

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

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

**“Mejoramiento de la calidad del lodo de la PTAR Lagos de Lindora, en San José,
Costa Rica”**

Ericka Lucía Sánchez Castillo

CARTAGO, febrero, 2021



“Mejoramiento de la calidad del lodo de la PTAR Lagos de Lindora, en San José, Costa Rica”

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

Miembros del tribunal

MS. Eng. Diana A. Zambrano Piamba
Directora

MS. Eng. Ernesto Alfaro Arrieta
Lector 1

MS. Eng. Andrés Lazo Páez
Lector 2

MS. Eng. Diana A. Zambrano Piamba
Coordinadora COTRAFIG

MGA. Ricardo Coy Herrera
Director Escuela de Química

MS. Eng. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mi familia por estar en cada lágrima y cada risa

A mi abuelita Tere que me cuida desde el cielo

A mi perrito Coffee, en sus ojitos se refleja el universo entero

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ponerme en el lugar correcto durante el momento adecuado, por darme la fortaleza para llegar hasta donde estoy, por tantas bendiciones que me brinda día con día. No me alcanzaría la vida para terminar de agradecer a mis papás, Lucy y Oscar, por ustedes soy la persona que soy hoy y no podría sentirme más orgullosa de ver todo el esfuerzo que han hecho por mí. A mi hermano Oscar por ser mi cómplice de aventuras y compañero durante estos 23 años, mi ejemplo a seguir.

A mi abuelita Carmen, todos mis tíos, primos y familiares que siempre me alentaron a seguir y me motivaron externándome su orgullo. A doña Salomé, don Juan Alexis y Jean Carlo por ser una gran familia y recibirme con tanto cariño siempre. A Roberto, quien estuvo a mi lado cuando atravesaba los caminos más tortuosos de este proceso.

Gracias infinitas al CIPA, Luis Romero y a don Freddy, su aporte fue fundamental en la realización de este proyecto. Agradezco a todo el personal del Laboratorio Nacional de Aguas por el recibimiento tan cálido, a don Juan por toda la ayuda y a Andrei por las enseñanzas y los momentos tan amenos. A Ernesto Alfaro, quien con su gran carisma y paciencia me ayudó a crecer no solo como profesional, sino también como persona, además de estar en cada paso en el laboratorio. A Ernesto Jiménez por la oportunidad. A Gilberto Saborío, operador de la PTAR Lagos de Lindora por atender todas mis consultas y apoyarme con los muestreos.

Gracias a mis compañeros del GDTP Puebla de los Pardos, por la familia tan alegre en la que nos hemos convertido. Al profe Carlos Montiel por escuchar y comprender. A la Dra. Melissa Cervantes por los consejos y el soporte en tiempos difíciles. A las familias Leiva Rojas, Ramírez Alfaro y Ramírez Schipp que durante toda mi etapa universitaria me desearon lo mejor.

A todos mis amigos y compañeros del TEC. A Alejandro Solís, Max Hronek y Lucía Gómez por estar desde el primer día. Gracias a Marian Guzmán por acompañarme durante estos meses de tanto trabajo. A Jhonny Brenes, Stephanny Rodríguez y Karolina Moya, los quiero con toda mi alma. A Johann Corrales y Giancarlo Vargas, por ayudarme a confiar más en mí y por ser grandes escuchas y consejeros. A Gabriel Coto y Stephanie Rojas, siempre voy a llevar en mi corazón cada prueba que superamos juntos, saben que siempre pueden contar conmigo, como ustedes han estado para mí. A Gabriela Fonseca y Raquel Jiménez por ser mis amigas de toda la vida, por el apoyo que siempre nos damos unas a otras y las porras por los éxitos de todas. Infinitas gracias a María Brenes y Mauricio Sanabria, estar con ustedes es como estar en casa. A Jesús Gaytán, el mejor amigo a distancia, porque aún con esta, siempre ha sido un gran apoyo.

A todos los profes del TEC y de la carrera de Ingeniería Ambiental, quienes son luz en el camino hacia nuestra formación profesional en todos los ámbitos. A mi tutora y profe favorita por siempre, Diana Zambrano, su amor por este oficio me ayudó a ser quien soy, la admiro y guardo en mi corazón cada palabra suya, de empoderamiento, amor por lo que hacemos, enseñanzas técnicas y de la vida. Espero un día poder transmitirle a la gente mis conocimientos con la misma pasión con la que usted lo hace. Gracias por todo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	Objetivo general.....	3
2.2.	Objetivos específicos	3
3.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1.	Situación actual de saneamiento en Costa Rica.....	4
3.2.	Biosólidos	6
3.2.1.	<i>Definición</i>	6
3.2.2.	<i>Características físicas, químicas y microbiológicas</i>	7
3.2.2.1.	<i>Huevecillos de helmintos y coliformes fecales como indicadores</i>	8
3.2.3.	<i>Tipos de lodos y biosólidos</i>	9
3.3.	Tratamiento de lodos fecales	10
3.3.1.	<i>Desinfección o secado solar</i>	11
3.3.2.	<i>Estabilización con alcalinizantes</i>	12
3.4.	Impactos positivos y negativos de tratamiento de lodos fecales.....	13
3.5.	Legislación vigente en Costa Rica.....	15
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.1.	Sitio de estudio.....	17
4.2.	Caracterización de lodos	19
4.2.1.	<i>Muestreo</i>	19
4.2.2.	<i>Análisis fisicoquímicos</i>	19
4.2.3.	<i>Análisis microbiológicos</i>	21
4.3.	Evaluación de tratamientos	22
4.3.1.	<i>Diseño experimental</i>	22
4.3.1.1.	Secado solar	22
4.3.1.2.	Alcalinización	24
4.3.1.3.	Secado solar + alcalinización.....	25
4.3.2.	<i>Análisis fisicoquímicos</i>	25
4.3.3.	<i>Análisis microbiológicos</i>	26

4.4.	Determinación de la técnica factible y los parámetros operativos.....	26
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
5.1.	Caracterización del lodo	27
5.2.	Evaluación de tratamientos	31
5.2.1.	<i>Secado solar</i>	31
5.2.2.	<i>Alcalinización</i>	40
5.2.3.	<i>Secado solar + alcalinización</i>	43
5.3.	Determinación de la técnica factible y el procedimiento operativo.....	45
5.3.1.	<i>Comparación de tratamientos</i>	45
5.3.2.	<i>Parámetros de diseño</i>	47
5.3.2.1.	Dosificación de alcalinizante	51
5.3.3.	<i>Manual de operación y mantenimiento</i>	52
5.3.4.	<i>Análisis económico</i>	52
6.	CONCLUSIONES	59
7.	RECOMENDACIONES	60
8.	REFERENCIAS.....	61
9.	ANEXOS	65
9.1.	Procedimiento para la determinación de huevecillos de helmintos en muestras de lodo.	65
10.	APÉNDICES.....	68
10.1.	Información meteorológica utilizada para la comparación de condiciones climáticas entre el sitio de estudio y el utilizado para realizar las pruebas.	68
10.2.	Manual de Operación y Mantenimiento para el tratamiento de lodos de la PTAR Lagos de Lindora.	

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Lechos de secado PTAR Lagos de Lindora. a) Lodo en proceso de sedimentación/concentración, b) Deshidratación del lodo.	18
Figura 4.2. Diagrama de procesos de la PTAR Lagos de Lindora.	19
Figura 4.3. Deshidratadores para diseño experimental (a), lecho de secado (b).	23
Figura 4.4. Mezcla de cal con lodo.....	24
Figura 5.1. Huevecillos de helmintos encontrados en las muestras de lodo de la PTAR Lagos de Lindora. a) <i>Taenia</i> sp; b), c) y d) <i>Uncinaria</i> sp.....	28
Figura 5.2. Temperaturas promedio diarias de dos estaciones meteorológicas durante el tratamiento de secado solar efectuado en época lluviosa.	33
Figura 5.3. Promedio diario de humedad relativa de dos estaciones meteorológicas durante el tratamiento de secado solar efectuado en época lluviosa.	33
Figura 5.4. Promedio diario de la radiación horaria máxima de dos estaciones meteorológicas durante el tratamiento de secado solar efectuado en época lluviosa.	34
Figura 5.5. Características de las tortas de lodo según tiempo de exposición.....	36
Figura 5.6. Sólidos totales (a) y % de humedad (b) para las muestras tratadas mediante secado solar a dos diferentes alturas de lecho.	37
Figura 5.7. Comportamiento de los sólidos volátiles durante el tratamiento de secado solar a dos diferentes alturas de lecho.....	38
Figura 5.8. Huevecillos de helmintos por gramo de materia seca cuantificados en las muestras con tratamiento de secado solar.....	38
Figura 5.9. UFC de Coliformes Fecales por gramo de materia seca detectadas en las muestras con tratamiento de secado solar.....	39
Figura 5.10. Huevecillos de helmintos por gramo de materia seca cuantificados en las muestras tratadas con la técnica de alcalinización.....	41
Figura 5.11. Cuantificación de UFC de Coliformes Fecales por gramo de materia seca en las muestras tratadas con alcalinizante.....	41
Figura 5.12. Determinación de Huevecillos de helmintos por gramo de materia seca en el tratamiento de secado solar + alcalinización.	44
Figura 5.13. UFC de Coliformes Fecales por gramo de materia seca contabilizadas en las muestras tratadas con secado solar + alcalinización.....	44
Figura 5.14. Comparación de los tratamientos de secado solar y secado solar + alcalinización mediante el parámetro Huevecillos de helmintos.....	45

Figura 5.15. Comparación de los tratamientos de secado solar y secado solar + alcalinización mediante el parámetro Coliformes Fecales.	46
Figura 5.16. Rutina de operación para el escenario 1.....	49
Figura 5.17. Rutina de operación para el escenario 2.....	50

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Límites máximos permisibles de los parámetros de análisis obligatorio para biosólidos ordinarios según su disposición final.	16
Cuadro 4.1. Diseño experimental según los parámetros utilizados en el tratamiento de secado solar. 23	
Cuadro 4.2. Diseño experimental según los parámetros utilizados en la alcalinización.	24
Cuadro 4.3. Diseño experimental según los parámetros utilizados en el tratamiento de secado solar + alcalinización.	25
Cuadro 5.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo residual crudo.	27
Cuadro 5.2. Análisis químico completo para abonos orgánicos.	30
Cuadro 5.3. Parámetros meteorológicos determinados durante el tratamiento de secado solar realizado en época lluviosa según el promedio diario.	32
Cuadro 5.4. Análisis estadístico de datos de las estaciones meteorológicas analizadas durante el tratamiento de secado solar en época lluviosa, con un 95% de confianza.	34
Cuadro 5.5. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de lodo tratadas mediante la técnica de secado solar con dos diferentes alturas de lecho.	37
Cuadro 5.6. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de lodo crudo tras la aplicación de alcalinizante.	40
Cuadro 5.7. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de lodo tratadas mediante secado solar y alcalinización.	43
Cuadro 5.8. Parámetros recomendados para el tratamiento de los lodos de la PTAR Lagos de Lindora. 46	
Cuadro 5.9. Dimensiones actuales de cada lecho de secado de la PTAR Lagos de Lindora. 47	
Cuadro 5.10. Análisis económico anual bajo un escenario netamente financiero.	53
Cuadro 5.11. Características del fertilizante químico y del biosólido en estudio.	54
Cuadro 5.12. Datos para el cálculo de las emisiones de CO ₂ equivalente.	56
Cuadro 5.13. Análisis económico anual bajo un escenario costo-beneficio.	57
Cuadro 9.1. Equipo utilizado en el procedimiento de determinación de huevecillos de helmintos.	65
Cuadro 10.1. Datos meteorológicos tomados de la estación del ITCR en Cartago durante el mes de junio para el tratamiento de secado solar.	68
Cuadro 10.2. Datos meteorológicos tomados de la estación del Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños en San José durante el mes de junio para el tratamiento de secado solar. ..	70

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
AYA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MS	Ministerio de Salud
CIPA	Centro de Investigación en Protección Ambiental
ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
USEPA	United States Environmental Protection Agency
CIA	Centro de Investigación Agronómica
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas
PNSAR	Plan Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales
Ca(OH)₂	Hidróxido de calcio
CaO	Óxido de calcio
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
HH	Huevecillos de helmintos
CF	Coliformes Fecales
mFC	Medio de cultivo para coliformes fecales
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
pH	Potencial de hidrógeno
CE	Conductividad eléctrica
C/N	Relación Carbono/Nitrógeno
UCC	Unidades Costarricenses de Compensación

RESUMEN

La producción de lodos fecales ha presentado un aumento significativo a nivel mundial derivado del crecimiento poblacional. Un manejo inadecuado de los lodos puede traer graves consecuencias para los ecosistemas y la salud pública. En la PTAR Lagos de Lindora (Santa Ana, San José), se producen anualmente 30,8 toneladas de lodo digerido aeróbicamente y deshidratado por lechos de secado, que son dispuestos actualmente en sus instalaciones. En este estudio se plantean tres opciones de tratamiento orientadas a disminuir la carga patógena, con lo que se pretende generar un biosólido seguro y con la calidad óptima para que sea aprovechable, según los parámetros establecidos en la normativa costarricense. Los tratamientos fueron secado solar a dos diferentes alturas de lecho (0.15 m y 0.20 m) y 4 tiempos de secado (5, 10, 17 y 24 días), alcalinización con tres dosificaciones de CaO (0.12, 0.20 y 0.25 g/g) y dos tiempos de contacto (2 y 24 h), además de un secado solar con posterior adición de cal a los 5 y 10 días de exposición al sol, con dosis de 0.20 y 0.25 g/g por un tiempo de contacto de 24 h. Con el secado solar después de 17 días se consiguió alcanzar el porcentaje de humedad requerido, los parámetros microbiológicos se encontraron muy por encima de los límites máximos permisibles para un biosólido clase B. La alcalinización permitió eliminar gran parte de los patógenos, pero no contribuyó a la deshidratación del lodo. El secado solar durante 17 días junto con alcalinización al quinto día de secado fue el tratamiento que mostró los resultados más favorables en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, generando un biosólido de clase B. El tratamiento propuesto es económicamente factible y el biosólido cuenta con una gran cantidad de nutrientes que lo hacen apto para el uso en actividades agrícolas o enmienda de suelos.

