

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Caracterización y propuesta para el tratamiento y disposición de
los lodos generados en el modelo físico de la Planta de Tratamiento de
Aguas Residuales de El Roble de Puntarenas**

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

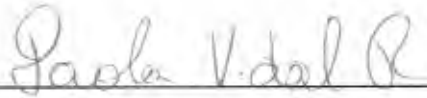
Verónica Chaves Vargas

Directora de proyecto de graduación:

Ing. Paola Vidal Rivera

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

INTEGRANTES DEL COMITÉ ASESOR



Ing. Paola Vidal Rivera

Directora



Ing. Nidia Cruz Zúñiga, MSc

Asesora

Ing. Erick Centeno Mora, MSc

Asesor



Verónica Chaves Vargas
Graduando

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Fecha: 2018, junio, 28

La suscrita, **Verónica Chaves Vargas**, cédula 4-0200-0830, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A71913, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Caracterización y propuesta para el tratamiento y disposición de los lodos generados en el modelo físico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de El Roble de Puntarenas**, bajo la dirección de la Ing. Paola Vidal Rivera, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Dulce María, quien ha sido un ejemplo para mí, cuyas enseñanzas, valores, amor y apoyo me permitieron concluir esta etapa y a mis hermanos por el apoyo que me han brindado.

A mi directora de trabajo final, la ingeniera Paola Vidal, mi asesora la ingeniera Nidia Cruz y a Dagoberto Oviedo encargado del laboratorio. A todos mis compañeros que fueron parte durante este proceso y me brindaron su ayuda y amistad.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Justificación	12
1.1 El problema específico	12
1.1.2 Importancia	13
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	14
1.2. Objetivos	16
1.2.1 Objetivo General.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Delimitación del problema	17
1.3.1 Alcances	17
1.3.2 Limitaciones.....	18
1.4 Metodología	19
1.4.1 Fase investigativa	20
1.4.2 Fase experimental	21
1.4.3 Fase Analítica	22
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	24
2.1 Lodos activados	24
2.2 Lodos de desecho	24
2.3 Lodo activado con biopelícula en lecho fijo	24
2.4 Parámetros de caracterización física de lodos.....	25
2.5 Coagulación química	26
2.5.1 Consecuencias del uso del cloruro de hierro (III) en agua y seres vivos	26
2.6 Modelo de Murcott.....	27
2.6 Aplicaciones de lodos residuales en obras de geotecnia.....	28

2.7 El hierro en los suelos	28
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA	30
.....	
3.1 Caracterización física.....	30
3.1.1 Ubicación de Planta de Tratamiento	30
3.1.2 Sistema de tratamiento	31
3.1.3 Condiciones climáticas del sitio	33
3.1.4 Sólidos totales.....	34
3.1.5 Sólidos sedimentables.....	36
3.1.6 Sólidos suspendidos volátiles	41
3.1.7 Relación SV/ST.....	43
3.1.8 pH.....	43
3.1.9 Porcentaje de humedad	44
3.1.10 Curvas de humedad	45
3.2 Caracterización química.....	51
3.3 Caracterización microbiológica	52
3.4 Remoción de fósforo y sulfatos	54
CAPÍTULO 4: CUANTIFICACIÓN DE PRODUCCIÓN DE LODOS	55
4.1 Cálculo de producción de lodos.....	55
4.2 Producción de lodos sin coagulante	55
4.3 Producción de lodos utilizando coagulante	57
CAPÍTULO 5: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS	59
5.1 Evaluación de opciones para tratamiento	59
5.1.1 Lagunas de secado	59
5.1.2 Deshidratación mecánica.....	60

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
6.1 Caracterización física.....	63
6.1.1 Sólidos totales.....	63
6.1.2 Sólidos sedimentables.....	63
6.1.3 Sólidos suspendidos volátiles	65
6.1.4 Relación SV/ST.....	67
6.1.5 pH.....	68
6.1.6 Porcentaje de humedad	69
6.1.7 Curvas de humedad.....	70
6.1.8 Caracterización química y microbiológica	72
6.2 Cuantificación de lodos.....	73
6.3 Tratamiento y disposición de lodos.....	75
6.3.1 Tratamiento de lodos	75
6.3.2 Disposición de lodos	76
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
7.1 Conclusiones	82
7.2 Recomendaciones.....	89
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÉNDICES	94
Apéndice 1. Datos de laboratorio de ensayos de caracterización física.....	94

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen de resultados para sólidos totales	35
Cuadro 2. Resumen de resultados de lodos sedimentables	36
Cuadro 3. Resumen de resultados de prueba de sedimentabilidad.....	40
Cuadro 4. Resumen de resultados de sólidos suspendidos volátiles	42
Cuadro 5. Relación de sólidos volátiles y sólidos totales.....	43
Cuadro 6. Resultados de pH para lodos.....	43
Cuadro 7. Medición de pH en muestras con coagulante de 3/05/2017	44
Cuadro 8. Resumen de humedades en lodos	45
Cuadro 9. Caracterización física y nutricional de lodos.....	51
Cuadro 10. Caracterización nutricional de lodos en las lagunas	52
Cuadro 11. Requisitos del Reglamento para el Manejo y Disposición Final	53
Cuadro 12. Contenido de coliformes en lodos.....	53
Cuadro 13. Datos técnicos de PTAR El Roble.....	55
Cuadro 14. Producción de lodo primario por el uso de cloruro férrico	58
Cuadro 15. Dosificación de referencia para acondicionadores en filtro prensa	62
Cuadro 16. Pruebas de humedad a lodo fino y lodo espeso	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico del proyecto.....	19
Figura 2. Incrustaciones de estruvita en tuberías.....	29
Figura 3. Ubicación de PTAR El Roble.....	30
Figura 4. Diagrama de proceso de tratamiento de aguas en El Roble.....	31
Figura 5. Laguna de lodos primarios.....	32
Figura 6. Precipitación en El Roble, Puntarenas.....	33
Figura 7. Temperatura en El Roble, Puntarenas.....	34
Figura 8. Comparación de sólidos totales en lodos.....	35
Figura 9. Sólidos sedimentables.....	36
Figura 10. Prueba de sedimentabilidad en octubre.....	37
Figura 11. Prueba de sedimentabilidad para febrero.....	38
Figura 12. Prueba de coagulante en mayo con dosis de 60 mg/l.....	39
Figura 13. Prueba a lodo primario de 17/03/2017 con 100 mg/l.....	41
Figura 14. Sólidos suspendidos volátiles en lodos.....	42
Figura 15. Comparación de pH en lodos.....	44
Figura 16. Comparación de humedades en lodos.....	45
Figura 17. Muestras de prueba de humedad en verano.....	46
Figura 18. Curva de humedad para lodos en estación seca.....	47
Figura 19. Curvas de humedad para lodos en estación lluviosa.....	47
Figura 20. Curvas de humedad para dosificaciones de cloruro en lodo primario..	48
Figura 21. Curvas de humedad para dosificaciones en lodo secundario.....	48
Figura 22. Prueba de humedad para diferentes dosificaciones en invierno.....	49
Figura 23. Curvas de humedad para dosificaciones de cloruro en lodo primario..	50
Figura 24. Curvas de humedad para dosificaciones en lodo secundario.....	50
Figura 25. Remoción de fósforo y sulfatos.....	54
Figura 26. Filtro prensa de banda.....	61
Figura 27. Prensa de tornillo RoS 3Q.....	61
Figura 28. Composición de sólidos totales en lodo primario.....	66
Figura 29. Composición de sólidos totales en lodo secundario.....	67
Figura 30. Relación SV/ST para lodos.....	68

Figura 31. Comparación de velocidad de deshidratación para71

Chaves Vargas, Verónica Isabel

Caracterización y propuesta para el tratamiento y disposición de los lodos generados en el modelo físico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de El Roble de Puntarenas

Proyecto de Graduación- Ingeniería Civil-San José, CR.:

V. I. Chaves V., 2018

X, 85, [3]h; ils. col.- 22 refs

RESUMEN

Esta investigación analiza la variación que se presenta en los lodos residuales que se producen en la PTAR El Roble al utilizar el cloruro férrico como coagulante en la entrada de la planta. La modificación en las características de los lodos, así como la variación en la producción de estos es de importancia para el AyA pues les permite conocer sobre la viabilidad en el uso del coagulante y se evalúa la necesidad de cambiar el tratamiento que reciben los lodos actualmente.

En la investigación paralela efectuada por Chacón (2018) se determinó mediante pruebas de Jarras un rango de dosis para la entrada de la planta ubicado entre 40 mg/l y 60 mg/l para mantener el nivel del fósforo en el agua a tratar. Las pruebas de humedad en condición natural, sólidos totales, sólidos volátiles y pH se realizaron en la línea base de la planta y con la adición de FeCl_3 . El aumento en la producción de lodos fue calculado utilizando el modelo de Murcott (1994).

Mediante las pruebas realizadas no se encontró evidencia que sugiera una afectación en la velocidad de deshidratación de lodos con el uso del coagulante, se presentaría un aumento en la producción de lodos de entre un 35% y un 57% si se utiliza el coagulante y las lagunas de secado de lodos deben ser cambiadas por un sistema mecánico de prensa de tornillo.

Palabras clave: lodos residuales, lodos activados, cloruro férrico, fósforo, hierro, sólidos totales, sólidos volátiles.

Ing. Paola Vidal Rivera

Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1 El problema específico

Costa Rica se caracteriza por una política inadecuada en cuanto al tratamiento adecuado de sus aguas residuales, si bien el país cuenta con una cobertura sanitaria alta, según el Decimonoveno Informe del Estado de La Nación, este porcentaje de acceso a algún tratamiento sanitario alcanza al 99% de la población, que incluye plantas de tratamiento de aguas residuales, tanques sépticos o letrinas, este dato se centra principalmente en el tratamiento de las aguas negras, ya que en muchos casos las aguas grises no son tratadas y se envían a cuerpos receptores de agua como ríos o lagunas sin ningún tratamiento.

Del 99% de cobertura sanitaria, aproximadamente el 72% del tratamiento recae en los sistemas de tanques sépticos, que resultan ser una buena opción para el tratamiento de las aguas residuales pero las deficiencias constructivas, de operación y requisitos para su uso en la mayoría de zonas urbanas del país convierten a este sistema de tratamiento en poco viable, efectivo y eficaz, por lo tanto, el alcantarillado sanitario surge como la mejor opción para el tratamiento de las aguas residuales para zonas con una densidad poblacional importante.

En nuestro país la institución que por ley se encuentra facultada para vigilar el uso del recurso hídrico y su tratamiento es el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) creado por la Ley 2726 del 14 de abril de 1961. Esta institución debe invertir en garantizar el suministro de agua potable y servicio de alcantarillado en áreas urbanas. La institución cuenta con varias plantas de tratamiento distribuidas a nivel nacional, siendo la planta del Roble de Puntarenas, la segunda en importancia, la cual procesa aproximadamente 6900 m³/día de aguas residuales, según datos de la institución.

Es por esta razón, que el AyA ha planteado, a través de los funcionarios de la Planta de Tratamiento del Roble de Puntarenas, buscar una solución ambientalmente y económicamente factible para el tratamiento de los lodos que se obtienen a través de los procesos que se realizan en la planta, de manera que su disposición sea sostenible y cumpla con reglamentación existente en el país. Además de esto, la institución busca soluciones para mejorar la eficiencia en el tratamiento de los lodos, que permita aumentar la capacidad y disminuir el tiempo que tardan estos en secar, ya que el proceso para su desecación involucra tener los lodos durante un año en una laguna, aumentando el riesgo de enfermedades en las comunidades vecinas, provocando malos olores y un aumento en la propagación de vectores.

El problema que presenta la planta actualmente se debe a que los lodos obtenidos del proceso de tratamiento de aguas residuales no tienen algún tipo de tratamiento posterior; el tratamiento que se hace o bien donde se disponen para que pierdan humedad consiste en la utilización de lagunas de secado que no son capaces de tratar y almacenar el volumen de lodos que se genera diariamente. El volumen de lodos aumentó a partir de la remodelación de la planta en 2014 lo que ha acrecentado el problema de tratamiento y disposición de los lodos, pues son frecuentes las filtraciones y derrames de las lagunas.

1.1.2 Importancia

Como el fin principal de la ingeniería es brindar soluciones pertinentes, eficientes y eficaces a problemas cotidianos, la importancia de este trabajo radica en proponer mejoras al proceso de generación de lodos, el tiempo que tardan estos lodos en secar y con ello aumentar la capacidad del procesamiento de estos, lo que deriva en un mejoramiento en el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Roble de Puntarenas y a un mejor uso de los recursos con los que dispone.

Tomando en consideración lo anterior y realizando un análisis de las propiedades de los lodos obtenidos del tratamiento de las aguas, es posible plantear aplicaciones para estos lodos de manera que sus propiedades puedan ser aprovechadas para fines agrícolas, geotécnicos, entre otros. La caracterización de los lodos es importante, ya que, para el caso específico de la planta, permite conocer cuál será el impacto de añadir el cloruro férrico y cuáles son los

cuidados que deben tenerse al disponer de los lodos con esa carga química, de modo tal, que no se presente una afectación en el ambiente debido a un manejo inadecuado de estos.

La realización de este trabajo le permitirá al AyA tener soluciones que cumplan con criterios técnicos, económicos y ambientales para el funcionamiento de la planta de tratamiento, de manera que éste sea sustentable y cumpla con la normativa ambiental que existe en el país.

La importancia de este trabajo radica en que el producto final consiste en el análisis de las características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos en su línea base, así como la caracterización física utilizando el coagulante, información que es importante para los encargados de la planta pues permite obtener datos e información de la que se carece hasta el momento. Asimismo, la investigación y análisis sobre opciones para la dosificación de cloruro férrico, posibles consecuencias de su uso en los lodos tales como aumento en el volumen generado y posible toxicidad del agua, alternativas para el tratamiento y análisis de opciones para la disposición que sirve como insumo para que el instituto valore e invierta en un sistema de tratamiento para la línea de lodos que resulta necesario para cumplir con la reglamentación del país.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

Los trabajos que servirán como referencia para la elaboración del trabajo y que estudian puntos que serán tomados en cuenta en el presente trabajo se enumeran a continuación:

- Chacón (2018). Este trabajo se basa en la aplicación del cloruro de hierro en el tratamiento del agua residual y su desarrollo fue paralelo con respecto al presente trabajo. Se sugiere un rango de dosificación de entre 40 mg/l y 60 mg/l para evitar la remoción de fósforo a niveles que afecten el proceso biológico. A su vez, el trabajo estudia la relación entre el cloruro férrico y la disminución de la presencia de sulfuro de hidrógeno en las áreas circundantes de la planta, llegando a concluir que para dosis de 80 mg/l el olor sería imperceptible, teóricamente, más allá del perímetro de la planta de tratamiento. La suposición se realizó utilizando el modelo de pluma de gases.

- Soto (2016). La autora realiza una caracterización física, química y microbiológica a los lodos de la Planta de Tratamiento El Roble, las pruebas se hicieron sin adicionar cloruro férrico. Se plantea comparar la información que ella obtuvo en su investigación con respecto a este trabajo, principalmente en la caracterización física.

- Solano (2015). Este trabajo se centra principalmente en la aplicación geotécnica de los lodos residuales obtenidos de aguas residuales ordinarias y en la creación de suelo artificial que resulta de la adición de cemento al lodo deshidratado. Parte de su abordaje se enfoca también en plantear una estructura para completar la deshidratación de los lodos, para evitar su putrefacción y así facilitar su uso como suelo artificial. La autora sugiere aplicaciones de los lodos de acuerdo con sus características como material de relleno o cubierta vegetal.

- Baudrit (2015). El trabajo de graduación sirve como referencia dado que realiza una caracterización física, química y microbiológica de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales ordinarias de un proyecto residencial, aunque la planta es de menor escala a la planta del Roble de Puntarenas, permite conocer acerca de los procedimientos y los resultados obtenidos que son relevantes para este trabajo.

- Rivera (2012) elaboró un prototipo de suelo a partir de un material cementante junto con lodos provenientes de dos plantas de tratamiento, una de las cuales fue la Planta de Tratamiento del Roble de Puntarenas. A partir de lo anterior realizó pruebas de laboratorio para evaluar el desempeño del suelo artificial.

- Redondo (2014). En este trabajo, la autora determina el volumen de lodos generados en la planta potabilizadora de Tres Ríos, realiza una caracterización físicoquímica de los mismos y a partir de lo anterior propuso aplicaciones, de manera tal que su disposición no afectara el río Tiribí.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Caracterizar los lodos producidos en un modelo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de El Roble de Puntarenas con diferentes dosificaciones de cloruro férrico para recomendar opciones de disposición adecuadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los lodos producidos mediante pruebas físicas, químicas y biológicas para determinar sus propiedades.
- Cuantificar los lodos producidos por la planta de tratamiento en las diferentes etapas del proceso e identificar la variación al utilizar coagulante.
- Recomendar tratamientos y aplicaciones para los lodos generados en la planta en función de sus características, de manera que su disposición sea ambientalmente sostenible y cumpla con la reglamentación nacional.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcances

Se detallan a continuación los alcances del proyecto:

- Se estudiarán las características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos residuales generados actualmente en la PTAR del Roble de Puntarenas para su utilización como parámetro comparativo cuando se generen los lodos del modelo de la planta en la cual se ha utilizado cloruro férrico como coagulante.

- A partir del volumen de lodos generados y su calidad se evaluarán diferentes aplicaciones dependiendo de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de estos, con el fin de que las aplicaciones sugeridas estén en cumplimiento de la normativa nacional.

- Las soluciones planteadas se remiten a los lodos obtenidos del modelo físico de la planta de tratamiento, así como para la condición actual, el trabajo no interviene directamente sobre procesos previos del funcionamiento del sistema de tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, contempla recomendaciones sobre la operación de esta.

- No se llevará a cabo ningún análisis económico de las posibles soluciones, pues el trabajo tiene como fin la valoración de opciones desde un punto de vista técnico y no se incluye también lo económico, aunque se menciona acerca de costos asociados con las soluciones.

1.3.2 Limitaciones

Dentro de las limitaciones para la realización de este trabajo se encuentran las siguientes:

Se utilizará una modelación a escala de la PTAR en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y los resultados dependerán del adecuado funcionamiento de este, especialmente para la estimación de la remoción del fósforo en el agua residual y sólidos suspendidos utilizando el cloruro férrico, pues las muestras con las cuales se caracterizan físicamente los lodos de la PTAR son tomadas de la planta y se les adiciona el coagulante en el laboratorio. La razón de esto se debe a que se estima que la producción de lodo en el modelo de la planta no generaría el volumen suficiente para llevar a cabo todas las pruebas necesarias para la caracterización.

Las pruebas de secado en condición natural de los lodos durante un período de 30 días se realizarán en la Ciudad Universitaria Rodrigo Facio y no en las instalaciones de la planta, lo cual influirá en los resultados, pero se considera que estos permitirán observar el comportamiento de los dos tipos de lodo en cuanto a la pérdida de humedad.

Los datos que maneja AyA con respecto al control que efectúa sobre los lodos y la calidad de estos no son significativos, pues carecen de mucha información tal como pruebas de coliformes, huevos de helminto, pruebas de sedimentabilidad y de contenido de sólidos suspendidos.

1.4 Metodología

La metodología por seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1.

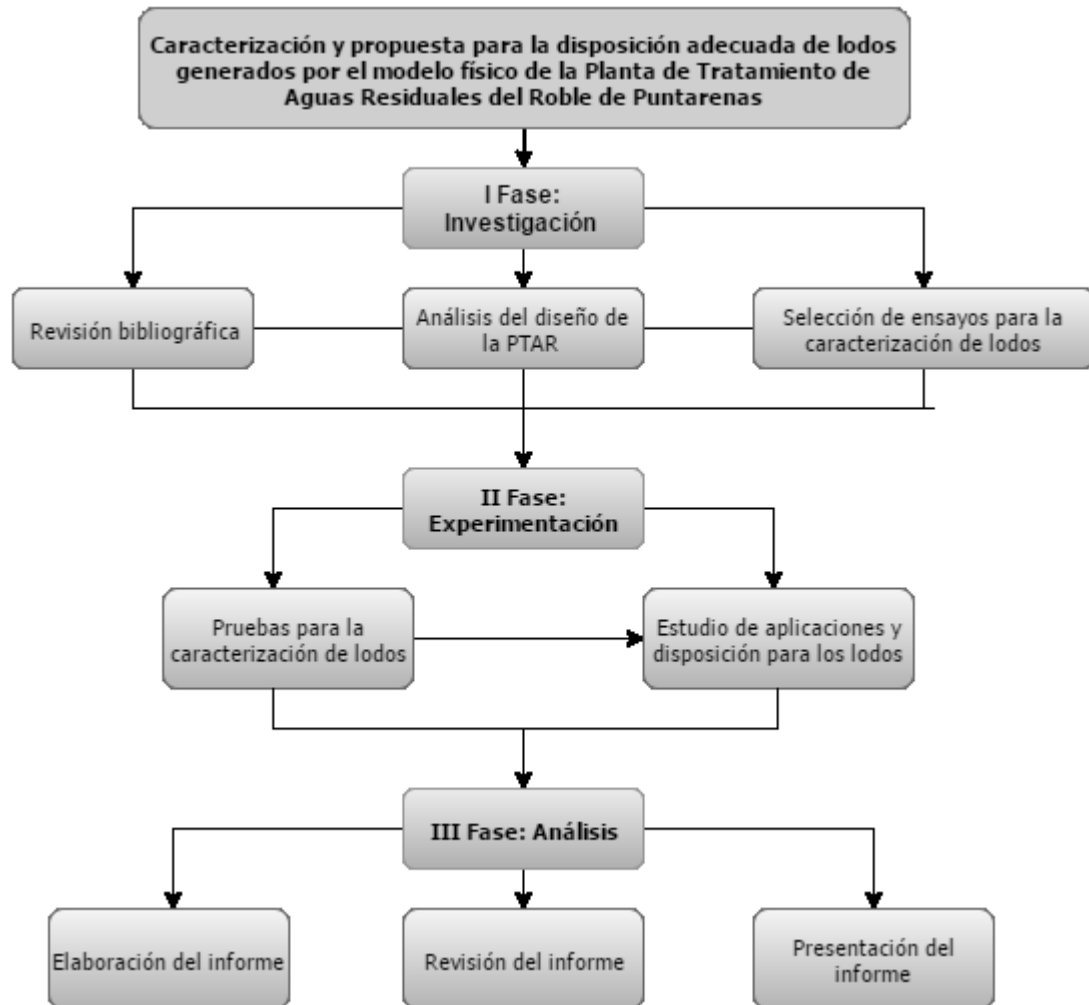


Figura 1. Esquema metodológico del proyecto.

