamiento de aguas residuales



Estado de la caseta de operador del sistema de tratamiento.



Estado de la Laguna 1 del sistema de tratamiento.



Estado de la Laguna 2 del sistema de tratamiento.



Punto de desfogue de las aguas de la laguna 2 hacia la propiedad colindante.

Evaluación técnica del proyecto

Estimación de caudal y carga orgánica

Para la estimación del caudal de aguas residuales se utilizaron los datos de dotación para zonas urbanas establecidos en el Reglamento Técnico para Diseño de Obras e Instalaciones Hidrosanitarias (225 l/Hab-día) con un factor de retorno del 80%. Adicionalmente, se contempla un 20% de conexiones erradas e infiltraciones al sistema de alcantarillado sanitario. A modo de resumen, el factor de generación de aguas residuales se estableció en 180 l/habitante-día.

Los datos de población y crecimiento demográfico fueron tomados del último Censo Nacional llevado a cabo en 2010 en la República Dominicana y se proyectó un crecimiento anual de 1.25% según el mismo documento (ONE, 2010). Se hace notar que la tasa de crecimiento utilizada es bastante conservadora, ya que es esperable un crecimiento menor en zonas rurales, por lo que es de suma importancia el monitoreo de caudal como parte del proyecto y poder tener una mejor predicción y control de la carga hidráulica futura del proyecto.

En cuanto la carga orgánica, se cuenta con dos análisis de aguas residuales realizados por el Ministerio de Medio Ambiente en febrero del año 2019 y Julio del año 2020. Estos análisis mostraron valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 304.5 y 973 mg/l. En el muestro del mes de Julio del 2020 se analizó la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) dando un resultado de 293 mg/l (Tabla 1).

Tabla 1: Análisis de agua residual cruda planta de tratamiento Sabana Yegua ⁽¹⁾.

| Parámetro | Muestro febrero 2019 | Muestro julio 2020 |
|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| pH | 7.65 | 7.56 |
| Temperatura (°C) | 26.8 | 34.2 |
| Conductividad (μS/cm) | 1134 | 1557 |
| Sólidos disueltos totales (ppm) | 560 | 1012 |
| Demanda Química de oxígeno (ppm) | 304.5 | 973 |
| Demanda Bioquímica de oxígeno (ppm) | - | 293 |
| Sólidos suspendidos totales (ppm) | 127 | 172 |
| Nitrógeno total (ppm) | - | 49.78 |
| Fósforo Total (ppm) | 2.4 | 7.92 |

⁽¹⁾ Fuente: Informe de inspección Ministerio de Medio Ambiente Código 17927.

Con base en los datos anteriores, se muestra en la Tabla 2 varios escenarios de carga orgánica proyectada bajo diferentes valores posibles de DBO en el agua cruda y las cargas de nutrientes esperadas. Es importante no solamente tomar un parámetro de DBO; sino varios escenarios de comportamiento, ya que dependiendo del valor real de la carga orgánica será el comportamiento del sistema lagunar.

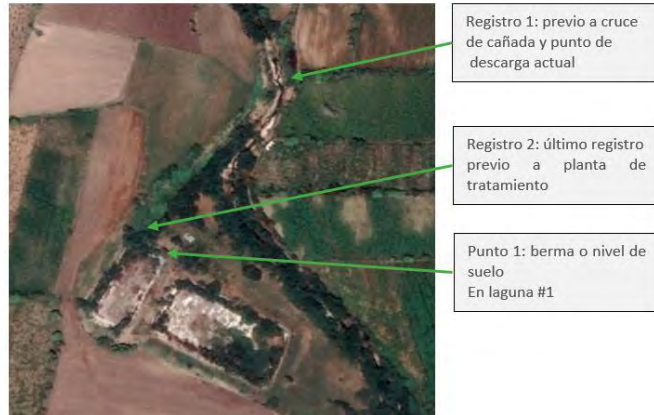
Tabla 2: Escenarios de caudal y carga orgánica proyectados para la planta de tratamiento de Sabana Yegua.

| Año | Habitantes | Caudal (m ³ /día) | Carga orgánica (kg/d) (DBO: 200 mg/l) | Carga orgánica (kg/d) (DBO: 300 mg/l) | Carga orgánica (kg/d) (DBO: 400 mg/l) | Carga de Nitrógeno (kg N/d) (NT: 50 mg/l) | Carga de Nitrógeno (kg P/d) (PT: 8 mg/l) |
|------|------------|------------------------------|--|--|--|--|---|
| 2010 | 10.313 | 2228 | 446 | 668 | 891 | 111 | 18 |
| 2020 | 11.637 | 2513 | 503 | 754 | 1005 | 126 | 20 |
| 2030 | 13.131 | 2836 | 567 | 851 | 1134 | 142 | 23 |
| 2040 | 14.816 | 3200 | 640 | 960 | 1280 | 160 | 26 |

La contraparte propone a nivel de diseño una solución para un caudal de 25 L/s (2160 m³/día) y una DBO de 200 mg/l. En vista de las analíticas, se considera que esta estimación puede ser insuficiente para las condiciones actuales, con el riesgo de sub-dimensionar el proyecto; siendo insuficiente para la condición actual y poniendo en riesgo la viabilidad del proyecto en el tiempo de vida útil del sistema de tratamiento, a menos que se tomen las previsiones necesarias.

Revisión del perfil hidráulico y alcantarillado

Como parte de las mejoras realizadas por la contraparte en el sistema de tratamiento, se corroboró que se han realizado inversiones en el alcantarillado del poblado de Sabana Yegua y la tubería de conducción por gravedad desde el pueblo hasta el emplazamiento de la planta de tratamiento.



Puntos de medición para perfil hidráulico de sección final de la tubería de conducción hacia la planta

Se corroboró la existencia de una tubería de conducción antigua, la cual fue mencionada en varias de la documentación enviada por las contrapartes, la cual se confirmó se encontraba obsoleta. La misma fue reemplazada por una nueva conducción en tubería de PVC 17.5" y un paso sobre el Arroyo Copey en tubería de acero.

Se establecieron algunos puntos de referencia con el fin de desarrollar un perfil hidráulico mediante medidas topográficas.



Puntos de medición para perfil hidráulico de sección final de la tubería de conducción hacia PTAR

Tabla 3: Perfil hidráulico de la sección de final de la conducción hacia la planta de tratamiento y cotas respecto a nivel de referencia.

| Punto de medición | Descripción | Cota (msnm) | Profundidad de tubo (m) | Cota fondo de tubo (msnm) | Distancia (m) |
|-------------------|---|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------|
| 1 | Tapa registro previo a cruce de Arroyo Copey | 54.06 | -2.085 | 51.975 | 0 |
| 2 | Tapa registro llegada a planta de tratamiento | 53.27 | -1.32 | 51.95 | 220 |
| 3 | Nivel de suelo en laguna 1 (Corona) | 53.39 | | | |
| 4 | Fondo de laguna 1 | 49.66 | | | |
| 5 | Nivel de suelo en laguna 2 ne área de salida (Corona) | 52.55 | | | |
| 6 | Fondo de laguna 2 | 48.48 | | | |

De acuerdo con las medidas realizadas la tubería de llegada al sistema de tratamiento tiene una cota 1.44 metros **por debajo** del nivel de suelo alrededor de la laguna #1. La revisión de la documentación enviada por la contraparte en el plano de la propuesta de mejoramiento se indica que la cota de llega del alcantarillado es 0.78 m por debajo del nivel de suelo de laguna #1. Esta situación se considera relevante, ya que ocasiona varias posibles situaciones:

1. Imposibilita la construcción de un tratamiento preliminar (rejillas y desarenador) en la entrada de la PTAR, a menos que se modifiquen las alturas útiles de cada laguna.
2. Prescindir del tratamiento preliminar y que la tubería de conducción trabaje a sección llena, con los problemas operativos que eso conlleva (sedimentación de arenas, obstrucción frecuente).
3. Reubicación del punto de tratamiento preliminar y/o instalación de sistema de elevación a pie de planta (cárcamo de bombeo).

A nivel general, este será uno de los puntos más importantes a manejar con la contraparte, ya

que el manejo de esta situación tendrá un impacto en cualquier solución que desee implementar en el sistema de tratamiento. En todo caso, no se recomienda trabajar sin un sistema de tratamiento preliminar. Por último, según las conversaciones mantenidas con la contraparte, se procederá a corregir las cotas del alcantarillado sanitario para ajustarlas a los valores de diseño, por lo que a nivel de revisión del sistema lagunar se asume que la deficiencia encontrada será corregida por la contraparte, ajustando que la cota de llega será 0.77 metros por debajo del nivel de la berma de la laguna #1.

Revisión de tratamiento preliminar

Actualmente no se cuenta con una unidad de tratamiento preliminar, por lo que debe ser considera dentro del proceso de rehabilitación la construcción de un tren en paralelo compuesto por unas rejas de limpieza manual, canal de desarenado y vertederos para la medición de caudal (tipo triangular o Parshall). A su vez, es importante que los mismos cuenten con los mecanismos de compuertas y válvulas de fondo para las labores de operación.