Palabras clave: *PTAR, Secado solar, Alcalinización, Biosólido, Indicadores microbiológicos*

ABSTRACT

The production of sewage sludge has presented a significant increase worldwide derived from population growth. Inadequate management of sludge can have serious consequences for ecosystems and public health. At the Lagos de Lindora WWTP (Santa Ana, San José), 30.8 tons of sludge are produced annually, which are disposed of at its facilities. In this study, three treatment options are proposed with the intention to generate a safe biosolid with the optimum quality so it can be usable, according to the parameters established in the Costa Rican regulations. The treatments were solar drying at two different bed heights (0.15 m and 0.20 m) and 4 drying times (5, 10, 17 and 24 days), alkalization with three CaO dosages (0.12, 0.20 and 0.25 g/g) and two contact times (2 and 24 h), and finally a solar drying with subsequent addition of lime after 5 and 10 days of sun exposure, with doses of 0.20 and 0.25 g/g for a contact time of 24 hours. With solar drying after 17 days, the required humidity percentage was achieved, the microbiological parameters were above the maximum permissible limits for a class B biosolid. The alkalization eliminated most of the pathogens but did not contribute to the dewatering of the sludge. The treatment that showed the most favorable results in the physical-chemical and microbiological parameters was solar drying for 17 days together with alkalization on the fifth day of drying, generating a class B biosolid. The treatment is economically feasible and the biosolid has a large amount of nutrients that make it suitable for reuse in agricultural activities or soil recovery.

Key words: *WWTP, Solar drying, Alkalization, Biosolid, Microbiological indicators*

1. INTRODUCCIÓN

Los lodos derivados del tratamiento de las aguas residuales son el residuo sólido generado después de procesos como los lodos activados, filtro anaerobio de flujo ascendente, en sistemas como tanques sépticos, entre otros. Cada vez son más los lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales debido al aumento poblacional, lo cual causa preocupación por los factores ambientales, sociales y económicos que se puedan dar a raíz de este material (Gherghel, Teodosiu & De Gisi, 2019). Un manejo inadecuado de los lodos fecales puede traer graves consecuencias ambientales debido a la peligrosidad según las características del agua residual, los productos químicos utilizados y las reacciones presentadas en el proceso. Por esto, las agencias ambientales internacionales y entes encargados a nivel nacional han implementado reglamentos y alternativas para el tratamiento, disposición o aprovechamiento de este material (Andreoli, 2001).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Lagos de Lindora tiene dentro de sus objetivos principales la reducción de la contaminación de fuentes de agua, así como la disminución de los riesgos asociados a la salud de las personas. Se estima que los beneficios generados por esta planta llegan de forma directa e indirecta a 1 700 habitantes cuyas aguas residuales son captadas para brindarles un tratamiento adecuado (Presidencia, 2017). Anualmente se generan alrededor de 30,8 toneladas de lodos, estos son digeridos aeróbicamente como parte del proceso de operación y se colocan en lechos de secado para disminuir su contenido de humedad. Posteriormente, son dispuestos en una zanja en las instalaciones de la planta.

A nivel mundial, los lodos se han empezado a ver como un producto valioso y ya no como un desecho. Aún gran cantidad de estos son llevados a rellenos sanitarios, pero también pueden utilizarse en la aplicación controlada al suelo debido a su alto contenido de nutrientes, en el campo de la energía o para generar algún bien para la población (Andreoli, 2001). Para que puedan ser aprovechados, es necesario que los lodos cuenten con ciertas características de sanidad con el fin de que no existan afectaciones a la salud humana ni al medio ambiente. Existen diversos tratamientos que pueden utilizarse para estabilizar e higienizar el lodo fecal. Dentro de los más comunes se encuentran el compostaje, el secado solar, la estabilización química, incineración, digestión anaerobia, tratamiento con amoníaco, entre muchos otros (Strande, Ronteltap & Brdjanovic, 2014). Para el presente estudio se decidió trabajar con secado solar y estabilización química mediante alcalinización. Actualmente en la planta se manejan lechos de secado solar, por lo que ya se cuenta con la infraestructura necesaria. Así mismo, la alcalinización es uno de los tratamientos menos costosos y más eficientes en la remoción de microorganismos patógenos según algunos investigadores (Silva-Leal, Bedoya Ríos & Torres-Lozada, 2013).

Con esta investigación se pretende identificar y evaluar las diferentes variables de tratamiento en el secado solar, la alcalinización y una combinación de ambos con el fin de determinar una técnica factible que permita mejorar el procedimiento operativo actual. Para esto se realizó un monitoreo de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas tanto al lodo crudo para su caracterización como a cada uno de los tratamientos manejados. También se analizó el contenido de nutrientes. Adicionalmente, se confeccionó un Manual de Operación y Mantenimiento en donde se describen todos los pasos del tratamiento propuesto y algunas recomendaciones. A la hora de formular la propuesta, se tomaron en cuenta factores técnicos, ambientales y económicos, de manera que esta fuera viable y se adaptara a las necesidades reales de la planta, demostrando los beneficios que se podrán obtener, como la generación de un biosólido con la calidad apta para su uso.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Mejorar la calidad microbiológica del lodo generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Lagos de Lindora

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los lodos de la PTAR Lagos de Lindora.
- Evaluar diversos tratamientos para la higienización del lodo de la PTAR Lagos de Lindora.
- Determinar la técnica de higienización factible y los parámetros operativos para el mejoramiento de la calidad del lodo de la PTAR Lagos de Lindora.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Situación actual de saneamiento en Costa Rica

A nivel nacional, el sistema de tratamiento de aguas residuales más común es el tanque séptico, alrededor del 75,77% de los hogares poseen esta tecnología que, a pesar de contar con diversas ventajas, brinda solamente un tratamiento primario, por lo que las aguas y los lodos provenientes de éstos no cuentan con la calidad óptima para su vertido en cuerpos de agua (Programa Estado de la Nación, 2017).

Para el año 2015, la población costarricense era de 4 832 227 habitantes y tomando el supuesto de que cada persona genera 0,2 m³/día de aguas residuales, en el país se producen 966 455 m³/día de estas aguas de tipo ordinario. Sumando los caudales tratados en las diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) autorizadas, solo 139 498 m³/día de las aguas reciben un tratamiento adecuado, lo cual representa el 14,43% de las aguas ordinarias generadas (Acueductos y Alcantarillados [AyA], Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE] & Ministerio de Salud [MS], 2016).

Según el Programa Estado de la Nación del año 2019, el dato de los hogares que hacen uso del tanque séptico como su tecnología de tratamiento para aguas residuales se mantiene muy similar con respecto a los estudios anteriores, con un 75,4%. El 22,9% de la población dispone estas aguas en sistemas de alcantarillado, de este porcentaje el tratamiento alcanza solamente el 14%, como se mencionó anteriormente. Es importante destacar que aún un 1,4% hace uso de letrinas y un 0,3% realiza sus evacuaciones a cielo abierto. La carencia de sistemas de alcantarillado lleva a que las aguas residuales de muchos hogares sean vertidas directamente en quebradas y ríos. Por otra parte, la disposición de residuos sólidos como comida y grasas, así como las conexiones ilegales afectan la condición de infraestructura de los sistemas y el nivel de tratamiento de las aguas (AyA, 2017). Estos datos indican que hay un rezago importante en las metas que se han planteado en el país en cuanto a saneamiento y se registra una contaminación significativa de las fuentes de agua (Programa Estado de la Nación, 2019).

Los entes encargados del tratamiento de aguas residuales en el país son los mismos que brindan el servicio de abastecimiento de agua potable, que corresponden al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), quien es el ente rector, las Asociaciones de Acueductos Comunales, las municipalidades que cuentan con acueducto y la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH). Estas instituciones no tienen los fondos suficientes para financiar los sistemas de saneamiento que el país requiere, por lo que se optó por crear un plan de inversiones que forma parte de la Política Nacional de Saneamiento en

Aguas Residuales (PNSAR), con la que se puedan desarrollar nuevos proyectos y mejoras en los sistemas existentes (AyA, 2017).

Con el Plan Nacional de Inversión se pretende expandir el saneamiento de aguas residuales en las zonas tanto urbanas como rurales, además de habilitar sistemas de saneamiento en las áreas rurales en donde aún no se cuenta con infraestructura ni tecnologías de tratamiento. La inversión de todo el proyecto ronda los \$6 224 millones y se espera que esté completado para el año 2045 (AyA, 2017). Por su parte, la PNSAR cuenta con 5 ejes de acción los cuales son el fortalecimiento institucional y normativo, la gestión integrada, infraestructura e inversión, sostenibilidad financiera y modelo tarifario, así como la participación de los ciudadanos. Al tratarse de una política cuenta con la ventaja de mantener su continuidad a través de los diferentes gobiernos, cuyo compromiso de cumplir los objetivos es esencial al tratarse de metas a largo plazo (AyA, MINAE & MS, 2016).

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se plantea una disminución significativa del efecto negativo que la producción de aguas residuales pueda tener en los ecosistemas, mediante el uso de sistemas de tratamiento adecuados según las necesidades de cada caso en específico. Con ello, la PNSAR se convierte en el primer referente a nivel nacional con respecto a lo que se espera del sector en relación con dichos objetivos (AyA, MINAE & MS, 2016).

La política se enfoca en gran parte a resolver problemas tecnológicos y de infraestructura como la baja cobertura de alcantarillado sanitario y los tratamientos inadecuados que se les brindan a las aguas residuales; sin embargo, a su vez se ataca uno de los mayores problemas que enfrenta Costa Rica en el eje de saneamiento, su afectación a la salud pública (AyA, 2017). No se pueden dejar de lado los grandes beneficios que traerá consigo la PNSAR en los temas de conservación de cuerpos de agua y la sostenibilidad del recurso hídrico (AyA, MINAE & MS, 2016).

Si bien, existen ya metas definidas para la mejora del saneamiento, así como legislación y reglamentación, la realidad en gran cantidad de casos es muy distinta por lo que es imperante continuar trabajando en el tema. Por ejemplo, debido a los múltiples tanques sépticos y el vertimiento de aguas residuales directo en ecosistemas, tanto las aguas superficiales como las subterráneas están resultando altamente contaminadas (Consejo Nacional de Planificación Urbana [CNPU], 2013). Uno de los mayores problemas de contar con un porcentaje tan alto de estos tanques es que generalmente no se cuenta con estudios de tipo de suelo que permitan conocer las condiciones de este a la hora de construirlos. Al utilizar un sistema de tratamiento de esta naturaleza es necesario conocer el grado de filtración presente, para analizar la funcionalidad o el nivel de contaminación que podría causarse. En suelos con una baja filtración es posible que se contaminen los cuerpos superficiales de agua, así como en zonas de alta filtración pueden contaminarse los mantos acuíferos subterráneos. Es un

factor para tener en cuenta ya que el 70% del agua que se aprovecha en el país es de origen subterráneo, con lo cual se pone en riesgo la salud de los ciudadanos (AyA, 2017).

El uso de tanques sépticos también implica la depuración periódica de los lodos, y su posterior tratamiento. Existen algunas compañías que se dedican a este trabajo, sin embargo, no todas las personas acostumbran a darle un buen mantenimiento a los sistemas de sus hogares. Según datos brindados por las compañías que cuentan con permisos vigentes, es posible tratar un total de 1 439 m³/día de lodos. Por otra parte, existen reportes de camiones cisterna que trabajan de manera ilícita, los cuales vierten las aguas y lodos residuales en lugares no aptos ni permitidos para tal fin, como alcantarillas, ríos o lotes baldíos, provocando una mayor contaminación (AyA, MINAE & MS, 2016).

Algunas de las empresas que se dedican al tratamiento de lodos lo comercializan como abono orgánico una vez que este es apto para su uso. Sin embargo, una de las maneras más comunes en que son dispuestos los lodos fecales es llevándolos a rellenos sanitarios, especialmente aquellos de PTARs con una alta generación de estos. Según estimaciones, en Costa Rica se envían 3 132 toneladas de residuos sólidos por día a los rellenos sanitarios o vertederos controlados (Programa Estado de la Nación, 2019). Para asegurar alargar el tiempo de vida de los sitios de disposición final es de suma importancia reducir la cantidad de desechos y materiales que están siendo enviados a los mismos, así como implementar conceptos de economía circular en los diferentes sectores.

Gherghel et al. (2019) señalan que el manejo de los lodos residuales se está convirtiendo en un problema global, tomando en cuenta el crecimiento poblacional y la capacidad de las plantas de tratamiento de brindar una adecuada higienización. Por ello, Mosquera-Losada et al. (2017) consideran de suma importancia brindarle valor a este tipo de residuo, para disminuir su disposición final en los rellenos sanitarios y obtener un producto de gran utilidad. Al introducir la bioeconomía o economía circular a los procesos no solamente se presentarán beneficios en el área ambiental sino también se reflejarán efectos positivos en el ámbito social mientras se logra un crecimiento económico sostenible.

3.2. Biosólidos

3.2.1. Definición

Las aguas residuales cuentan con una parte sólida o semisólida dentro de su composición, la cual es conocida como lodo (Al-Gheethi et al., 2018). Durante las fases presentes en el tratamiento de aguas residuales se pueden identificar diferentes tipos de lodo. Por una parte,

se encuentran los lodos no estabilizados biológicamente (en ocasiones llamados “lodos crudos”), estos a su vez se subdividen en primarios y secundarios. Ambos provienen de etapas como el sedimentador primario, trampa de grasas, procesos de lodos activados y biofiltros aerobios. Así mismo, se pueden encontrar lodos estabilizados biológicamente, los cuales han pasado por un proceso o tratamiento que favorece la reducción de gran cantidad de microorganismos patógenos (López, Ramírez, Gomes y Morgan-Sagastume, 2017). Los lodos fecales son un subproducto inevitable de los procesos de tratamiento de aguas residuales, que pueden concentrar la mayor parte de sustancias contaminantes (Buonocore, Mellino, De Angelis, Liu & Ulgiati, 2016).

Según Foster-Martínez y Variano (2018), antes de 1991, se le llamaban lodos a la parte sólida de las aguas residuales en cualquier fase de tratamiento; sin embargo, después del crecimiento tecnológico y los diferentes sistemas de tratamiento emergentes, la institución Water Environment Federation estableció que se utilizara el término biosólidos para aquellos lodos que habían sido tratados y eran seguros para su reutilización. De esta forma, los biosólidos son aquellos lodos de aguas residuales que han sido sometidos a diversos tipos de tratamiento con el fin de que cumplan con los parámetros requeridos para un uso beneficioso, o bien, para que causen el menor impacto a la salud y a los ecosistemas (Al-Gheethi et al., 2018).

3.2.2. Características físicas, químicas y microbiológicas

En general, los lodos están conformados por una mezcla activa de agua, materia orgánica, diversos tipos de microorganismos (bacterias, virus, protozoos y helmintos) y una serie de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos (Kacprzak et al., 2017). Dependiendo del origen de los lodos, sus características y composición van a presentar variaciones. Esto también implica que el tratamiento que debe aplicarse será distinto en cada caso. Al-Gheethi, Ismail, Efaq, Bala y Al-Amery (2015) señalan que la diversidad de microorganismos que pueden contener los lodos fecales depende de factores como la salud pública de la zona, el tamaño de la población, los procesos de tratamiento a los que hayan sido sometidos las aguas residuales y el tipo de agua que se maneje (se debe considerar la presencia de hospitales e industrias).