1.4.1 Fase investigativa

La primera etapa del trabajo consiste en la revisión bibliográfica sobre los temas que abarca el estudio. Dentro de esta fase se recolectó información sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento y además se revisó su diseño, así como las mejoras que se le han realizado a la planta para tener un mejor conocimiento sobre los procesos que participan durante el tratamiento de las aguas residuales. Esto es de principal relevancia para el trabajo, dado que conociendo los procesos previos que intervienen es posible determinar ciertas características que se espera presenten los lodos, principalmente para el caso de los lodos secundarios que son dependientes del proceso biológico.

Se realizó una investigación sobre los parámetros de calidad del agua y lodos que aplican según la normativa nacional y posteriormente se plantean las pruebas que se deberán realizar para caracterizar los lodos producidos en la planta de tratamiento.

La investigación sobre casos similares y estudios previos que se hayan realizado sobre la aplicación de cloruro férrico en los lodos, las consecuencias sobre la producción de lodos y la variación en las características forman parte de la investigación que se llevó a cabo, ya sea en el país u otros países que utilicen ampliamente el cloruro de hierro (III). Se consideró como referencia importante para esta investigación, el trabajo realizado por Diousa Soto, el cual caracterizó los lodos de la planta un año antes del período de muestreo que se realizó.

La diferencia entre el trabajo de Soto y esta investigación se basa en el uso del coagulante y en el análisis de tratamientos para el tratamiento, deshidratación y posterior disposición de los lodos aplicando el coagulante o sin este. Este trabajo va ligado al de Chacón (2018), por lo cual los resultados obtenidos en pruebas que se realizaron en ese trabajo son insumo para algunos análisis realizados.

Se evaluó tomar en cuenta datos del AyA pero la información facilitada carece de información sobre los lodos, pues se centra principalmente en la evaluación de la entrada y salida del agua a la planta, a las diferentes unidades y la salida al estero que si bien permiten concluir acerca de la eficiencia del tratamiento sobre la línea del agua no aportan información relevante para el análisis de los lodos, como son pruebas de coliformes, pruebas para caracterización física y pruebas de contaminantes químicos.

1.4.2 Fase experimental

Una vez realizada la fase de investigación se cuenta con los elementos teóricos necesarios para proceder con las pruebas para la caracterización de los lodos. Las muestras de los lodos fueron traídas desde la planta ubicada en El Roble, Puntarenas y se procesaron en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil.

Inicialmente como no se tenía establecida una dosificación o un rango de dosis de cloruro férrico establecido se hicieron pruebas de caracterización física sin utilizarlo en los meses de octubre de 2016 y enero de 2017, posteriormente se decidió trabajar con un rango de 20 mg/l a 60 mg/l de cloruro férrico, el cual se obtuvo por medio de una prueba de Jarras realizado por Chacón. Pese a que la investigación paralela sugiere el uso de dosis entre 40 mg/l y 60 mg/l o incluso más altas, se trabajó con una dosis de 20 mg/l para conocer si una dosis menor generaba resultados similares en los lodos a dosis mayores, lo cual podría generar menores costos para el AyA.

Los lodos que se generaron en el modelo de la planta realizado por Chacón fueron insuficientes para hacer pruebas directamente a estos lodos, por lo que se decidió dosificar el cloruro directamente sobre los lodos de la planta.

Para la caracterización física de los lodos primarios y secundarios con dosis de cloruro férrico o sin la aplicación de este, se utilizaron los siguientes métodos:

- 2540B Sólidos totales a 103°C de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*
- 2540E Sólidos volátiles a 503°C de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*
- 2540F Sólidos sedimentables de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*

En el caso de la medición de pH se utilizó un medidor de la compañía Hach modelo HQ40D.

La dosificación del cloruro de hierro se hizo en la prueba de Jarras, para asemejar las condiciones de dosificación en la entrada de la planta, que es donde Chacón y el AyA valoran la aplicación del coagulante. Para la prueba de Jarras se siguió el siguiente método:

- Mezcla rápida: 1 minuto a aproximadamente 120 rpm.
- Mezcla lenta: 15 minutos a 30 rpm.
- Reposo: 20 minutos para observar la formación del floculo.

En el caso de las pruebas de humedad, se utilizó cápsulas de porcelana de diferente tamaño, siendo las más utilizadas las de 100 ml y las de 350 ml. Las cápsulas se colocaron fuera del laboratorio de tal forma que estuvieran expuestas al sol y condiciones naturales, evitando la contaminación por agente externos que pudieran variar la masa de las cápsulas y con ello generar un sesgo. Las pruebas de curva de humedad para la estación seca sufrieron una contaminación por ceniza entre el día 10 y el día 15 de la prueba, por tanto, los resultados son útiles para el estudio hasta ese dato, para el caso de la prueba de humedad en condiciones naturales en estación lluviosa no se tuvo ninguna contaminación en las muestras.

1.4.3 Fase Analítica

En esta fase se procedió a analizar los resultados de la fase experimental, para los datos obtenidos de la caracterización física se compararon datos con los resultados de Soto (2016). Las pruebas de Soto fueron importantes para el análisis de caracterización química y microbiológica pues no se realizaron en el presente estudio.

Con base en la información de remoción de fósforo y sólidos suspendidos que se generó en el modelo de la planta de Chacón, se procedió a calcular el volumen de lodos generados por la adición del cloruro férrico, el cálculo se realizó utilizando el modelo de Murcott (1994) que se ajusta a las condiciones en las cuales el AyA quiere aplicar el cloruro, en el tratamiento primario y además la autora considera de importancia para la investigación el conocer mejor la relación entre el cloruro de hierro y la remoción de fósforo.

Para el caso del cálculo de los lodos que se generan en los reactores biológicos no se consideró de importancia el cálculo del aumento en el volumen por el uso del coagulante, pues como se mencionó antes, el AyA plantea el uso de este en el tratamiento primario y se estima que los resultados pueden ser extrapolados al caso de los lodos biológicos pues eso sugiere la

literatura. Se asumió que todo el fósforo y fosfatos removidos del agua cruda pasan a los lodos y que estos llegan a contener la totalidad de fósforo una vez que han sido deshidratados.

El volumen de lodos totales que se genera en la condición base de la planta sí se estimó, pues es parte del alcance del proyecto de investigación. Para el caso de los lodos primarios y secundarios obtenidos del reactor de lodos activados convencional se utilizó el método incluido en Andreoli & Von Sperling (2007) el cual es una aproximación utilizando el caudal, población y sólidos totales que aporta cada habitante. En el caso del reactor IFAS como no se encontró literatura con información al respecto se consideró más adecuado utilizar el cálculo incluido en la memoria de cálculo que la empresa encargada de la remodelación utilizó.

Para el tratamiento y disposición de los lodos y del lodo biológico se consideró las sugerencias que autores como Andreoli & Von Sperling (2007) recomiendan para casos de plantas de tratamiento que funcionan con un sistema de tratamiento de lodos activados y que los autores agrupan con lodos activados de filtros aireados y cuyos resultados

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En el contexto en el cual se enmarca el trabajo es necesario definir conceptos que serán utilizados para el desarrollo adecuado del proyecto.

2.1 Lodos activados

El término hace referencia a la tecnología que se encarga de recircular los lodos sedimentados nuevamente al reactor biológico.

En su modalidad convencional, un sistema de lodos activados comprende un clarificador primario, el reactor biológico aeróbico y un clarificador secundario. En sistemas de tratamiento pequeños, suele utilizarse la modalidad de aireación extendida, donde se prologa en forma importante el tiempo de retención hidráulico dentro del reactor biológico y se prescinde del clarificador primario.

2.2 Lodos de desecho

Es la fracción del lodo sedimentado en el clarificador primario o secundario que no es retornado de nuevo hacia el reactor biológico, sino que es sacado del sistema, o desechado para su posterior tratamiento. Estos lodos deben recibir tratamiento y este varía de acuerdo al origen y el tratamiento que reciben las aguas residuales. En el caso de plantas de lodos activados, los lodos que se obtienen no han sido estabilizados, por tanto la probabilidad de putrefacción especialmente en los lodos primarios es alta pues la materia orgánica no ha sido digerida.

2.3 Lodo activado con biopelícula en lecho fijo

Es una tecnología que se utiliza para el tratamiento de aguas residuales, el término proviene del inglés *Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS)*, que es como normalmente se conoce a este sistema. Su variación con respecto al sistema de lecho móvil convencional se encuentra en que este es un híbrido, ya que combina el lecho móvil con lodos activados. Esta tecnología se utiliza principalmente en plantas de tratamiento de aguas residuales que han superado su capacidad.

2.4 Parámetros de caracterización física de lodos

Al ser el lodo residual dependiente del tipo de aguas a tratar ambos comparten características que son necesarias a tomar en cuenta para definir el sistema de tratamiento adecuado por lo cual los métodos de caracterización y muestreo son similares. (Metcalf & Eddy, 2003).

Entre los parámetros que son considerados para la caracterización física de lodos provenientes de aguas residuales se encuentran:

- **Sólidos totales (SST):** en la caracterización de lodos se toma como sólidos totales (ST), a los sólidos suspendidos totales (SST), pues de acuerdo con Andreoli y Von Sperling (2007) se puede asumir que la mayor proporción de sólidos en los lodos residuales son los sólidos suspendidos y que a su vez resultan de importancia pues el contenido de sólidos suspendidos indica la presencia de materia orgánica que si no es adecuadamente estabilizada será la responsable de olores desagradables y presencia de organismos patógenos en los lodos.

- **Sólidos suspendidos volátiles (SSV):** estos indican la presencia de materia orgánica en el agua, al ser volatilizada a una temperatura superior a 500 °C donde el residuo del crisol corresponde a los sólidos inertes o sólidos fijos.

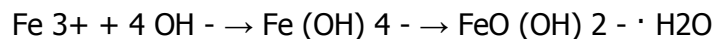
- **Sólidos sedimentables (SS):** corresponde a la cantidad de sólidos que sedimentan en un cono de Imhoff transcurrido un período de tiempo que puede ser de 30 minutos o una hora. La medición se realiza en ml/ml en términos de volumen.

- **Potencial de hidrógeno (pH):** mide la concentración de iones de hidrógeno en una disolución, indicando con esto la basicidad o acidez de la disolución. (Von Sperling, 2007).

2.5 Coagulación química

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantiene separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. La coagulación es un método eficaz para la remoción de contaminantes y partículas no deseadas en el agua, sin embargo, debe elegirse un coagulante y una dosificación que garanticen una optimización del proceso (Carrasco, 2007). En este caso, se estudia la utilización del cloruro de hierro III o cloruro férrico como coagulante.

- **Cloruro de Hierro (III):** se utiliza en tratamiento de aguas residuales y producción de agua potable. El FeCl_3 en solución acuosa ligeramente básico reacciona con el hidróxido de iones de la mezcla para formar un flóculo de hidróxido de hierro (III), o más precisamente formulado como $\text{FeO}(\text{OH})$, que puede eliminar los materiales suspendidos. La reacción química que se produce es la siguiente:



La coloración de la disolución es un marrón característico de los compuestos del hierro que posee un poder corrosivo alto. Por tanto, resulta de interés conocer la calidad de los lodos residuales que se obtienen luego de la adición del coagulante.

2.5.1 Consecuencias del uso del cloruro de hierro (III) en agua y seres vivos

La afectación que sufren los ecosistemas y algunos seres vivos debido a la presencia del coagulante metálico ha sido estudiado por algunos autores a nivel mundial, tales como Sotero, Rocha y Povinelli (2007) que estudiaron las consecuencias sobre tres especies de seres vivos que son una cladóceras, una daphnia similis, ambas son especies de crustáceos y un pez tetra serpae, que habita en las cuencas de los ríos Amazonas, Guaporé y Paraná.

El principal descubrimiento es que no se encontró evidencia significativa de que el cloruro de hierro afectara a las especies estudiadas directamente, con excepción de la daphnia que presentó problemas de fertilidad, se observó un endurecimiento aguas abajo del punto de descarga y se indica que es necesario la utilización de una muestra más grande para mejorar la confiabilidad de los resultados pues se tiene evidencia de que el cloruro sí afecta

negativamente a las especies pero esto supone situaciones que deben ser revisadas, tales como la remoción de turbidez en el agua y la presencia de sedimentos.

En otra investigación consultada (Harland, Wood, et al, 2013) se menciona que las cianobacterias o algas azules pueden sufrir problemas en su crecimiento ya sea en cuanto al aumento o disminución de la población, pues se menciona que existen estudios con resultados contrarios, pero se determina que el ambiente en el cual se desarrollan las cianobacterias se ve afectado por estresantes presentes en el agua, se detalla que el hierro y el cobre son estresantes que pueden aumentar o disminuir el crecimiento de ciertas algas lo que genera que estas puedan producir toxinas o neurotoxinas (cianotoxinas) que al ser consumidas por seres vivos puede ocasionar la muerte o daños a nivel orgánico.

2.6 Modelo de Murcott

Entre los modelos que han sido obtenidos por medio de la investigación en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales alrededor del mundo se encuentra este modelo el cual serán considerado en el trabajo pues considera dentro del cálculo la remoción del fósforo del agua. Fue desarrollado en una investigación llevada a cabo por Susan Murcott y Donald Harleman del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, 1994).

En la investigación desarrollada se aporta la ecuación

$$ST [kg/día] = SST_{rem}[kg/día] + F \cdot P_{rem} [kg/día] + K \cdot Q[m^3/día] \cdot D[kg/m^3]$$

Los detalles de las variables se explicarán posteriormente cuando se utilice la ecuación en la sección de resultados.

El aporte que ellos realizaron se clasifica dentro de los que se conoce como Sedimentación Química Mejorada o *Chemically Enhanced (Primary) Sedimentation*. Esto consiste en el uso de compuestos químicos, generalmente con presencia de aluminio o hierro que mejoran el rendimiento de las plantas de tratamiento con problemas de rendimiento y dificultades para expandirse. Los autores clasificaron dosis por debajo de 50 mg/l como tratamiento químico de dosis baja y dosis por encima de este valor como dosis altas. La función principal del coagulante se asocia con la remoción de sólidos totales y de DBO.

2.6 Aplicaciones de lodos residuales en obras de geotecnia

Por medio de diferentes estudios se han encontrado aplicaciones para los lodos residuales en distintos campos que van desde la agricultura a la geotecnia.

En la agricultura las aplicaciones se dirigen principalmente en el mejoramiento de los suelos por medio de la elaboración de compost, aprovechando los nutrientes que se obtienen del proceso de tratamiento de las aguas residuales. Cuando el lodo se desea utilizar como mejorador de suelo, debe cumplir parámetros nacionales referentes a presencia de patógenos, parásitos y metales pesados.

En el campo de la geotecnia y tal como los describió Solano (2015), los lodos con edades de secado que presenten una humedad menor al 9% pueden ser utilizados como mejoradores de suelo al mezclarse con cemento. Sin embargo, este suelo artificial, como se denomina, debe utilizarse únicamente para relleno en zonas donde no se requiere capacidad soportante. Según los estudios de Solano, mediante las pruebas mecánicas se puede clasificar el suelo artificial obtenido de los lodos residuales como de tipo blando.

2.7 El hierro en los suelos

Con el uso de coagulantes químicos de hierro o aluminio se pueden producir compuestos como fosfatos insolubles cuyo uso en la agricultura puede ser contraproducente pues las plantas no lo absorben o pueden interferir dentro del crecimiento y producción de los cultivos. En cuanto a los fosfatos que sí pueden ser útiles para la agricultura se encuentra la estruvita (Mg , NH_4 , PO_4) la cual se forma dependiendo del pH del lodo (entre 8 y 10), concentración de nitrógeno, fósforo y magnesio, además de la adición de CO_2 .

Con respecto a la formación de este cristal debe ponerse especial atención pues los cristales que se forman pueden dañar el equipo de deshidratación, así como tuberías por incrustaciones (Figura 30), sin embargo, el uso dentro de la agricultura es beneficioso. Entre las ventajas se encuentran: aportar magnesio, fósforo y nitrógeno al suelo. La estruvita es de disolución lenta lo que puede permitir un abonado por largos periodos, así como evitar la contaminación de mantos acuíferos y cuerpos de agua superficiales cercanos.



Figura 2. Incrustaciones de estruvita en tuberías

Fuente: Envirotec Magazine, 2016

Según Kass, la presencia de hierro tanto en su forma férrica (Fe^{3+}) como ferrosa (Fe^{2+}) en los suelos del país con pH normal (5,5 – 6,5) es baja. La presencia del hierro en su forma férrica es la que facilita el crecimiento y desarrollo de las plantas, principalmente. El uso del cloruro de hierro como se sabe provoca la remoción del fósforo de las aguas residuales, por lo cual este precipita en forma de fósforo y otros compuestos en los lodos. El fósforo es un elemento importante para la nutrición vegetal, sin embargo, en condiciones acuosas en el suelo una alta presencia de fósforo puede llegar a formar compuestos de fosfato de hierro altamente insolubles que evitan la nutrición adecuada de la planta y podría provocar clorosis, entre otras deficiencias.

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA

3.1 Caracterización física

3.1.1 Ubicación de Planta de Tratamiento

La planta de tratamiento operada por AyA se ubica en la provincia de Puntarenas, cantón Puntarenas, distrito de El Roble. Se encuentra en operación desde el año 1997 y recibió una mejora en el diseño en el año 2012 por medio de una licitación pública que concluyó la remodelación en 2014. En la figura 3 se muestra la ubicación de la planta.

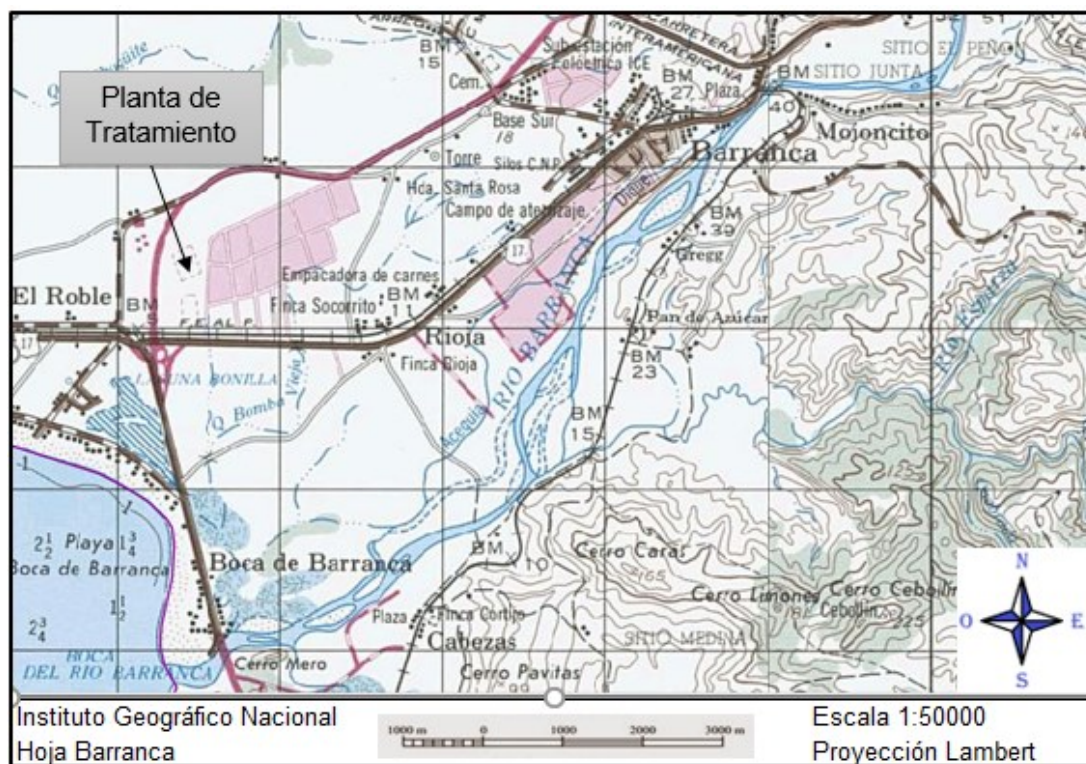


Figura 3. Ubicación de PTAR El Roble

3.1.2 Sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento que se utiliza en la PTAR El Roble consiste en un sistema aerobio de Lodos Activados con Biopelícula en lecho fijo (IFAS). La figura 3 muestra a nivel general, el esquema de tratamiento que se emplea para la depuración de agua y el manejo de lodos que se realiza.

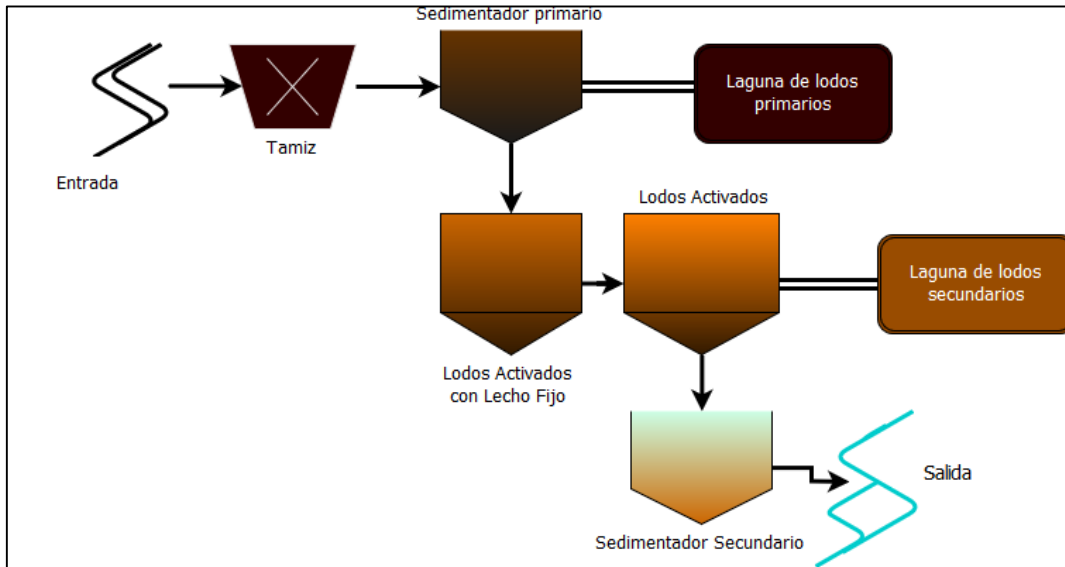


Figura 4. Diagrama de proceso de tratamiento de aguas en El Roble

Las aguas residuales son bombeadas desde poblados cercanos a la planta e ingresan para recibir el tratamiento primario, que consta de un tamiz rotatorio de tornillo automatizado ROTAMAT de la marca alemana Huber Technology, el cual puede procesar hasta 150 l/s, posterior a esto, las aguas residuales pasan al sedimentador primario, el cual cuenta con un tiempo de retención hidráulica de 2,34 horas.