Preliminarmente, considerando el caudal máximo al final de periodo de diseño (3200 m³/d, año 2040) y un factor horario máximo de 2.25 se estima un caudal máximo horario de 300 m³/h. Con base en una tasa de aplicación hidráulica de 60 m³/m²-h, se estima un requerimiento de área de 5 m². Tomando en cuenta esto no se prevé problema alguno en cuanto al área disponible para la instalación de esta unidad.

Revisión del sistema lagunar

Se observó en el sistema lagunar una construcción tipo artesanal para la conformación de los taludes. Se utiliza la colocación de piedras o rocas de varias pulgadas con la aplicación de un mortero para sellar las separaciones entre las mismas, lo cual no garantiza una correcta impermeabilización. No hay ningún tipo de elemento



Tipo de construcción del sistema lagunar utilizado para la protección de taludes

adicional que sea flexible, y que puede garantizar la integridad del sistema ante posibles movimientos como asentamientos diferenciales. Por consiguiente, el sistema de impermeabilización existente es susceptible a la formación de micro fisuras y fisuras por donde el agua residual podría infiltrarse.

Cabe mencionar que al momento de realización de este informe no hay un reglamento local específico sobre el tipo de impermeabilización a utilizar en sistemas lagunares. Tampoco se cuenta con un estudio de suelo para estudiar el grado de impermeabilidad del suelo donde se emplaza el proyecto. Por otro lado, se debe tomar en cuenta que este tipo de conformación (rocas/mortero) es una práctica bastante común en la zona, ya que se observó en varios de los canales de riego que se ubican por la zona, por lo que se debe evaluar con las contrapartes la necesidad de manejar una partida para este rubro en caso de verse como una necesidad a corto o mediana plazo.

Cómo recomendación final, como parte del diseño definitivo se deben realizar sondeos y pruebas de suelo para evaluar a nivel geotécnico el proyecto, determinar los coeficientes de permeabilidad del suelo y con ello determinar los requerimientos de impermeabilización. A nivel de este informe y en la ausencia de datos, se recomienda la impermeabilización con membranas plásticas como una partida para llevar a cabo la rehabilitación del sistema de tratamiento.

El funcionamiento de los sistemas lagunares está determinado por la carga orgánica superficial (laguna facultativa) y la carga orgánica volumétrica (laguna anaeróbica). Estos parámetros, a nivel general, son los que determinan el tipo de comportamiento de cada laguna, ya sea anaeróbica o facultativa.

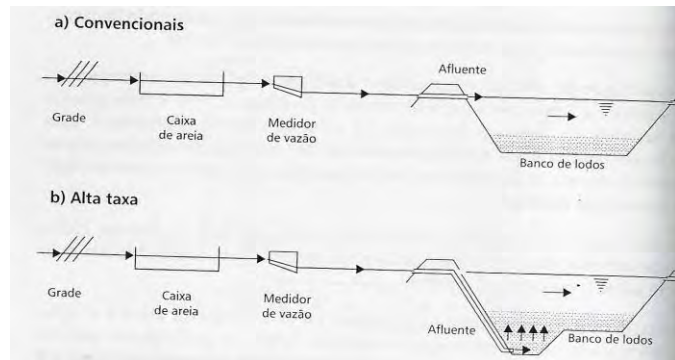
Los sistemas lagunares son generalmente diseñados como sistemas compuestos de lagunas anaeróbicas como fase inicial. Estas lagunas están orientadas a reducir la carga orgánica en un menor volumen y área (operan a cargas orgánica volumétricas mayores y son más profundas) y con ello economizar espacio en las lagunas facultativas. Posterior a las lagunas anaeróbicas, la reducción de la carga orgánica permite que las siguientes lagunas operen a una carga orgánica menor, permitiendo la generación de microalgas, que a su vez aportan el oxígeno disuelto requerido por las bacterias para reducir la carga orgánica en el efluente final.

Como fase final de algunos sistemas lagunares, una vez reducida la carga orgánica, se opta por la adición de lagunas de maduración, que tienen por objetivo mejorar la eficiencia de remoción de microorganismos patógenos, usualmente medidos a través del indicador de coliformes fecales.

Cada una de estas lagunas tienen particularidades en cuanto a su profundidad, relación largo/ancho, tipo de flujo, que determinan en última instancia el comportamiento del sistema lagunar.

De acuerdo con la información aportada por las contrapartes, se propone como parte del proceso de mejoramiento del sistema lagunar, la creación de una fosa anaerobia en la primera sección de la laguna, de forma que se tenga una laguna mixta anaerobia – facultativa. Este concepto de laguna anaerobia-facultativa no se encuentra claramente definido en la literatura. De acuerdo con los criterios de diseño típicos, la laguna únicamente se comportaría

como una laguna anaeróbica. Por otro lado, el desarrollo de una fosa en la primera sección de la laguna anaerobia si se encuentra dentro la literatura y se denomina lagunas anaeróbicas de alta tasa. En este tipo de lagunas, el sustrato (agua residual) es alimentado por el fondo de la laguna de forma localizada, el flujo

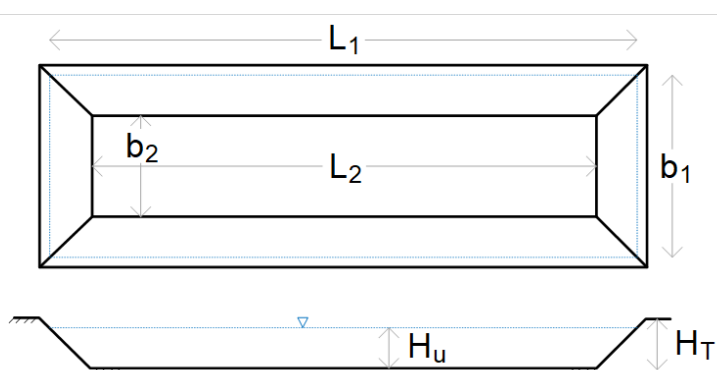


Modelos hidráulicos en lagunas anaerobias (Adaptado PROSAB, 2009)

ascendente mejora el contacto con la biomasa, dando como resultado una mejoría en la eficiencia de proceso (PROSAB, 2009). Este tipo de lagunas, tienen la ventaja que pueden operar con tiempo de detención hidráulica menores (24 horas) comparados con los tiempos de detención de las lagunas anaerobias convencionales (3 a 5 días).

A pesar de que la concepción de una laguna anaerobia de alta carga puede lograr una mejora en la eficiencia del proceso, su diseño y construcción conlleva otros criterios en cuanto al ingreso del agua cruda, hidráulica, separación de la biomasa y captación del biogás, lo que puede incrementar el grado de dificultad de la solución y su coste de operación y mantenimiento. Tomando esto en cuenta, se recomienda optar por el diseño de una laguna anaeróbica convencional, la cual mantendrá una simplicidad operativa del proceso de tratamiento y logrará cumplir los objetivos de tratamiento como se comentará en las siguientes secciones. Más adelante en el informe, en la sección de mejoras se hacen algunas observaciones con respecto al diseño de sistemas lagunares anaerobios de alta tasa.

Por lo tanto, para la revisión de la capacidad de las lagunas existentes en Sabana Yegua se procedió a analizar la capacidad de la primera laguna operando como laguna anaeróbica, y la segunda como laguna facultativa secundaria. Las dimensiones de las lagunas



Vista planta y corte típico para dimensionamiento de una laguna

fueron medidas por medio de topografía y mediciones de campo, según se presenta en la **Tabla 4**, y según las especificaciones de imagen superior. El área superficial y el volumen útil de las lagunas consideran una profundidad útil optimizada, según las posibilidades observadas en campo, y los accesorios hidráulicos respectivos (cajas de control de nivel, vertedores) deberán ser definidos durante la fase de diseño final para ajustar los niveles operacionales a los requeridos según esta propuesta.

Tabla 4: Dimensiones de las lagunas de la planta de tratamiento de Sabana Yegua.

| Parámetro / Dimensión | Unidad | Laguna anaeróbica | Laguna facultativa secundaria |
|-----------------------|----------------|-------------------|-------------------------------|
| L_1 | m | 71.0 | 120.0 |
| L_2 | m | 76.3 | 114.0 |
| b_1 | m | 28.0 | 56.0 |
| b_2 | m | 33.3 | 50.0 |
| H_T | m | 3.73 | 4.07 |
| H_u | m | 3.5 | 2.98 |
| Área superficial | m ² | 2538.6 | 6712.96 |
| Volumen útil | m ³ | 8222.3 | 18474.8 |

Con respecto a la altura útil del sistema lagunar se realiza la revisión para 3.5 metros como valor recomendado para lagunas anaerobias convencionales, lo que implica la profundización de la laguna #1 en aproximadamente 1 m del nivel de fondo actual. Este ajuste de altura contempla que los problemas de niveles en el alcantarillado sanitario serán corregidos. Cabe mencionar que la profundidad útil dependerá de la cota final de llegada del alcantarillado sanitario, vertederos y volúmenes de excavación que se propongan durante la fase de diseño final. En la Tabla 5 se resumen los valores utilizados para el perfil hidráulico del sistema lagunar.