Algunos de los patógenos más comunes encontrados en aguas residuales urbanas son *Enterococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Vibrio cholera*, *Shigella* sp. y *Staphylococcus aureus* (Al-Gheethi et al., 2015). Por su parte, Arthurson (2008) añade que la localización geográfica de donde proviene el agua residual también influye en la cantidad y el tipo de bacterias y otros patógenos presentes; de igual manera señala que los microorganismos *Campylobacter* spp., y *Clostridium* spp. pueden sobrevivir en este medio. Para los huevos de helmintos se estima que por cada litro de lodo

pueden encontrarse hasta 60 mil de estos. En comparación con otras matrices, los microorganismos patógenos, la concentración de nutrientes, los metales pesados, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), son mucho mayores en los lodos fecales (Singh, Mohan, Rathi & Raju, 2017).

Los lodos crudos cuentan con un alto grado de humedad, que puede estar entre el 97-98%. Una vez que el biosólido es secado, la humedad decrece hasta un 50-70%. Con respecto a otros componentes, pueden llegar a contener 3,4-4% de nitrógeno y 0,5-2,5% de fósforo, además de gran cantidad de otros nutrientes y micronutrientes, esta característica hace que puedan ser considerados buenos fertilizantes (Kacprzak et al., 2017), es decir, los contenidos orgánicos e inorgánicos presentes, resultan un gran aporte para los suelos y las plantas (Al-Gheethi et al., 2018). Sin embargo, también pueden contener cantidades considerables de contaminantes inorgánicos (*e.g.* metales pesados) o bien, orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), bifenilos policlorados (PCBs), fármacos, pesticidas, nanopartículas, entre otros (Kacprzak et al., 2017).

3.2.2.1. Huevecillos de helmintos y coliformes fecales como indicadores

Al momento de caracterizar lodos fecales o medir el nivel de remoción de patógenos tras un tratamiento se seleccionan indicadores específicos, ya que la complejidad y el costo económico de analizar todos los posibles microorganismos presentes en este material sería sumamente complejo. Los indicadores deben cumplir una serie de requerimientos: ser exclusivamente de origen fecal, estar presentes en mayor cantidad y con una capacidad de sobrevivir más tiempo que los patógenos de interés, que su remoción se asemeje a la de los microorganismos de interés y ser simples, de bajo costo, precisos y que su medición sea confiable. Los más comunes para los lodos fecales son las bacterias coliformes, helmintos y bacteriófagos (Strande et al., 2014).

En las diversas legislaciones a nivel mundial para determinar si es seguro el uso de los biosólidos se establecen límites máximos permisibles de estos parámetros microbiológicos por su afectación a la salud pública, además de otros parámetros físicos y químicos. Según Mishra et al. (2018), los coliformes pueden verse como organismos modelo debido a que cuando estos se encuentran en algún medio (ya sea agua, lodo, alimentos u otros) actúan como indicadores de contaminación fecal; una baja calidad del agua o lodo puede estar dada por la detección de la presencia de estos microorganismos (Omondi & Bangding, 2017). Además, su presencia indica la prevalencia de otros microorganismos patógenos. En general, los coliformes se dividen en fecales y no fecales, los coliformes fecales (*e.g.* *E. coli*, *Klebsiella* y *Enterobacter*) habitan en seres vivos de sangre caliente y se han utilizado durante décadas como un estándar sanitario de la calidad del agua, su consumo puede ocasionar enfermedades diarreicas agudas (Mishra et al., 2018). Sin embargo, los coliformes no son

indicadores de virus y protozoos por lo que no necesariamente indican con exactitud la reducción de todos los patógenos en el tratamiento de lodos fecales (Strande et al., 2014).

Los huevecillos de helmintos también son importantes como indicadores de la presencia de parásitos, especialmente en aguas residuales tratadas, lodos y biosólidos, donde puede existir una alta contaminación fecal, ya que prevalecen en alrededor de un tercio de la población mundial. Estos organismos poseen una alta resistencia a condiciones ambientales como pH, temperatura y humedad, además de su mínima dosis infectiva (Campos, Beltrán, Fuentes & Moreno, 2018). Su resistencia viene dada por la membrana externa (o cáscara) que los recubre, la cual es altamente impermeable y una de las estructuras biológicas más fuertes, protegiendo a los organismos de productos químicos y condiciones extremas. Por esto, el seguimiento de los huevecillos de helmintos proporciona una indicación de que otros patógenos menos resistentes también han sido inactivados. Los huevecillos que se cuantifican son aquellos viables, es decir, que aún tienen el potencial de desarrollarse y ser infecciosos (Strande et al., 2014). Tal y como indican Solano y León (2018), los helmintos intestinales que se encuentran con mayor frecuencia en los humanos son las uncinarias, *Ascaris lumbricoides* y *Trichocephalus trichiurus*.

En el caso de las uncinarias, las larvas son capaces de ingresar al cuerpo por medio de la piel, las principales causantes de enfermedades en el país son *Ancylostoma duodenale* y *Necator americanus*. Las infecciones por tricocéfalos pueden incurrir en dolor abdominal, diarrea, pérdida de peso y prolapso rectal, similar a los efectos de una infección por *Ascaris lumbricoides*, microorganismo que además puede afectar la nutrición, el oído y las vías respiratorias. En general, una infección masiva por helmintos puede causar obstrucción intestinal, perforación, obstrucción de la vía aérea y migración hacia la vía biliar y/o tráquea (Solano & León, 2018).

3.2.3. Tipos de lodos y biosólidos

Anteriormente se mencionó que los lodos de aguas residuales pueden clasificarse en primarios y secundarios, pero además existen los lodos mixtos y químicos. Se les llama lodos primarios a los que han pasado por una primera etapa de tratamiento físico, como un sedimentador, se componen de los sólidos de mayor tamaño, arena, aceites y materiales grasos. Los lodos secundarios son subproducto de un tratamiento biológico, para este punto su composición es en su mayoría materia orgánica. Los lodos mixtos son una mezcla de lodos primarios y secundarios. Por último, los químicos son generados al agregarles algún compuesto químico para mejorar las condiciones del proceso como coagulación, sedimentación, remoción de sustancias, entre otros (Gualoto, 2016; Gherghel et al, 2019).

Según Zhou, Thompson y Meschke (2016), los biosólidos ordinarios se pueden clasificar en tipo A o tipo B. Esta clasificación se basa en el contenido de microorganismos patógenos o bien, los procesos utilizados para la remoción de dichos microorganismos (*Salmonella* spp, virus entéricos, huevos de helmintos, entre otros).

Las clases de biosólidos pueden variar dependiendo de la legislación del país. Para el caso de Costa Rica, los biosólidos de tipo A son aquellos que serán dispuestos en terrenos donde puede darse contacto directo con la población, mientras que los del Tipo B son los biosólidos que se podrán disponer en lugares donde no existe un contacto directo con las personas, lo cual está asociado a una serie de límites máximos permisibles de parámetros determinados, estos se muestran en el apartado 3.5 (Decreto Ejecutivo N°39316, 2015).

3.3. Tratamiento de lodos fecales

Existen tratamientos tanto para los lodos no estabilizados como para los estabilizados. Puede llamársele higienización al proceso que se le da a los biosólidos que se busca que contengan cierto grado de desinfección. Dichos procedimientos se han vuelto sumamente necesarios para la remoción de los microorganismos patógenos, ya que los tratamientos previos que generalmente se aplican a los lodos no los eliminan en su totalidad (Al-Gheethi et al., 2015).

Para el uso de biosólidos como mejorador de suelos, por ejemplo, el compostaje es una de las mejores opciones, ya que la mayor parte del lodo se transforma en un recurso valorizable. Mediante esta técnica, los contaminantes presentes se reducen en medida considerable y se mejora la retención de agua lo cual contribuye al aporte de nutrientes esenciales (Hee, Dello, Antmann y Chorath, 2015).

Se han estudiado diferentes tipos de compostaje para lodos, en donde la pila estática aireada presenta muchas ventajas con respecto a otras técnicas, por su efectividad y pocas limitaciones, aunque produce una cantidad considerable de dióxido de carbono que se libera a la atmósfera. El vermicompost basa su proceso en el uso de lombrices, lo cual representa una desventaja ya que estos deben permanecer sanos y se debe controlar la carga de contaminantes que pueden contener los lodos que afecten a estos organismos, tal es el caso de los metales pesados. El compostaje de hilera es el más sencillo de manejar, pero deja los resultados menos favorables, requiere mucho espacio, es lento y el biosólido obtenido es de baja calidad (Hee et al., 2015).

El atrincheramiento profundo de lodos es un tratamiento menos convencional, pero ha sido aplicado en varios países. Consiste en excavar hoyos en forma de trincheras en donde se disponen los lodos fecales, posteriormente estos son cubiertos con tierra para dar paso a un proceso anaeróbico. En la parte superior se siembran árboles, por lo que el lodo funciona

como un fertilizante de liberación lenta, a su vez que protege a la plantación de la erosión. No suele ser un tratamiento recomendado en lugares donde el agua es obtenida de fuentes subterráneas por la potencial contaminación a estas (Singh et al, 2017).

Algunos procesos se encargan de otras funciones principales como la disminución del volumen o masa del lodo (*e.g.* espesamiento, deshidratación, tratamientos térmicos) o acondicionamiento del material, y son mayormente utilizados en lodos no estabilizados o como pretratamiento (Gualoto, 2016). Una de las técnicas emergentes empleadas para la desinfección de lodos estabilizados es mediante radiación solar. La inactivación de los patógenos ocurre por el efecto de la radiación ultravioleta y las altas temperaturas que brinda la exposición al sol. Otro tratamiento altamente utilizado es la estabilización con alcalinizantes, en donde se utilizan principalmente dos aditivos alcalinos, los cuales son el óxido de calcio o cal viva (CaO) y el hidróxido de calcio o cal hidratada (Ca(OH)₂). Al igual que los otros tratamientos, su fin es disminuir la población de patógenos que afectan a la salud humana y que el producto obtenido pueda utilizarse como mejorador de suelos (Al-Gheethi et al., 2015).

3.3.1. Desinfección o secado solar

Se ha demostrado en diversos estudios que la acción del sol sobre los lodos fecales causa un impacto en varios microorganismos, especialmente cuando son expuestos de manera directa a la luz ultravioleta de longitud de onda corta, sin embargo, para proteger los lechos de secado de factores como la lluvia se utilizan cubiertas o techos lo cual limita el trabajo realizado por los rayos ultravioleta mencionados (Shanahan et al, 2010). Aun así, el principio de la desinfección o secado solar es mantener cierto nivel de radiación en el lodo, así como preservar la temperatura que ha sido incrementada gracias a este proceso, para que sea posible destruir los microorganismos patógenos requeridos (Ozdemir, Yetilmezsoy, Dede & Sazak, 2018).

La desinfección solar tiene una función bactericida más que bacteriostática y es muy efectiva para disminuir la población de Coliformes Totales (CT) y la bacteria *E. coli*. Se debe tener en cuenta que existen una serie de parámetros que pueden influir en la efectividad del tratamiento, tales son el tiempo de exposición, la temperatura, la intensidad de la radiación (Al-Gheethi et al., 2015), la tasa de ventilación y el contenido de materia seca inicial (Singh et al, 2017). Es clave tener un buen control de estos parámetros para conseguir una reducción en la población microbiana, sin importar su concentración inicial (Al-Gheethi et al., 2015).

Dentro de las ventajas que presenta la desinfección solar se encuentran la fácil implementación, es eficiente y natural, lo cual implica que no se generan productos tóxicos en el proceso (Al-Gheethi et al, 2015), y es económicamente accesible con respeto a otros

tratamientos, incluyendo los bajos costos de operación y la energía consumida (Cota-Espericueta & Ponce-Corral, 2008). Así mismo, esta tecnología necesita generalmente un gran espacio para poder disponer los lodos, lo cual puede convertirse en una desventaja si no se cuenta con terrenos amplios y aptos (Singh et al, 2017).

Por otra parte, mediante un estudio hecho por Paluszak, Skowron, Sypula y Jadwiga (2012) en Polonia, se obtuvo que la desinfección solar no garantiza que el material producido sea apto para su uso en la agricultura o como mejorador de suelo, debido a que no resultó ser un producto biológicamente seguro. La tecnología no mostró ser lo suficientemente efectiva en la higienización del lodo, e incluso se determinó que era menos favorable que otras técnicas como compostaje, alcalinización y pasteurización. De igual forma, se señala que la efectividad del secado de los lodos está ligado a las condiciones climáticas de la zona.

3.3.2. Estabilización con alcalinizantes

La función de los alcalinizantes es aumentar el pH del lodo a 12 o más y/o aumentar la temperatura entre 55-70 °C (Al-Gheethi et al., 2015). En el caso del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, al hacer que se llegue a un pH de 12, los iones de NH_4^+ generan gas amoníaco, este gas actúa como bactericida, destruyendo los microorganismos presentes. La concentración y dosis de este alcalinizante debe ser la adecuada, además la condición debe mantenerse por al menos 2 horas. El CaO , por su parte, produce una reacción exotérmica que eleva la temperatura de los lodos, reduciendo así los patógenos (Arthurson, 2008).

Es sumamente importante controlar el tiempo de contacto y asegurar que la mezcla de los componentes sea apropiada para que los microorganismos sean destruidos o inactivados. En caso de que los biosólidos deban almacenarse por largos periodos de tiempo en condiciones anaeróbicas, se debe tener un adecuado control en este aspecto, ya que de lo contrario el pH puede volver al valor original produciendo ácidos (*e.g.* ácido láctico) (Al-Gheethi et al., 2015).

Dentro de las ventajas de este tratamiento se encuentra su capacidad de precipitar metales, lo cual reduce su solubilidad y movilidad, aumenta el contenido sólido por lo que los lodos se vuelven más fáciles de manejar (Arthurson, 2008), mejora el control de olores, su operación es sencilla en plantas pequeñas y suele ser de bajo costo. Sin embargo, se debe tener en cuenta la alteración de las características físicas y químicas de los lodos, debido al aumento de la alcalinidad no es recomendable aplicarlo a cualquier tipo de suelo que se esté usando para actividades agrícolas (Gualoto, 2016). Además, Singh et al. (2017) advierten que uno de los riesgos de aplicar este tratamiento es la posibilidad de observar un nuevo crecimiento de los microorganismos patógenos.

Como se mencionó anteriormente, para que el proceso muestre resultados favorables en la eliminación de microorganismos patógenos depende de la temperatura y el pH alcanzado durante el encalado y el tiempo de contacto. Es necesario hacer una buena elección de los parámetros de diseño (como la dosis de cal y el tiempo de contacto), tomando en cuenta las características del lodo para que el tratamiento sea óptimo en términos técnicos, operativos y económicos (Singh et al, 2017).