Los lodos de purga que se obtienen son bombeados hasta una laguna de secado que se ubica dentro de la planta (figura 5), sin recibir ningún tratamiento previo. Según los operadores, la purga se realiza una vez al día a diferentes horas según el criterio del operador que se encuentre encargado del turno.



Figura 5. Laguna de lodos primarios

Posterior al tratamiento primario, el agua es enviada a los tanques que contienen los dispositivos IFAS, que se emplean para aumentar el área superficial del tanque, favoreciendo con esto el proceso de nitrificación-desnitrificación y la remoción de DBO. De acuerdo con el diseño, se emplea un 30% del volumen total de los tanques para determinar la cantidad de IFAS requerida dentro de los mismos. Según la empresa, la principal diferencia entre el uso de IFAS con respecto a la tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) se debe a que IFAS produce menos lodo y el flóculo producido es de mejor calidad, lo cual favorece la sedimentación. La principal desventaja de este sistema es el alto requerimiento de aireación en comparación con los Lodos Activados Convencionales (LAC) pero tiene la ventaja de que no requiere la recirculación del lodo, que para LAC es usualmente del 50% del caudal y es lo que se aplica dentro del diseño de PTAR El Roble. (Solamsa, 2014)

Una vez que el agua recibió el tratamiento biológico, pasa a los sedimentadores secundarios y de ahí el agua es llevada por medio de un sistema de bombeo al punto de descarga situado a 6,5 km de la PTAR en el estero de Puntarenas.

Los lodos secundarios de desecho de la planta son bombeados a la laguna destinada para almacenarlos, que se encuentra junto a la laguna de lodos primarios. Se tiene que estas lagunas fueron concebidas para que funcionaran como lagunas de secado cuando la planta no tenía el caudal que procesa ahora y no contaba con la mejora de IFAS. Cuando la planta fue remodelada, el proceso que se venía realizando de almacenar el lodo durante un año en una laguna y dejar secar los lodos durante otro año y alternar entre ambas se tuvo que cambiar, pues el volumen generado diariamente por el proceso biológico sumado a un aumento en el caudal al pasar de 60 l/s en promedio en 2008 a 80 l/s en promedio en 2016, no permitía seguir con este proceso.

Posterior al almacenamiento de los lodos en las lagunas no se realiza ningún otro proceso para verificar la calidad o para tratarlos disminuyendo el contenido de microorganismos patógenos y la putrefacción que genera malos olores. Cuando los lodos se retiran de las lagunas no cuentan con tratamiento adicional, lo cual incumple con la normativa vigente en el país, además de representar un riesgo para la salud de los trabajadores y de personas que entren en contacto con los lodos no tratados, especialmente los lodos primarios.

3.1.3 Condiciones climáticas del sitio

El Roble de Puntarenas presenta un clima tropical seco, con una precipitación máxima ubicada entre 300 mm y 400 mm, que se presenta en los meses de setiembre y octubre, la temperatura promedio oscila entre 26 °C y 28 °C (figura 7).

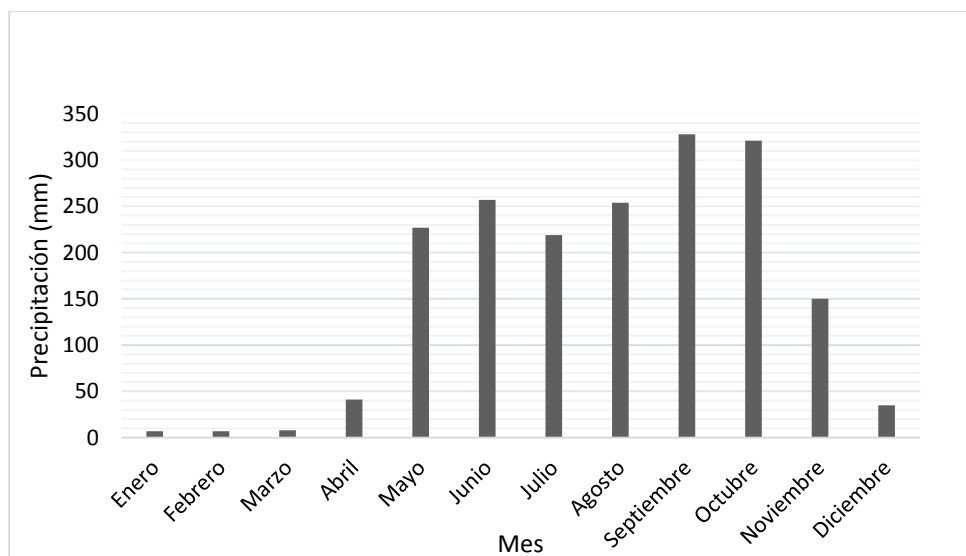


Figura 6. Precipitación en El Roble, Puntarenas

Fuente: Climate Data, s.f

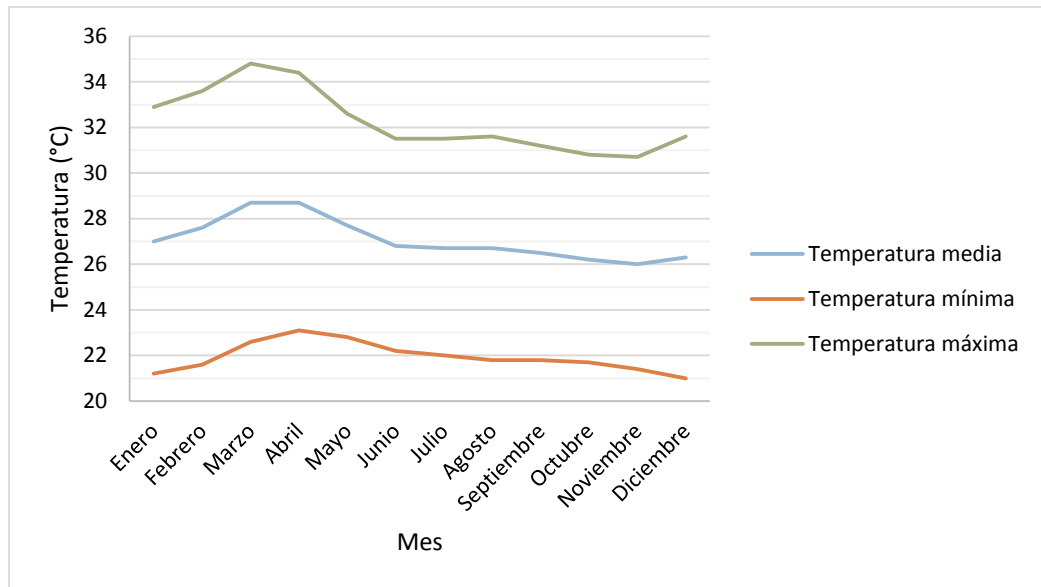


Figura 7. Temperatura en El Roble, Puntarenas
Fuente: Climate Data, s.f

Estas condiciones climáticas son más favorables para la aplicación de tratamiento tales como lagunas de secado pues las temperaturas altas facilitan la pérdida de humedad en los lodos, así como tener una precipitación inferior a la que se tiene en el sitio donde se realizaron las pruebas de deshidratación de lodos en condiciones naturales.

3.1.4 Sólidos totales

Para el caso de los sólidos totales no se consideró de importancia la adición del coagulante para efectos de los resultados de las pruebas, pues los efectos del coagulante se relacionan con la sedimentabilidad y la remoción del fósforo principalmente. Sí se realizaron pruebas utilizando cloruro, pero los resultados no variaron significativamente con respecto a no utilizar el coagulante.

Cuadro 1. Resumen de resultados para sólidos totales

Fecha	Lodos primarios (mg/l)	Lodos secundarios (mg/l)
25/10/2016	1300	970
24/01/2017	9800	6490
16/02/2017	4350	5620
17/03/2017	18730	6960
03/05/2017	6120	5420
Promedio	8060	5092

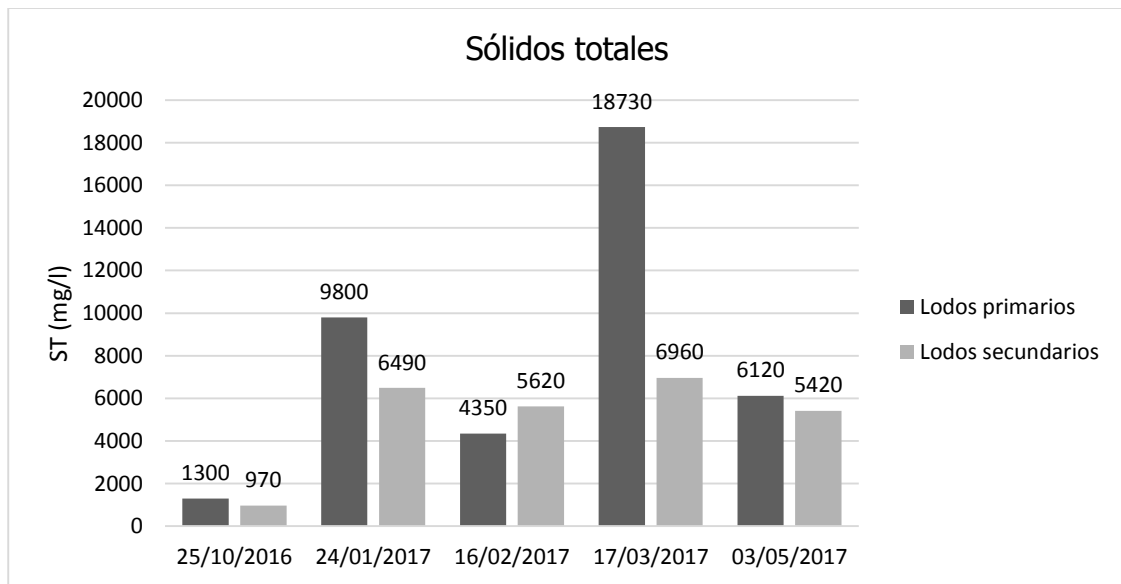


Figura 8. Comparación de sólidos totales en lodos

Se aprecia un resultado fuera del rango de manera significativa para el mes de marzo en los lodos primarios con respecto a los otros meses muestreados.

3.1.5 Sólidos sedimentables

Se colocan los resultados de las pruebas sin utilizar distintas dosis de cloruro férrico.

Cuadro 2. Resumen de resultados de lodos sedimentables

Fecha	Lodos primarios (ml/l)	Lodos secundarios (ml/l)
25/10/2016	29	91
24/01/2017	860	600
16/02/2017	220	1000
17/03/2017	1000	1000
03/05/2017	1000	940
Promedio	622	726

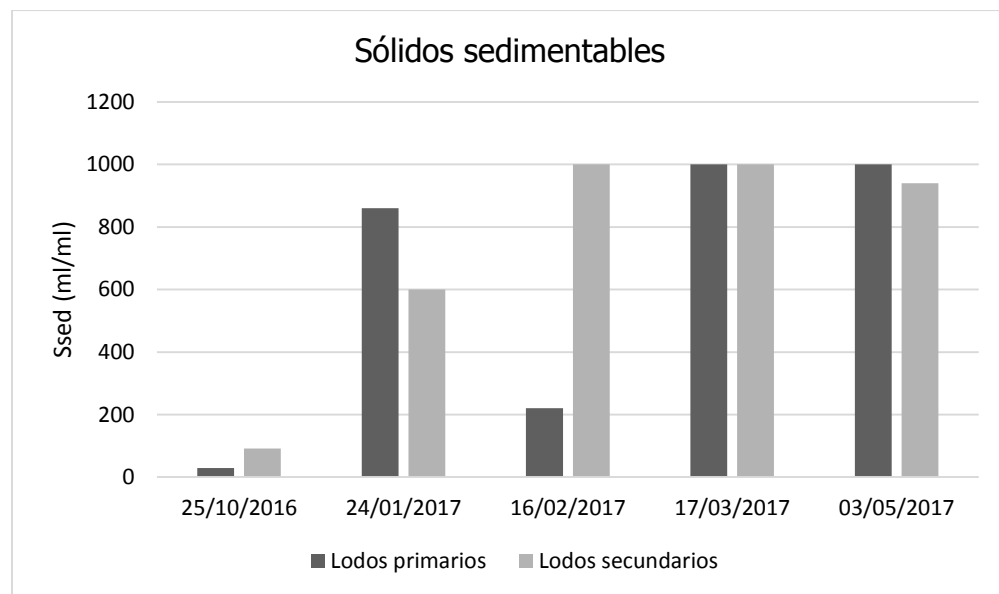


Figura 9. Sólidos sedimentables

Como parte de las características observadas en los lodos durante los muestreos en cuanto a su sedimentabilidad sin la aplicación del coagulante, se observó que las muestras del 25 de octubre de 2016 presentaron una buena sedimentabilidad, no se tuvo gran presencia de sólidos, lo cual puede verse en el Cuadro 2. En la figura 10 se nota presencia de sólidos

suspendidos en los lodos primarios, para el caso de los lodos secundarios el comportamiento fue muy similar y ambos presentaron una coloración café claro.



Figura 10. Prueba de sedimentabilidad en octubre

En el muestreo efectuado el 24 de enero de 2017, los lodos presentaron una coloración café oscuro en el caso de los lodos primarios y café claro en los lodos secundarios. Se observó la presencia de burbujas en los lodos secundarios, con una consistencia similar a un coloide. Cuando se efectuaron las pruebas de sedimentabilidad, los lodos primarios sedimentaron 920 ml/l en 30 minutos y 860 ml/ml al finalizar la prueba, en el caso de los lodos secundarios la sedimentación en 30 minutos fue de 900 ml/l, al completar la prueba el resultado fue 600 ml/l. En este caso no hubo dosificación de cloruro férrico.

A partir de las pruebas del 16 de febrero de 2017, se comenzó a utilizar el coagulante a modo de prueba para observar el comportamiento de los lodos previo al establecimiento del rango adecuado para la dosificación. Se utilizó una dosificación de 100 mg/l de cloruro férrico aplicado a los lodos. En cuanto a las características del lodo se observó más densidad, la coloración fue considerablemente más oscura en comparación con los muestreos anteriores y

se percibió un olor distinto en los lodos secundarios al acostumbrado en la planta, muy similar al que expele el alimento enlatado para animales domésticos, se observaron burbujas pequeñas y los lodos eran más espesos. La figura 11 muestra la prueba con los lodos sin coagulante y luego con la aplicación de coagulante a la muestra.



Figura 11. Prueba de sedimentabilidad para febrero sin dosis/con dosis

A partir de las muestras del 17 de marzo de 2017 se estableció un rango de dosificación de 20 mg/l y 60 mg/l, que es consecuente con los requisitos de operación de la planta, pues una dosificación más alta de coagulante en la entrada de esta puede provocar una pérdida de fósforo en el agua residual que impediría una relación adecuada de F/M en el sistema de lodos activados. Para el caso de los lodos secundarios se manejó la misma dosificación por cuestiones de facilidad operativa en la planta, al utilizar en todo el proceso la misma dosis y para efectos de comparación entre los lodos.

Los lodos primarios y secundarios en este muestreo presentaron una apariencia oscura, fueron considerablemente más espesos en comparación con los lodos muestreados en fechas previas; en el caso de los lodos primarios estos presentaban una división de fases: lodo, agua y lodo. Las muestras recolectadas el 3 de mayo de 2017 compartían las mismas características anteriores, sin embargo, la diferencia en la separación de fases de los lodos primarios fue más notoria con respecto al muestreo de marzo.

En la figura 12, se muestra la condición de los lodos primarios y secundarios en la prueba sin la adición del coagulante y con una dosis de 60 mg/l. Se aprecia la división de fases en los lodos primarios. Los cuales fueron los únicos en presentar dicha separación para las muestras de marzo y mayo, así como la clarificación en el sobrenadante.

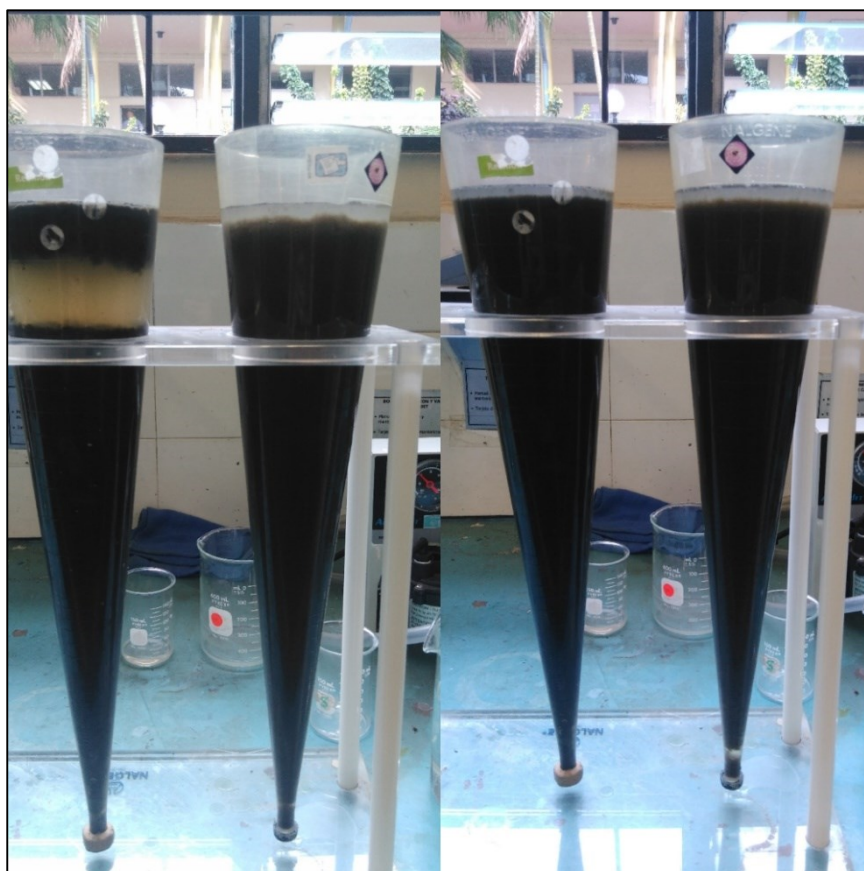


Figura 12. Prueba de coagulante en mayo con dosis de 60 mg/l

El Cuadro 3 muestra los resultados para los meses de marzo y mayo de las pruebas de cono de Imhoff con diferentes dosificaciones de cloruro de hierro. Es importante mencionar que en los lodos secundarios de mayo también se presentó división de fases, pero se presentó en menor grado en comparación con los lodos primarios.

Cuadro 3. Resumen de resultados de prueba de sedimentabilidad

Fecha	17/03/2017		03/05/2017	
Tipo de lodo	Dosis (mg/l)	Sedimentabilidad (ml/l)	Dosis (mg/l)	Sedimentabilidad (ml/l)
Lodo primario	0	1000	0	1000
	20	1000	20	1000
	40	970	40	1000
	60	NA	60	950
Lodo secundario	0	1000	0	1000
	20	1000	20	1000*
	40	920	40	990
	60	NA	60	910

NA: no aplicado.

Para el caso del registro del lodo secundario del 3 de mayo se resalta debido a que presentó una segmentación al finalizar la prueba de 600 ml/ml de sobrenadante, 300 ml/ml de agua clarificada y 100 ml/ml de lodo más espeso al fondo del cono.

Los lodos al añadirse la dosis del cloruro férrico presentaron un oscurecimiento en su color y un cambio en el olor. La capa de sobrenadante o nata que presentaron los lodos primarios y que se observa en las figuras 11 y 12 corresponde a una textura fibrosa, bastante espesa, liviana y con la misma tonalidad de los lodos precipitados.

A modo de prueba extra se utilizó una dosis de 100 mg/l en los lodos de marzo, con una agitación rápida de un minuto y agitación lenta de tres minutos. La figura 13 muestra el resultado que se obtuvo.

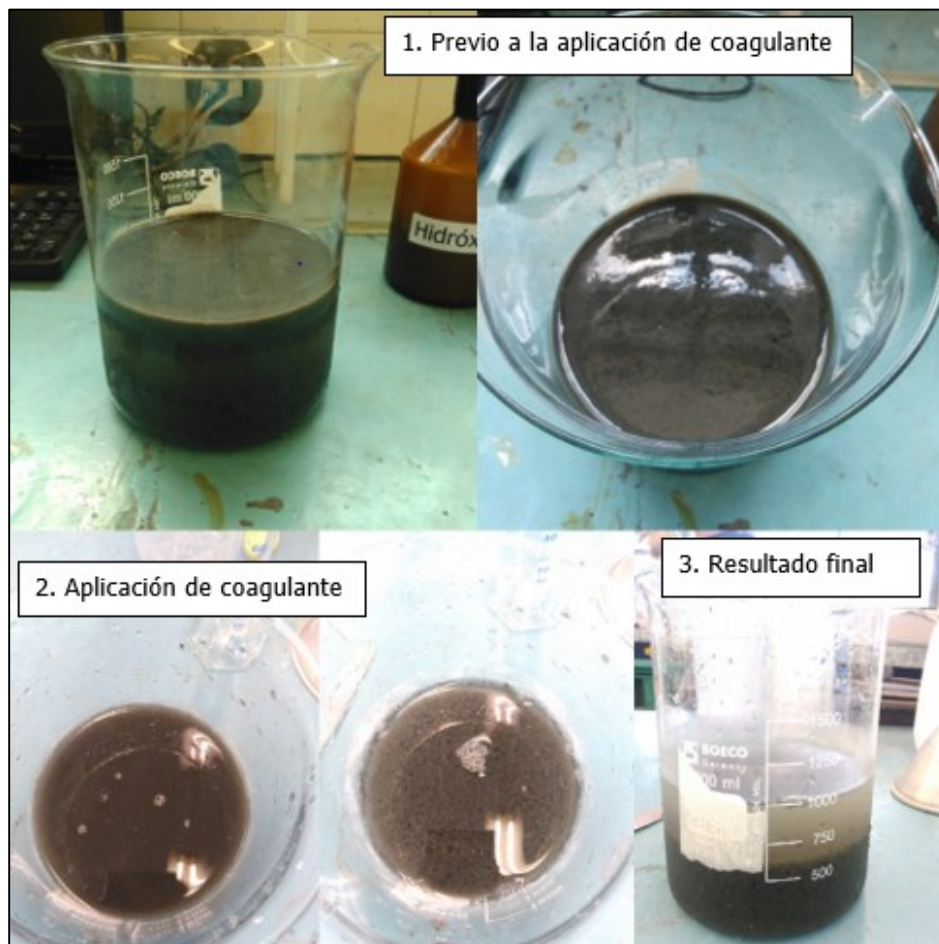


Figura 13. Prueba a lodo primario de 17/03/2017 con 100 mg/l

3.1.6 Sólidos suspendidos volátiles

La parte orgánica de los lodos indica que el promedio para el período estudiado en los lodos primarios fue de 4956 mg/l y en los lodos secundarios fue de 3836 mg/l, considerando el valor inusual en los lodos del mes de marzo y la alteración en la media, si se elimina se

obtiene un promedio de 3102 mg/l para los lodos primarios y 3535 mg/l para los lodos secundarios.