Tabla 5: Cotas y perfil hidráulico propuesto para el sistema lagunar de Sabana Yegua.

| Punto de referencia Laguna #1 | Cota (m) | Punto de referencia Laguna #2 | Cota (m) |
|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| Berma de laguna | 0.0 | Berma de laguna | -0.84 |
| Cota de llegada alcantarillado | -0.77 | Cota de llegada alcantarillado | |
| Cota vertedero | -1.0 | Cota vertedero | -1.93 |
| Cota fondo laguna 1 (actual) | -3.73 | Cota fondo laguna 1 (actual) | -4.91 |
| Cota fondo laguna (propuesto) | -4.5 | Cota fondo laguna (propuesto) | -4.91 |
| Profundidad útil | 3.5 | | 2.98 |



La revisión de las lagunas se llevó a cabo considerando una carga hidráulica de 3 200 m³/d (37 L/s) (año 2040), y una DBO en el agua cruda de 200, 300 y 400 mg/L.

i. Revisión de la capacidad de la laguna anaeróbica

Los criterios de revisión de la laguna anaeróbica fueron tomados de Sperling (2007), y el resultado de evaluación para cada uno de ellos se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Revisión de parámetros de funcionamiento de la laguna anaeróbica.

| Criterio | Ecuación | Rango recomendable | Valor obtenido | Observaciones |
|--------------------------------|--------------|---|---|----------------------------------|
| Carga orgánica volumétrica | $COV = CO/V$ | $COV = 0.35$ ($T \geq 25^{\circ}C$) | $DBO = 200 \text{ mg/L} - COV = 0.08 \text{ kg DBO/m}^3\text{-d}$ $DBO = 300 \text{ mg/L} - COV = 0.12 \text{ kg DBO/m}^3\text{-d}$ $DBO = 400 \text{ mg/L} - COV = 0.16 \text{ kg DBO/m}^3\text{-d}$ | Volumen suficiente |
| Tiempo de retención hidráulica | $TRH = V/Q$ | TRH entre 3 y 5 días ($T \geq 20^{\circ}C$) | TRH = 2.6 d | Volumen ligeramente insuficiente |
| Profundidad H_u | - | H_u entre 3.5 y 5.0 m | $H_u = 3.5 \text{ m}$ | Profundidad adecuada |
| Geometría: Relación L/b | L_1/b_1 | L_1/b_1 entre 1.0 y 3.0 | $L_1/b_1 = 2.53$ | Relación L/b adecuada |



COV: carga orgánica volumétrica (kgDBO/m³-d)

CO: Carga orgánica afluente (kgDBO/d);

V: volumen útil de la laguna (m³);

T: temperatura media del agua en el mes más frío (°C);

TRH: Tiempo de retención hidráulica (d);

Q: caudal promedio diario de diseño (m³/d).

La **Tabla 6** muestra que la laguna existente cumple con la mayoría de los criterios de funcionamiento, particularmente con el de COV (el más importante). En el caso del criterio de TRH, la laguna anaeróbica posee un TRH ligeramente inferior al mínimo recomendado en lagunas anaeróbicas típica, para la carga hidráulica esperada en el año 2040. Proyectando el crecimiento de la población y el caudal respectivo en el tiempo, el TRH de 3.0 días se alcanzaría

aproximadamente en el año 2027 (población base según censo del 2010, considerando un crecimiento anual de 1.22%, y una generación de aguas residuales per cápita de 180 L/p-d).

Por este motivo, es recomendable adoptar medidas que podrían mejorar el funcionamiento de la laguna anaeróbica, propiciando un mejor contacto entre la biomasa y el agua residual, por medio de una alimentación sumergida en la laguna.

Por último, la eficiencia de remoción de DBO en la laguna anaeróbica estará en torno de 70% (temperatura del agua superior a 25°C, según Sperling, 2007). Por lo tanto, la concentración de DBO y carga de materia orgánica efluentes de la laguna anaeróbica (y afluente a la facultativa) esperable se presentan en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Calidad esperable del efluente de la laguna anaeróbica

| DBO en agua residual cruda (mg/L) | DBO en efluente de laguna anaeróbica (mg/L) | Carga orgánica afluente a laguna facultativa (kgDBO/d) |
|-----------------------------------|---|--|
| 200 | 60 | 192 |
| 300 | 90 | 288 |
| 400 | 120 | 384 |



En términos de remoción de coliformes, es esperable que la laguna anaeróbica aporte aproximadamente 90% de eficiencia (Sperling, 2007). Estos valores serán utilizados para el análisis de capacidad de la laguna facultativa.

ii. Revisión de la laguna facultativa secundaria

La laguna facultativa operaría como una laguna facultativa secundaria, esto es, como un postratamiento de una laguna anaeróbica. La carga orgánica afluente fue presentada en la Tabla 7, y la Tabla 8 presenta los resultados de la evaluación de la capacidad de la laguna existente.

Tabla 8: Revisión de parámetros de funcionamiento de la laguna facultativa secundaria

| Criterio | Ecuación | Rango recomendable | Valor obtenido | Observaciones |
|--------------------------------|--------------|---|--|--|
| Carga orgánica superficial | $COS = CO/A$ | COS entre 240 y 350 kg DBO/ha-d para climas calientes de elevada insolación | $DBO = 200 \text{ mg/L} - COS = 286 \text{ kg DBO/ha-d}$ $DBO = 300 \text{ mg/L} - COS = 429 \text{ kg DBO/ha-d}$ $DBO = 400 \text{ mg/L} - COS = 572 \text{ kg DBO/ha-d}$ | Área insuficiente para valores de DBO en el agua cruda por encima de 235 mg/L. |
| Tiempo de retención hidráulica | $TRH = V/Q$ | TRH superior a 5 d ($T \geq 20^\circ\text{C}$) | TRH = 5.8 d | Volumen suficiente |
| Profundidad H_u | - | H_u entre 1.5 y 3.0 m | $H_u = 2.98 \text{ m}$ | Profundidad adecuada |
| Geometría: Relación L/b | L_1/b_1 | L_1/b_1 entre 2.0 y 4.0 | $L_1/b_1 = 2.14$ | Relación L/b adecuada |



COS: carga orgánica superficial (kgDBO/ha-d)

CO: Carga orgánica afluente (kgDBO/d)

A: superficial útil de la laguna (m³)

T: temperatura media del agua en el mes más frío (°C)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (d)

Q: caudal promedio diario de diseño (m³/d)

La Tabla 8 muestra que la laguna facultativa se encuentra muy ajustada a nivel de carga orgánica superficial, y que el sistema tiene altas probabilidad de operar por encima de los valores máximos recomendados en la literatura. Este límite estaría en torno de 234,9 kg DBO/m³-d (salida de laguna anaeróbica), que correspondería a aproximadamente a 783 kg

DBO/m³-d en el agua cruda. La **Error! Reference source not found.** muestra que esta carga no se alcanzaría al año 2040 en caso de que la DBO en el agua cruda sea de 200 mg/L, pero se alcanzaría aproximadamente para el año 2023 y ya se habría sobrepasado antes del año 2010, en los casos en los que la DBO en el agua cruda sea de 300 y 400 mg/L, respectivamente.

En este sentido, debido al margen de variación de cargas (hidráulica y orgánica) en el agua residual afluyente a la PTAR, es difícil pronosticar si la laguna facultativa tendrá capacidad suficiente para operar dentro del rango recomendado según la literatura técnica, y evitar problemas de sobrecarga en el sistema. Ante este escenario, y considerando que el peor escenario es el actual, en el que las aguas residuales son vertidas sin ningún tratamiento al ambiente, es recomendable recuperar el sistema y operarlo para generar datos que permitan estimar, en una fase posterior, si se requerirá aumentar su capacidad o controlar la carga orgánica afluyente. Este tema se discute en mayor detalle en la Sección Mejoras Futuras para el sistema lagunar. Adicionalmente, se está tomando en cuenta una temperatura de 25 °C; sin embargo, de acuerdo con la visita de campo la zona tiene una elevada temperatura que podría favorecer los procesos cinéticos en el sistema lagunar.