Segura (2018) determinó que una dosis de 0,12 g/g de CaO era suficiente para elevar el pH del biosólido por encima de 12, en periodos tanto de 1 hora como de 24 horas. En su estudio, Gualoto (2016) utilizó 0,20 g/g con la cual obtuvo resultados favorables, consiguiendo un valor de pH mayor a 13 después de dos horas de contacto con el material. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) indica que es necesaria una dosis de 0,25 g/g de cal viva para obtener un biosólido clase B, mientras que el pH se mantenga mayor a 12 durante al menos 72 h. En un estudio realizado por Bina, Movahedian y Kord (2004) se determinó que la estabilización con cal mejoró la calidad microbiológica del lodo siempre que el pH se mantuvo en valores mayores a 11 por dos horas, obteniendo un biosólido de clase B, mientras que el biosólido de clase A se consiguió después de 24 horas. En el caso de los huevecillos de helmintos para asegurar su inactivación, el tiempo de contacto tuvo que sobrepasar las 24 horas con un pH mayor a 12, ya que estos son más resistentes al encalado en comparación con otros microorganismos.

3.4. Impactos positivos y negativos de tratamiento de lodos fecales

Para alcanzar el saneamiento de una zona es necesario mantener las condiciones higiénicas mediante el adecuado tratamiento y disposición de las aguas residuales y los lodos. Cuando esto no se vuelve posible, se comienzan a presentar una serie de efectos negativos en el medio ambiente y la salud de las personas (Singh et al, 2017).

Como se mencionó anteriormente, los lodos provenientes de las aguas residuales domésticas contienen altas concentraciones de microorganismos patógenos como las bacterias del género Enterobacteriaceae, en el cual se encuentran los coliformes, *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. Estas características pueden causar daños potenciales en los suelos si se da una inadecuada aplicación de los biosólidos (Rico et al., 2017), además se presenta un gran riesgo potencial debido a la transmisión de contaminantes y patógenos en el área de producción de alimentos o agricultura (Kacprzak et al., 2017), por ello es imprescindible determinar el tratamiento que mejor se ajusta al sustrato en análisis tras una caracterización, así como la tasa máxima de aplicación que puede emplearse. El mal manejo de este material implica también una amenaza para las aguas superficiales y subterráneas, según el origen de los lodos y la manera en que se manejen, traten y dispongan. Tal y como se señaló, puede darse incluso en mayor medida una afectación a la salud humana (Rico et al., 2017).

La disposición de los lodos en vertederos o rellenos sanitarios afecta la composición de los lixiviados, así como la producción de dióxido de carbono que es emitido a la atmósfera. Algunos autores la consideran una opción poco eficiente desde el punto de vista ambiental en comparación a otras alternativas, por lo que debe evitarse aplicar esta práctica en la medida en que sea posible (Kacprzak et al., 2017).

Por otra parte, tanto el tratamiento de aguas residuales como de los lodos provenientes de estas forman parte de los procesos sostenibles que muchos países han implementado como parte de las medidas para enfrentar el cambio climático (Melo, Rodríguez & González, 2017). Los biosólidos, posterior a un tratamiento, pueden utilizarse para determinadas actividades. Su aplicación en el suelo, por ejemplo, mejora las condiciones de este, incluyendo el contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como la capacidad de retención de agua o humedad (Rico et al., 2017).

Por esto se pueden utilizar en las plantaciones forestales, adecuación de zonas verdes, como abono, en la biorremediación de suelos contaminados e incluso en recuperación de canteras. En el caso de su uso en agricultura deben analizarse rigurosamente las condiciones del biosólido y el tipo de cultivo, en sembradíos sobre el suelo de productos de consumo directo implica un mayor riesgo de transmisión de patógenos (Melo et al, 2017)

Así mismo, pueden aprovecharse en la obtención de energía cuando es un lodo crudo o cuenta con alta carga orgánica. De esta forma es posible realizar una sustitución de combustibles fósiles por el uso de un biocombustible (disminuyendo así el costo por concepto de energía). En general, los costos de manejar este tipo de residuos y disponerlos en los rellenos sanitarios son mucho más elevados que apostar por un tratamiento que permita utilizarlos en la remediación del suelo y como “fertilizantes” naturales. Además, con las condiciones apropiadas son aptos para actividades productivas del área de alimentos y su tratamiento presenta beneficios directos e indirectos en la salud pública y provoca una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (Kacprzak et al., 2017).

Aunque los sistemas de tratamiento de aguas residuales tengan dentro de sus principales objetivos proteger los cuerpos receptores de agua y la salud pública, es necesario implementar estrategias que involucren una mayor cantidad de elementos como optimizar el uso de la energía, la protección de recursos naturales y el adecuado manejo de los residuos generados en el proceso, así como su disminución (Buonocore et al, 2016).

Numerosos estudios científicos, autoridades reguladoras e instituciones alrededor del mundo consideran que el uso de lodos fecales, tras convertirlos en biosólidos posterior a un tratamiento, es la forma más ambientalmente sostenible en la gestión de este material. Con esto, no solamente se le empieza a dar un enfoque de economía circular a un material que actualmente no es tan valorado, sino que también es posible obtener los beneficios que brindan sus nutrientes y contenido de materia orgánica (Smith, 2009).

Se debe tener en cuenta que no todos los países tienen una regulación clara al respecto, así como falta de metodologías para seleccionar sistemas de tratamiento y manejo adecuados con respecto a dicho subproducto. Además, algunas tecnologías requieren altos costos de inversión, mantenimiento y operación, en especial en aquellos casos donde se deban modificar las instalaciones originales de una PTAR. Por estas razones se vuelve sumamente importante generar un análisis integral para encontrar el mayor beneficio en el tratamiento y reutilización de lodos fecales (Buonocore et al, 2016).

No solamente se debe tomar en cuenta el factor económico al momento de elegir una tecnología, sino también considerar las opciones que sean sostenibles con el tiempo, duraderas y con el potencial de recuperar la mayor cantidad de constituyentes beneficiosos del biosólido. El correcto manejo de los lodos fecales contribuye a alcanzar las metas locales en temas de saneamiento, además de sus beneficios en salud pública y bienestar (Singh et al, 2017).

3.5. Legislación vigente en Costa Rica

En el país, las disposiciones legales en el tema de manejo de biosólidos vienen dadas por el “Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos”. El Ministerio de Salud es el ente encargado de velar por el cumplimiento de los artículos establecidos en el decreto. Mediante auditorías realizadas en el año 2015, se determinó que existía un control y fiscalización insuficientes sobre los procesos de recolección, tratamiento y disposición final de los lodos de aguas residuales ordinarias y especiales. El reglamento viene a complementar el marco jurídico existente, adaptándose a la necesidad y la realidad nacional actual (Programa Estado de la Nación, 2017).

De esta manera, el reglamento brinda las especificaciones que deben acatarse en todo el territorio nacional con respecto al manejo y disposición de los lodos ordinarios y especiales. Posterior a algún tratamiento, los biosólidos que provengan de aguas residuales ordinarias o especiales de actividades agropecuarias, pueden disponerse en rellenos sanitarios, como mejoradores de suelos o para obtener combustibles alternos. Con el fin de proteger la salud pública y el medio ambiente, existen una serie de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que deben cumplir con los límites máximos permitidos por este reglamento (Decreto Ejecutivo N°39316, 2015). Para los biosólidos de tipo ordinario dicha información se muestra en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Límites máximos permisibles de los parámetros de análisis obligatorio para biosólidos ordinarios según su disposición final.

Parámetro	Disposición en relleno sanitario	Disposición en suelo	
		Biosólidos de tipo A	Biosólidos de tipo B
Humedad (%)	75	75	75
Coliformes fecales (UFC/g)	No aplica	2000	2x10 ⁶
pH (rango)	5-12	5-12	5-12
Huevos de helmintos patógenos (número/gramo de sólidos totales)	No aplica	1	10

Fuente: Decreto Ejecutivo N°39316 (2015).

Con respecto a los parámetros de carácter microbiológico relevantes para la normativa, se tiene que los coliformes fecales son todas aquellas bacterias pertenecientes a los géneros *Escherichia*, *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. Se encuentran en el intestino de animales de sangre caliente y se clasifican como bacilos Gram negativos no esporulados. Por su parte, los huevecillos de helmintos son un gran indicador de contaminación fecal en muestras de origen ambiental, ya que corresponden a estados larvales de nemátodos, céstodos y tremátodos que son capaces de parasitar a humanos y animales al alcanzar su forma adulta. De ahí la gran importancia de determinar las formas viables de eliminar estos patógenos para evitar sus efectos adversos (Decreto Ejecutivo N°39316, 2015).

Según Melo et al. (2017) los biosólidos clase A son aptos para colocarse en zonas verdes, campos de golf, separadores viales, jardines y agricultura; mientras que los de clase B pueden emplearse en recuperación de suelos degradados, reforestación o revegetación, paisajismo, en estabilización de taludes, como cobertura de rellenos sanitarios o cierre de minas e insumos en materiales de construcción y acondicionadores de suelos o fertilizantes. Para efectos de la normativa costarricense, los biosólidos de clase A pueden ser dispuestos en lugares donde exista contacto directo con el público, mientras que los de clase B solo pueden colocarse donde no exista este tipo de contacto. Sin embargo, estos últimos pueden utilizarse en actividades agrícolas siempre y cuando su aplicación finalice dos semanas antes de la cosecha, y en pastoreo evitando la actividad en los 15 días posteriores de la aplicación del material (Decreto Ejecutivo N°39316, 2015).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se detallan los procedimientos realizados en el presente estudio. Comprende la descripción del sitio de estudio, la caracterización de los lodos fecales de la PTAR en análisis según los parámetros físicos, químicos y microbiológicos elegidos y la selección de variables para evaluar diferentes tratamientos. Con respecto a dichos tratamientos, se explica el análisis efectuado para la determinación de la técnica con mayor factibilidad desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

4.1. Sitio de estudio

Esta investigación se realizó con el lodo producido en la PTAR Lagos de Lindora, administrada por el AyA. La misma se sitúa en el cantón de Santa Ana ubicado en San José, más específicamente en el distrito de Pozos. La PTAR se encarga de tratar las aguas residuales domésticas de la urbanización que lleva el mismo nombre, para posteriormente ser vertidas en el Río Virilla. Durante mucho tiempo esta planta se encontró fuera de funcionamiento, por lo que el AyA, el Ministerio de Salud y la municipalidad correspondiente trabajaron en conjunto para su recuperación y puesta en operación (CNPU, 2013).

En el año 2013 pasó a ser administrada por el AyA, mediante el área de Operación y Mantenimiento de PTARs de la Unidad Estratégica de Negocios (UEN) de Recolección y Tratamiento de la GAM. Sin embargo, presentaba algunas deficiencias por lo que se optó por instalar un nuevo sistema electromecánico de aireación mediante difusores de burbuja fina. La inversión del proyecto fue de \$142 millones y benefició a aproximadamente 1 700 habitantes (Núñez, 2014; Presidencia, 2017).

Con respecto al proceso actual de la PTAR, las aguas residuales son recolectadas por el alcantarillado sanitario y se ingresan a la planta mediante un sistema de bombeo. Las aguas crudas son transportadas por una sola tubería a la primera fase del tratamiento, en donde esta se bifurca hacia dos reactores aerobios, cada uno de los cuales cuenta con dos difusores de aire. Las aguas residuales de cada reactor pasan a su respectivo sedimentador y una vez tratadas se vierten en un alcantarillado para llegar posteriormente al cuerpo receptor. El tiempo de retención de las aguas residuales desde su entrada al reactor hasta que salen del sedimentador es de 16 horas. (G. Saborío, comunicación personal, 20 de febrero de 2020).

En el caso de la línea de lodos, cuando estos llegan a los sedimentadores se recolectan por gravedad en tolvas, las cuales permiten la recirculación hacia los reactores mediante un sistema Air Lift. Una vez que los lodos se encuentran nuevamente sedimentados, se concentran en las tolvas y son transportados a un biodigestor con capacidad para 25 m³, en donde permanece de 15 a 22 días. Pasado este tiempo el lodo es bombeado hasta los lechos

de secado, en donde se realiza un decantado del sobrenadante, o lixiviados, que son recirculados hasta los reactores (ver figura 4.1). El lodo se deja secar por un tiempo determinado (entre 15-22 días en verano y 1 mes en invierno) (G. Saborío, comunicación personal, 20 de febrero de 2020). El proceso completo de la planta tanto en la línea de agua como la línea de lodo se puede observar gráficamente en la figura 4.2.



Figura 4.1. Lechos de secado PTAR Lagos de Lindora. a) Lodo en proceso de sedimentación/concentración, b) Deshidratación del lodo.

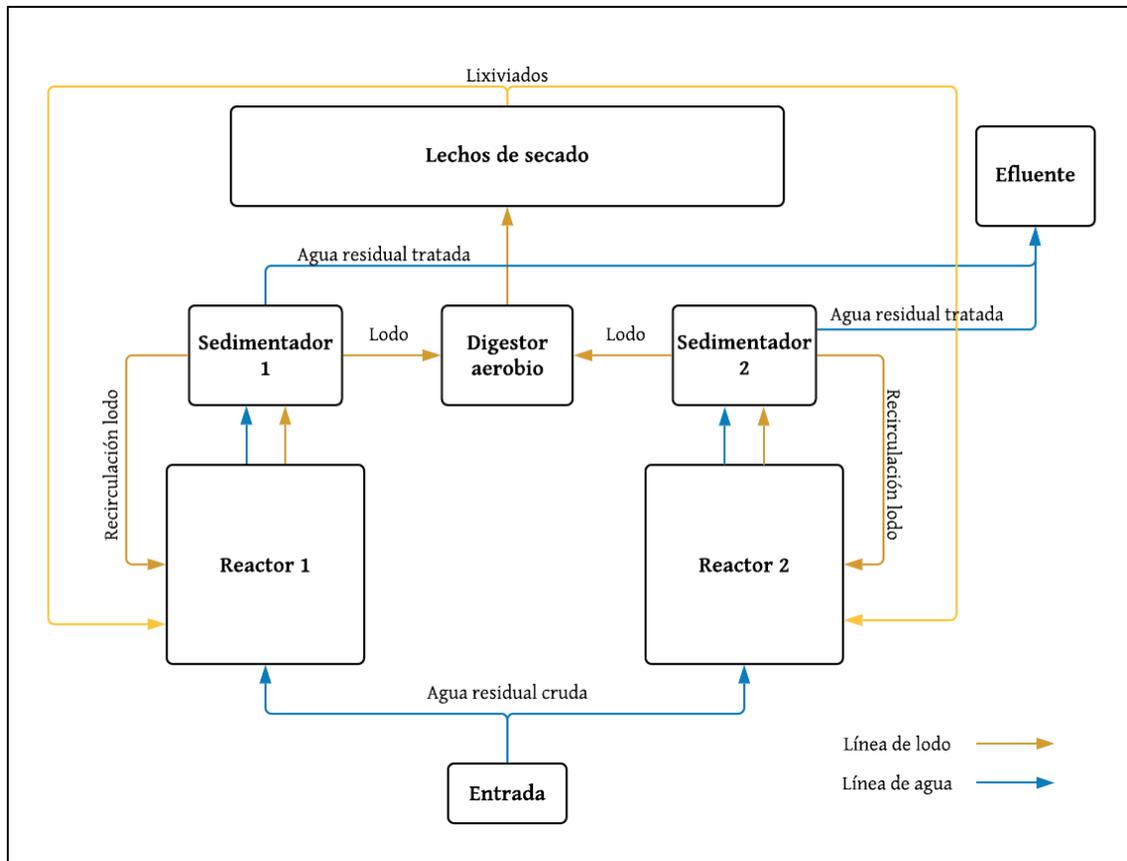


Figura 4.2. Diagrama de procesos de la PTAR Lagos de Lindora.