Cuadro 4. Resumen de resultados de sólidos suspendidos volátiles

Fecha	Lodos primarios (mg/l)	Lodos secundarios (mg/l)
25/10/2016	1060	850
24/01/2017	7440	5770
16/02/2017	3710	3980
17/03/2017	12370	5040
03/05/2017	200	3540
Promedio	4956	3836

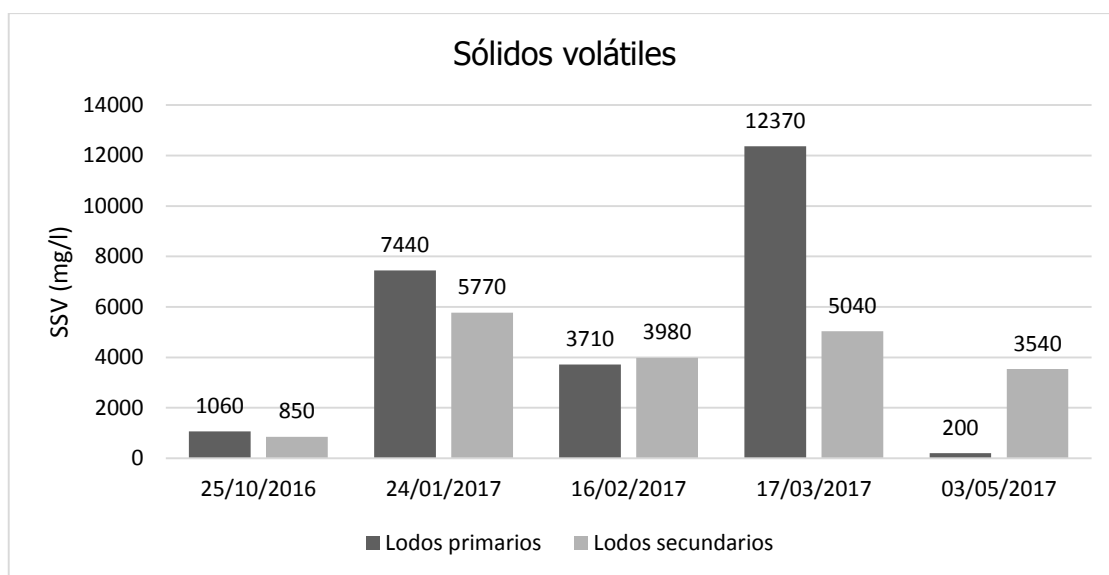


Figura 14. Sólidos suspendidos volátiles en lodos

Se observa un comportamiento atípico nuevamente en los lodos de marzo, así como en los lodos de mayo, pues en los lodos primarios de mayo la fracción orgánica es muy baja en comparación con el resto de meses y con lo que se esperaría en la planta.

3.1.7 Relación SV/ST

Cuadro 5. Relación de sólidos volátiles y sólidos totales

Fecha	Lodos primarios	Lodos secundarios
25/10/2016	0,82	0,88
24/01/2017	0,76	0,89
16/02/2017	0,85	0,71
17/03/2017	0,66	0,72
03/05/2017	0,03	0,65
Promedio	0,62	0,77

Esta relación indica el grado de digestión de materia orgánica en los lodos, por lo que resulta importante conocer si la planta opera o no

3.1.8 pH

Los resultados de las mediciones de pH se muestran en el Cuadro 6. La medición de pH para las muestras tomadas el 24 de enero de 2017 no se pudo realizar, sin embargo, se observa un comportamiento muy similar en los valores de pH, los cuales se encuentran dentro del rango esperado para lodos provenientes de una planta de lodos activados.

Cuadro 6. Resultados de pH para lodos

Fecha	Lodo primario	Lodo secundario
16/02/2017	6,80	6,98
17/03/2017	6,67	6,84
03/05/2017	6,44	6,80
Promedio	6,64	6,87

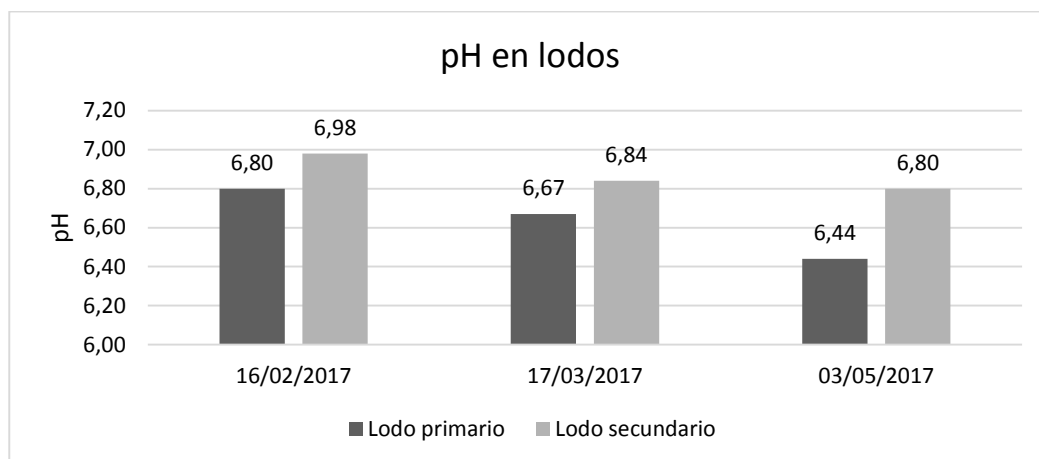


Figura 15. Comparación de pH en lodos

Cuadro 7. Medición de pH en muestras con coagulante de 3/05/2017

Muestra	pH			
	Sin dosis	20 mg/l	40 mg/l	60 mg/l
Lodos primarios	6,44	6,40	6,71	6,17
Lodos secundarios	6,80	6,60	6,99	6,41

3.1.9 Porcentaje de humedad

Se realizó una prueba de determinación de humedad para 24 horas, el promedio de humedad entre los lodos primarios y lodos secundarios del Cuadro 8 muestra la similitud en el comportamiento de los diferentes lodos y que se ha venido comentando.

Cuadro 8. Resumen de humedades en lodos

Lodo Primario		Lodo Secundario	
Muestra	% de humedad	Muestra	% de humedad
25/10/2016	99,78	25/10/2016	99,74
24/01/2017	99,10	24/01/2017	99,62
16/02/2017	99,56	16/02/2017	99,43
17/03/2017	98,13	17/03/2017	99,30
03/05/2017	99,38	03/05/2017	99,46
Promedio	99,19	Promedio	99,51

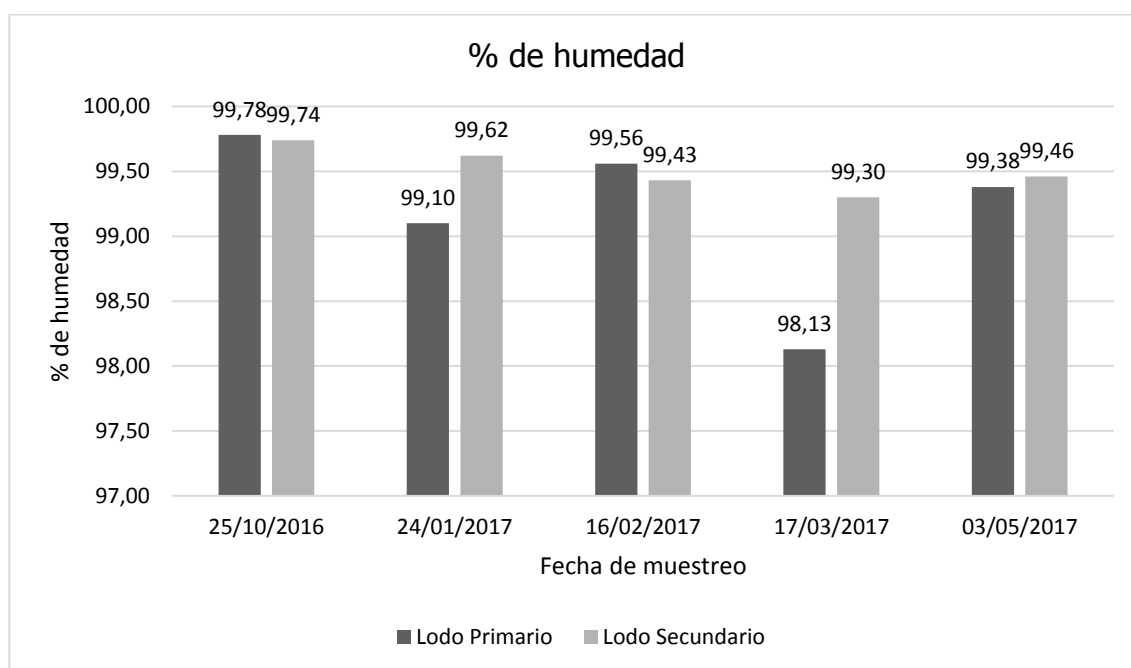


Figura 16. Comparación de humedades en lodos

3.1.10 Curvas de humedad

Las curvas de humedad se obtuvieron para el período de estación seca y estación lluviosa. En el caso de la obtención de las curvas de humedad en la estación seca, durante la prueba se presentó una interferencia a partir del séptimo día para el caso de los lodos sin dosis y en la cápsula con muestra de 200 ml, debido a la caída de ceniza proveniente del Volcán

Turrialba a finales del mes de marzo e inicios de abril de 2017, por lo tanto, los datos posteriores no son válidos para efectos del análisis. La figura 17 muestra la pérdida de agua que tuvieron los lodos al día cuatro de la prueba.

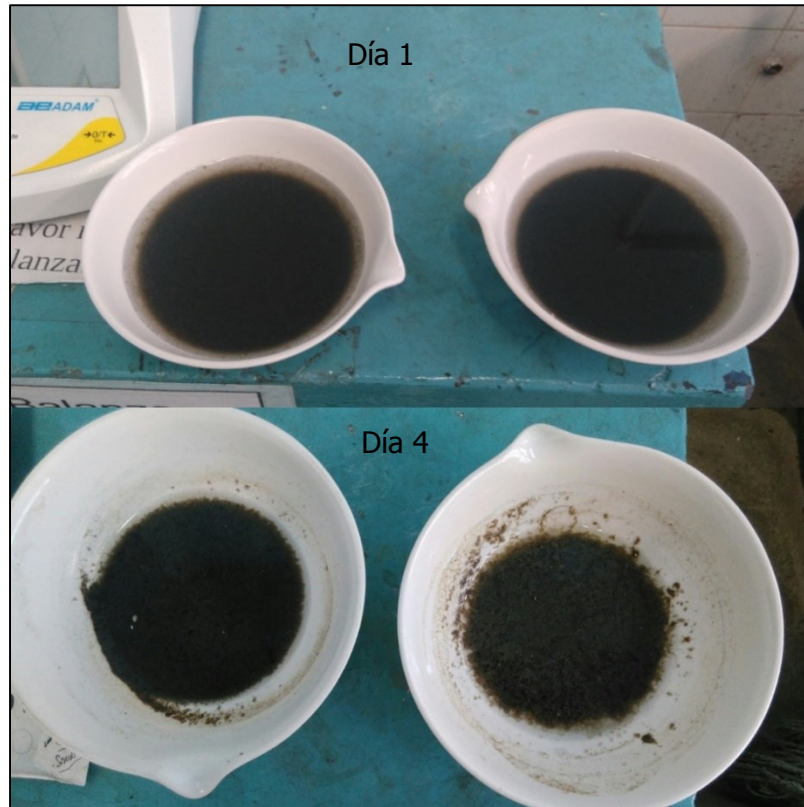
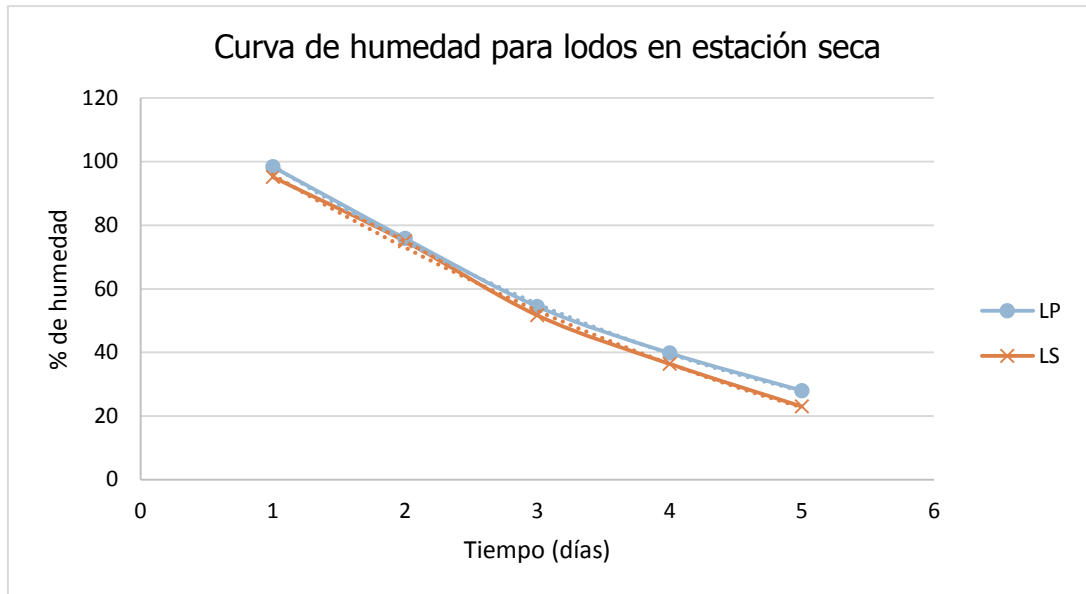


Figura 17. Muestras de prueba de humedad en verano

Para las curvas de humedad en época seca, se tomaron los datos de los cinco días iniciales por la razón expuesta previamente. El trazar una curva no resultaría útil en este caso, pues como se observa en las pruebas siguientes entre el día 1 y el 5 los lodos siguen una misma pendiente en cuanto a la velocidad de deshidratación que luego varía y es más pronunciada luego de que los lodos pierden entre un 40% y 60% de humedad.

Figura 18.
Curva de



humedad para lodos en estación seca

Al realizar la misma prueba con los lodos obtenidos en la estación lluviosa, no se presentó contaminación de las muestras y se midieron las humedades para todo el mes.

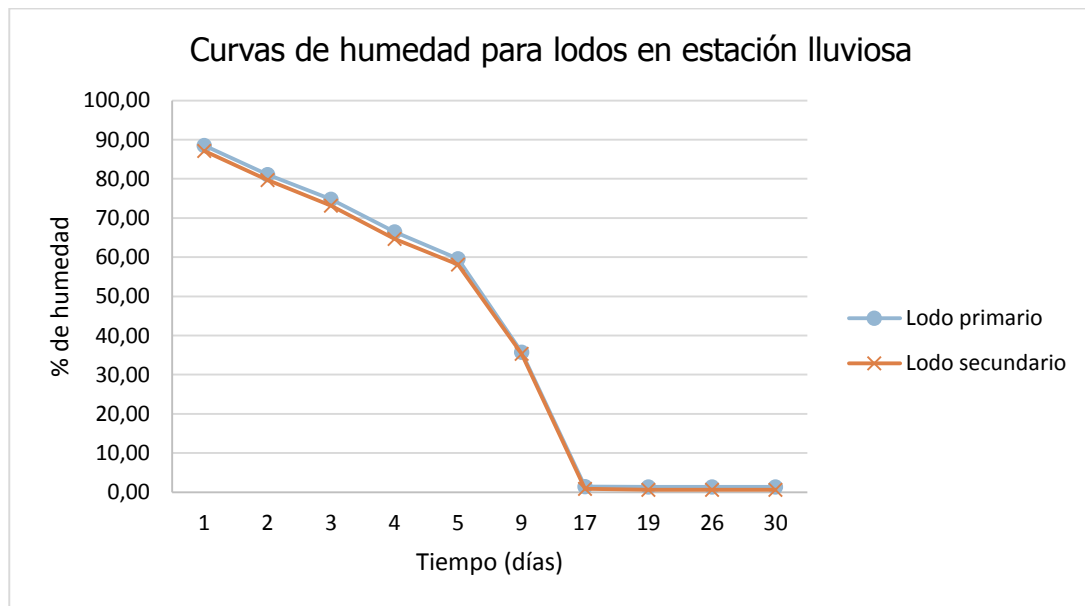


Figura 19. Curvas de humedad para lodos en estación lluviosa

Para el caso de las muestras con el coagulante y la comparación con respecto a la línea base, se realizaron pruebas para la estación seca y lluviosa. Tal como sucedió con las muestras sin coagulante a finales de marzo e inicios de abril, las pruebas se contaminaron con la ceniza posterior al día 15 de la prueba.

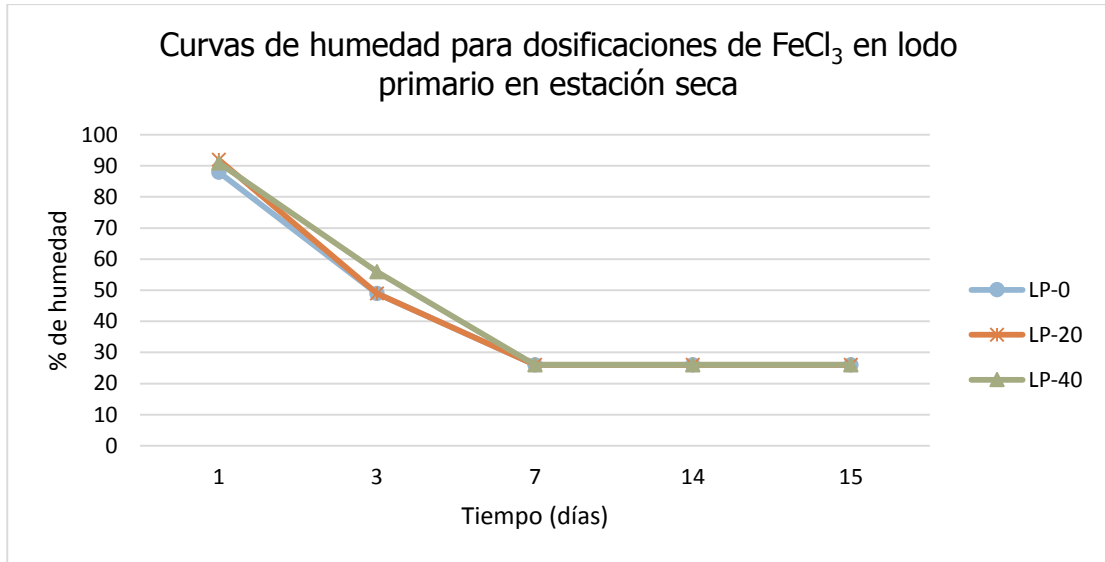


Figura 20. Curvas de humedad para dosificaciones de cloruro en lodo primario en estación seca.

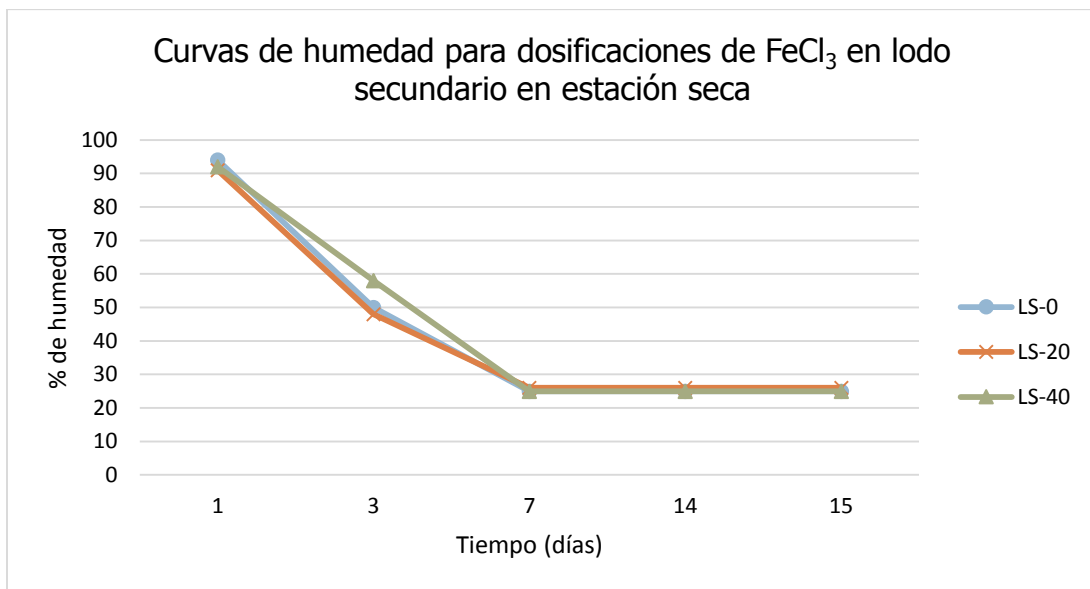


Figura 21. Curvas de humedad para dosificaciones de cloruro en lodo secundario en estación seca

En la estación lluviosa, se hicieron pruebas a las muestras de mayo con diferentes dosificaciones de coagulante para cuantificar la variación de la humedad en condiciones naturales para un período de 30 días. Las dosificaciones empleadas fueron de 0 mg/l, 20 mg/l, 40 mg/l y 60 mg/l. En la figura 22 se aprecia a la izquierda el segundo día de la prueba, se consideró más adecuado incluir la de este día pues se aprecia mejor la clarificación debido a la diferencia que hay en el sobrenadante para las muestras; a la derecha se observa el último día de la prueba.