Para estimar la calidad del efluente se consideró un modelo matemático de flujo disperso (Sperling, 2007), el cual es más realista que el flujo de mezcla completa o de pistón. Este modelo se utilizó tanto para estimar la concentración de DBO soluble (S) como de coliformes fecales (CF). Las ecuaciones respectivas se muestran a continuación.

$$C_{ef} = C_{af} \frac{4ae^{1/(2d)}}{(1+a)^2 e^{a/(2d)} - (1-a)^2 e^{-a/(2d)}} \quad [1]$$

$$a = \sqrt{1 + 4K \cdot TRH \cdot d} \quad [2]$$

$$d = \frac{1}{(L/b)} \quad [3]$$

En donde, C_{af} : concentración de DBO total (mg/L) o coliformes fecales (NMP/100mL) en el afluyente; C_{ef} : concentración de DBO soluble (mg/L) o coliformes fecales (NMP/100mL) en el efluente; K : coeficiente de reacción de primer orden (d^{-1}); TRH : tiempo de retención hidráulico (d); d : número de dispersión (adimensional); L : longitud en la dirección del flujo en la laguna (m); B : ancho de la laguna.

Para la remoción de DBO, se adoptó un valor de K de 0.36 d^{-1} (temperatura de 25°C , K20 de 0.29, según Sperling, 2007); mientras que para la remoción de coliformes se usó un valor de K de 0.60 d^{-1} (Sperling, 2007).

Adicionalmente, la laguna facultativa tendrá una concentración de Sólidos Suspendidos (SS) en el efluente, debido a la presencia de algas, que aumentarán la DBO particulada final (y por lo tanto la DBO total final). Asumiendo una concentración de SS en el efluente de la laguna facultativa de 65 mg/L (valor típico entre 50 y 80 mg/L), y una relación teórica de $0.35 \text{ mg DBO/mg SS}$, es posible estimar que la DBO en el efluente final debido a las algas arrastradas de la laguna facultativa será de 23 mg/L . Este valor debe ser sumado a la DBO soluble (calculado por medio del modelo de flujo disperso) para encontrar la DBO total esperable en el efluente de la laguna facultativa.

La Tabla 9 presenta el resultado de las estimaciones realizadas para calcular la calidad del efluente de la PTAR.

Tabla 9: Estimación de la calidad del efluente de la laguna facultativa en términos de materia orgánica y coliformes fecales.

| Parámetro | Concentración en el agua cruda | Concentración en el efluente de la laguna anaeróbica | Concentraciones en efluente de la laguna facultativa (soluble + particulada para DBO) | Eficiencia global |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------|
| DBO (mg/L) | 200 mg/L | 70 | $16.2 + 23 = 39.2$ | 80.4% |
| | 300 mg/L | 90 | $20.8 + 23 = 43.8$ | 85.4% |
| | 400 mg/L | 120 | $27.7 + 23 = 50.7$ | 87.3% |
| Coliformes Totales (NMP/100mL) | Valor de literatura: 10^8 | 10^7 (90% eficiencia) | $1.21 \cdot 10^6$ | 98.8% (2 log) |

La Tabla 9 muestra eficiencias compatibles con la literatura técnica, según se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10: Concentraciones en el efluente y eficiencias de remoción típicas en sistemas lagunares formados por lagunas anaeróbicas y facultativas¹

| Parámetro | Concentraciones en efluente (mg/l) | Eficiencias de remoción | Norma de vertido |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------|
| DBO (mg/L) | 50-80 | 75% - 85% | 35 |
| DQO (mg/L) | 120-200 | 65% - 80% | 130 |
| SST (mg/L) | 60-90 | 70% - 80% | 40 |
| Amonio (mg/L) | >15 | < 50% | 10 |
| Nitrógeno Total (mg/L) | >20 | < 60% | 18 |
| Fósforo Total (mg/L) | >4 | < 35% | 3 |
| Coliformes Fecales (NMP/100 mL) | 10 ⁶ -10 ⁷ | 1-2 log | 10 ³ |
| Cloro residual libre (mg/L) | | | |
| Huevos de helminto | <1 | - | |

¹Adaptado de Tabla 4.9 (Von Sperling, 2007).

Como se indica en la Tabla 10, incluso para valores de diseño conservadores, los volúmenes del sistema lagunar son ajustados para lograr una remoción de DBO que permita cumplir la normativa de vertido. Por otro lado, el sistema no sería capaz de cumplir los límites de vertido de coliformes fecales y nutrientes para el cuerpo receptor.

Bajo el escenario descrito, en la Tabla 10, se presentan los valores usuales en el efluente de este tipo de sistemas de tratamiento para aguas residuales domésticas y la eficiencia de remoción de contaminantes.

Los datos mencionados anteriormente solo dan una indicación del comportamiento del sistema lagunar, ya que las medidas de las lagunas utilizadas para la estimación de las cargas orgánicas pueden variar bajo distintos escenarios. Algunos de los puntos que tienen incidencia son:

1. Cota final de llegada del alcantarillado sanitario.
2. Cota de nivel útil de lagunas.
3. Cota de excavación de las lagunas.

Estos condicionantes tienen un efecto sobre el comportamiento de la primera laguna, ya que

afectan los parámetros de volumen, tiempo de detención hidráulica y geometría de la laguna. Ante esta situación se recomienda verificar las cotas del alcantarillado sanitario para hacer una revisión del sistema lagunar y definir las acciones necesarias para un correcto diseño del sistema lagunar.

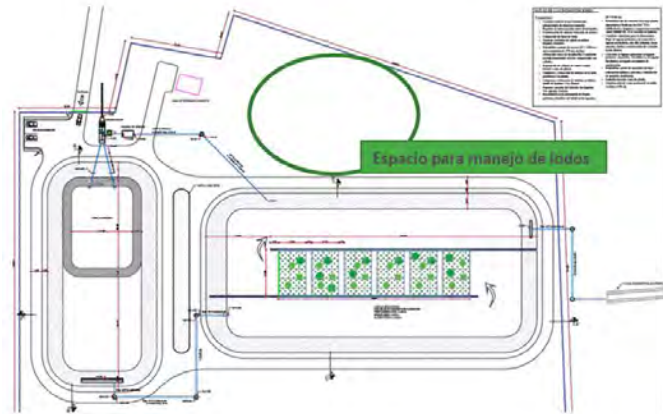
Por último, se hace ver que la carga orgánica superficial de la laguna facultativa (laguna #2) se encontrará cerca del valor límite, por lo que se recomienda un control de la carga orgánica y el caudal futuro mediante un monitoreo como parte de la operación del sistema de tratamiento. En caso necesario, se deben prever alternativas para reducir la carga orgánica en el mediano y largo plazo.

Gestión de lodos del sistema lagunar

Aunque el proceso de acumulación de lodo en las lagunas anaeróbicas y facultativas demora varios años, y la frecuencia de limpieza de lodo es baja comparado con otros sistemas de tratamiento (3 a 10 años posiblemente). Se recomienda planificar el manejo de lodos, ya que, por el tipo de configuración del sistema de tratamiento (no hay lagunas en paralelo), no se podrán sacar lagunas de operación para su limpieza. Ante esto, se debe diseñar una solución que permita la gestión de los lodos almacenados en las lagunas, ya que, de no tomarse en cuenta, se estaría trasladando un costo de inversión a la operación del sistema de tratamiento, lo que podría poner en riesgo la viabilidad del proyecto en el mediano y largo plazo.

La construcción de lechos de secado o una laguna de secado podría ser una alternativa que permitiera la gestión de los lodos. La producción de lodos en una laguna anaerobia se estima entre 0.03 y 0.10 m³/hab-año (Mendoza, 2000). De acuerdo con este criterio se puede esperar una producción anual mínima de 300 a 450 m³ de lodos por año en cada laguna.

En la figura a la derecha se puede apreciar un posible espacio para el manejo de lodos. Esta zona tiene aproximadamente 3500 m² que podrían ser aprovechados para la construcción de una laguna, varias lagunas de secado de lodos o lechos de secado. En vista que la operación de los lechos de secado es más intensiva en términos de mano de obra y se deberían manejar tiempos de limpieza de lagunas más frecuentes, se recomienda optar por una solución de lagunas de secado.



Espacio propuesto para área de manejo de lodos.

La operación de estas lagunas consiste en la transferencia por vía húmeda (bombeo) del lodo almacenado en las lagunas anaerobia y facultativa a la laguna de secado (profundidad de 1 a 2 metros). Esta laguna no tiene un efluente, sino que, una vez llena, se permite la sedimentación del lodo y se extrae el agua sobrenadante por medio bombeo hasta conseguir una alta concentración de sólidos. Luego de esta operación, se permite el secado del lodo mediante la evaporación natural de la humedad.



Posible arreglo de lagunas para manejo de lodos.