4.2. Caracterización de lodos

4.2.1. Muestreo

Se realizó un muestreo representativo *in situ* en uno de los lechos de secado de la PTAR, el día 5 de junio del 2020. Los lodos son concentrados, contaban con 48 horas en el lecho antes del muestreo, en los cuales se sedimentaron los sólidos y se extrajo el sobrenadante para disminuir su contenido de agua. Se utilizaron recipientes de plástico debidamente sellados para transportar las muestras al Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), ubicado en la Sede Central de Cartago.

4.2.2. Análisis fisicoquímicos

Para efectos del estudio se determinó que los parámetros físicos y químicos de importancia son el pH, la temperatura, el porcentaje de humedad y el contenido de materia seca o sólidos

totales (ST), análisis que se efectuaron en el CIPA. Además, se determinaron los sólidos volátiles (SV), en el Laboratorio de Aire y Agua Potable de la Carrera de Ingeniería Ambiental. Cabe destacar que todos los análisis se realizaron por duplicado, tomando como referencia el método “2540 G. Total, Fixed and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples” del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Baird, Eaton & Rice, 2017).

Para la caracterización del lodo crudo se tomó una muestra de 1 litro. Se realizó una medición del potencial de hidrógeno y de temperatura utilizando un pHmetro marca Hanna Instruments. En el caso de la determinación del porcentaje de humedad y la cantidad de sólidos se pesaron aproximadamente 10 g de muestra en un crisol, para posteriormente colocarlo en una estufa Lindberg Blue M a 105°C durante 24 h. Transcurrido ese tiempo se dejaron enfriar las muestras en un desecador durante 30 minutos y se procedió a pesarlas. El cálculo de los sólidos totales se realizó mediante la fórmula 4.1.

$$\frac{(A-B)*1000}{C-B} = \text{sólidos totales}, \frac{mg}{g} \text{ (ec.4.1)}$$

Donde:

A = peso del residuo seco + crisol, g

B = peso del crisol, g

C = peso de la muestra fresca + crisol, g

Para calcular los SV (fórmula 4.2) se colocaron las muestras en una mufla marca Fisher Scientific a 550 °C por una hora, se realizó el pesaje correspondiente después de haber dejado enfriar las muestras durante 30 minutos en el desecador. Todos los pesajes se realizaron en una balanza analítica marca AND.

$$\frac{(A-D)*1000}{C-B} = \text{sólidos volátiles}, \frac{mg}{g} \text{ (ec.4.2)}$$

Donde:

D = peso final del residuo + crisol después de la ignición, g

Adicionalmente, se tomó una muestra de lodo seco y se le realizó un análisis químico completo para abonos orgánicos en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Este incluía la determinación de nutrientes, cuantificación de algunos metales, relación C/N, Conductividad Eléctrica (CE), entre otros parámetros.

4.2.3. Análisis microbiológicos

Los indicadores microbiológicos requeridos por la normativa costarricense son coliformes fecales y huevecillos de helmintos, por lo que son los parámetros que se cuantificaron en este análisis. Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA), ubicado en el cantón de La Unión en Cartago y todas las pruebas se realizaron por duplicado.

Tanto el método empleado para coliformes fecales como para huevecillos de helmintos son los utilizados por el LNA. En la determinación de coliformes fecales se siguió la técnica de filtración por membrana, adaptada del método “9222 D. *Thermotolerant (Fecal) Coliform Membrane Filter Procedure*” del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Baird et al., 2017). Dicho procedimiento se detalla a continuación:

- Se pesaron 30 g de la muestra en una balanza granataria.
- Se licuó la muestra previamente pesada con 270 ml de agua destilada o esterilizada, durante 3 a 5 minutos o hasta que la muestra estuviera completamente líquida, sin trozos de lodo.
- Sin dejar que se asentara la muestra, se tomó una alícuota de 10 ml y se mezcló con 90 ml de agua destilada o esterilizada en un frasco de vidrio para hacer diluciones seriadas 1 en 10. Se siguió este procedimiento para hacer las diluciones de 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} . Cabe destacar en este método que en los casos en los que la dilución de 10^{-4} indicó negativo para coliformes fecales, se filtró la dilución de 10^{-3} , y para muestras muy cargadas de coliformes fecales se realizaron diluciones mayores.
- Las muestras de 10^{-4} se pasaron por un sistema de filtración con membranas de 0,45 μm , dicho sistema consiste en una serie de embudos de filtración conectados a una bomba de vacío.
- Posteriormente, las membranas se colocaron en el medio para coliformes fecales (mFC) y se incubaron a 44,5 °C por 24 horas.
- La presencia de colonias azules indica positivo para coliformes fecales por el tipo de medio de cultivo utilizado, por lo que se contaron dichas colonias. El número obtenido se insertó en la ecuación 4.3 para obtener la cantidad de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por gramo de sólidos secos.

$$\frac{\text{colonias contadas}}{(\text{dilución}) \times \% \text{ sólidos secos}} = \frac{\text{UFC}}{\text{g}} \text{ (ec.4.3)}$$

El procedimiento para la determinación de huevecillos de helmintos está adaptado de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT (1996), y se encuentra descrito en el Anexo 9.1. “Procedimiento para la determinación de huevecillos de helmintos en muestras de lodo.”

4.3. Evaluación de tratamientos

Con el fin de buscar una desinfección adecuada para el lodo de la PTAR Lagos de Lindora se propusieron tres tecnologías de tratamiento:

- Secado solar
- Tratamiento químico con alcalinizantes o alcalinización
- Combinación de secado solar y tratamiento con alcalinizantes.

Para cada tecnología se variaron parámetros como tiempo de exposición, dosis de alcalinizante y alturas de lecho según correspondía, lo que dio paso a diversas combinaciones de tratamiento, las cuales se especifican en el apartado 4.3.1.

4.3.1. Diseño experimental

Los tratamientos por evaluar se realizaron con el lodo concentrado presentado en la caracterización. Se tomó una muestra representativa del lodo dispuesto en uno de los lechos de secado de la PTAR Lagos de Lindora y se transportó a la Sede Central del ITCR en recipientes de plástico debidamente sellados. La totalidad del material se dividió entre las pruebas requeridas para los tratamientos.

4.3.1.1. Secado solar

Este tratamiento se llevó a cabo durante época lluviosa (del 8 al 30 de junio del 2020), siendo esta la condición crítica para este tratamiento. La deshidratación se realizó en un lecho de secado techado con láminas transparentes y con una estructura de arena ubicado en el ITCR, en donde se colocaron 6 cajones de madera (o deshidratadores) de dimensiones: 40 cm de alto, 28 cm de largo y 28 cm de ancho (ver figura 4.3). Cada cajón se asoció a un tratamiento, según las variables definidas mediante literatura y consulta con expertos en el tema, las cuales fueron altura del lecho de secado y tiempo de exposición al sol. Se eligieron dos alturas de lodo: 20 cm y 15 cm, el monitoreo se realizó en 3 tiempos de secado los cuales fueron 10, 17 y 24 días. A los 10 días que estaba más compacto el lodo, se quitaron los cajones y quedó expuesta la torta de lodo.



Figura 4.3. Deshidratadores para diseño experimental (a), lecho de secado (b).

Considerando los resultados del primer diseño experimental, se agregó una prueba más para analizar el comportamiento del lodo a los 5 días de secado con una altura de lecho de 20 cm. En el cuadro 4.1 se presenta un resumen del diseño experimental de esta tecnología.

Cuadro 4.1. Diseño experimental según los parámetros utilizados en el tratamiento de secado solar.

Tiempo de secado (días)	Altura del lecho (cm)	
	20	15
5	T1	-
10	T2	T5
17	T3	T6
24	T4	T7

*T: tratamiento

En el caso del muestreo, para asegurar una mayor heterogeneidad en la composición del material se realizó un cuarteo en el deshidratador, es decir, se dividió el espacio en 4 partes iguales y se tomó una cantidad de material del centro de cada una, desde el fondo del lecho, hasta obtener una muestra de un litro. Las muestras se reservaron en botellas de vidrio ámbar para su transporte al laboratorio.

Para monitorear este proceso, se realizó la toma de datos de temperatura, humedad relativa y radiación horaria máxima de las estaciones ubicadas en el ITCR y en el Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños, a diferentes horas (8:00 a.m., 12:00 m.d. y 4:00 p.m.) durante todos los días del tratamiento, utilizando el sitio web de las Estaciones Automáticas del

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Posteriormente se realizó una comparación estadística de los datos de ambas estaciones, mediante una prueba F para igualdad de varianzas y una prueba t para igualdad de promedios, utilizando la herramienta Excel.

4.3.1.2. Alcalinización

Se tomó el lodo concentrado y se dispuso en 6 beakers con 1 litro cada uno. A cada muestra se le agregó una dosis de cal identificada según recomendaciones de literatura, se mezcló de forma manual con una espátula y se dejó por un tiempo de contacto (ver figura 4.4). La cal utilizada fue Óxido de Calcio (CaO), también conocida como cal viva. El diseño experimental para esta técnica de tratamiento se observa en el cuadro 4.2.

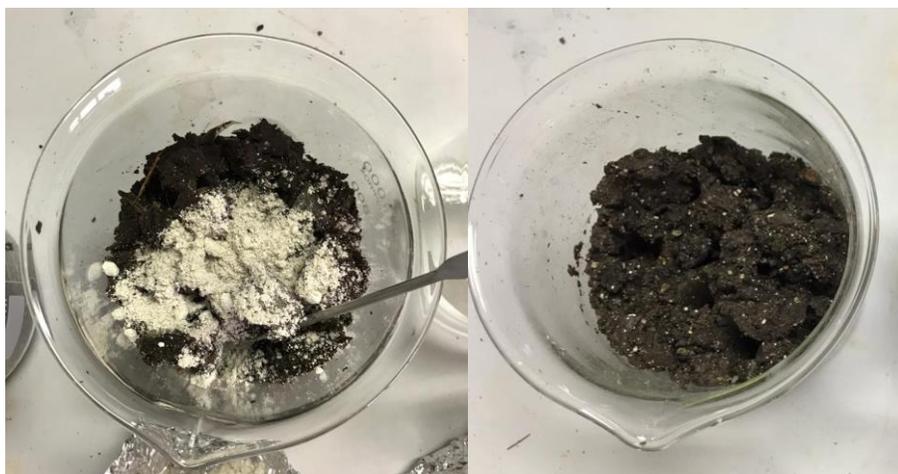


Figura 4.4. Mezcla de cal con lodo.

Cuadro 4.2. Diseño experimental según los parámetros utilizados en la alcalinización.

Dosis (g cal/g lodo)	Tiempo de contacto (h)	
	2	24
0,12	T8	T11
0,20	T9	T12
0,25	T10	T13

*T: tratamiento

Pasado el tiempo de contacto, la totalidad de cada muestra se preservó en botellas de vidrio ámbar para su transporte al LNA y posterior análisis.

4.3.1.3. Secado solar + alcalinización

Se acondicionaron 2 cajones de madera de dimensiones 40 cm de alto, 28 cm de largo y 28 cm de ancho, estos se colocaron en el lecho de secado ubicado en el ITCR. Ambos cajones se llenaron con lodo hasta que el lecho alcanzó una altura de 20 cm, uno de los lechos se mantuvo por un tiempo de secado de 5 días y el otro durante 10 días. Cumplido cada uno de los tiempos, se realizó un muestreo representativo, asegurando su heterogeneidad mediante la técnica de cuarteo hasta obtener de cada lecho dos muestras de 1 litro, las cuales se colocaron en botellas de vidrio ámbar para su transporte al laboratorio. El tratamiento se realizó del 30 de julio al 10 de agosto del 2020.

Las muestras se llevaron al CIPA y se colocaron en beakers de 1 litro, con esa misma cantidad de material cada uno. Previamente se definió la dosis de cal (CaO) a agregar a cada muestra, se pesaron los gramos correspondientes y se mezclaron de forma manual con una espátula. Para este tratamiento se manejó un tiempo de contacto de la cal de 24 horas. En el cuadro 4.3 se presentan las combinaciones de tratamientos con esta técnica según los parámetros elegidos.

Cuadro 4.3. Diseño experimental según los parámetros utilizados en el tratamiento de secado solar + alcalinización.

Dosis (g cal/ g lodo)	Tiempo de secado (días)	
	5	10
0,20	T14	T16
0,25	T15	T17

*T: tratamiento

4.3.2. Análisis fisicoquímicos

Para todos los tratamientos en estudio se realizaron los mismos análisis y procedimientos descritos en el apartado 4.2, cada uno de los cuales se efectuó por duplicado. La toma de

datos de los parámetros físicos y químicos de las muestras se realizó en el CIPA, estos parámetros fueron el pH, la temperatura, el porcentaje de humedad y el contenido de materia seca, además de los SV en el Laboratorio de Aire y Agua Potable de la Carrea de Ingeniería Ambiental, con base en el método “2540 G. Total, Fixed and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples” (Baird et al., 2017).

En el caso del tratamiento de secado solar, se realizaron las mediciones de temperatura y pH después de tomada la muestra. Para la técnica de alcalinización, estos parámetros se midieron en tres momentos diferentes: antes de agregar la cal, en el momento en el que se realizó la dosificación y una vez cumplido el tiempo de contacto previamente definido. Por otra parte, para calcular el porcentaje de sólidos totales y el porcentaje de SV se utilizaron las ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente.

4.3.3. Análisis microbiológicos

Una vez determinados todos los parámetros fisicoquímicos necesarios, las muestras se transportaron al LNA para los respectivos análisis microbiológicos establecidos en la normativa nacional vigente (coliformes fecales y huevecillos de helmintos). Para la cuantificación de los coliformes fecales se siguió el procedimiento del laboratorio basado en el método “9222 D. Thermotolerant (Fecal) Coliform Membrane Filter Procedure” (Baird et al., 2017), el mismo que se describe en el apartado 4.2. Para calcular las UFC por gramo de sólidos secos de cada muestra se utilizó la fórmula 4.3. En el Anexo 9.1 se encuentra detallado el procedimiento para la cuantificación de huevecillos de helmintos, el cual está adaptado de Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT (1996).