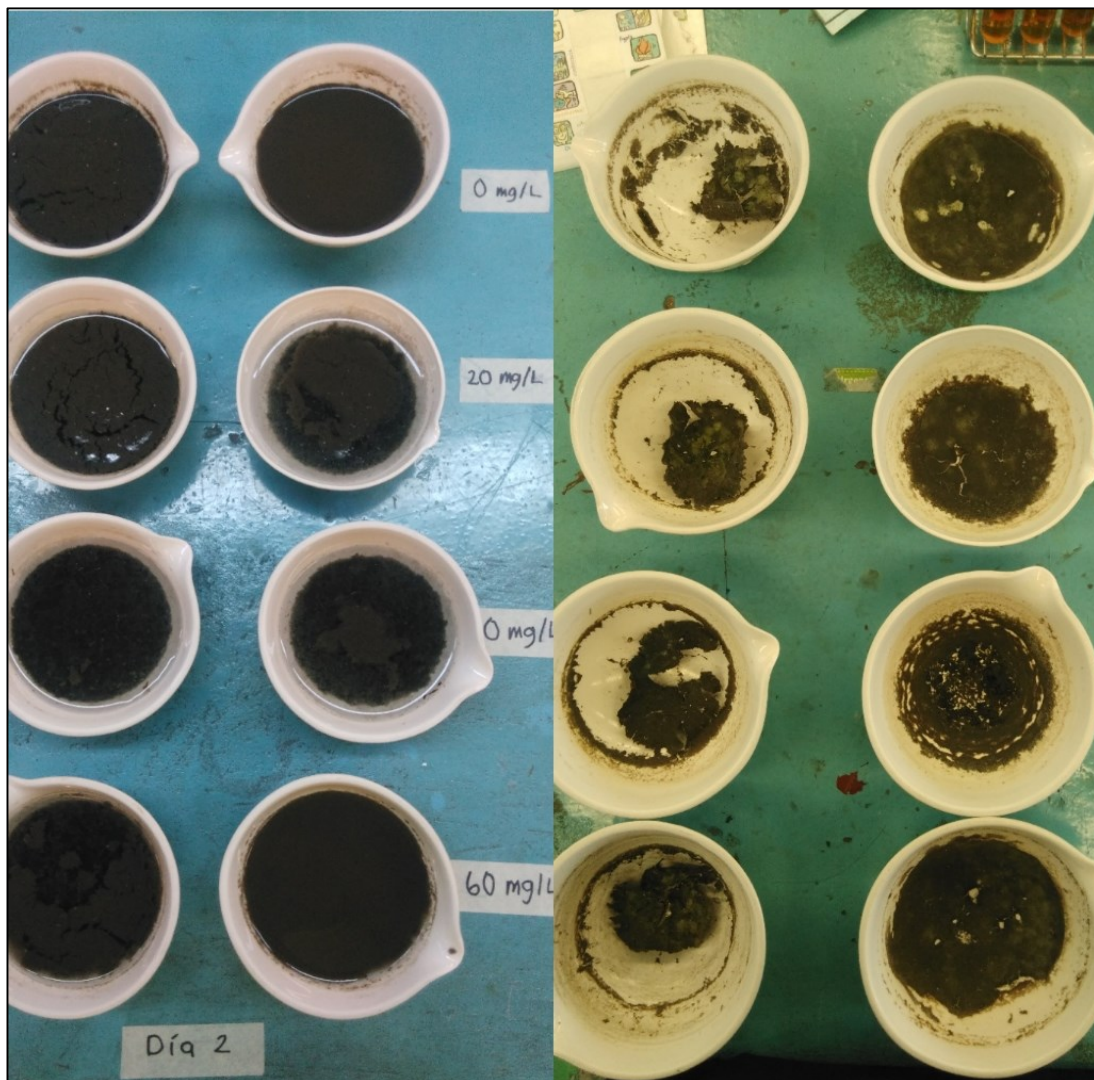


Figura 22. Prueba de humedad para diferentes dosificaciones en invierno

Las variaciones para los lodos primarios y lodos secundarios se muestran en las figuras 23 y 24.

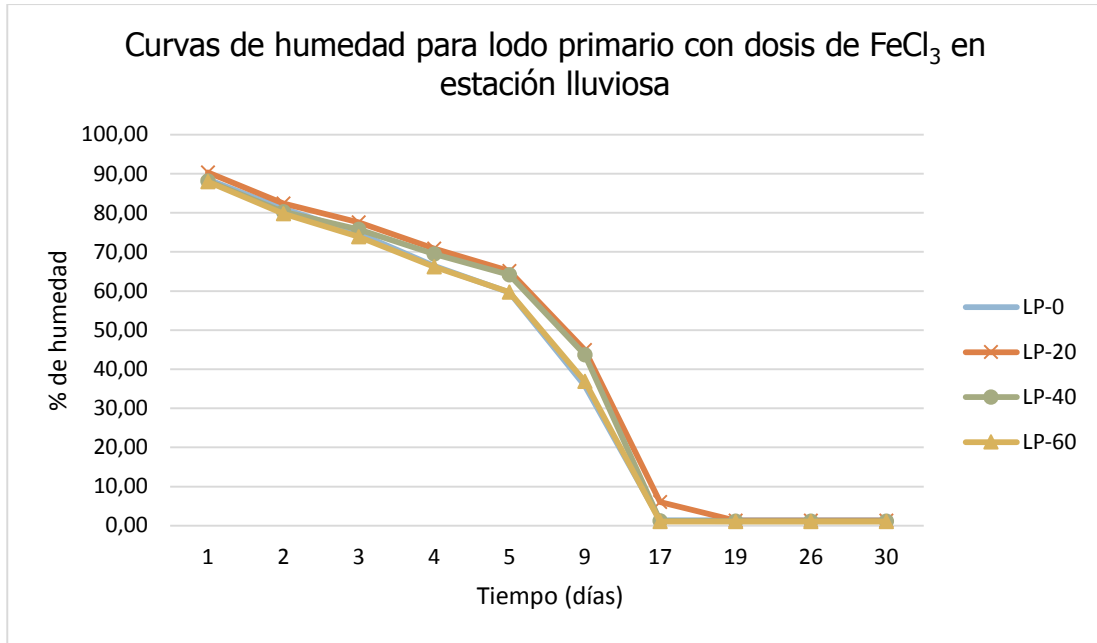


Figura 23. Curvas de humedad para dosificaciones de cloruro en lodo primario en estación lluviosa

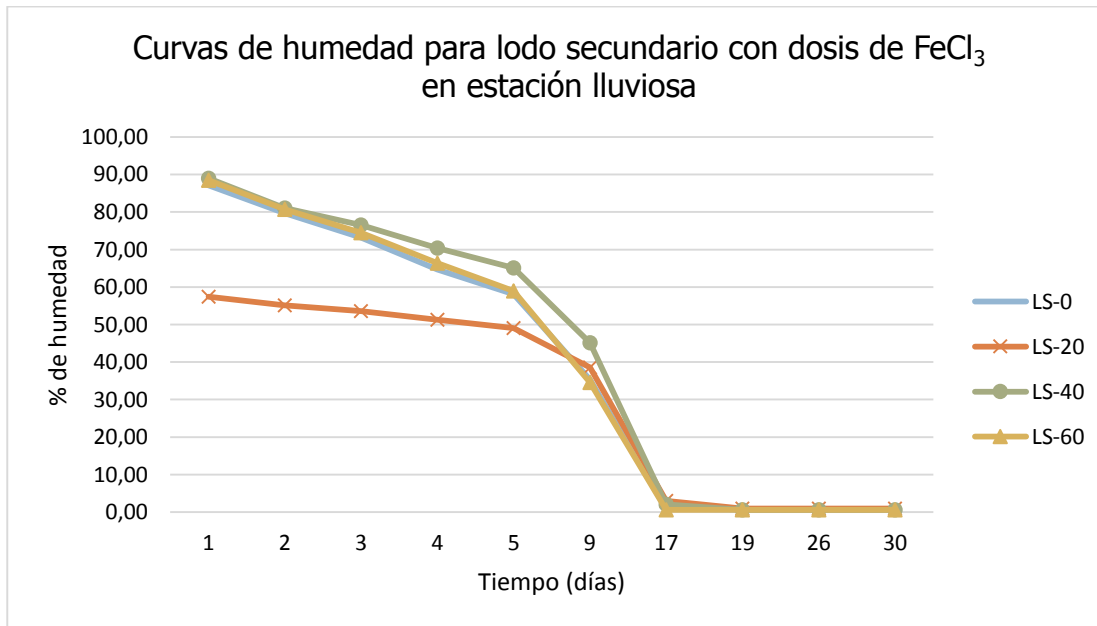


Figura 24. Curvas de humedad para dosificaciones de cloruro en lodo secundario en estación lluviosa

3.2 Caracterización química

Con base en los resultados obtenidos de la investigación en ambas lagunas y en la salida de la purga de lodos realizada por Soto (2016) y como se muestra en el Cuadro 9, que a su vez compara los datos con respecto al Reglamento sobre Valores Guía en Suelos para descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales y derrames (2013), este muestra los requisitos de incluye el reglamento de valores permisibles en mg/kg de suelo seco para uso agrícola y que pretende proteger el recurso hídrico del país así como evitar el riesgo de contaminación.

Cuadro 9. Caracterización física y nutricional de lodos

Análisis	Laguna de lodos primarios	Laguna de lodos secundarios	Reglamentación
DQO (g/l)	13,2 ± 0,5	5,5 ± 0,3	
DBO (g/l)	5,3 ± 0,4	2,0 ± 0,2	
Grasas y aceites (mg/l)	174 ± 3	100 ± 1	
pH	6,32 ± 0,03	6,96 ± 0,03	5 - 12*
Sustancias Activas de Azul de Metileno (mg/l)	< 0,05	< 0,05	
Nitrógeno total	2,0 ± 0,02 (g/l)	233 ± 13 (mg/l)	
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	86 ± 9	56 ± 7	
Fosfatos (mg/l)	201 ± 10	< 0,5	
Hierro (mg/l)	< 0,01	0,4 ± 0,2	
Plomo (mg/l)	< 0,01	< 0,01	180
Plata (mg/l)	< 0,04	<0,04	25
Cromo (mg/l)	< 0,04	< 0,04	40
Aluminio (mg/l)	< 0,02	< 0,02	
Manganeso (mg/l)	< 0,09	0,13 ± 0,04	
Arsénico (mg/l)	< 0,003	< 0,003	35
Zinc (mg/l)	< 0,09	< 0,003	450
Níquel (mg/)	< 0,02	< 0,09	70
Selenio (mg/l)	< 0,01	< 0,01	39
Cobre (mg/l)	< 0,02	< 0,02	20
Mercurio (mg/l)	<0, 001	< 0,001	12

Fuente: Soto, 2016

Cuadro 10. Caracterización nutricional de lodos en las lagunas

Parámetro	Muestra	
	Laguna de lodos primarios	Laguna de lodos secundarios
DQO (mg/l)	13200	5500
DBO (mg/l)	5300	2000
Nitrógeno (mg/l)	2000	233
Fósforo (mg/l)	201	0,5
Relación DQO/N/P	100:15,15:1,52	100:4,24:0,01
Relación DBO/N/P	100:37,7:3,8	100:11,65:0,025

Fuente: Soto, 2016

Se observa un contenido considerable de fósforo en la laguna de lodos primarios, el cual puede aumentar de aplicarse el coagulante en el tratamiento primario del agua. El potencial para aprovechamiento agronómico es importante pues tanto el fósforo como el nitrógeno se encuentran de manera abundante, principalmente en el caso del lodo primario.

3.3 Caracterización microbiológica

En la misma investigación realizada por Soto (2016), indica que los flóculos analizados en los lodos descartados en la planta presentan una buena estructura, la cual es robusta y con forma redondeada, los cuales son factores que señalan la calidad del lodo, sin embargo, algunos presentaban una estructura abierta lo que puede afectar la sedimentación, por lo que se clasifica el lodo de calidad moderada a buena.

El lodo cumple con ocho de nueve criterios que, de acuerdo con la autora, plantea el AyA para la caracterización del lodo desde la perspectiva microbiológica, en las pruebas se detectaron pocos organismos filamentosos, pocas amebas/ciliados y no se encontraron amebas o flagelados dentro del muestreo. No se realizaron pruebas para la detección de huevos de helminto, los cuales sí presentan un riesgo para la salud pública debido a la resistencia que presentan para ser eliminados y la fácil propagación debido a la facilidad de contagio. El riesgo es principalmente importante en los lodos primarios, los cuales no han sido digeridos o estabilizados.

En cuanto a la presencia de coliformes fecales, y considerando la clasificación que plantea el reglamento nacional sobre el tipo de lodo de acuerdo con la disposición final, los clasifica en: tipo A, que es aquel lodo dispuesto en un terreno donde puede existir el contacto directo con el público y el tipo B, que es lodo dispuesto en terrenos donde no puede existir el contacto directo con el público y este puede ser utilizado en terrenos agrícolas. La disposición debe cesar dos semanas antes de la cosecha, lo mismo sucede con el pastoreo de ganado, debe evitarse el pastoreo por 15 días posteriores a la disposición del lodo.

Si el lodo es depositado en relleno sanitario, el reglamento nacional no impone requisitos más allá de un contenido de humedad menor al 75% y un pH ubicado entre 5 y 12. Para casos en donde se quiera disponer en suelos, el Cuadro 11 muestra requisitos adicionales a los que se mencionaron en cuanto a humedad y potencial de hidrógeno. El contenido de coliformes en los lodos, de acuerdo con las pruebas realizadas, no supera los límites dentro del reglamento.

Cuadro 11. Requisitos del Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos

Parámetros	Relleno sanitario	Disposición en suelos	
		Tipo de biosólido	
		Tipo A	Tipo B
Coliformes fecales NMP (UFC/g)	No aplica	2000	2×10^6
Huevos de helmintos patógenos (número/ por gramo sólidos totales)	No aplica	1	10

Fuente: Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos, 2015

Cuadro 12. Contenido de coliformes en lodos

Muestreo	Lodos primarios NMP(UFC/g)	Lodos secundarios NMP (UFC/g)
Martes	1100	43
Jueves	240	210
Domingo	1100	93

Fuente: Soto, 2016.

3.4 Remoción de fósforo y sulfatos

Las pruebas para determinar la variación de la cantidad de fósforo y fosfatos en los lodos luego de adicionar el coagulante no se realizaron directamente sobre estos pues el coagulante como se mencionó, se plantea utilizarlo en la entrada a la planta, por lo tanto, la dosificación para las pruebas se realizó en el agua cruda. La determinación del cambio fue medida en la investigación paralela ejecutada por Chacón (2018). Con base en las pruebas realizadas en el agua residual en marzo de 2017 (figura 25) y cuyos resultados se utilizan en el cálculo de la producción de lodos en el presente trabajo, se observa que la remoción de fósforo y sulfuros en el agua se incrementa proporcionalmente con la dosis de coagulante añadida y que la disminución es significativa al punto de removerse casi en su totalidad para una dosis de 100 mg/l.

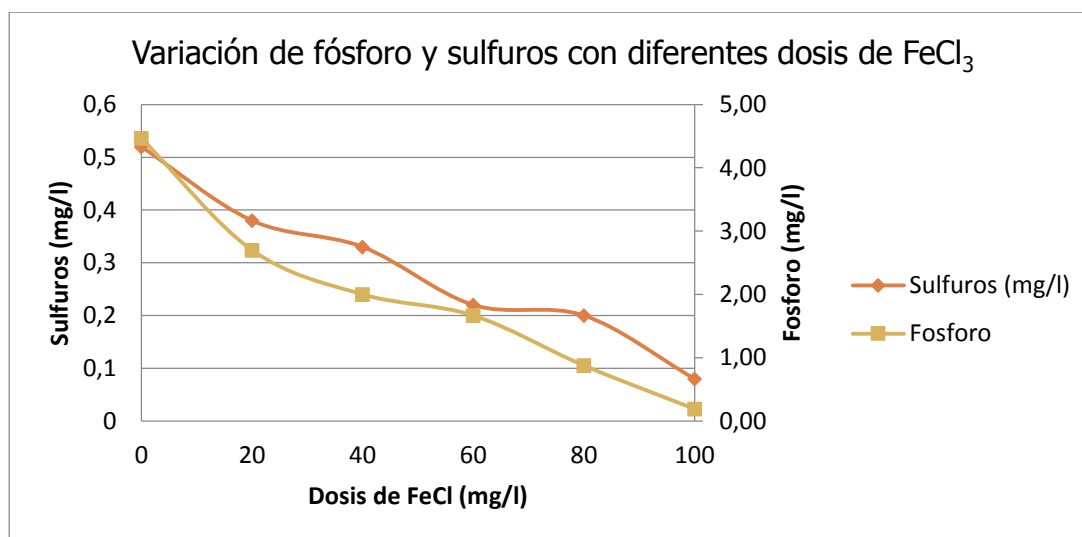


Figura 25. Remoción de fósforo y sulfatos
Fuente: Chacón, 2018

Para el caso de la presencia del hierro, este aumenta en el agua conforme se dosifica una mayor concentración de cloruro férrico lo cual responde al comportamiento esperado, pues se estima que la relación entre dosis altas de coagulante y presencia de hierro en agua y lodos es de tipo lineal.

CAPÍTULO 4: CUANTIFICACIÓN DE PRODUCCIÓN DE LODOS

4.1 Cálculo de producción de lodos

Al utilizar la PTAR El Roble un sistema de lodos activados con IFAS, la producción de lodos es constante. De acuerdo con la memoria de cálculo entregada por la empresa encargada de desarrollar la remodelación y con los datos de mediciones de la planta facilitados por AyA, se consideran las siguientes condiciones para el cálculo de la producción de lodos. (Cuadro 13)

Cuadro 13. Datos técnicos de PTAR El Roble

Población	39 225 habitantes
Caudal	6 912 m ³ /día
Volumen de sedimentadores primarios	519 m ³
Volumen de reactores biológicos IFAS	468 m ³
Volumen de reactores biológicos LAC	468 m ³

4.2 Producción de lodos sin coagulante

Se calculará el volumen aproximado que genera la planta actualmente y posteriormente se considerará la variación al utilizar el cloruro férrico en diferentes dosis. Utilizando las aproximaciones que se incluyen en Andreoli y Von Sperling (2017).

Lodo generado en los sedimentadores primarios:

$$L_p = 40 \frac{gSS}{hab - día} \times 39\,225\, hab = 1\,569\,000\, gSS/día$$

$$L_p = 1569\, kgSS/día$$

En volumen:

$$Lp = 1,5 \frac{L}{hab - día} \times 39\,225\, hab = 58\,838\, l/día$$

$$Lp = 58,8\, m^3/día$$

Para el caso de los lodos secundarios, se tienen los lodos producidos por el sistema IFAS y el lodo producido por el sistema de lodos activados convencional (LAC).

$$LAC = 30 \frac{gSS}{hab - día} \cdot 39\,225 = 1\,176\,750\, gSS/día$$

$$LAC = 1\,177\, kgSS/día$$

En volumen:

$$LAC = 4,5 \frac{l}{hab - día} \cdot 39\,225\, hab = 176\,512\, l/día$$

$$LAC = 176,5\, m^3/día$$

Como el lodo en este tanque debe ser recirculado, de acuerdo con la memoria de cálculo el volumen que se recircula es del 50%, por lo tanto:

$$LAC = 88,25\, m^3/día$$

Los lodos que se generan por el tratamiento con los IFAS vienen dados por la ecuación

1.

$$Q = \frac{SSLM \cdot V\, reactores}{TRS \times X_{RAS}}$$

Según los datos del cálculo realizado por la empresa encargada del diseño, se tiene que:

$$Q = \frac{2000 \frac{mg}{l} \cdot 468 m^3}{2,51 \text{ días} \times 6,667 \frac{mg}{l}}$$

$$Q = 56 m^3/día$$

Que se prefiere aproximar a 60 m³/día dentro del diseño. Se tiene entonces que en total se produce un volumen de lodo secundario diario igual a:

$$Q_{sd} = 88,25 \frac{m^3}{día} + 60 \frac{m^3}{día} = \mathbf{148,5 m^3/día}$$

4.3 Producción de lodos utilizando coagulante

En la estimación se usará la ecuación planteada por Murcott (1994) para el cálculo en la variación de los sólidos totales, que considera la remoción del fósforo dentro del tratamiento, por lo cual se decidió utilizar este modelo al asociar el fósforo con el potencial agronómico que puedan tener los lodos resultantes.

Entonces:

$$ST [kg/día] = SST_{rem} [kg/día] + F \cdot P_{rem} [kg/día] + K \cdot Q [m^3/día] \cdot D [kg/m^3]$$

Donde F es un factor estequiométrico con valor de 1,43 para metales monovalentes y trivalentes, K una constante igual a 0,66 para el cloruro férrico. D es la dosis aplicada al afluente (Carrasco, 2007).

Los datos de sólidos suspendidos removidos y fósforo removido se obtuvieron de la investigación de Chacón (2018) en una corrida realizada utilizando diferentes dosis de cloruro férrico.

Cuadro 14. Producción de lodo primario por el uso de cloruro férrico

Dosis (mg/l)	SS removidos (kg/día)	Fósforo removido (kg/día)	Producción extra por FeCl₃ (kgSS/día)	Total de producción de lodo (kgSS/día)
40	160	2,47	346	1915
60	360	2,80	638	2207
100	440	4,28	902	2471

Se consideran únicamente los lodos primarios pues en la PTAR se plantea la utilización del cloruro en la entrada de la planta para la mitigación de generación de olores desagradables, además, asumiendo que el coagulante en su mayoría sedimenta con los lodos y el porcentaje que pasa a procesos posteriores es mínimo, se supone que los lodos secundarios no sufrirían una afectación significativa.

CAPÍTULO 5: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS

5.1 Evaluación de opciones para tratamiento

Como se ha mencionado, la generación de lodos como consecuencia del sistema de tratamiento que emplea la PTAR es alta. Considerando esto, se analizarán opciones más viables que sigan condiciones técnicas y económicas, de acuerdo con las condiciones actuales de la planta.

5.1.1 Lagunas de secado

Las lagunas como método de depuración y digestión de lodo son alternativas muy económicas cuando se cuenta con espacio suficiente y la producción de lodo no es alta, esta opción es apta para lodos que sí han sido digeridos o son resultado de algún proceso de estabilización (Metcalf y Eddy, 2004). Este método de tratamiento se recomienda para caudales entre $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ inclusive, debe considerarse que la acumulación de lodo se da por un espacio de 10 meses y se debe dejar la laguna en reposo por un período de 8 meses. El volumen final de los lodos es menor en consideración con otros tratamientos, debido al proceso de digestión, desgasificación y acumulación de lodos en el fondo de la laguna.

Actualmente la planta acumula los lodos que genera por este método, sin embargo, la capacidad para procesar y tratar los lodos es prácticamente nula, pues ambas lagunas cuentan con un volumen aproximado de 4578 m^3 (Soto, 2016) de los cuales en la laguna de lodos primarios se estima que los lodos acumulados tienen un volumen de 4328 m^3 y se reciben cerca de 60 m^3 diarios en la laguna de lodos primarios y 148 m^3 en la laguna de lodos secundarios, la cual cuenta con características similares a la laguna de lodos primarios, lo que significa mayor acumulación de lodos en lagunas donde se ha perdido la capacidad de almacenamiento.

Pese a que la planta se ubica en una zona con un clima que favorece la deshidratación a una velocidad considerable, en época lluviosa es frecuente que se presenten desbordes, aunado a esto, la presencia de malos olores y vectores es un factor que influye en la poca viabilidad de esta opción como tratamiento de lodos, debido principalmente a su cercanía con poblados.