En la siguiente página se muestra un posible arreglo de lagunas para manejo de lodos. Se propone la instalación de varias lagunas con un ancho máximo de 6 metros, profundidad de 1 metro, largo entre 80 a 120 metros y un espacio de 5 metros entre cada laguna. Esta configuración podría permitir su impermeabilización con geomembranas y que la extracción de los lodos secos se realice desde el exterior de la laguna con equipos



Bomba de desplazamiento positivo montada en balsa para extracción de lodos por vía húmeda

mecánicos sin dañar la impermeabilización. Otra posibilidad que se puede evaluar durante el diseño definitivo es la utilización de arcilla para la impermeabilización de las lagunas, de forma que se puede permitir el tránsito de equipos sobre el fondo de las lagunas. Bajo el escenario

de la instalación de 3 lagunas con un volumen total de 1800 m³, se podría plantear una limpieza cada 3 a 4 años del sistema lagunar.

Para el trasiego de los lodos de las lagunas al sistema de secado, se puede optar por instalar un sistema de draga de fondo de la laguna compuesto por una balsa, una bomba de combustión interna (desplazamiento positivo) y una línea de impulsión para enviar el lodo hasta una laguna de lodo o lechos de secado que deberá ser dimensionada posteriormente. La imagen inferior muestra una fotografía de referencia del sistema de draga, tomada de un proyecto en Costa Rica. Otra variación sería la utilización del mismo tipo de bomba desde un lateral de la laguna, una línea de succión al fondo de la laguna y luego su impulsión hasta el sistema de secado. Otra opción más sencilla es la utilización de la misma bomba desde el lateral de la laguna y la instalación de una manguera de succión hasta los puntos de acumulación de lodos.

Una vez el lodo de las lagunas complete su secado, se puede plantear su reuso como un mejorador de suelos para su aplicación de los campos de cultivo aledaños. El lodo procedente de la limpieza de lagunas se encuentra bastante estabilizado, con relaciones de sólidos volátiles y totales alrededor del 50% (SV/ST). Por otro lado, mediciones realizadas en una laguna anaerobia y facultativa primaria (Goncalves, 1999) muestran contenido de nitrógeno, fósforo y potasio de 2%, 0.2% y 0.04% respecto al valor de sólidos totales del lodo. Este mismo autor reportó valores de Coliformes Fecales en torno a 100 y 10.000 CF/g ST y huevos de helminto sitúan este parámetro en la faja de 30 a 800 huevos/g ST.

Se debe considerar que de momento no existe una normativa específica sobre reuso de biosólidos en República Dominicana, por lo que se recomienda hacer una revisión de experiencias en otros lugares y capacitar a los agricultores sobre los cuidados especiales para el reuso de este tipo de lodos, principalmente prácticas de manejo y periodos de veda previo a las cosechas. A manera de recomendación, en la siguiente tabla se presentan los límites permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de biosólidos ordinarios según su

disposición final en la normativa costarricense (Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos, Decreto N° 39316-S).

Tabla 11: Límites permisibles para los parámetros de análisis obligatorio de biosólidos según su disposición final

| Parámetros | Relleno sanitario | Disposición en suelo (Tipo de sólido A1) | Disposición en suelo (Tipo de sólido B2) |
|---------------------|-------------------|--|--|
| Humedad (%) | 75 | 75 | 75 |
| Coliformes fecales | No aplica | 2000 | 2×10^6 |
| pH | 5-12 | 5-12 | 5-12 |
| Huevos del Helminto | No aplica | 1 | 10 |



Tipo de biosólidos según su uso (Normativa Costarricense).

Tipo A1: Biosólidos dispuestos en terrenos donde puede existir contacto directo con el público.

Tipo B2: Biosólidos dispuestos en terrenos donde no debe existir un contacto directo con el público. En terrenos de uso agrícola, la disposición debe cesar dos semanas antes de la cosecha. Debe evitarse el pastoreo de ganado durante los quince días siguientes a la finalización de la disposición.

De acuerdo con esta normativa, los lodos podrían ser utilizados como un mejorador de suelos en los terrenos del cultivo. Es importante que a nivel operativo se incluyan partidas el presupuesto de operación para el monitoreo de los diferentes parámetros del lodo durante el proceso de secado y una vez seco, con el fin de asegurar una buena maduración y calidad del lodo previo a su utilización como mejorador de suelos. Este producto del proceso de tratamiento se puede ofrecer a los agricultores de la zona, con el fin de fomentar su reúso dentro del marco de soluciones de economía circular.

Revisión de propuestas y planos de la contraparte

A nivel general, los planos para la rehabilitación del sistema de tratamiento proponen los siguientes cambios:

1. Laguna 1:

- 1.1. Inclusión un tratamiento preliminar mediante caja de rejillas, desarenador y vertedero para medición de caudal.
- 1.2. Instalación de nuevas tuberías para distribución del agua residual a la laguna 1.
- 1.3. Construcción de una fosa anaerobia en la primera sección de la laguna 1.
- 1.4. Cambio del régimen hidráulico mediante la construcción de un nuevo vertedero en el lado opuesto a la entrada de la laguna.
- 1.5. Instalación de tubería de conexión con la Laguna 2.
- 1.6. Reconstrucción de encache dañado (taludes) y aceras (berma).

2. Laguna 2:

- 2.1. Construcción de muros divisorios para mejorar el régimen hidráulico.
- 2.2. Instalación de macrófitas flotantes en una sección de laguna.
- 2.3. Construcción de nuevo vertedero de salida del agua tratada.
- 2.4. Reconstrucción de encache dañado.

3. Planta física:

- 3.1. Construcción de camino de acceso y paso de alcantarilla.
- 3.2. Construcción de verja perimetral.
- 3.3. Rehabilitación de caseta del operador.
- 3.4. Instalación de iluminación.
- 3.5. Caminos de acceso y estacionamiento.

Todos estos cambios planteados van a tener un impacto positivo sobre el desempeño del sistema de tratamiento de aguas residuales. Algunas recomendaciones adicionales son las siguientes:

1. Incluir dispositivos para la medición de caudal.
2. Incluir una partida para la impermeabilización del sistema lagunar.
3. Verificar el funcionamiento hidráulico de los dispositivos de entrada en la laguna 1 según los planos de remodelación, ya que esto es crítico para lograr la operación de una laguna de alta tasa.
4. Cambio de vertedero de salida en las lagunas por tuberías para facilitar los trabajos de impermeabilización.
5. Incluir vertedero de excesos del efluente del sistema lagunar cuando no se logre el reúso del agua tratada y su conexión hacia el cauce de desfogue.
6. Incluir una partida y/o planificar la gestión de los lodos producidos por el sistema lagunar.

Una de las mejoras que se proponen en los planos, es la introducción de muros divisorios y macrófitas flotantes en la laguna 2. Es claro que este tipo de mejoras tienen un impacto positivo en la operación del sistema lagunar; sin embargo, posiblemente no se llegue a cumplir con los límites de vertido para cauce receptor, por lo que se debe analizar el costo beneficio de implementar esta solución. Adicionalmente, es probable que la primera sección de esta laguna tenga condiciones de sobre carga orgánica, por lo que a nivel general no se recomienda la inclusión de los muros divisorios.

Por último, se hace énfasis en la necesidad de planificar la gestión de los lodos resultantes de la limpieza de las lagunas y control de natas, ya que al momento no se ha considerado una solución para ello. Una mala planificación de la gestión de lodos puede generar resultados

negativos en el corto plazo, por lo que prevenir esta situación es de suma importancia.

Por último, en cuanto a la inclusión de un aliviadero de exceso o emergencia en el efluente del sistema lagunar, se debe hacer la salvedad que esta no debe ser una operación rutinaria y se debe favorecer el reúso del agua tratada en riego; sin embargo, es claro que será mejor a la situación actual de vertido de aguas residuales no tratadas.

Costos estimados

Para la estimación del presupuesto preliminar solo se han considerado las partidas necesarias para lograr un funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales y se ha considerado la profundización de la laguna #1 para alcanzar una altura útil de 3.5 m. No se han contemplado partidas referentes a los caminos de acceso o intervención del sistema de alcantarillado.