4.4. Determinación de la técnica factible y los parámetros operativos

La determinación de la técnica más factible para el tratamiento del lodo de la PTAR Lagos de Lindora se realizó bajo una visión de sostenibilidad, tomando en cuenta factores técnicos, económicos y ambientales principalmente. Para elegir los parámetros operativos que mejor se ajustaran a los requerimientos para el biosólido se realizó una comparación de los tratamientos de secado solar y de secado solar + alcalinización. Los resultados de cada una de las pruebas realizadas para ambos tratamientos se graficaron con la herramienta Excel, se compararon entre sí, y a su vez con los límites permitidos para los biosólidos de clase A y B según la legislación nacional. Posterior a la elección de las variables óptimas, se verificó si el área dispuesta para filtración y secado en la PTAR es suficiente para asegurar la generación de un biosólido seguro con el tratamiento recomendado.

Para el análisis económico se tomaron en cuenta dos escenarios, uno netamente financiero y otro que se basa en la relación Costo-Beneficio, para el cual se calcularon indicadores (la ganancia obtenida y la relación Beneficio/Costo) con el fin de determinar su factibilidad. Se tomaron en cuenta gastos de material, costos evitados (ahorro por fertilizante químico evitado, emisiones de GEI evitadas y ahorro por transporte al relleno sanitario) y la comercialización del biosólido. Adicionalmente, se generó un manual de procedimientos operativos como herramienta para el operador de la PTAR a la hora de aplicar el plan propuesto con las variables de tratamiento definidas en este estudio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización del lodo

Los lodos residuales varían en su composición fisicoquímica y microbiológica dependiendo de una serie de factores como el sistema de tratamiento del que provengan, la naturaleza del agua residual y las características de salud de la población servida. Por esto, es sumamente importante realizar estudios base de caracterización para optar por alternativas seguras de tratamiento, uso y/o disposición (Bedoya-Urrego, Acevedo-Ruíz, Peláez-Jaramillo & Agudelo-López, 2013).

En este estudio se analizaron los factores de pH, temperatura, humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, UFC y huevecillos de helmintos, para el lodo crudo de la PTAR Lagos de Lindora después de que este es dispuesto en los lechos de secado y el sobrenadante ha sido decantado. Los resultados de estas pruebas se observan en el cuadro 5.1. Con respecto a los parámetros fisicoquímicos, se determinó que el pH se encuentra dentro del rango permitido por la legislación presentada en el cuadro 3.1, sin embargo, el porcentaje de humedad se encuentra muy elevado, por lo tanto, los sólidos totales representan un pequeño porcentaje. Para los indicadores microbiológicos, el valor de los HH/g se encuentra por debajo del límite máximo establecido en el reglamento para un biosólido clase B, no siendo así en el caso de los coliformes fecales.

Cuadro 5.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del lodo residual crudo.

Lodo	pH	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Sólidos Totales ($\pm 0,0001$) mg/g	Sólidos Volátiles ($\pm 0,0001$) mg/g	HH/g	UFC/g
Crudo	6,83	22	98,3203 \pm 0,0371	16,7966 \pm 0,3711	13,0425 \pm 0,2581	9	2,56x10 ⁷
Clase B Norma	5-12	-	75	-	-	10	2x10 ⁶

Los sólidos totales están compuestos de materia flotante, sedimentable, disuelto y coloidal, y pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Las concentraciones de ST son utilizadas para dimensionar las tecnologías de tratamientos de lodos fecales como en el caso de los lechos de secado (Strande et al., 2014). Los SV representan el contenido de materia orgánica presente en el lodo; tanto los ST como los SV son utilizados para evaluar la estabilización de estos materiales biológicos. Para conocer el grado de estabilización es necesario realizar mediciones en un cierto periodo de tiempo para evaluar el cambio en el valor de estos parámetros (Posligua, Peñaherrera, Villegas & Banchón, 2018). Con el fin de analizar este aspecto se monitorearon dichos parámetros tanto en la caracterización como en la evaluación de los tratamientos de secado solar.

Los helmintos intestinales transmitidos por el suelo comprenden las especies *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura* y las uncinarias *Necator americanus* y *Ancylostoma duodenale*, que como se mencionó anteriormente, son los más comunes en los seres humanos a nivel mundial y en Costa Rica (Solano & León, 2018). En la figura 5.1 se muestran algunos de los huevecillos encontrados en las muestras de lodo de la PTAR, aunque no se realizó una caracterización y cuantificación por especie, se encontraron uncinarias. Se observaron en menor cantidad huevecillos de *Taenia* sp., cuya prevalencia real no ha sido cuantificada en el país (Solano & León, 2018), pero esto no aminora el riesgo que representa una infección por estos parásitos.

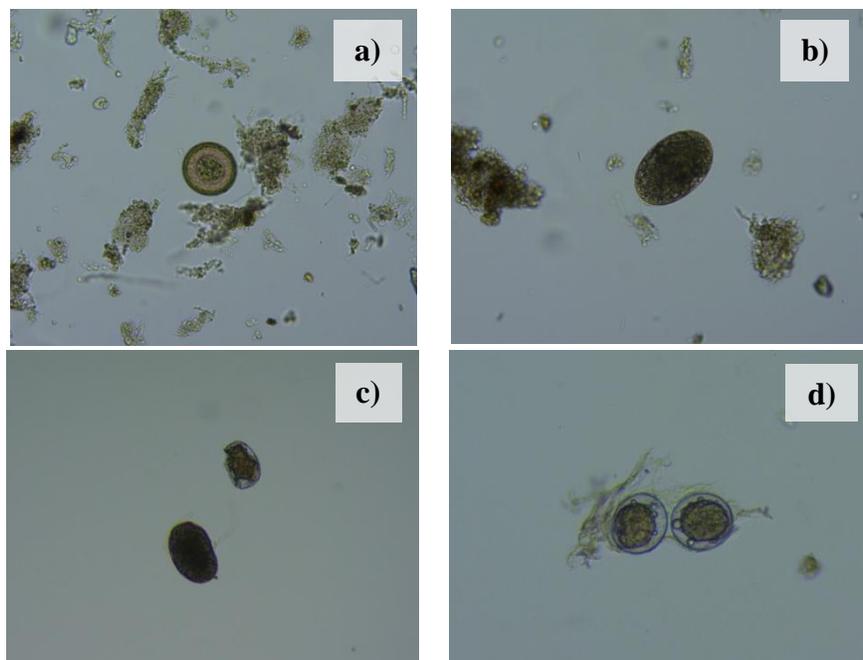


Figura 5.1. Huevecillos de helmintos encontrados en las muestras de lodo de la PTAR Lagos de Lindora. a) *Taenia* sp; b), c) y d) *Uncinaria* sp.

A nivel mundial, las infecciones por uncinarias en humanos son una de las causas principales de morbilidad (índice de personas enfermas en un lugar y tiempo específicos con respecto al total de la población). Debido a la cantidad de personas afectadas por esta enfermedad, es considerada como una de las más importantes en el grupo de las infecciones por parásitos, además de la enfermedad desatendida más importante en las zonas tropicales (Haldeman, Nolan & Ng'habi, 2020).

El ciclo de vida de las uncinarias comprende una serie de etapas las cuales se podrían enlistar como huevecillo, larva fase 1, larva fase 2, larva fase 3 y helminto adulto. Las larvas fase 3 normalmente habitan en el suelo o hierba y son capaces de infectar a los humanos a través de la piel expuesta. Al tener un hospedero, las larvas evolucionan a la fase adulta y pueden reproducirse, generando hasta 20.000 huevecillos por día, que posteriormente serán expulsados a través de las heces. Estos huevecillos con las condiciones óptimas de temperatura, sombra y humedad pueden eclosionar y convertirse en larvas de fase 1 (Haldeman et al., 2020).

Teniendo en cuenta la presencia en los lodos de esta y otras especies de huevecillos de helmintos, coliformes fecales, otros patógenos y contaminantes, se recalca la importancia de darle un adecuado tratamiento y desinfección a los lodos fecales, ya que un mal manejo de estos puede causar un gran impacto negativo en la salud pública y los ecosistemas (Bedoya-Urrego et al., 2013). El análisis de nutrientes, metales y otros parámetros de importancia para matrices cuyo objetivo es ser utilizadas como abono orgánico se realizó en el CIA con una muestra de lodo seco. Los resultados se presentan en el cuadro 5.2, además se muestran análisis realizados en otros estudios para diferentes plantas de tratamiento, así como parámetros óptimos para abonos orgánicos.

Cuadro 5.2. Análisis químico completo para abonos orgánicos.

Parámetros	PTAR Lindora	PTAR Santa Ana*	PTAR Los Reyes*	Abonos Orgánicos**
C (%)	18,65	30,85	33,89	
N (%)	3,00	3,09	4,68	>2
P (%)	0,46	0,79	0,95	0,15-1,5
Ca (%)	1,42	2,32	1,58	
Mg (%)	0,28	0,29	0,35	
K (%)	0,16	0,09	0,21	>1,5
S (%)	0,79	2,04	0,77	
pH	7,1	6,5	7,1	5,0-9,0
Humedad (%)	27	7	84	<40
CE (mS/cm)	5,8	3,4	2,8	<10
Relación C/N	6,2	10	7,2	10-20
Fe (mg/kg)	26048	23,74	12,77	
Cu (mg/kg)	113	252	182	<500
Zn (mg/kg)	584	1545	791	<500
Mn (mg/kg)	330	152	167	<1000
B (mg/kg)	22	47	28	<500

*Baudrit (2015)

** Castro, Henríquez & Bertsch (2009)

La concentración total de nutrientes en los abonos orgánicos puede presentar mucha variabilidad de un material a otro. Su capacidad de aportar estos nutrientes a cultivos, por ejemplo, depende del grado de mineralización de los materiales la cual varía según la materia prima, los procesos a los que se somete y las condiciones presentes en el campo para su descomposición. Diversos autores mencionan que los abonos orgánicos deben tener un valor de N superior al 2%, además el P debe encontrarse en un rango de 0,15-1,5%, en el caso del K este se ha caracterizado por tener una poca afinidad a los componentes orgánicos (Castro, Henríquez & Bertsch, 2009).

El lodo analizado en este estudio cuenta con 3% de N y 0,46% de P lo cual indica que estos parámetros se encuentran dentro de los valores establecidos como óptimos; el K representa solamente un 0,16%, siendo similar a la cantidad de este elemento que se identificó en el lodo de la PTAR Los Reyes.

De igual forma, la relación C/N en las PTARs Lagos de Lindora y Los Reyes tiene valores cercanos (6,2 y 7,2), pero ambos menores al de la PTAR Bosques de Santa Ana. Un valor aceptable de C/N para abonos orgánicos se encuentra entre 10 y 20, este parámetro es un indicador de la velocidad de descomposición del material y por consiguiente la mineralización de sus componentes. Aunque existe un rango ideal, aquellos abonos cuya relación C/N es >20 presentan mayores dificultades para liberar los nutrientes en comparación a los que cuentan con un valor <10 (Castro et al., 2009).

En la normativa costarricense no se contemplan límites máximos permisibles para metales pesados, sin embargo, la USEPA establece que un biosólido no debe de contener más de 4500 mg/kg de Cu y 7500 mg/kg de Zn. La norma mexicana NOM-004-SEMARNAT (2002) considera estos mismos valores para biosólidos clasificados de buena calidad, pero cuenta también con una clasificación de biosólidos de excelente calidad en la que los límites máximos son 1500 mg/kg de Cu y 2800 mg/kg de Zn. Los lodos de la PTAR Lagos de Lindora se encuentran muy por debajo de los valores establecidos en estas normas internacionales.

La caracterización de los lodos de la PTAR en estudio demostró que, aunque contiene una buena cantidad de nutrientes, el lodo crudo no clasifica como un biosólido clase A ni B según la normativa correspondiente, por lo que se le debe dar un tratamiento que permita alcanzar los parámetros requeridos para obtener un producto seguro y de calidad. Además, la caracterización sirve como línea base y punto de comparación con los tratamientos a evaluar, para determinar su efectividad.

5.2. Evaluación de tratamientos

5.2.1. Secado solar

A nivel mundial existe una gran preocupación que gira en torno al saneamiento, y es el manejo y la disposición segura de los lodos provenientes de las aguas residuales, especialmente por la transmisión de patógenos presentes en este material. Una de las técnicas más factibles y económicas en las zonas donde se cuenta con condiciones climáticas adecuadas (climas cálidos y secos) es el secado solar. Con esta tecnología se aprovecha la

energía solar para deshidratar los lodos y a su vez higienizarlos; sin embargo, los efectos del secado solar con respecto a la eliminación de patógenos pueden generar resultados muy variables (Öğleni & Özdemir, 2010).

Para evaluar este tratamiento, se simularon 7 lechos de secado a pequeña escala en donde se colocó lodo crudo de la PTAR Lagos de Lindora a dos diferentes alturas (15 y 20 cm) y se dejó secar en un intervalo de 5 a 24 días, en las instalaciones del ITCR en Cartago. Se tomaron datos de dos estaciones meteorológicas durante el periodo del tratamiento, una ubicada en el ITCR y la otra en el Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños, el cual se encuentra cerca de la PTAR en estudio. Los parámetros analizados fueron temperatura, humedad relativa y radiación horaria máxima, los cuales se visualizan en las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 respectivamente. En el apéndice 10.1. “Información meteorológica utilizada para la comparación de condiciones climáticas entre el sitio de estudio y el utilizado para realizar las pruebas” se muestran detalladamente los datos tomados. Además, en el cuadro 5.3 se muestran los valores máximos, mínimos y promedios para cada condición meteorológica.

Cuadro 5.3. Parámetros meteorológicos determinados durante el tratamiento de secado solar realizado en época lluviosa según el promedio diario.

Estación meteorológica	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)			Radiación horaria máxima (kW/m ²)		
	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio
ITCR	23,23	18,8	21,06±1,09	100	71,7	82,2±6,85	1,21	0,13	0,67±0,20
A.I. Tobías Bolaños	25,33	21,43	23,54±0,97	95,7	61,67	75,72±7,73	0,96	0,12	0,60±0,18

*A.I.: Aeropuerto Internacional

Se observa que en la estación meteorológica cercana a la PTAR la temperatura promedio es mayor y la humedad relativa corresponde a un valor menor con respecto a Cartago donde se llevó a cabo el tratamiento, sin embargo, la radiación horaria máxima promedio de ambos sitios es similar. En la figura 5.2 se muestra el comportamiento de las temperaturas desde el día 1 al día 24 del secado solar. La temperatura promedio diaria siempre fue mayor en la estación del A.I Tobías Bolaños.

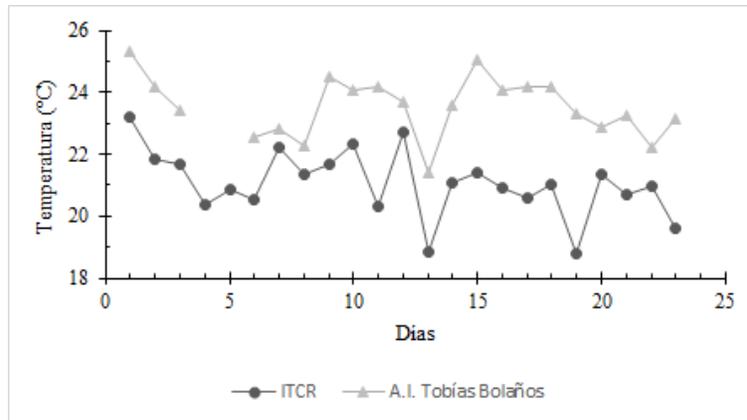


Figura 5.2. Temperaturas promedio diarias de dos estaciones meteorológicas durante el tratamiento de secado solar efectuado en época lluviosa.