5.1.2 Deshidratación mecánica

Según las tendencias actuales de tratamiento de lodos generados en plantas que emplean el sistema de lodos activados, la deshidratación mecánica corresponde a la opción más viable pues trabaja de manera continua y no requiere de grandes áreas para el procesamiento de los lodos, pese a presentar la desventaja del consumo energético y de la adición de polímeros o químicos para el acondicionamiento de los lodos en la mayoría de los casos.

La ventaja que presenta es el procesamiento de grandes volúmenes en un corto período de tiempo y a una reducción de volumen cercana al 90% que permite el traslado de los lodos a un menor costo y en mejores condiciones, pues el porcentaje sólidos secos en la torta obtenida oscila entre 16% y 25%.

En el mercado existen opciones como el filtro prensa de banda, filtro prensa, banda centrífuga y la prensa de tornillo, estas dos últimas opciones operan bajo un principio similar teniendo un mecanismo de operación de un transportador de tornillo a dos o tres fases que permite la separación del agua y los sólidos en un único proceso.

En la figura 26 se muestra un tipo de configuración utilizada por equipos de filtro de banda, este equipo pese a presentar un rendimiento similar al obtenido en la torta seca utilizando la prensa de tornillo, su consumo energético es más alto en comparación con la prensa de tornillo (figura 27) además de requerir unas instalaciones más amplias en comparación con la prensa de tornillo. Además de esto, es utilizada para caudales más altos que el que presenta la PTAR. Una desventaja de este equipo es la utilización de rodillos y piezas que requieren un mantenimiento más frecuente, en comparación la prensa de tornillo que se compone de un equipo compacto.

Dependiendo del tipo de filtro de banda elegido, si es cerrado o abierto, esto puede generar olores desagradables durante la deshidratación de los lodos.

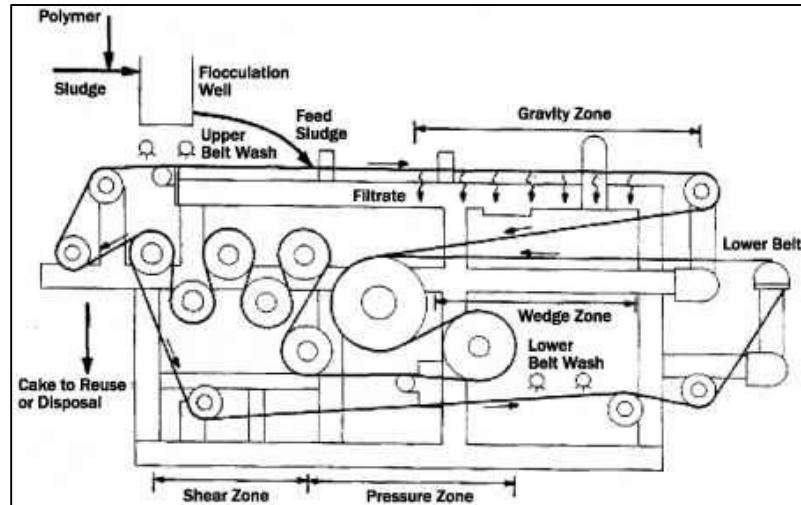


Figura 26. Filtro prensa de banda
Fuente: climate-policy-weather.org

De acuerdo con fabricantes de prensas de tornillo la ventaja de este equipo con respecto a otras opciones en el mercado es la poca generación de ruido, poco espacio requerido para la instalación, menor desgaste en las piezas debido a una velocidad de rotación baja, la independencia con respecto a requerir de un operador para el control del proceso y de auto limpieza con un uso escaso de agua. Equipo similar al mostrado en la figura 27, es capaz de procesar hasta 140 kg de sólido seco por hora con un consumo estimado menor a 0,01 kW por kg de sólido seco.

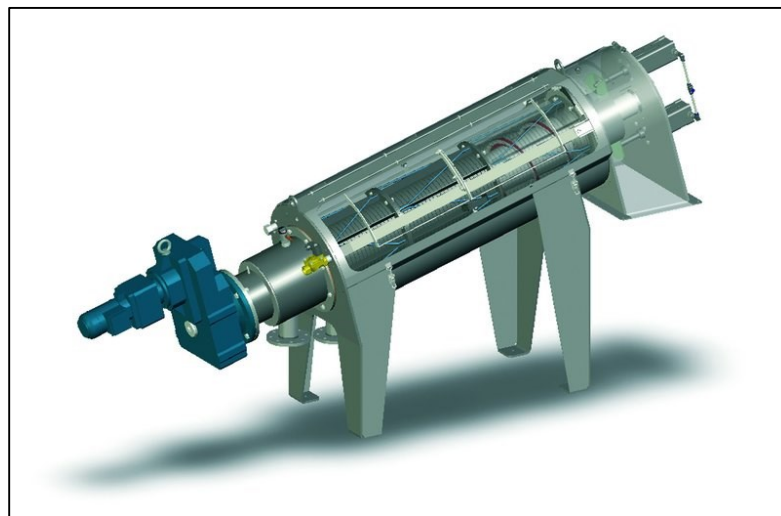


Figura 27. Prensa de tornillo RoS 3Q
Fuente: Huber Technology

El equipo de deshidratación mecánica requiere el uso de polímeros o coagulantes inorgánicos más cal para el acondicionamiento del lodo previo a la deshidratación, esto con el fin de formar flóculos más grandes y estables que faciliten la obtención de un mayor porcentaje de sólidos secos. Además, la adición de cal eleva el pH del lodo lo que disminuye la exposición del acero del equipo a un proceso corrosivo.

Pese a que no se consideró la tecnología del filtro prensa, debido a la generación de ruido y poca practicidad debido al requerimiento de instalaciones más grandes con respecto a las opciones mencionadas con anterioridad, Andreoli y Von Sperling (2007) plantean la siguiente dosificación de cloruro férrico y cal viva (Cuadro 15) en lodos producidos en un sistema de lodos activados, que sirve como referencia para la estimación de los requisitos necesarios para la operación del equipo mecánico.

Cuadro 15. Dosificación de referencia para acondicionadores en filtro prensa

Tipo de lodo	Filtro prensa (kg/ton-m)	
	FeCl ₃	CaO (cal viva)
Primario	40 – 60	10 – 140
Secundario	70 – 100	200 – 250

Fuente: Andreoli y Von Sperling, 2007.

En análisis de resultados se profundizará con respecto a las opciones para la disposición de los lodos, así como la variación que se genera por la formación de compuestos químicos debido al uso del cloruro férrico, compuestos que pueden ser aprovechados en suelos o bien el uso de lodo como material de relleno o cobertura vegetal.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Caracterización física

6.1.1 Sólidos totales

Se puede establecer con base en las pruebas que el promedio de los sólidos totales en los lodos primarios es de 8060 mg/l, sin embargo, debe considerarse que tal como se mencionó en resultados, la muestra de marzo de los lodos primarios presentó un resultado atípico en comparación con el resto de los meses observados, al eliminar este dato debido a que está por encima del dato más alto obtenido en prácticamente un 50% el promedio de sólidos suspendidos totales en los lodos es de 5392 mg/l.

En el caso de los lodos secundarios no resultó necesario realizar esta corrección pues el dato se encuentra dentro del rango de los meses restantes, el promedio de los lodos secundarios es de 5092 mg/l. Si se elimina este mes para ser consecuentes con el resultado de los lodos primarios, se obtendría un promedio de 4625 mg/l. Lo cual representa el comportamiento esperado dentro del proceso de tratamiento de las aguas residuales, pues los lodos primarios contienen un mayor porcentaje de sólidos suspendidos.

En el Cuadro 1, la medición para el primer mes (octubre) indica un porcentaje 33% menor de sólidos en comparación con el mes más bajo en estación seca reportado y con el mes de mayo en el cual las lluvias todavía no presentan la misma intensidad y frecuencia, esto puede explicarse por la mayor dilución de las aguas debido a conexiones pluviales ilícitas en el sistema de alcantarillado sanitario.

6.1.2 Sólidos sedimentables

Con relación a los sólidos sedimentables en octubre, se observó el mismo comportamiento pues la menor presencia de lodos al finalizar la prueba indica una menor presencia de sólidos totales en el agua residual, según se observa en el Cuadro 2 y la Figura 9. A partir del año 2017 se observa que los sólidos sedimentan poco, a excepción del mes de febrero, en el cual los lodos primarios alcanzan un valor esperado y sedimentan adecuadamente en los 30 minutos de la prueba; esto no sucede en la mayoría de muestreos realizados pues la consistencia de los lodos era espesa, con presencia de fibras y de material

liviano que impedía la sedimentación, así como la separación entre fases que se explicó en el capítulo de caracterización física; esto sucedía principalmente en el caso de los lodos primarios.

Con los lodos secundarios, la consistencia similar a gel, de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se debe a un desbalance en la población de bacterias dentro del reactor lo que genera un fenómeno conocido como *bulking* o abultamiento de lodos, que provoca una sobrepoblación de bacterias filamentosas. La ocurrencia de este fenómeno puede deberse a un bajo porcentaje de oxígeno disuelto, escasez de nutrientes requeridos para mantener la relación F/M dentro del reactor, agua con cargas altas de contaminantes como ácidos orgánicos, agua muy ácida o con una alta presencia de grasas y aceites.

Cuando se agrega el coagulante a la prueba, realizando una prueba de Jarras, se observa que la dosis de entre 40 mg/l y 60 mg/l son las que parecen tener un mejor efecto sobre la sedimentación de los lodos primarios principalmente, siendo que para los casos en los cuales los lodos no eran tan espesos o presentaban mucho contenido de material fibroso, sí tenían un efecto clarificando el agua y formando flóculos en el lodo. Pese a esto, la dosis fue insuficiente para lograr una adecuada floculación, por lo que este efecto no fue tan notorio como sí sucedió cuando en una prueba independiente se utilizó 100 mg/l en los lodos primarios. Cuando se adicionaron 100 mg/l a los lodos secundarios no hubo un cambio significativo en el caso de aquellos cuya consistencia era similar a gel y poseía burbujas.

La dosis de 100 mg/l resulta más adecuada si se quiere aumentar la sedimentación en los lodos primarios; debe considerarse que esto puede remover un gran porcentaje del fósforo y fosfatos en el agua, lo que afectaría el funcionamiento del proceso biológico posterior. El uso de una dosis de 100 mg/l como dosificación apta para mejorar la sedimentación de los lodos es conveniente cuando se emplea un sistema para el tratamiento de lodos de tipo mecánico. Sin embargo, la dosificación a utilizar, como se observó en los resultados es variable, pues en el caso de los lodos secundarios con una dosificación de 100 mg/l el resultado no fue satisfactorio, por lo cual es conveniente realizar pruebas de jarras para determinar la dosificación requerida debido a la variabilidad que presenta el agua cruda y el proceso biológico.

El incremento en la dosis de cloruro férrico produce un oscurecimiento y una tonalidad marrón propia del uso de un reactivo que incluye hierro. El olor en los lodos primarios no disminuye por el uso del coagulante, se combina con un olor fuerte a metal.

Como resultado de las pruebas (cuadros 2 y 3) se demuestra que utilizando las dosificaciones de 20 mg/l, 40 mg/l y 60 mg/l estas no contribuyen a incrementar significativamente la sedimentación de los lodos, por lo cual se requiere del uso de dosificaciones más altas para alcanzar la formación de flóculos capaces de sedimentar.

6.1.3 Sólidos suspendidos volátiles

La fracción orgánica dentro de los sólidos totales obtenidos del proceso de clarificación primaria es como se espera considerablemente mayor en comparación con los lodos obtenidos en la clarificación secundaria. En las figuras 28 y 29, se observa que el orden de los sólidos suspendidos ronda el orden de 12000 mg/l en lodo primario 5000 mg/l en lodo secundario. En el lodo primario se incluye la medición de marzo, sin esta medición el orden es cercano a los 8000 mg/l.

En la figura 28 (se incluye el agua como parte de los sólidos volátiles para efectos gráficos), en la medición de mayo de lodo primario se observa que la materia orgánica es prácticamente nula y que la mayor parte de los sólidos suspendidos totales corresponde a sólidos fijos o materia inorgánica, lo cual es un comportamiento atípico dentro de lo observado y esperado, debido al origen de las aguas que trata la PTAR, pero debe considerarse que a la planta llegan aguas provenientes de industria alimentaria (panificación, aceites, cárnica y de productos marinos), servicios médicos, hotel e industria relacionada con fertilizantes agrícolas lo cual podría explicar la razón por la cual para ese momento de muestreo los sólidos fijos están por encima de los sólidos suspendidos en más de un 1000%. Para el mes de marzo, también se observa una presencia de sólidos fijos muy alta, sin embargo, la relación entre sólidos suspendidos y fijos es prácticamente de 2:1.

Para el primer mes de medición en invierno, los sólidos suspendidos y sólidos fijos están muy por debajo del comportamiento que se tiene en los meses secos, lo cual se explica por la dilución debido a interferencia de conexiones ilícitas.

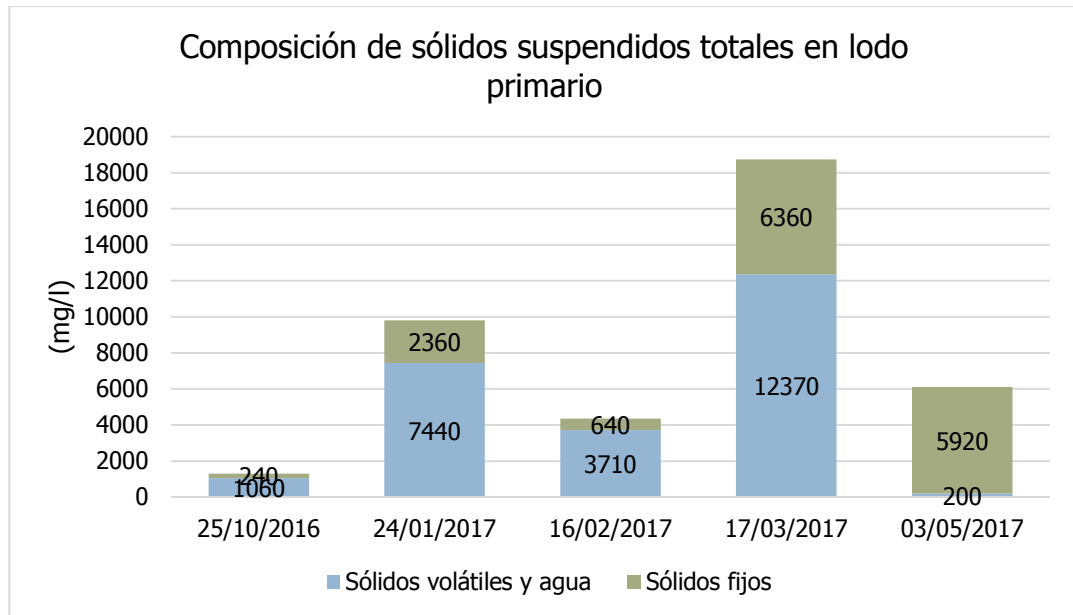


Figura 28. Composición de sólidos totales en lodo primario

Para el caso del lodo secundario (figura 29), el comportamiento de los sólidos suspendidos más agua es uniforme para todas las mediciones, siendo considerablemente superior en relación con los sólidos fijos, esto es así, pues la mayoría de los sólidos fijos quedan retenidos en la clarificación primaria y los sólidos suspendidos en el lodo secundario corresponden al que se obtiene del proceso biológico.

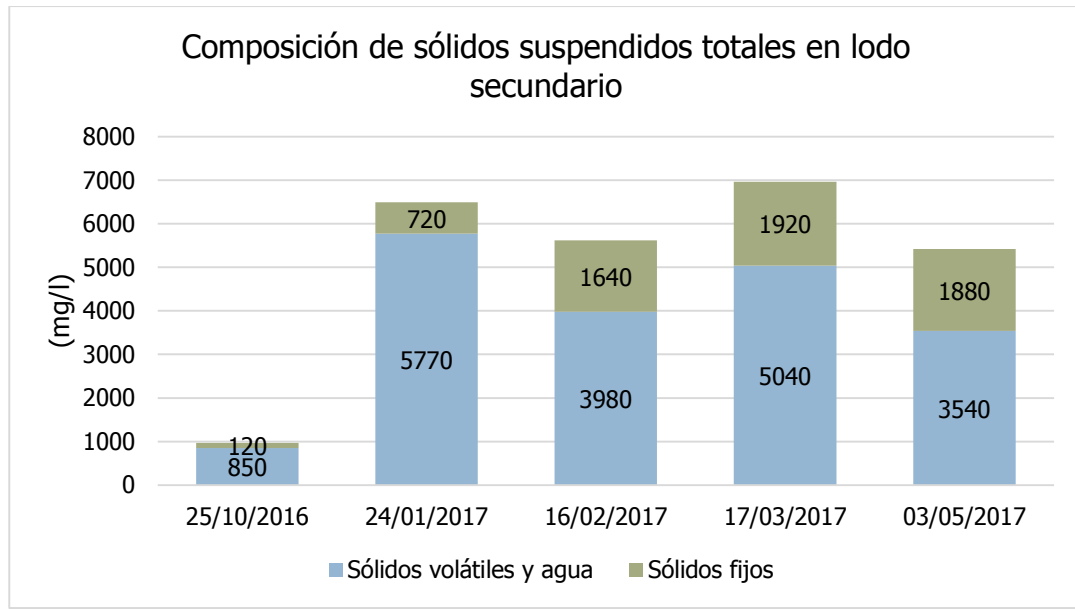


Figura 29. Composición de sólidos totales en lodo secundario

6.1.4 Relación SV/ST

Estos sólidos cuantifican la presencia de materia orgánica dentro de las aguas residuales y su grado de digestión. Con el sistema de tratamiento empleado en la PTAR El Roble, los lodos no tienen un proceso de digestión pues el tiempo de permanencia de los lodos dentro de los tanques es muy corto, lo cual impide el proceso biológico de estabilización y espesamiento como sí sucede en lagunas de estabilización o sistemas anaeróbicos (Andreoli y Von Sperling, 2007, p.14). De acuerdo con estos mismos autores, el rango en el cual se debe encontrar la relación entre materia orgánica suspendida y sólidos totales para el tratamiento primario e igualmente para el caso de lodo biológico es de 0,75 – 0,80.

En la figura 30, se suprimieron los datos del mes de mayo, pues se salen considerablemente del rango, especialmente para el caso de la relación en lodo primario, cuyo valor es de 0,03, que se explicó antes que es ocasionado por la considerable diferencia entre la presencia de sólidos suspendidos y sólidos fijos para este mes.

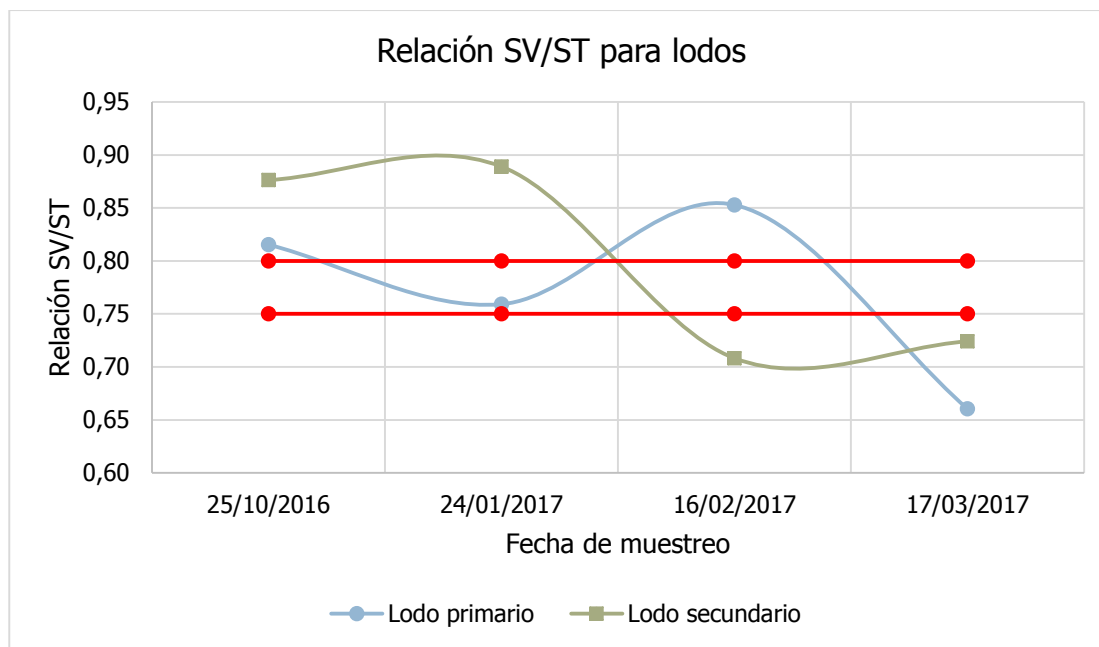


Figura 30. Relación SV/ST para lodos

Con base en los resultados, puede decirse que únicamente el lodo primario del mes de marzo se ubica dentro del rango, el resto de los datos oscila entre los límites. Para el caso de los lodos secundarios, significa que en los últimos meses los lodos fueron mejor digeridos, en contraposición con los meses de octubre y enero.

6.1.5 pH

Los resultados de las pruebas de medición del potencial de hidrógeno tanto para las muestras con el coagulante como sin dosis se ubican dentro del rango que el Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Sólidos y Biosólidos (2015) establece el cual es de 5 a 12.

El promedio de las mediciones para ambos lodos presenta un comportamiento muy similar entre ambos (Cuadro 6), de 6,90 y 7,04 con la diferencia de una mayor acidez en los lodos primarios, como es esperable. El caso de las mediciones de octubre es particular, pues las mediciones para ambos lodos supera un pH de 7,40. Lo cual puede explicarse por el equipo utilizado para la medición, el cual no estaba adecuadamente calibrado.

Al adicionar el coagulante, se da una acidificación del lodo, dada la naturaleza de este, pero de acuerdo con las pruebas, cuyos resultados se incluyen en el Cuadro 7, existen similitudes entre los resultados de las pruebas sin dosis de coagulante y adicionando 40 mg/l. Para el caso de la dosis más alta de coagulante, si se observó el comportamiento esperado de la acidificación del lodo, pues mostró el resultado de pH más bajo para ambos tipos de lodos. Es importante resaltar que, pese a que las pruebas no muestran tan claramente el comportamiento descrito, el fenómeno de disminución del potencial de hidrógeno está ampliamente estudiado y deben realizarse más pruebas para tener mejor certeza en cuanto a la variación en el caso de los lodos de PTAR El Roble.