Tabla 12: Costos estimados para ejecución de actividades de remodelación del sistema de tratamiento.

| Unidad | Descripción | Base de análisis | Cantidad | Precio unitario | Costo estimado (USD) |
|------------------------|---|------------------|----------|-----------------|----------------------|
| Preliminares | Bodega, cabaña sanitaria, oficina y letrero | global | 1 | 4500 | 4,500.0 |
| Tratamiento preliminar | Tratamiento preliminar | Global | 1.0 | 35,000.0 | 35,000.0 |
| | Instalación de conexión desde desarenador a laguna mediante tuberías de fondo | Global | 1.0 | 15,000.0 | 15,000.0 |
| Laguna anaerobia | Demolición de vertedero existente | Global | 1.0 | 500.0 | 500.0 |
| | Limpieza y desmonte en perímetro de laguna y remoción de vegetación en enchache | m2 | 1,432.0 | 0.9 | 1,256.1 |
| | Reparación en enchache dañado (20%) | m2 | 264.0 | 10.0 | 2,640.0 |
| | Demolición de fondo de laguna (m2) | m2 | 2,100.0 | 3.5 | 7,368.4 |
| | Acopio y bote de material de limpieza y fondo de laguna (m3N) | m3N | 441.7 | 5.4 | 2,366.4 |
| | Excavación de fondo laguna y bote de material (m3N) | m3N | 2,730.0 | 8.8 | 23,947.4 |

| | | | | | |
|--------------------|---|--------|---------|----------|-----------|
| | Suministro relleno, nivelación y compactación fondo de laguna 0.20 cm | m3 | 420.0 | 22.4 | 9,413.8 |
| | Instalación de geomembrana para impermeabilización (Materiales, mano de obra especializada y de apoyo) | m2 | 4,500.0 | 13.0 | 58,500.0 |
| | Apoyo de maquinaria para movimientos y conformación de trincheras para fijación de geomembrana | día | 15.0 | 350.9 | 5,263.2 |
| | Interconexión de lagunas desde vertedero de salida hasta laguna facultativa. 4 salia de 8" a registros y tubo principal 16" | Global | 1.0 | 20,000.0 | 20,000.0 |
| Laguna facultativa | Demolición de vertedero existente | Global | 1.0 | 500.0 | 500.0 |
| | Limpieza y desmonte en perímetro de laguna, remoción de vegetación en enchache y limpieza de fondo de laguna | m2 | 8,228.0 | 0.9 | 7,217.5 |
| | Acopio y bote de material de limpieza y fondo de laguna (m3N) | m3N | 1,604.5 | 5.4 | 8,595.3 |
| | Reparación en enchache dañado (20%) | m2 | 1,645.6 | 10.0 | 16,456.0 |
| | Impermeabilización de laguna con geomembrana y mejora de taludes | m2 | 8,300.0 | 13.0 | 107,900.0 |
| | Apoyo de maquinaria para movimientos y conformación de trincheras para fijación de geomembrana | día | 22.0 | 350.9 | 7,719.3 |
| | Tuberías de salida, vertedero de medición | Global | 1.0 | 4,000.0 | 4,000.0 |
| | tuberías de salida, distribución a riego | Global | 1.0 | 15,000.0 | 15,000.0 |
| Lagunas de lodos | Limpieza y desmonte | m2 | 2,000.0 | 0.9 | 1,754.4 |
| | Acopio y bote de material de limpieza | m3N | 390.0 | 5.4 | 2,089.3 |
| | Excavación de lagunas (1800 m3 capacidad total) | m3N | 2,808.0 | 8.8 | 24,631.6 |
| | Suministro relleno, nivelación y compactación fondo de laguna 0.20 cm | m3 | 360.0 | 22.4 | 8,069.0 |
| | Impermeabilización de laguna con geomembrana y mejora de taludes | m2 | 2,600.0 | 13.0 | 33,800.0 |
| | Apoyo de maquinaria para movimientos y conformación de | día | 22.0 | 350.9 | 7,719.3 |

| | | | | | |
|--|---|-------------------------|-------|----------|-----------|
| | trincheras para fijación de geomembrana | | | | |
| | Tuberías de salida y registro hacia laguna facultiva | global | 1.0 | 5,000.0 | 5,000.0 |
| Otros trabajos | Sellado de tubos de entrada y salida de lagunas | und | 20.0 | 400.0 | 8,000.0 |
| | Bomba de desplazamiento positivo con motor gasolina, mangueras y tuberías | Global | 1.0 | 15,000.0 | 15,000.0 |
| | Rehabilitación caseta operador | Global | 1.0 | 3,000.0 | 3,000.0 |
| | Cercado con alambre de púas y portón de ingreso | mL | 700.0 | 35.0 | 24,500.0 |
| Nota: considera material de excavación tipo caliche, sin roca. Bote material 5 km. Las partidas de movimientos de tierra pueden variar según tipo de material definido en estudio de suelo. No se considera presencia de nivel freático. | | Subtotal | | | 486,706.9 |
| | | Costos indirectos (30%) | | | 146,012.1 |
| | | Total | | | 632,719.0 |

Los principales rubros que afectan el monto global del proyecto corresponden a la partida excavaciones en la fosa anaeróbica, lagunas de secado e la impermeabilización del sistema lagunar. Para la estimación de las partidas, en ausencia de estudios de suelo para determinar el tipo de terreno se ha sido conservador al utilizar un terreno duro para las excavaciones. Esto podría ser revisado durante la fase de diseño definitivo. Por igual, definir la cota de llegada del alcantarillado sanitario es crucial, ya que permite de forma precisa establecer un diseño de los trabajos que se deben ejecutar en la primera laguna.

Recomendaciones para reúso del agua tratada

Como se mencionó en la sección anterior, el sistema lagunar no cumpliría con los límites de vertido a cuerpo hídrico receptor establecidos en la reglamentación dominicana. Sin embargo, el proyecto tiene un gran potencial para que el tipo de disposición final del agua sea el reúso agrícola.

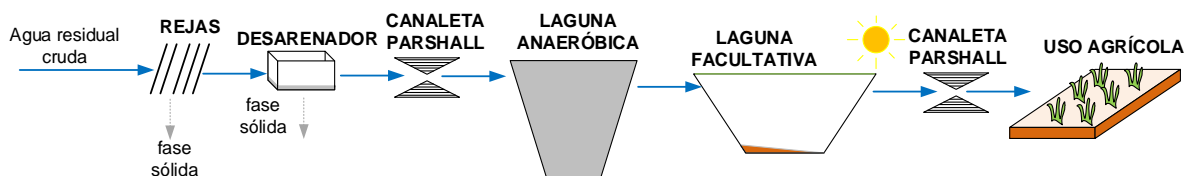


Diagrama del proceso de tratamiento propuesto en la PTAR Sabana Yegua

Nótese que el sistema propuesto, además de contar con las lagunas analizadas en la sección anterior, incluye un pretratamiento compuesto por unas rejillas de desbaste y un desarenador. Se recomienda colocar al menos una rejilla con apertura de 1.0 cm, seguido de un desarenador de flujo horizontal y sección transversal rectangular, los cuales deberán ser diseñados durante la fase de diseño final de la propuesta. En cuanto al desarenador es recomendable tener una velocidad de 0.30 m/s y que no supere 0.40 m/s para evitar el arrastre de arenas.

Una sección de control, tipo Canaleta Parshall podría usarse para mantener el nivel en el desarenador y para medir el caudal afluente a la PTAR. Otra canaleta Parshall a la salida de la laguna facultativa permitiría verificar si existen infiltraciones o pérdidas excesivas por evaporación en el sistema, además de proveer el control adecuado para la alimentación de los campos agrícolas.

En cuanto al espacio disponible para la instalación de estos dispositivos, no hay problemas de espacio para su colocación.

Por la cercanía de la PTAR con plantaciones de plátano y pasto para forraje (se desaconseja para los cultivos de yuca), el efluente del sistema lagunar puede fácilmente usarse para proveer parte de los nutrientes requeridos por esos cultivos (N, P, K). Esta condición es deseable desde una perspectiva de economía circular del saneamiento, y es preferible a verter el efluente tratado a un cuerpo hídrico.



Área próxima a la planta de tratamiento para reúso de aguas residuales tratadas

La zona propuesta para el reúso del agua residual tratada se localiza en una cota inferior a las bermas que conforman el sistema lagunar, por lo que es posible aprovechar la pendiente natural del terreno para dirigir el agua residual tratada hacia un punto de común acuerdo con los agricultores desde donde ellos puedan dirigir el efluente mediante canales hasta los distintos campos de cultivo. El punto de toma de agua desde el vertedero de la planta de tratamiento deberá contar con una válvula de control hacia el reúso y un vertedero de excesos, de forma que al cerrar la válvula esta pueda ser conducida hasta un punto de vertido. Como se comentó anteriormente, la utilización del aliviadero de excesos no debe ser la rutina normal; de forma que se propicie lograr el mayor aprovechamiento posible del agua residual tratada. Como se presenta más adelante, se ha estimado un área de riego con el fin que se logre un reúso del 100% del agua tratada.

El tipo de reúso, según las normas de la OMS (1989) sería el agrícola Tipo C “Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles” en los cuales los trabajadores y el público no están expuestos. Para este tipo de disposición final la OMS recomienda al menos un tratamiento primario, y en esta propuesta se tendría un tratamiento secundario /

biológico, superando el mínimo de la OMS. La propuesta cumpliría también con los requisitos para reúso agrícola tipo B (exposición de trabajadores), que tiene un límite de nemátodos intestinales menor a 1 y un TRH en un sistema lagunar entre 8-10 días (no hay límites para coliformes fecales).

El sistema de disposición del efluente en el suelo, para aprovechamiento agrícola, deberá diseñarse adecuadamente y una transferencia de conocimiento para que sea operado de manera segura por los agricultores de la zona será necesaria, tal y como se analiza en la siguiente Sección.