En el caso de la humedad relativa (figura 5.3), en la mayoría de los casos, el promedio diario de la estación del ITCR se mantuvo por encima de los datos recopilados para la otra estación.

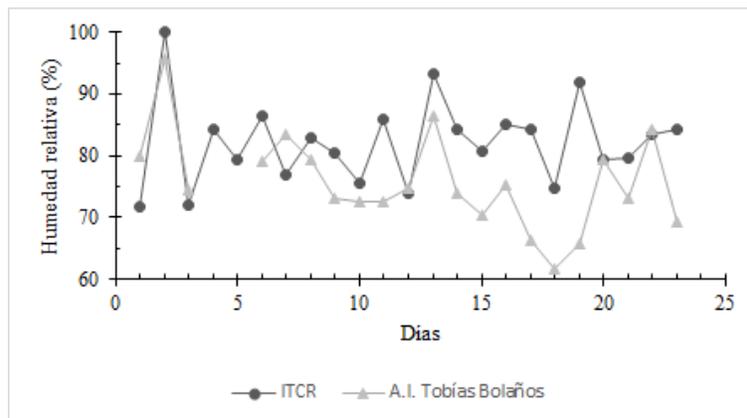


Figura 5.3. Promedio diario de humedad relativa de dos estaciones meteorológicas durante el tratamiento de secado solar efectuado en época lluviosa.

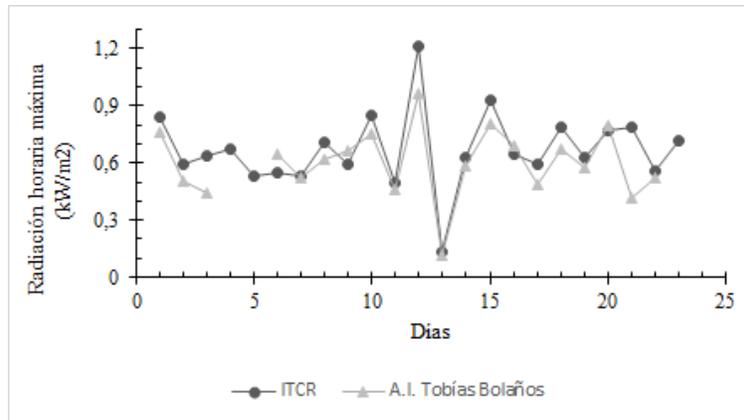


Figura 5.4. Promedio diario de la radiación horaria máxima de dos estaciones meteorológicas durante el tratamiento de secado solar efectuado en época lluviosa.

Con el fin de determinar si existía diferencia significativa entre los datos de los parámetros meteorológicos tomados en ambas estaciones se compararon las varianzas y promedios mediante pruebas estadísticas, estos resultados se muestran en el cuadro 5.4.

Cuadro 5.4. Análisis estadístico de datos de las estaciones meteorológicas analizadas durante el tratamiento de secado solar en época lluviosa, con un 95% de confianza.

Parámetro	Prueba F para igualdad de varianzas ($\alpha=0,05$)				Prueba t para igualdad de promedios ($\alpha=0,05$)			
	Hipótesis H_0	Hipótesis H_1	P(F<=f) una cola	Decisión	Hipótesis H_0	Hipótesis H_1	P(T<=t) dos colas	Decisión
Temperatura	$S_1^2=S_2^2$	$S_1^2 \neq S_2^2$	0,3049	Se acepta H_0	$\bar{X}_1=\bar{X}_2$	$\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$	$6,6 \times 10^{-10}$	Se rechaza H_0
Humedad	$S_3^2=S_4^2$	$S_3^2 \neq S_4^2$	0,2909	Se acepta H_0	$\bar{X}_3=\bar{X}_4$	$\bar{X}_3 \neq \bar{X}_4$	0,0052	Se rechaza H_0
Radiación	$S_5^2=S_6^2$	$S_5^2 \neq S_6^2$	0,3007	Se acepta H_0	$\bar{X}_5=\bar{X}_6$	$\bar{X}_5 \neq \bar{X}_6$	0,2306	Se acepta H_0

En el caso del análisis de varianzas efectuado mediante la prueba F, se obtuvo que las varianzas de ambas estaciones para cada uno de los parámetros no presentaron diferencia significativa. En el caso de la prueba t para determinar la igualdad de promedios, evidenció que para la radiación horaria máxima no existe diferencia significativa, caso contrario a lo que sucede con la temperatura y la humedad las cuales presentan diferencia significativa en los promedios de ambas estaciones.

Las características de los lodos pueden verse directamente influenciadas por las condiciones climáticas, en especial por la temperatura y la humedad. En los países con clima tropical, durante la época lluviosa las temperaturas decrecen considerablemente e incluso el caudal que ingresa a las PTARs aumenta debido a las altas precipitaciones, mientras que en la época seca se alcanza la temperatura máxima. Adicionalmente, la temperatura influye en la tasa de degradación biológica, a temperaturas más altas se tendrá una mayor degradación. En el caso de la humedad, esta reduce la eficiencia del proceso de secado (Strande et al., 2014). Las condiciones de humedad y temperatura en el lugar donde se realizó el tratamiento (ITCR) son menos favorables que en la PTAR Lagos de Lindora según el análisis estadístico, por lo que los datos obtenidos corresponden a un escenario crítico.

La radiación solar ayuda a inactivar microorganismos patógenos mediante reacciones fotoquímicas que desnaturalizan las moléculas de ADN. Para que los rayos ultravioleta sean efectivos como tratamiento, estos deben penetrar los lodos fecales, sin embargo, los lodos cuentan con una alta carga de materia orgánica y turbidez por lo que el efecto de la radiación se da especialmente en la superficie, sin alcanzar a atravesar toda la capa de lodo (Strande et al., 2014). Como lo hace notar Andreoli (2001), siempre va a existir un gradiente de temperatura en el perfil del lodo, de esta forma, cuanto mayor sea la profundidad de la capa las temperaturas que actúan sobre ella son menores. Así, los tiempos de exposición deben ser mayores y esto aumenta el área necesaria para el tratamiento.

La figura 5.5, presenta las características de la torta a cada tiempo de exposición. A cada muestra tomada se le realizaron mediciones de pH y temperatura, los valores de estos parámetros se observan en el cuadro 5.5. En todos los casos el pH se encontró dentro del rango establecido por la normativa (5-12), siendo 5,25 el valor mínimo de este parámetro en el tratamiento de 24 días de secado a una altura de lecho de 15 cm. La temperatura máxima se encontró a los 17 días de secado en el lecho de 15 cm (25 °C), mientras que la más baja fue de 20,7 °C (a los 24 días y altura de 20 cm).

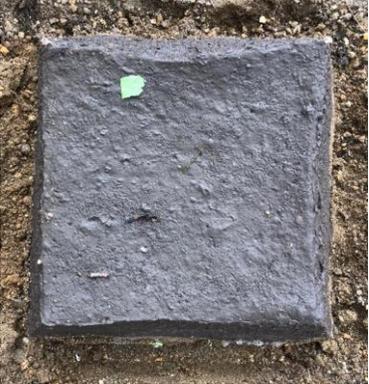
Crudo			Altura 20 cm, 5 días		
					
% humedad: 98,3203±0,0371			% humedad: 80,7334±0,1513		
Altura 20 cm					
10 días		17 días		24 días	
					
% humedad: 85,0369		% humedad: 74,2830±0,2122		% humedad: 80,7293±0,0007	
Altura 15 cm					
10 días		17 días		24 días	
					
% humedad: 84,7528±0,9541		% humedad: 53,5311±6,5667		% humedad: 45,0477±8,4696	

Figura 5.5. Características de las tortas de lodo según tiempo de exposición.

Cuadro 5.5. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de lodo tratadas mediante la técnica de secado solar con dos diferentes alturas de lecho.

Fecha de muestreo	Tiempo de secado (d)	pH		Temperatura (°C)	
		20 cm	15 cm	20 cm	15 cm
03/08/2020	5	6,40	-	21,10	-
16/06/2020	10	7,32	6,11	21,60	20,70
23/06/2020	17	6,30	7,66	22,90	25,00
30/06/2020	24	7,22	5,25	20,70	21,30

A su vez, se analizó el contenido de ST y % de humedad cuyos resultados se presentan en la figura 5.6. Con respecto al lodo crudo, la concentración de sólidos totales aumentó para ambas alturas del lecho, sin embargo, a partir del día 17 los lechos con altura de 15 cm presentaron un mayor aumento de estos parámetros, alcanzando valores de aproximadamente 465 mg/g a los 17 días y 550 mg/g a los 24 días de secado.

Aunado a esto, los dos tratamientos señalados fueron los que presentaron un mayor decrecimiento del porcentaje de humedad, llegando a valores de 53% y 45% respectivamente, ambos se encuentran por debajo del límite máximo permisible que se indica en la legislación nacional (75%). De los tratamientos manejados con una altura de 20 cm solamente uno cumplió con el valor requerido después de 17 días de secado, alcanzando un valor de 74,28%.

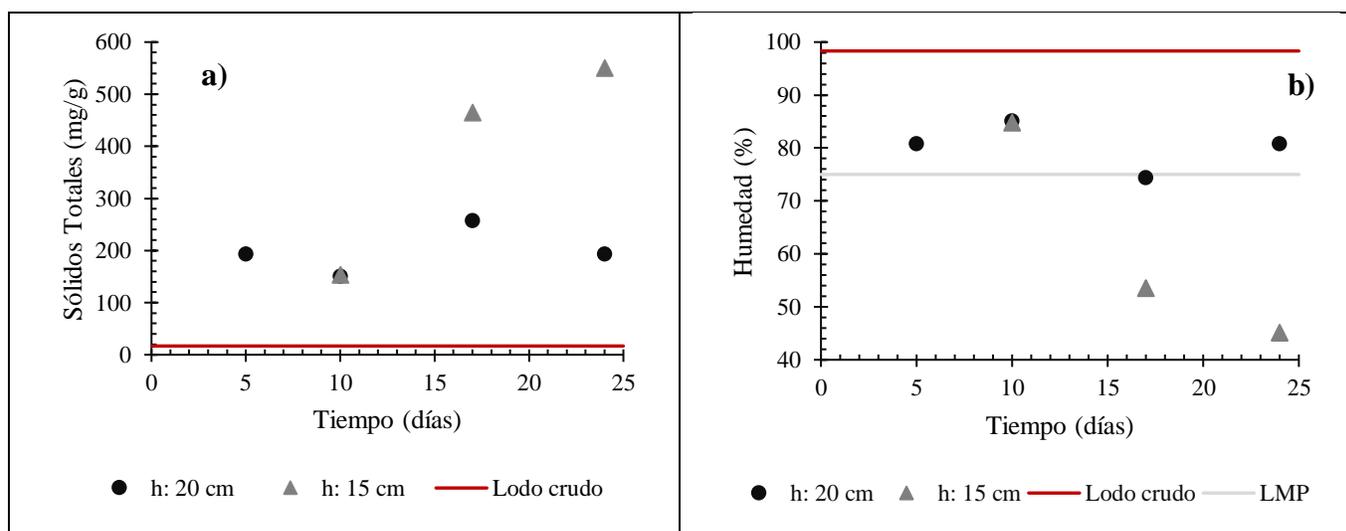


Figura 5.6. Sólidos totales (a) y % de humedad (b) para las muestras tratadas mediante secado solar a dos diferentes alturas de lecho.

Los SV (figura 5.7) por su parte, presentan un aumento en todos los tratamientos analizados con respecto al lodo crudo. En general los valores se mantuvieron en un rango que iba desde los 85,59 mg/g hasta los 238,82 mg/g. Según lo mencionado anteriormente, los ST y los SV

son utilizados como indicadores de la estabilización biológica, observando los resultados obtenidos en el presente apartado se afirma que, en este caso, el secado solar no contribuyó a la estabilización del lodo.

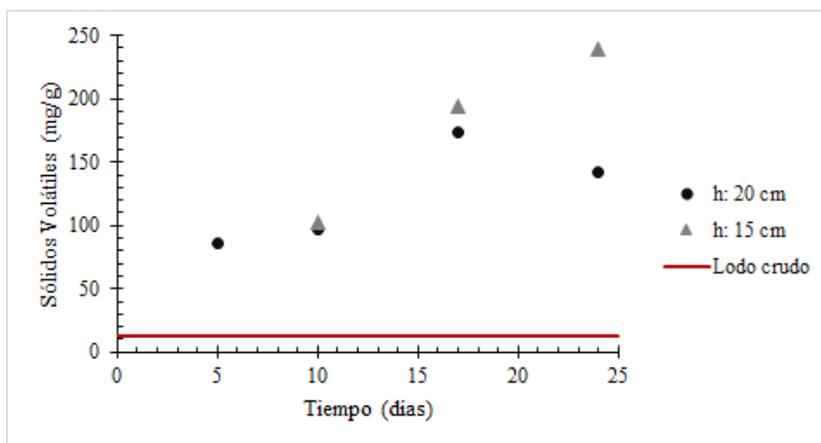


Figura 5.7. Comportamiento de los sólidos volátiles durante el tratamiento de secado solar a dos diferentes alturas de lecho.

Los indicadores microbiológicos cuantificados fueron huevecillos de helmintos y coliformes fecales, los resultados se muestran en las figuras 5.8 y 5.9 respectivamente.

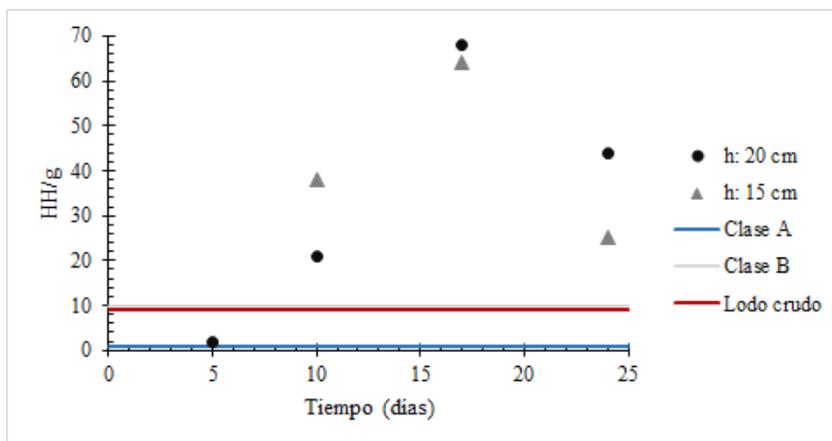


Figura 5.8. Huevecillos de helmintos por gramo de materia seca cuantificados en las muestras con tratamiento de secado solar.