6.1.6 Porcentaje de humedad

De acuerdo con las pruebas de humedad puede establecerse que el contenido de humedad en ambos lodos es prácticamente el mismo, en el Cuadro 8 se observa que en general el contenido de sólidos en los lodos del sedimentador primario es de entre 1,0 y 1,5% lo cual está por debajo del rango esperado en un sistema de lodos activados convencional, pues debe estar entre 2% y 6%. Para el caso de los lodos secundarios, el porcentaje de sólidos es de 0,6% y 1%. Según esto, los lodos secundarios sí presentan una humedad dentro del comportamiento esperado.

Según la investigación de Soto (2016), la cual divide el muestreo entre lodos finos y lodos espesos (Cuadro 16) y el muestreo se realizó directamente sobre las lagunas y no sobre el lodo purgado, el porcentaje de humedad de los lodos denominados como finos y que contienen la mayor parte del agua presentan valores muy similares con los obtenidos del muestreo realizado en esta investigación.

Cuadro 16. Pruebas de humedad a lodo fino y lodo espeso

Origen	Lodo espeso (%)	Lodo fino (%)
Laguna de lodo primario	91,86	98,40
Laguna de lodo secundario	94,60	99,59

Fuente: Soto, 2016

El contenido de humedad tan alto impide la disposición de los lodos en algún relleno sanitario o bien implementar la técnica del compostaje, pues para esto es requerido un porcentaje de humedad máximo de 75%, esto de acuerdo con el Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos vigente en el país, lo que significa que es necesario deshidratar los lodos.

6.1.7 Curvas de humedad

Debido al comportamiento similar entre ambos lodos en cuanto a su contenido de humedad, las curvas son prácticamente iguales para ambos lodos sin la dosificación de coagulante tanto para la estación seca como la estación lluviosa (figuras 15 y 16). En el caso de los lodos en estación seca, contrario a lo que se esperaría, los lodos primarios presentaron una menor pérdida de humedad en comparación con los lodos secundarios, pese a ser una diferencia muy pequeña, es esperable que sean los lodos secundarios los que presenten una pérdida de humedad más lenta debido al origen biológico y a que no se encuentran arenas o partículas grandes en el lodo, pero esto no se refleja con notoriedad en los lodos estudiados.

Para las muestras de estación seca colocadas en la cápsula grande (300 ml), la humedad del 75% se alcanza el primer día de prueba y la mayor pérdida de humedad, en la cual se llega a un porcentaje de humedad cercano al 20% concluye al quinto día; es importante aclarar que las pruebas se realizaron en San Pedro de Montes de Oca, por lo cual la pérdida de humedad es más lenta en comparación con las condiciones que se presentan en El Roble.

Con las muestras sin coagulante colocadas en estación lluviosa se observó el mismo patrón de deshidratación entre ambos lodos. La diferencia entre la deshidratación que alcanzan los lodos primarios al quinto día en estación seca con respecto a los lodos primarios en estación lluviosa se muestra en la Figura 31. Al quinto día los lodos en estación seca han perdido la totalidad de humedad, en contraposición con los lodos en estación lluviosa, en la cual todavía presentan un porcentaje de humedad cercano al 60%. Es necesario mencionar que los resultados mostrados en las gráficas se ven influenciados por el peso de la cápsula en la cual se realizó, debido a la relación que existe entre la masa y el cálculo del porcentaje de humedad. Pese a que se indica un porcentaje de humedad de 20%, los lodos estaban totalmente secos en el caso de la estación seca.

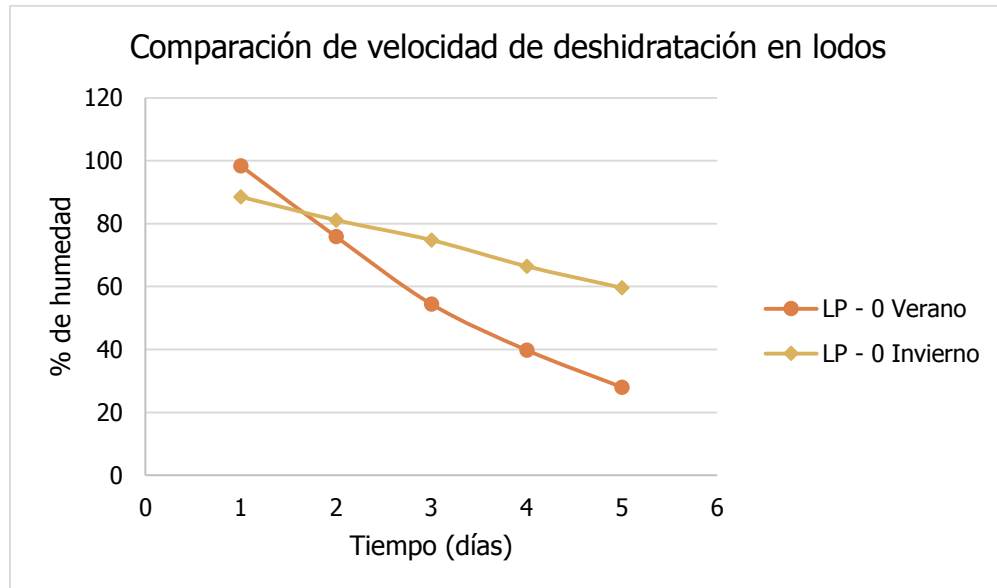


Figura 31. Comparación de velocidad de deshidratación para lodo primario

6.1.7.1 Utilizando coagulante en estación seca

Recordando que en estación seca no se utilizó dosis de 60 mg/l, los resultados en la Figura 20 muestran que el lodo primario sin dosis y con la dosis de 20 mg/l deshidrataron más rápido que el lodo con dosis de 40 mg/l.

El lodo secundario bajo las mismas condiciones presentó el mismo comportamiento del lodo primario (Figura 21).

6.7.2 Utilizando coagulante en estación lluviosa

En las muestras de lodo primario colocadas, las que tenían dosificaciones de 20 mg/l y 40 mg/l deshidrataron más despacio en comparación con las muestras que tenían una concentración de 60 mg/l y la muestra que no tenía el coagulante (Figura 23).

El lodo secundario siguió el mismo comportamiento al descrito para el lodo primario, con la excepción que se observa en la Figura 24 en la cual la muestra con 20 mg/l parece tener

un menor porcentaje de humedad y deshidratar más rápido, pero esto se debe al uso de una cápsula diferente con respecto al resto de las muestras la cual era considerablemente más liviana.

Pese a que los resultados muestran una tendencia de los lodos con dosis de 40 mg/l a deshidratar más despacio con respecto a no utilizar dosis, es importante resaltar que las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas permitían que polvo u otras partículas como ceniza contaminaran las muestras, así como la exposición al sol era variable, sin embargo, resulta interesante que esta dosis según la Figura 22, es la que muestra una mejor clarificación y por ende sedimentación en los lodos primarios y secundarios con respecto a las otras dosis. Al finalizar la prueba, los lodos secundarios con esta misma dosis fueron los que menos se adhirieron a la cápsula, en contraposición con el resto de las muestras.

Se observa en la misma figura, que los lodos tienen unas manchas blancas que no ocurrieron en las otras pruebas que se realizaron, no se analizó microbiológicamente la razón del por qué ocurrió este fenómeno, pero se estima que puede deberse al crecimiento de alguna bacteria u hongo y no al uso del cloruro férrico.

6.1.8 Caracterización química y microbiológica

De acuerdo con los resultados de la investigación de Soto y comparando con los requisitos impuestos en los reglamentos nacionales, ambos lodos cumplen con lo que se establece tanto en el aspecto microbiológico (excluyendo los huevos de helminto pues no se realizaron pruebas) como nutricional; siendo que no presentan un alto contenido de metales pesados que puedan afectar el agua o los suelos.

Con la adición del cloruro férrico no se presentarían problemas asociados con la disposición en los suelos, pues el hierro es un metal que es requerido para el desarrollo vegetal y no se estipula en los reglamentos como un metal peligroso presente en los lodos. El coagulante en dosis adecuadas de acuerdo con el contenido de fósforo, fosfatos y fosfonatos es capaz de producir una mejora en los suelos, al obtenerse ortofosfatos a partir de la combinación del hierro y otros elementos metálicos presentes en el agua. Los ortofosfatos son utilizados en abonos, pues estimulan el crecimiento de plantas y la floración. Sobre esto se ampliará en el análisis que se realizará sobre opciones para la disposición de los lodos.

De acuerdo con los resultados de Chacón (2018) y asumiendo que la totalidad de fósforo y otros compuestos del fósforo que son removidos durante el tratamiento primario pasan a los lodos y estos se mantienen en la torta seca, se observa que para el rango recomendado de 40 mg/l - 60 mg/l la remoción del fósforo es de un 55% y un 63% respectivamente. A partir de la dosis de 80 mg/l la disminución del fósforo del agua es más alta de un 80%. Este comportamiento es beneficioso en tanto que el fósforo es uno de los principales nutrientes para el suelo junto con el hierro y el nitrógeno, lo que sugiere un potencial agronómico alto en los lodos que se producirían en la planta si se utiliza el cloruro férrico en dosificaciones que permitan la formación de compuestos de fósforo y hierro solubles o bien que se produzca la formación de la estruvita.

6.2 Cuantificación de lodos

Según lo esperado por el tipo de tratamiento que se da a las aguas residuales, la producción de lodos diaria en la PTAR es alta, se tiene que para el caso de los lodos primarios la producción de lodo es de 60 m³ y en el caso de los lodos secundarios se producen diariamente 148 m³. Esto es, sin considerar la adición del coagulante, pues se estima que el aumento en la producción al utilizar este acondicionador se ubica entre un 25% y un 35%. (Carrasco, 2007).

Dentro de los acondicionadores que se utilizan normalmente a nivel mundial, los que emplean un elemento metálico son los que tienden a producir más lodos, entre ellos el sulfato de aluminio y el cloruro férrico. De investigaciones realizadas, se tiene que entre estos dos coagulantes el sulfato de aluminio produjo menos lodos en comparación con el cloruro férrico, a la vez que se estima que la remoción de sólidos totales presenta una relación lineal con respecto a la dosis de cloruro férrico utilizada, Moncada (citado en Carrasco, 2017).

De la estimación que se realizó para cuantificar el aumento de la producción de lodos utilizando el cloruro, se observó que la dosificación de 40 mg/l produjo un aumento en la producción de sólidos suspendidos totales de un 22%, la dosis de 60 mg/l generaría un 40% más de sólidos suspendidos y la dosis de 100 mg/l un 57% más de sólidos. Lo cual se acerca

bastante al rango que se plantea como acostumbrado cuando se utiliza cloruro férrico en el caso del rango de dosis entre 40 mg/l y 60 mg/l.

Es importante mencionar que una dosis igual o mayor a 100 mg/l es utilizada normalmente en plantas de tratamiento de aguas residuales físico químicas, pues la pérdida de sólidos suspendidos y fósforo hace poco viable el tratamiento biológico posterior. Una alternativa viable y que evita el riesgo por utilización de sustancias químicas peligrosas y corrosivas para la operación de la planta y que tiene la misma funcionalidad es la utilización de polímeros en el tratamiento primario.

El aumento en el volumen de lodos como consecuencia de la utilización es muy reducido, pues por ejemplo por tonelada de lodo se adiciona 50 kg de cloruro férrico (dosis de 50 mg/l), en cambio, para obtener resultados muy similares se emplean únicamente 3 kg de polímero, lo que significa menores costos de operación, menos aumento en el volumen y disminución del riesgo por la manipulación de un producto corrosivo. (Manual Mexicano de Agua Potable y Saneamiento, 2007)

Es posible combinar el uso de coagulante con polímero, lo que aumenta la sedimentación del lodo primario, pues el polímero es capaz de generar un flóculo de mejor calidad, a la vez que facilita la sedimentación de los fosfatos poco solubles que se generan como consecuencia de la reacción del coagulante con el agua residual.

Las autoridades del AyA deben considerar la viabilidad de utilizar el coagulante sin adecuar previamente el tratamiento de los lodos, pues como se analizó, el aumento en la producción de lodos es superior al 20% para la dosis más baja recomendada, lo que puede ocasionar todavía más problemas con el manejo de los lodos de los que existen actualmente, esto pese a que la pérdida de humedad en apariencia no se ve afectada significativamente por la adición del coagulante, el volumen extra generado supera con facilidad el volumen disponible en las lagunas para almacenar los lodos.

Debe tomarse en cuenta, además, que la opción de lagunas de secado para los lodos primarios no es recomendada, debido a que los lodos no han sido sometidos a un tratamiento previo para disminuir la contaminación por patógenos.

6.3 Tratamiento y disposición de lodos

6.3.1 Tratamiento de lodos

La capacidad de las lagunas actuales está superada y el volumen útil es pequeño debido a la acumulación de lodos, lo cual acarrea problemas como derrames, malos olores y propagación de vectores. El empleo de lagunas de estabilización no es un método viable para el volumen que se genera diariamente en la planta. Aunado a esto, si se insiste en utilizar este sistema, debe ampliarse el área de las lagunas, a la vez que se debería aumentar la cantidad de lagunas de dos a cuatro, pues la alternabilidad en el tratamiento es necesaria para la adecuada digestión, estabilización y deshidratación de lodos por un período de entre 8 y 10 meses.

Según se mencionó, el uso de lagunas de secado para lodo primario no es recomendado por la naturaleza del lodo y el contenido de contaminantes que presenta así como la generación de malos olores y atracción de vectores, si se considera la cercanía de la PTAR con poblados cercanos y el limitado espacio con el que cuenta para construir más lagunas y ampliar las existentes, esta resulta ser una opción poco conveniente en el corto y largo plazo, tomando en cuenta, además, que dentro de los planes del AyA se encuentra la construcción de la PTAR Gran Puntarenas en el terreno actual de PTAR El Roble.

El uso de un método de deshidratación mecánico se proyecta como la opción más rentable según las condiciones actuales en las cuales opera la planta y por los inconvenientes que han presentado las lagunas como método de almacenamiento de los lodos, dentro de las opciones que presenta el mercado, se estima que la mejor opción es el uso de una prensa de tornillo. El costo del equipo se ubica entre los \$6.000.000 y \$12.000.000, que depende del fabricante, además de no incluir costos de instalación. La prensa de tornillo es capaz de procesar 140 kg en una hora con un consumo de 0,01 kW por kilogramo procesado.

El tratamiento debe ir acompañado de un proceso de acondicionamiento de lodos, adicionando un polímero según las recomendaciones de la mayoría de los equipos, sin embargo, esto varía de acuerdo con el fabricante, pues el polímero facilita la formación de un floc a partir de pequeñas partículas lo que favorece el proceso de deshidratación, en este caso podría considerarse la adición previa que se efectuó del cloruro en la entrada a la planta. Lo

que resulta necesario, además, es la adición de cal para aumentar el pH de los lodos, con ello también disminuir los organismos patógenos y estabilizar el lodo facilitando la formación junto con el cloruro de hierro de un flóculo más robusto que facilite la sedimentación.

La relación que se muestra en el Cuadro 13, sirve como guía para la estimación del consumo de FeCl_3 y CaO para el caso de lodos obtenidos a partir de una planta de lodos activados. El volumen alto que es requerido para el tratamiento de los lodos se relaciona con la poca digestión que presentan debido al poco tiempo de residencia en los tanques. Aunque este equipo presenta el beneficio de obtener lodos más secos, con menos bacterias y organismos patógenos, lo que facilita la disposición o uso posterior evitando con ello un riesgo a la salud pública.

6.3.2 Disposición de lodos

La elección de la disposición final de los lodos es dependiente de factores como el tipo de proceso del cual se obtienen, la calidad del lodo, el costo asociado con la elección de la alternativa más económica y ambientalmente responsable, el porcentaje de humedad que presentan, contenido de microorganismos patógenos y tratamientos previos tales como el acondicionamiento o la estabilización.

En el caso de PTAR El Roble, el volumen de lodos que se genera diariamente es de aproximadamente $200 \text{ m}^3/\text{día}$, lo que representa una producción considerable y estos no reciben ningún tratamiento antes de ser enviados a las lagunas de secado. La mayor cantidad de lodo como es de esperarse proviene del proceso biológico, especialmente del proceso de LAC. De acuerdo con Metcalf & Eddy (2004) se estima que por cada $3,78 \text{ m}^3$ de lodo producido finalmente se consigue $0,94 \text{ kg}$ de sólidos secos. Para el caso en estudio se tiene que diariamente se produciría una cantidad de sólidos secos cercana a 50 kg , esto sin considerar que si se decide acondicionar los lodos se aumentaría el volumen de lodos en su fase líquida en alrededor de $30\% - 35\%$, dependiendo de la dosificación de cloruro férrico así como de cal, esto se debe al aporte que hacen los propios acondicionadores así como a la remoción de sólidos suspendidos en los lodos que permiten obtener un mayor contenido de sólidos secos que rondan entre $25\% - 35\%$ generalmente.

Entre las opciones que se tienen para la disposición de los lodos se encuentra la disposición en relleno sanitario, su uso como material de relleno y cubierta vegetal, uso como mejorador de suelo y compostaje. En el país el reglamento en vigencia que como se habló en la sección de caracterización física, química y microbiológica no contempla requisitos más específicos y exigentes con los lodos en comparación con el reglamento para lodos y biosólidos en países como Chile o Estados Unidos. Especialmente para el caso de Chile sobresale que se considera el origen del lodo, el tipo de tratamiento del agua residual, la temperatura del proceso anaerobio, por ejemplo y la remoción de sólidos volátiles en tratamientos previos.

Se controla el transporte y almacenamiento, la temperatura y alcalinidad o acidez de los lodos y se le presta atención a la prohibición de la permanencia superior a 40 días de los lodos en laguna de estabilización a menos que algún problema de funcionamiento en la planta impida cumplir con esto, siempre y cuando se controle la emanación de olores desagradables, presencia de vectores y disminución del riesgo de que los líquidos provoquen algún tipo de contaminación en el agua o el suelo, especialmente en el caso de los llamados lodos crudos o primarios. También se controla el almacenamiento por tiempo y peso de los lodos secos en instalaciones. Esto en contraposición con nuestro país sustenta la afirmación de que la reglamentación existente carece de mejores controles en el tema de lodos residuales.

6.3.2.1 Relleno Sanitario

Esta es la opción que desde el punto de vista de control de calidad del lodo requiere menor esfuerzo. Según el reglamento nacional para el manejo y disposición de lodos y biosólidos el único requisito que se impone a la disposición de los lodos provenientes de aguas residuales ordinarias en rellenos sanitarios es un porcentaje de humedad menor al 75% y un pH dentro del rango de 5 - 12. Si existe algún otro tipo de requisito que deba cumplirse esto dependerá del operador del relleno sanitario que decida aceptar los lodos pues el reglamento no establece requisitos químicos o microbiológicos que controlen los niveles de contaminantes en los lodos.

En el caso de El Roble, aproximadamente a 10 km de la planta se ubica el proyecto de Manejo Ambiental TecnoAmbiente el cual se dedica al tratamiento de residuos sólidos, al cual podría valorarse enviar los lodos, en este caso se plantea esta opción una vez que los lodos ya

fueron deshidratados por medios mecánicos, pues de lo contrario serían lodos con un porcentaje de humedad muy alto (superior al 75%) que pueden provocar inconvenientes en el relleno sanitario lo cual es una razón por la que TecnoAmbiente no recibe lodos residuales, es importante mencionar que el porcentaje de contenido orgánico de los lodos residuales es considerablemente más alto que el que se presenta en los suelos, por lo cual es un material ideal para cuando se quiere utilizar para sembrar cubierta vegetal especialmente en sitios como rellenos sanitarios una vez que la celda alcanzó la vida útil o construcciones de gran tamaño en los cuales se debe remover la capa vegetal del suelo durante el proceso constructivo.

Pese a que como se mencionó es una opción que no demanda que el AyA incurra en más controles sobre los lodos posteriores al proceso de deshidratación, el costo asociado al transporte de los lodos al sitio de disposición final, así como el costo asociado por tonelada ingresada al relleno encarecen la opción con respecto a otras opciones. Resulta importante señalar que dentro de los alcances de este trabajo no se valora realizar un análisis económico de las opciones para el tratamiento o disposición de los lodos y biosólidos, pero se mencionan variables que intervienen para ser luego consideradas dentro de la estructura de costos que considere el AyA.

6.3.2.2 Material de relleno, caminos y obras conexas

De acuerdo con el trabajo de Solano (2015) los lodos con poco contenido de humedad, con consistencia no pastosa resultan por lo general, en un material aceptable de relleno en áreas donde no se requiera capacidad soportante del suelo, pues el suelo orgánico no tiene la resistencia necesaria para asentar obras de infraestructura. El trabajo hace especial énfasis en el uso de suelo artificial, el cual se puede definir como la mezcla del lodo con cemento con el fin de aumentar la trabajabilidad del lodo para ser utilizado para control de erosión en taludes y en la construcción de caminos. Se establece que utilizar un contenido superior al 30% de cemento en la mezcla con el lodo no se aconseja, además, se menciona que de acuerdo con el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes se podría sustituir el uso de suelo por el del lodo o suelo artificial en obras como siembra de zacate, cubierta vegetal o material de relleno.

Se comenta la posibilidad del uso del lodo y suelo artificial para la recuperación de áreas que han sido dedicadas a la explotación minera, debido a su contenido orgánico.

Es importante mencionar que si los lodos a disponer han sido dosificados con el coagulante cloruro férrico y con cal es recomendable que se analice si los compuestos químicos que tendrán los lodos, así como los suelos en los cuales se colocarán los lodos no tendrán algún tipo de reacción que sea perjudicial para el ambiente. El análisis de este punto se sale del alcance del trabajo, pero es necesario que sea considerado pues en el trabajo de Solano los lodos no fueron acondicionados con estos compuestos, tampoco se conoce la interacción entre el cemento, el cloruro férrico y la cal y si esto afecta la resistencia del suelo artificial, lo cual es algo que sería necesario evaluar en trabajos posteriores.

6.3.2.3 Mejorador de suelo

Según la investigación realizada, los lodos que son el subproducto del tratamiento de aguas residuales ordinarias son generalmente buenos mejoradores del suelo debido al contenido orgánico alto que poseen y a la presencia de elementos como fósforo, nitrógeno, hierro y manganeso que son requeridos por las plantas para su desarrollo foliar, floración y cosecha. El reglamento del país establece que si los terrenos a los cuales se les aplica el lodo residual como mejorador estarán en contacto con personas debe controlarse que el número más probable de coliformes y huevos de helminto cumplan con la clasificación de lodo tipo A, que establece que los coliformes fecales deben ser inferiores a 2000 NMP (UFC/g) y 1 huevo de helminto NMP (g).