Disposición del efluente tratado en el suelo para reúso agrícola

El reúso del efluente para fines agrícolas permite la disposición del agua residual tratada mediante sistemas de bajo costo de implementación y mantenimiento, especialmente cuando existen zonas agrícolas próximas a la PTAR. A su vez, beneficia al sistema suelo-cultivo, debido a que el agua residual tratada mejora características del suelo, tales como su estructura, estabilidad, aireación, drenaje y retención de agua; además, permite la incorporación de materia orgánica y nutrientes en el suelo, lo cual es beneficioso para las áreas cultivadas y puede verse reflejado en mejoras en los cultivos y reducción del uso de fertilizantes químicos (Matos, 2017).

Existen diversos métodos de disposición del efluente en el suelo, pero en este caso, debido a las condiciones en el sitio (existencia de canales de distribución en las zonas de cultivos) se propone el reúso agrícola del agua residual tratada por medio de infiltración. Este sistema de disposición se caracteriza por la percolación del agua residual en el suelo, el agua es depurada (adicionalmente al tratamiento recibido en la PTAR) mediante la filtración en el suelo, y posteriormente pasa a ser recuperada por drenaje superficial o a formar parte del agua subterránea. La disposición del agua residual por medio de infiltración presenta ventajas tales como la necesidad de pequeñas áreas de cultivo (en comparación con otros tipos de

disposición agrícola), poca dependencia de las pendientes del terreno y puede ser utilizado durante todo el año, a excepción de sitios con épocas lluviosas intensas. Sin embargo, el factor limitante de esta técnica es la capacidad de infiltración del suelo, siendo preferible que el suelo sea de alta permeabilidad, es decir, suelos arenosos (Matos; Matos, 2017). Además, es importante resaltar que se recomiendan monitoreos periódicos de la calidad del efluente, principalmente de nitrato, debido a la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas por filtración del agua residual tratada.

El objetivo de esta sección es estimar de manera preliminar la cantidad de terreno que podría ser necesaria para la disposición del efluente. Debido a que no se contó con un análisis de laboratorio de algunos parámetros importantes para la realización de los cálculos respectivos, se usaron valores de la literatura. Por lo tanto, estos resultados deberán ser evaluados posteriormente, luego de realizada una caracterización más completa de las aguas residuales (preferiblemente a la salida del sistema de tratamiento, una vez que entre en operación) y del suelo en el cual será aplicado el efluente. Los parámetros adoptados para el cálculo del área requerida se muestran en la **Tabla 13**.

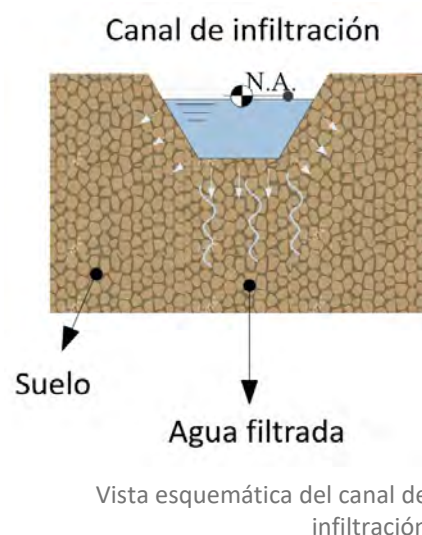


Tabla 13: Parámetros adoptados para la determinación del área requerida

| Parámetro | Concentraciones en efluente |
|--------------------------------------|--|
| Caudal | 3200 m ³ /d |
| DBO efluente | 80 mg/L ⁽²⁾ |
| Tipo de suelo | Suelo arenoso de alta permeabilidad ⁽¹⁾ |
| Frecuencia de aplicación | 3 días de aplicación por 6 días de reposo ⁽³⁾ |
| Tasa de infiltración estable (TIE) | 15 mm/h → 0,36 m/d ^{(1) (3)} |
| Tasa de aplicación recomendada (TAR) | 0,075 kg DBO/m ² d ⁽³⁾ |



- (1) Se asume un tipo de suelo arenoso y permeable. El valor de TIE puede verse afectado al determinar ese parámetro para el terreno donde será realizada la disposición del efluente
- (2) Adaptado de Tabla 4.9 (Sperling, 2007)
- (3) Adaptado de Matos y Matos (2017)

Para determinar el área requerida, se realiza la estimación utilizando dos métodos: *i)* método basado en la tasa de infiltración del suelo y *ii)* método basado en la carga orgánica; el área mayor obtenida, será la que regirá para el dimensionamiento. En el primer método, el factor limitante es la capacidad de filtración del suelo; mientras en el segundo método, la cantidad de efluente dispuesta en el suelo es condicionada por la materia orgánica aplicada en el suelo, pues debe evitarse la generación de zonas anaeróbicas o la obstrucción del suelo debido a la presencia excesiva de materia orgánica. Utilizando el método de la tasa de infiltración para determinar el área requerida, se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_N = \frac{Q}{TIE \times F_P} \times F_R \quad [4]$$

Donde,

A_N : Área (m²)

Q : Caudal (m³/d) → 3200 m³/d

TIE : Tasa de infiltración estable (m³/d) → 0,36 m/d (para un suelo arenoso y permeable)

F_P : Factor de corrección del método de determinación de la TIE (0,10 – 0,15) → Valor adoptado de 0,1

F_R : Factor multiplicador por intervalo de reposo → 3 días (el área debe triplicarse para que 1/3 del área permanezca en reposo de aplicación del efluente, durante 6 días)

$$A_N = \frac{3200 \text{ m}^3/\text{d}}{0,36 \text{ m/d} \times 0,1} \times T_R = \mathbf{26,6 \text{ ha}}$$

Para la determinación del área necesaria basada en la carga orgánica, se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_N = \frac{Q \times \text{DBO}}{TAR} \quad [5]$$

En que,

A_N : Área (m²)

Q: Caudal (m³/d) → 3200 m³/d

DBO: Concentración DBO (mg/m³) → 80 mg/L = 0,08 kg/m³

TAR: Tasa de aplicación recomendada (kg DBO/ha.d) → 0,075 kg/m²d

$$A_N = \frac{3200 \text{ m}^3/\text{d} \times 0,08 \text{ kg/m}^3}{0,075 \text{ kg/m}^2\text{d}} = \mathbf{0,34 \text{ ha}}$$

En este caso, rige el área requerida basada en la tasa de infiltración del suelo, debido a que es superior al área determinada por la carga orgánica, de modo que es necesaria un área de aproximadamente 26,6 ha para la disposición del efluente tratado; es importante resaltar que ese valor puede verse afectado al determinar la tasa de infiltración del suelo donde será realizada la disposición del efluente. En una etapa siguiente, conociendo la geometría del terreno que será utilizado para la disposición del efluente, debe realizarse el dimensionamiento de los canales (ancho y perímetro de los canales), así como su distribución en el terreno según los intervalos de aplicación y reposo.

En cuanto a la infraestructura requerida para el reúso del agua residual tratada, se propone aprovechar que la planta de tratamiento se localiza en una cota mayor a los terrenos aledaños. Tomando esto en cuenta se prevé la instalación de una salida desde el canal vertedero de las lagunas #2 hasta un punto donde los agricultores pueden hacer uso del agua tratada y llevar hacia los campos de cultivo.

La planificación y diseño del reúso con posibles parceleros es de suma importancia, ya que se debe lograr el consumo del agua residual tratada y evitar que esta sea vertida al arroyo copey en la medida de lo posible, ya que no cumpliría con todos los parámetros para ello. En el cálculo del área de riego se ha planificación la rotación y tiempos de descanso de los terrenos y de esta forma eliminar la necesidad de un tanque o laguna de almacenamiento de pulmón que encarecerían el proyecto.

Recomendaciones futuras para el sistema lagunar

En esta sección se presentan algunas posibles mejoras que se recomienda implementar en el sistema lagunar de Sabana Yegua en el mediano y largo plazo, una vez que el sistema se haya recuperado y se haya podido recabar datos más completos sobre el agua residual cruda y las eficiencias efectivas.

i. Laguna anaeróbica

La laguna anaeróbica generará biogás, el cual es rico en metano (CH_4). El CH_4 , además de tener un elevado potencial energético que permite su uso para cocinar, calentar agua o hasta generar electricidad en motores de combustión interna, es un potente gas de efecto invernadero (con un potencial de calentamiento global 28 veces el del CO_2). Por lo tanto, es importante evitar la emisión de CH_4 a la atmósfera, e intentar valorizarlo energéticamente.