Para el caso del lodo tipo B los coliformes fecales se sitúan dentro del requisito en el orden de dos millones y los huevos de helminto en 100 NMP siempre y cuando se apliquen los lodos siguiendo la pauta que se establece para evitar la contaminación.

En el caso de los lodos sin acondicionadores que se sometieron a prueba en la investigación de Soto (2016), se observa que el contenido de coliformes fecales en ambos lodos cumple con el reglamento y que como es esperable el contenido de estos es superior en los lodos primarios con respecto a los lodos secundarios. Esto se explica pues gran parte de

los contaminantes sedimentan en el tratamiento primario y porque el proceso biológico se encarga de la depuración de los lodos. Resulta necesario realizar pruebas para determinar la cantidad de huevos de helminto presentes en los lodos para evitar riesgos por contaminación de patógenos.

En cuanto a la calidad de los lodos desde el punto de vista agronómico, se observa que estos presentan un contenido considerable de fósforo y fosfatos, así como de otros elementos químicos, aunque en menor medida. La presencia de hierro de acuerdo con las pruebas es escasa en ambos lodos. El uso del cloruro férrico está demostrado que aumenta la presencia del hierro en los lodos, en una relación prácticamente lineal. (Carrasco, 2007). Se estima que cuando se añade coagulante se puede obtener un aproximado de 1 mg/l de fósforo.

La condición de presencia de ion ferroso en exceso (Fe^{2+}) descrita por Kass, es atípica en el país pues tanto el hierro en forma de cationes, así como el fósforo y sus compuestos no son abundantes en los suelos del país. Esta condición variaría pues como se mencionó, los lodos primarios principalmente, así como lodos biológicos al ser tratados con el cloruro de hierro aumentan la presencia de hierro y fósforo en sus diferentes formas en los lodos. Cabe mencionar que ambos son de importancia para las plantas, especialmente el hierro, por tanto, los lodos que se obtienen a partir del acondicionamiento poseen características que en condiciones normales son de mucho valor agronómico, pero no se debe dejar de lado que las condiciones del sitio en el cual serán dispuestos deben ser tomadas en cuenta para evitar una afectación en la actividad agrícola.

Otra consideración que debe hacerse con respecto a la disposición de los lodos es que el sitio donde se dispongan debe estar alejado de cuerpos de agua superficiales o zonas en las cuales los lodos puedan contaminar pozos ya sea por cercanía o debido al proceso de escorrentía, así como evitar terrenos con pendientes altas, pues los contaminantes presentes en los lodos, tanto químicos como microbiológicos podrán afectar la calidad del agua o bien poblados cercanos.

Entre las opciones analizadas, se considera que aquellas que impliquen la disposición de los lodos secos en sitios en los cuales no se tenga contacto con personas, con cultivos que puedan sufrir contaminación o con cuerpos de agua cercanos son las que representan las

mejores opciones para el AyA pues no implican que se lleven controles más estrictos sobre los lodos en cuanto a reducción de patógenos, como si lo exigen técnicas como el compostaje o el uso agrícola, por ejemplo.

Pese a que desde el punto de vista agronómico los lodos secos obtenidos tienen potencial como mejoradores del suelo, deben realizarse controles más frecuentes sobre la calidad del lodo y esto puede representar un costo adicional para la institución, podría valorarse la opción de algún tipo de alianza con alguna organización pública o privada que pueda aprovechar el potencial orgánico de los lodos y que se encargue de controlar el riesgo de contaminación por patógenos.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La planta analizada es una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo Lodos Activados con Lecho Fijo, que corresponde a una variación del sistema de lodos activados convencionales y que proporciona una mejora del tratamiento sin necesidad de ampliar las instalaciones.

Las aguas residuales que recibe la planta son de tipo ordinario y provienen de las comunidades de El Roble y parte de Barranca, Puntarenas. La planta también recibe aguas residuales de industrias cercanas tales como industria alimentaria y de agroquímicos que es posible que puedan afectar la operación del sistema, como lo sugieren algunas pruebas realizadas.

El tipo de sistema de tratamiento que se utiliza en la planta produce lodos que debido a su corto tiempo de residencia en los tanques no están estabilizados, esto genera inconvenientes en cuanto a la putrefacción y alto contenido de humedad en los lodos.

La planta produce lodos primarios en dos tanques de sedimentación primaria y lodos secundarios en cuatro reactores, de los cuales dos funcionan con un sistema de lodos activados convencionales y dos trabajan con el sistema IFAS; estos son producto de procesos de separación física y el proceso biológico, respectivamente.

El uso de un sistema de lodos activados como tratamiento para las aguas residuales implica que el volumen de lodos generados diariamente será considerablemente mayor en comparación con otros tratamientos. El volumen de lodos secundarios que se producen en El Roble es más del doble en comparación con los que se producen por medio de la separación física pues en el lodo primario se produce en un aproximado de 60 m³ diariamente en contraposición con 60 m³ provenientes del IFAS más 88 m³ provenientes del LAC.

Con respecto a la caracterización física, química y microbiológica de los lodos en la condición actual y utilizando cloruro férrico

- Las conexiones pluviales ilícitas afectan el contenido de sólidos totales en la planta de tratamiento al provocar una dilución del agua residual.
- El contenido de sólidos totales suspendidos en los lodos es alto, para el caso de los lodos primarios el promedio es de 5 392 mg/l y para los lodos secundarios es de 4 625 mg/l. Esto se ve reflejado a su vez en la prueba de sólidos volátiles, en las cuales, con excepción de un muestreo realizado, superan en más de un 80% el contenido de sólidos fijos en los lodos esto para los meses considerados en las pruebas. Este comportamiento sugiere una alta presencia de materia orgánica en el agua.
- En general, puede decirse que los lodos que se generan en la PTAR El Roble presentan una sedimentabilidad muy baja, especialmente en época seca. El uso de cloruro férrico probó mejorar la sedimentabilidad aplicado en dosis de 40 mg/l y 60 mg/l, siendo que para los casos en los cuales no se logró una adecuada formación de flóculos se estima necesario el uso de dosis superiores a 100 mg/l, para lo que se requiere realizar un número de pruebas de jarras significativo tal que, se pueda asociar las condiciones de los lodos con la dosis de cloruro férrico necesaria para alcanzar una buena sedimentación.
- Los lodos que se generan en la planta tienen un contenido de humedad muy alto pues ambos están por encima de 98% y la diferencia entre las humedades de ambos tipos de lodo no es significativa pues varía entre un 0,5% y un 1,0%
- La velocidad de deshidratación y el comportamiento de los lodos primarios y secundarios parecen seguir el mismo comportamiento pese a la diferencia en la composición que presentan. En período de estación seca se tiene que en un día los lodos pierden en promedio el 22% de humedad, mientras que en la estación lluviosa la pérdida de humedad ronda el 10%. Recordando que estos resultados son para las muestras controladas en San Pedro de Montes de Oca, se espera que en el caso

de la PTAR la pérdida de humedad sea más alta, debido a las condiciones de temperatura más altas y a una menor presencia de humedad.

- Los lodos secundarios con una consistencia coloidal o gelatinosa muestran problemas de funcionamiento en la planta debido a la presencia de bacterias filamentosas en los reactores biológicos que se debe principalmente a problemas de pH, grasas y aceites en el agua con valores por encima de lo aceptable, relación F/M inadecuada, entre otros, que facilita un desbalance en el crecimiento de bacterias de este tipo.
- El lodo secundario con problemas de hinchamiento o *bulking* dificulta la sedimentación del lodo esto de acuerdo con lo observado en las pruebas de laboratorio, pues requiere de más coagulante para precipitar y el resultado no es satisfactorio, lo que puede acarrear costos de operación y hacer menos eficiente el proceso de deshidratación de lodos.
- La acidez de los lodos se ubica dentro del rango normal aceptado para los lodos primarios y secundarios en un proceso de tratamiento de lodos activados, el cual se ubica entre 6 y 7. Cuando se dosificó el coagulante de hierro en las muestras de mayo, se observó que a mayor dosis de cloruro, la disminución del pH era notable, lo cual coincide con la teoría. Es necesario realizar más pruebas sobre la variación del pH para el caso específico de los lodos en la planta de El Roble, sin embargo, debe recordarse que es normal el uso del cloruro férrico junto con cal cuando se utiliza un sistema mecanizado para la deshidratación del lodo, lo cual vuelve el lodo alcalino.

- La remoción del fósforo y fosfatos en el tratamiento primario para el rango de dosis de coagulante que se concluyó era adecuado para la planta, se ubicaría entre un 50% y un 65% lo que significa que los lodos que se obtendrían como resultado de este proceso tendrán un potencial agronómico alto, pues junto con el hierro del coagulante y los nutrientes que ya tienen actualmente los lodos esto los convierte en material recomendable para el mejoramiento de suelos o su uso para cobertura vegetal.

Con respecto a la cuantificación de la producción de lodos

- La producción diaria estimada de lodos generados en la PTAR El Roble es de 60 m³ por día para los lodos primarios y un total de 1569 kgSS por día, en el caso de los lodos secundarios que se obtienen del proceso con IFAS se desecha diariamente un estimado de 60 m³ y de los lodos obtenidos del LAC son desechados 88 m³ cuya producción de sólidos diaria es de 1177 kgSS.
- El uso de cloruro férrico como coagulante produce un aumento en la producción de lodos y contenido de sólidos totales secos. Para la dosis de 40 mg/l el aumento en el volumen se estimó que sería de un 22% del contenido de kilogramos de sólidos secos por día, la dosis de 60 mg/l produce un aumento de 40% y la dosis más alta produciría un 57% más de lodo.
- De acuerdo con la bibliografía consultada el aumento teórico en la producción de lodos se ubica entre un 20% y un 35%, siendo que este rango es variable y depende tanto del modelo empleado para la estimación, del contenido de sólidos y características del agua cruda, así como de la dosis de cloruro utilizada.
- El volumen total de lodo producido actualmente por la planta es cercano a los 200 m³/día de acuerdo con las estimaciones realizadas, lo que produce alrededor de 50 kg/día de sólidos secos.

Con respecto al tratamiento y la disposición de lodos

- El uso de lagunas de secado como tratamiento de lodos provenientes de un sistema de lodos activados es inadecuado, pues este método se utiliza para lodos que han sido previamente estabilizados o bien, que su origen es producto de un sistema anaeróbico, condiciones que no ocurren en la planta.
- Debido al volumen diario de lodos que se genera en la planta y que es bombeado hacia las lagunas, la deshidratación que se esperaría lograr en los lodos de la planta no se alcanza pues el volumen útil de las lagunas es insuficiente para contener los lodos, así como para permitir la deshidratación.
- El alto contenido de humedad en los lodos que son retirados de las lagunas dificulta su manejo posterior y encarece los costos de traslado para su disposición final. La práctica de utilizar el lodo extraído de las lagunas para rellenar el terreno donde se ubica la planta puede representar un riesgo para la salud, pues no se realizan pruebas para verificar que no exista un riesgo debido a alta presencia de patógenos.
- Se concluye que resulta necesario el uso de un sistema mecánico para la deshidratación y tratamiento de los lodos, el cual es capaz de tratar diariamente la producción de lodo de desecho que se genera en la planta, evitando con esto el uso de las lagunas y las consecuencias que se generan debido al almacenamiento tales como malos olores debido a la putrefacción de la materia orgánica presente en los lodos primarios principalmente y a la propagación de vectores. Debe recordarse que las lagunas de secado no se recomiendan para lodos primarios provenientes de un sistema de lodos activados.
- Dentro de las opciones de sistemas mecánicos, se estima que el uso de una prensa de tornillo es la mejor alternativa pues es capaz de deshidratar en menor tiempo los lodos que se producen, a la vez que el lodo resultante ya está acondicionado lo que facilita su disposición final y su posible aprovechamiento agronómico.

- Utilizando un sistema de deshidratación mecánica se obtiene en promedio un porcentaje de sólidos en la torta de un 25%. El costo aproximado del equipo se ubica entre los ₡6.000.000 y ₡12.000.000, sin embargo, esto depende del fabricante y de costos de instalación asociados. Estos equipos pueden procesar hasta 140 kg de sólido seco por hora con un consumo estimado menor a 0,01 kW por kg de sólido seco, lo cual resulta favorable para efectos de costos de operación que deben ser considerados por AyA.
- El uso de una prensa de tornillo tiene otras ventajas pues no requiere de personal que vigile constantemente el equipo, dependiendo del fabricante el equipo tiene alternativas de autolimpieza, el ruido y la vibración son bajos lo que no afecta la salud de operarios y no afecta las instalaciones.
- El suelo artificial que se obtiene a partir de la mezcla de cemento con lodo puede utilizarse como material de relleno o para cobertura vegetal. Nunca debe utilizarse para asentar alguna estructura debido a su limitada capacidad soportante.
- El relleno sanitario como sitio de disposición final de los lodos requiere de menos controles, debe valorarse la viabilidad del uso de esta opción con respecto a la disposición en otros sitios por medio de un análisis económico que se sale del alcance del presente trabajo, que facilite la toma de decisiones con respecto al tratamiento y disposición final de lodos.
- El potencial agronómico de los lodos que utilizan cloruro de hierro es alto, debido a la escasez del hierro en los suelos del país siendo que es muy necesario para la nutrición de cultivos; pero debe prestarse atención a que el hierro y el fósforo no formen entre sí fosfatos insolubles en niveles que afecten la nutrición de los cultivos, en el caso que quiera utilizarse el lodo como mejorador de suelo en terrenos agrícolas. Cultivos de palma, piña o melón cercanos al sitio de operación de la planta pueden verse beneficiados. Viveros cercanos que también

estén dispuestos a aprovechar el contenido orgánico de los lodos son también una opción.

- Los lodos utilizados para control de erosión, material de relleno, mejoradores de suelo deben disponerse en lugares en los cuales por acción de escorrentía o contacto directo no puedan contaminar fuentes de agua o estar en contacto directo con personas.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda que el AyA controle mejor el sistema de alcantarillado sanitario y pluvial en la zona para evitar conexiones ilícitas que provoquen dilución de las aguas que ingresan al tratamiento.

De acuerdo con el resultado de las pruebas de caracterización física se observa que es posible que la industria esté incumpliendo normativa en cuanto a los efluentes y esto esté afectando el funcionamiento de la planta, principalmente en el caso del *bulking* y la presencia de sólidos fijos y que se reflejó en los muestreos realizados. Por lo tanto, se sugiere al AyA realizar controles para evitar que esas aguas afecten el proceso de tratamiento en la planta.

Se recomienda investigar más a fondo si la variación que se presenta en la disminución de sólidos totales en los lodos primarios y secundarios al aumentar la dosis de cloruro férrico es significativa, pues se observó este fenómeno en las pruebas que se realizaron, pero cuyos resultados no se incluyeron dentro de este análisis, pues no se consideraron relevantes.

Aunque se recomienda la dosis de 40 mg/l como la dosis adecuada para los lodos, siguiendo los resultados de la investigación de Chacón (2018) los resultados obtenidos de sedimentabilidad y formación de flóculos robustos y pesados no se presenta de manera satisfactoria, por lo que se sugiere realizar más pruebas con dosis de 100 mg/l o superiores, pero en este caso para la adición del cloruro férrico a los lodos de desecho directamente y no teniendo el limitante de no remover casi la totalidad del fósforo, fosfonatos y fosfatos del agua cruda. Ampliando esta misma recomendación, los resultados de pruebas más extensas son útiles para la calibración y determinación de las dosis a utilizar una vez que se implemente la solución de tratamiento de deshidratación mecánica.

Mejorar los controles en la PTAR El Roble, pues de acuerdo con las pruebas de laboratorio en dos de los cinco muestreos que se realizaron en diferentes períodos de tiempo, se presentó un hinchamiento en los lodos secundarios, lo que sugiere la existencia de problemas en la operación y control del tratamiento de las aguas residuales que está alterando el crecimiento de las bacterias en los reactores biológicos.

Se recomienda realizar pruebas de huevos de helminto y salmonella en los lodos. Aunque la prueba de salmonella no es requerida en el país, los brotes que ocasiona esta bacteria representan un problema de salud pública pues si el lodo primario y el lodo biológico son dispuestos en zonas agrícolas con un control deficiente en el proceso, es posible que los alimentos o plantas que entren en contacto con el lodo puedan contaminarse, por lo que es imperativo minimizar el riesgo de brotes en la población o la contaminación de fuentes de agua o cuerpos superficiales.

Se requiere más investigación con respecto al cambio en las características de los lodos al utilizar cloruro férrico con cal, se sabe que es recomendable el uso de cal cuando los lodos han alcanzado al menos un 75% de humedad como máximo pues de lo contrario disminuyen la velocidad de deshidratación en los lodos.

Se sugiere para trabajos posteriores el análisis para nuestro país sobre el posible efecto que pueda tener el uso del cloruro férrico sobre el ecosistema acuático, pues existe evidencia de que el uso del cloruro afecta el crecimiento de las cianobacterias, así como la fertilidad de un tipo de crustáceo mediante un estudio que se realizó en Nueva Zelanda. Es recomendable que el AyA considere que el riesgo de aumento en la toxicidad del agua cuando se utiliza el coagulante es probable por lo que se debe analizar de manera más específica el aumento del hierro en el agua.

Se recomienda efectuar un análisis de costo beneficio con respecto a las opciones aquí evaluadas para el tratamiento y disposición de los lodos, con el fin de encontrar la combinación de opciones que resulte más favorable en términos de operación y costos para el AyA.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Textos

Andreoli, C. Von Sperling, M. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series: Sludge Treatment and Disposal*. Volume Six. Londres: Iwap Publishing Alliance House.

Baudrit, D. (2015). *Caracterización física, química y microbiológica de los lodos generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales ordinarias y sus posibles usos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Chacón, A. (2018). *Propuesta de optimización del proceso de tratamiento de aguas residuales en la planta de tratamiento de El Roble de Puntarenas*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Kass, D. (1996). *Fertilidad de Suelos*. San José: EUNED.

Metcalf & Eddy, I. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse – 4th ed.* New York: Mc Graw Hill.

Orozco, Alvaro. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales*. Acodal, Colombia.

Redondo, A. (2014). *Propuesta para el manejo y disposición de lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable de Tres Ríos*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Rivera, J. (2012). *Caracterización geotécnica de un prototipo de suelo artificial*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Solano, V. (2015). *Caracterización mecánica y ambiental para la aplicación geotécnica de un suelo artificial elaborado a partir de lodos de diferentes edades, provenientes de una planta de tratamiento de agua residual doméstica*. Proyecto de graduación para optar por el

grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José.

Vidal, Paola. (2016). Notas de curso Análisis Ambiental I. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Referencias electrónicas

Asano, T. (1998). *Wastewater Reclamation and Reuse*. Florida, Estados Unidos. Recuperado de: <https://books.google.co.cr/books?id=9vAGkleP234C&lpg=PA174&dq=ferric%20chloride%20murcott%20model&hl=es&pg=PA174#v=onepage&q=ferric%20chloride%20murcott%20model&f=false>

Andía, Y. (2000). Tratamiento de Agua: Coagulación y Floculación. Recuperado de: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

Angulo, F. (2013). *Manejo, disposición y desecho de las aguas residuales en Costa Rica*. Recuperado en: http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/019/angulo_2013.pdf

Carrasco, C. (2007). *Tratamiento físico químico de aguas residuales*. Memoria de graduación para optar por al título de ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago. Recuperado de: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/carrasco_c/sources/carrasco_c.pdf

Instituto Meteorológico Nacional. (2009). Atlas Climatológico. Recuperado de <http://www.imn.ac.cr/>

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes. Disponible en: www.conavi.go.cr/wps/wcm/connect/c341d35f-7579-4b76-8250-576edbe47fe0/CR-2010.pdf?MOD=AJPERES

SEMARNAT, México. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y

disposición de lodos. Recuperado de: <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro50.pdf>

Sans, R. Ribas, J. (1989). Ingeniería Ambiental: contaminación y tratamientos. Recuperado de: <https://books.google.co.cr/books?id=kumplOJs6T0C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Artículos

Snurer, H. (2007). *Sludge production from chemical precipitation*. Lund Institute of Technology. Recuperado de <http://www.chemeng.lth.se/exjobb/E294.pdf>

Harland, F. Wood, S. (2013). Phormidium autumnale Growth and Anatoxin-a Production under Iron and Copper Stress. Dec; 5(12): 2504–2521. doi 10.3390/toxins5122504

Reglamentos

Ministerio de Salud de Salud de Costa Rica. Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos. (2015). Recuperado de http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/reglamento_manejo_y_disposicion_final_lodos_y_biosolidos.pdf

Ministerio de Salud de Costa Rica. Reglamento sobre Valores Guía en Suelos para descontaminación de Sitios Afectados por Emergencias Ambientales y Derrames (2013). Recuperado de www.digeca.go.cr/file/194/download?token=8AvcqzY

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de laboratorio de ensayos de caracterización física

25/10/2016		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Lodos primarios	112.633	112.763
Lodos secundarios	114.668	114.765
24/01/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Lodos primarios	114.676	115.656
Lodos secundarios	114.071	114.72
16/02/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Sin dosis		
Lodos primarios	113.186	113.621
Lodos secundarios	117.679	118.241
17/03/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Sin dosis		
Lodos primarios	114.06	115.933
Lodos secundarios	110.87	111.566
03/05/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Sin dosis		
Lodos primarios	112.632	113.244
Lodos secundarios	119.452	119.994

25/10/2016		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Lodos primarios	112.633	112.763
Lodos secundarios	114.668	114.765
24/01/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Lodos primarios	114.676	115.656
Lodos secundarios	114.071	114.72
16/02/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Sin dosis		
Lodos primarios	113.186	113.621
Lodos secundarios	117.679	118.241
17/03/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Sin dosis		
Lodos primarios	114.06	115.933
Lodos secundarios	110.87	111.566
03/05/2017		
Sólidos totales	Pi (g)	Pf (g)
Sin dosis		
Lodos primarios	112.632	113.244
Lodos secundarios	119.452	119.994

03-05-2017			
Sólidos volátiles	Pi (g)	Pf (g)	Peso de sólidos (g)
Sin dosis			
Lodos primarios	30.722	30.870	0.148
Lodos secundarios	34.990	35.037	0.047
Sólidos volátiles	Pi (g)	Pf (g)	Peso de sólidos (g)
Dosis de 20 mg/L			
Lodos primarios	23.621	23.708	0.087
Lodos secundarios	24.367	24.389	0.022
Sólidos volátiles	Pi (g)	Pf (g)	Peso de sólidos (g)
Dosis de 40 mg/L			
Lodos primarios	30.712	30.874	0.162
Lodos secundarios	34.997	35.024	0.027
Sólidos volátiles	Pi (g)	Pf (g)	Peso de sólidos (g)
Dosis de 60 mg/L			
Lodos primarios	23.601	23.69	0.089
Lodos secundarios	24.365	24.39	0.025