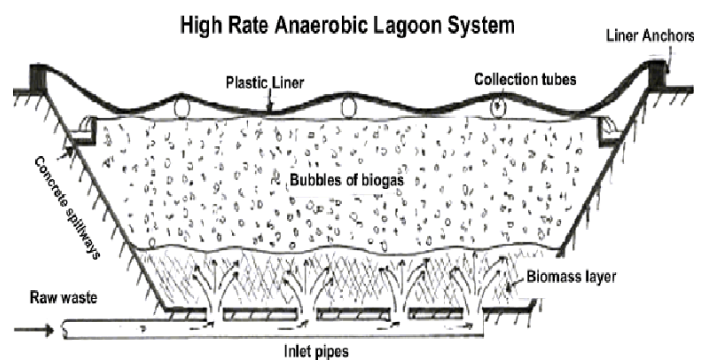
Para este fin es posible cubrir la laguna anaeróbica con una geomembrana, e instalar un sistema de captación, tratamiento y aprovechamiento del biogás. En el peor de los escenarios, se recomienda quemar el biogás en antorchas. En la figura se muestra una fotografía de referencia de una laguna anaeróbica cubierta, y de una antorcha para el quemado del biogás generado.



Vista de una laguna anaeróbica cubierta (M,usa y Idrus, 2021)

Una vez cubierta la laguna anaeróbica, se recomienda captar y medir el caudal de biogás generado durante por lo menos un año, y luego enviarlo al quemador. De este modo se podrá tener un mejor conocimiento de la generación real de biogás y su composición, de modo que será posible diseñar algún sistema de aprovechamiento del biogás.

Otra posible mejora para la laguna anaeróbica (Tabla 6), es sumergir la alimentación de agua residual a la entrada e instalar un sistema de distribución de caudal en el fondo, de modo a promover el contacto directo entre el agua residual (sustrato), y la biomasa anaeróbica. Esto permitirá emular el funcionamiento de un reactor anaeróbico de alta tasa, como el reactor UASB. Este sistema también es conocido como laguna anaeróbica de alta tasa.



Vista esquemática de la alimentación una laguna anaeróbica de alta tasa (Alam, 2009).

La laguna anaeróbica de alta tasa puede operar a TRH tan bajos como 1 día, permitiendo aumentar la capacidad de la laguna existente.

ii. *Laguna facultativa*

Tal y como se analizó en la **Tabla 8**, la laguna facultativa se encuentra ajustada en términos de carga orgánica superficial. Por este motivo, será necesario dar seguimiento en el tiempo al incremento de la carga orgánica afluente, y evaluar si será necesario aumentar el área de laguna facultativa (por medio de la construcción de un nuevo sistema en



Aireación en lagunas facultativas

paralelo), o aumentar su capacidad instalando un sistema de aireación mecánica en la laguna facultativa. No es necesario aportar aire suficiente para que el sistema se comporte como una laguna de mezcla completa, sino aportar apenas el oxígeno necesario para oxidar una parte de la materia orgánica afluente. Esto convertiría el sistema en una laguna facultativa aireada.

Transformar el sistema lagunar en una laguna facultativa aireada tendría un costo elevado a nivel de inversión (equipos electromecánicos, instalación eléctrica) y operación y mantenimiento (consumo energético y mantenimiento de los equipos), por lo que se recomienda dar prioridad a la opción de aumentar el área de lagunas facultativas, de ser posible.

Otra mejora que puede realizarse en la laguna facultativa es la instalación de un filtro de piedra a la salida del sistema, de modo a retener una parte importante de las algas y obtener un efluente clarificado que pueda ser aceptado más fácilmente por parte de los agricultores. Mara (2008) reporta un efluente con una concentración de SS de tan solo 7 mg/L al usar un filtro de piedra (tamaño de 75mm a 200mm) a la salida de una laguna facultativa, y Andrada (2005) reportó concentraciones de 25 mg/L y 27 mg/L de SST y DBO, respectivamente, en un sistema experimental en Brasil.



Filtro de piedra para pulimiento de efluentes lagunares (Andrada, 2005).

Requisitos legales

República Dominicana cuenta con una norma de referencia para los parámetros de vertido permitidos a cuerpos receptores, por lo que, cualquier sistema de tratamiento debe estar acorde los valores mencionados en la Norma NA-CDAS-2012 (Tabla 1. Para una población equivalente a 10,000 – 100,000 habitantes).

Tabla 14: Parámetros de vertido a cumplir en el cuerpo receptor.

| Población HAB. equiv | Valores máximos permisibles | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------|------|-----|----|-------------------|---------------------------------------|-------------------|------|---------------|
| | | mg/L | | | | | | | NMP/100 mL |
| | pH | DBO | DQO | SS | N-NH ₄ | N-(NO ₃ +NH ₄) | P-PO ₄ | CRL | CT |
| <5000 | 6-8.5 | 50 | 160 | 50 | | | | 0.05 | 1000 |
| 5001- 10,000 | 6-8.5 | 45 | 150 | 45 | | | | 0.05 | 1000 |
| 10,001 – 100,000 | 6-8.5 | 35 | 130 | 40 | 10 | 18 | 3 | 0.05 | 1000 |
| >100,000 | 6-8.5 | 35 | 130 | 35 | 10 | 18 | 2 | 0.05 | 1000 |

Como se puede comprobar al observar las Tablas 9 y 10, el sistema lagunar en su condición actual no cumpliría con los límites de vertido a cuerpo receptor establecidos en la reglamentación dominicana. Con base en ello, se recomienda tramitar el permiso de sistema de tratamiento por parte del Ministerio de Medio Ambiente tomando en cuenta el reúso del efluente tratado.

En la siguiente tabla se presentan las diferentes instituciones que deben ser involucradas para realizar los trámites correspondientes previo a las obras de remodelación. Se debe tomar en cuenta que esta tramitología es la realizada para la realización de proyectos particulares; sin

embargo, al tratarse de una obra ya construida y propiedad de INAPA se pueden mediar los acuerdos de colaboración entre todas las instituciones para reducir los tiempos indicados.

Tabla 15: Trámites y requisitos legales previo a la realización del proyecto

| Institución | Trámite | Tiempo estimado | Referencia |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|
| Ayuntamiento de Sabana Yegua | Uso de suelo y no objeción | 20 días laborales | https://ayuntamientosabanayegua.gob.do/certificado-de-uso-de-suelo/ |
| Ayuntamiento de Azua | Uso de suelo y no objeción | 20 días laborales | https://ayuntamientoazua.gob.do/presentacion-de-proyectos-y-construcciones-definitivas/ |
| INAPA | Aprobación de documentación técnica | 30 días laborables | https://www.inapa.gob.do/index.php/proyectos/category/26-reglamentos-y-requerimientos-de-proyectos# |
| Ministerio de Ambiente | Licencia ambiental | El proyecto tiene aprobación | https://ambiente.gob.do/autorizaciones-ambientales-2/ |
| Ministerio de Obras Públicas | Licencia de construcción | 45 días laborables | https://www.mopc.gob.do/servicios/directori%C3%B3n-oficina-central-de-tramitaci%C3%B3n-de-planos/emisi%C3%B3n-de-licencia-de-construcci%C3%B3n/ |
| Total de tiempo estimado | | 95 días | |

Indicadores del proyecto

Para el cálculo de los indicadores del proyecto se ha utilizado el dato de caudal calculado para el año 2021 (2544 m³/día). El valor de DBO en el agua cruda se ha utilizado una concentración media (300 mg/L) y los valores de nutrientes se ha utilizado los reportados en la Tabla 1 y una eficiencia de 60% y 35% de remoción de nitrógeno y fósforo respectivamente, las cuales son usuales en sistemas lagunares como el propuesto.

- + Número de soluciones de baja tecnología: 5
 - Caja de rejas y desarenador.
 - Laguna anaerobia.
 - Lagunas facultativas.
 - Lagunas de secado de lodos.
 - Reúso de agua tratada.
- + Volumen de agua residual a tratar anualmente (2021): 928,560 m³
- + Hogares que se beneficiarán: 2729 (Censo, 2010)
- + Reducción de la contaminación:
 - DBO eliminada anualmente: 237,897 kg DBO/año
 - Nitrógeno evitado: 18,489 kg NT/año
 - P evitado: 4,780 kg PT/ año

Referencias

OMS (1989). Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Reporte técnico Serie 778. Geneva: Organización Mundial de la Salud.

Von Sperling, Marcos (2002). Principios de tratamiento biológico de aguas residuales. Volumen 3: Lagunas de estabilización. Universidad Federal de Minas Gerais (Belo Horizonte).

Von Sperling, Marcos (2007). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. Volumen 1: Características del agua residual, tratamiento y disposición. Universidad Federal de Minas Gerais (Belo Horizonte).

Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos. Decreto 39316-S. República de Costa Rica (2015).

Mendonça, Sérgio (2000). Sistemas de Lagunas de Estabilización: como reutilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. McGraw Hill (Colombia).

Campos, Roberto. (1999). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio y disposição controlada no solo. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico -PROSAB (Rio de Janeiro).

Norma Ambiental sobre Control de Descargas a Aguas Superficiales, Alcantarillado Sanitario y Aguas Costeras. (2012). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (República Dominicana)

6.3. Diseños

Para más información consultar con el equipo de Proyecto

Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



Más derechos para más gente

En alianza con



CRew+