En la mayoría de los tratamientos de secado solar se encontraron niveles de huevecillos de helmintos mayores al presente en el lodo crudo. Solamente un tratamiento se ubicó como biosólido de clase B para este parámetro, el cual fue el lecho con 5 días de secado a 20 cm, con un valor de 2 HH/g.

Para los coliformes fecales se presentó una disminución de todos los tratamientos con respecto a la carga de este microorganismo con la que contaba el lodo crudo, sin embargo,

no fue suficiente para alcanzar la Clase A en ninguno de los casos. Con respecto a la clase B, 3 de los tratamientos están por debajo del límite establecido, estos son el lecho de 20 cm de altura con 10 días, y los lechos a 15 cm de altura para 17 y 24 días de secado.

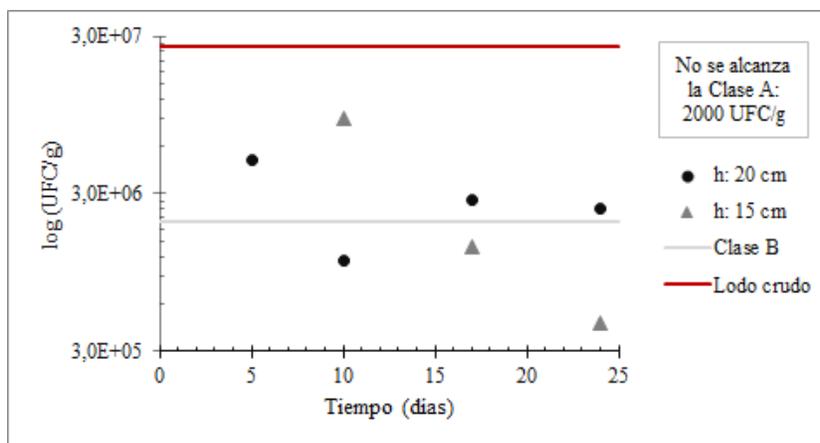


Figura 5.9. UFC de Coliformes Fecales por gramo de materia seca detectadas en las muestras con tratamiento de secado solar.

Uno de los factores determinantes en la eficiencia de tratamientos como el secado solar es la duración de este. Los patógenos tienen un tiempo de sobrevivencia limitado en condiciones adversas. Los coliformes fecales pueden sobrevivir en el lodo un promedio de 50 días, pero en general las bacterias tienen periodos de permanencia que van desde una semana a 2 meses. Otros microorganismos son mucho más resistentes, como los huevecillos de helmintos que pueden permanecer durante meses o años (Strande et al., 2014). Según el diseño experimental propuesto, se trabajó con menores tiempos de exposición al sol que el promedio de sobrevivencia de los patógenos indicadores.

En el estudio de Segura (2018) los coliformes totales después de 19 días de secado presentaron un aumento con respecto al lodo inicial e indica que una de las posibles razones es que las condiciones del clima no favorecieron la eliminación de los patógenos, sino más bien propiciaron su crecimiento. Cota-Espericueta y Ponce-Corral (2008) utilizaron una estructura tipo invernadero con dispositivos que facilitaban el tratamiento, por lo cual alcanzaron una reducción de coliformes fecales del 99% tras 11 días de tratamiento. Paluszak et al. (2012) realizaron un secado solar bajo las siguientes condiciones meteorológicas promedio: temperatura de 25,2 °C, humedad de 58% y radiación de 327,8W/m². A los 28 días de tratamiento la concentración de *Escherichia coli* era de 3,17x10⁶ UFC/g, por lo que concluyeron que esta técnica no garantiza la higienización de los lodos.

Para la PTAR Lagos de Lindora se observa un aumento importante en la concentración de huevecillos de helmintos con el paso del tiempo. Con respecto al ciclo de estos patógenos, de huevecillos pasan a larva y posteriormente se convierten en helmintos adultos. Cuando

estos corresponden a especies dioicas o hermafroditas son capaces de colocar nuevos huevecillos en el lodo sin necesidad de un hospedero, completando el ciclo, si las condiciones ambientales son aptas para su reproducción. Además, los helmintos son altamente resistentes a condiciones ambientales adversas (V. Montero, comunicación personal, 30 de octubre del 2020). Por esto se determinó que el secado solar con las variables propuestas es un tratamiento limitado para la desinfección del lodo.

5.2.2. Alcalinización

El tratamiento alcalino, también llamado encalado, se lleva a cabo al mezclar el biosólido con una dosis determinada de cal para elevar el pH y propiciar la desinfección de este. Otros factores que ayudan a la higienización son el aumento en la temperatura y la volatilización de amoníaco. Esta técnica se ha vuelto una de las más empleadas y diversos estudios han logrado determinar que es un tratamiento eficiente frente a la eliminación de indicadores como los coliformes fecales y los helmintos (Silva-Leal et al., 2013).

El estudio de la alcalinización como agente higienizante del lodo se llevó a cabo a escala de laboratorio. Se tomó lodo crudo concentrado de la PTAR Lagos de Lindora y en beakers de 1 litro se agregaron diferentes dosis de Óxido de Calcio a dos tiempos de contacto para comparar sus resultados. Además, se monitorearon los parámetros de pH y temperatura, considerados de suma importancia en este tipo de tratamiento, estos se presentan en el cuadro 5.6. Se observó que la temperatura no tuvo un aumento significativo con respecto a la temperatura ambiental, mientras que el pH sí logró un incremento, especialmente en la dosis más alta llegando a valores cercanos a 11.

Cuadro 5.6. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de lodo crudo tras la aplicación de alcalinizante.

Dosis (g/g lodo)	pH		Temperatura (°C)		Humedad (%)
	2 h	24 h	2 h	24 h	
0,12	8,20	8,50	23,00	22,40	
0,2	10,70	7,80	22,90	22,00	98,3203±0,0371
0,25	11,74	10,88	22,90	22,60	

Se cuantificó la presencia de huevecillos de helmintos y UFC de coliformes fecales para cada una de las pruebas realizadas (figuras 5.10 y 5.11 respectivamente). Estos resultados se compararon con los obtenidos en la caracterización, además de lo establecido por la normativa para biosólidos de clase A y B.

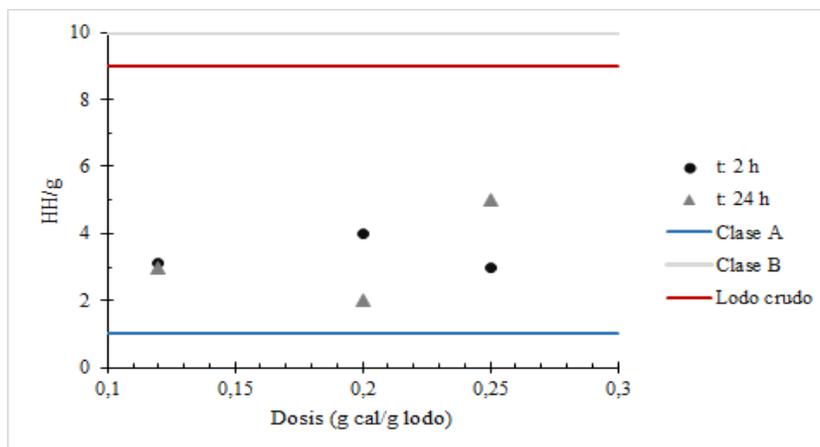


Figura 5.10. Huevecillos de helmintos por gramo de materia seca cuantificados en las muestras tratadas con la técnica de alcalinización.

La aplicación de cal al lodo sin tratamiento de la PTAR contribuyó a una reducción de la cantidad de huevecillos de helmintos por gramo con respecto al lodo crudo. Todas las combinaciones de dosis de cal con diferentes tiempos de contacto lograron que el lodo alcanzara la clase B, sin embargo, ninguno de estos logró una desinfección clase A para este parámetro. De igual forma, los coliformes fecales se encontraron por debajo del lodo crudo y la mayoría de los tratamientos clasificó como clase B.

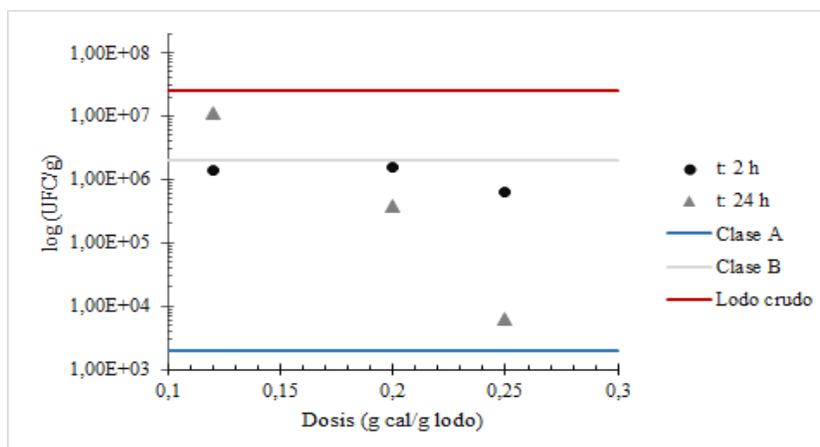


Figura 5.11. Cuantificación de UFC de Coliformes Fecales por gramo de materia seca en las muestras tratadas con alcalinizante.

Muy pocos microorganismos logran sobrevivir en valores de pH menores a 3 y mayores a 10, por lo que la adición de un agente químico como la cal capaz de aumentar el pH es una buena forma de reducir patógenos. Al utilizar este tipo de tratamientos como lo es la alcalinización se debe tener en cuenta el manejo posterior del lodo o tratamientos complementarios, ya que el pH puede afectar procesos como el compostaje y la digestión anaeróbica (Strande et al., 2014).

El fundamento de la alcalinización está en el aumento del pH a 12, para lo cual se requiere adicionar cantidades adecuadas de cal. El incremento del pH propicia no solamente la reducción de patógenos, sino que contribuye a la reducción de olores, incrementa la eficiencia de sedimentación e hidroliza grasas, carbohidratos, proteínas y amoníaco. Después de la reacción inicial el pH puede decrecer por lo que en algunos casos requiere añadir más cal (Strande et al., 2014). La cal viva es la más utilizada para tratar grandes cantidades de lodo, esta provoca una buena elevación del pH. También proporciona un aumento en la temperatura, sin embargo, al mezclarse con el lodo esta no es suficiente para aportar en la higienización (Andreoli, 2001).

Las variables que mejores resultados tuvieron para este estudio en cuanto a huevecillos de helmintos fueron una dosificación de 0,20 g/g con 24 h de contacto, mientras que el mejor resultado de coliformes fecales se dio al aplicar una dosis de 0,25 g/g durante el mismo tiempo de contacto. Con la mayor dosis utilizada se logró alcanzar un pH superior a 11 después de haberse adicionado la cal, contrario a lo que sucedió con la dosis más pequeña cuyos valores de pH no pasaron de 9 y por lo tanto no contribuyó a la eliminación de los agentes patógenos.

Silva-Leal et al. (2013) realizaron análisis con diferentes porcentajes de CaO y Ca(OH)₂, de los cuales la cal viva dio mejores resultados en la desinfección del lodo, ya que esta reacciona con la humedad aumentando la temperatura y causando la liberación de gases. Adicionalmente determinaron que el tratamiento no aportó en la disminución del porcentaje de humedad debido a que las temperaturas alcanzadas no fueron tan altas, por lo que la higienización se dio principalmente por la permanencia del pH mayor a 12 durante 72 h y la formación de amoníaco que tiene función bactericida. En otro estudio se determinó que el pH alcanzó un valor de 12 al aplicar una dosis de CaO del 13%, este pH logró mantenerse durante 96 horas resultando en una inmediata eliminación de coliformes fecales, huevecillos de helmintos y otros microorganismos de control como *Salmonella* sp., y bacteriófagos (Castellanos-Rozo, Galvis-López, Merchán-Castellanos, Manjarres-Hernández & Rojas, 2020). Coelho et al. (2018) utilizaron Ca(OH)₂, tras 24 horas de tratamiento las muestras presentaron cambios en la comunidad bacteriana y se logró un material apto sanitariamente para su uso en actividades agrícolas.

Para el caso de la PTAR Lagos de Lindora se evidenció que la aplicación de cal contribuye a la eliminación de microorganismos patógenos, sin embargo, se necesita un tratamiento complementario que contribuya a la deshidratación del lodo, para alcanzar además el porcentaje de humedad permitido por la legislación nacional.

Si bien, adicionar cal en la matriz de lodo con un baja concentración de sólidos facilita las labores de mezcla, se utiliza mucho de la cal reaccionando con la matriz acuosa, limitando la acción sobre los sólidos del lodo.

5.2.3. Secado solar + alcalinización

Desde el punto de vista microbiológico el tratamiento propuesto mediante secado solar resultó ser limitado para la higienización del lodo de la PTAR Lagos de Lindora, mientras que, la adición de cal contribuyó en gran medida a la reducción de patógenos, requiriendo la reducción del porcentaje de humedad. Por esto, se consideró realizar un tratamiento que combine el secado solar para la deshidratación del lodo junto con una alcalinización, en condiciones de humedad que permita la optimización del alcalinizante y dé como resultado un biosólido apto para su uso según los parámetros microbiológicos.

Para este análisis se corrieron dos lechos de secado con una altura de lodo de 20 cm cada uno, los tiempos de secado fueron de 5 y 10 días. Pasado este tiempo se realizó la dosificación de cal en el laboratorio, aplicando dosis de 0,20 y 0,25 g/g con un tiempo de contacto de 24 h. Según estudios, la altura del lecho que se maneja en general en el secado solar es de 20 a 30 cm, con una preferencia notable en la primera altura mencionada. Esto debido a que a mayores alturas el tiempo de secado se incrementa, con lo que se reduce el espacio disponible en los lechos de secado. Un aumento de 10 cm en la altura de la cama de lodo puede aumentar el tiempo de secado entre un 50 y un 100%, por lo que lo recomendable es usar alturas menores (Strande et al., 2014).

Posterior al secado solar y la alcalinización, a cada muestra se le realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos (cuadro 5.7). Se determinó que las muestras con 5 días de secado lograron valores de pH mayores a 12 con ambas dosificaciones tras las 24 horas de contacto, valor óptimo para la desinfección, mientras que el lodo con 10 días de secado apenas superó el valor de pH de 9. Por otra parte, la humedad para ambos tiempos de secado sigue siendo mayor al límite permitido, el cual es 75%.

Cuadro 5.7. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de lodo tratadas mediante secado solar y alcalinización.

Dosis (g/g lodo)	pH		Temperatura (°C)		Humedad (%)	
	5 días	10 días	5 días	10 días	5 días	10 días
0,2	12,43	9,88	21	21,4	80,7334±0,1513	85,0369
0,25	12,38	9,44	20,8	21,5		

En las figuras 5.12 y 5.13 se presentan los resultados obtenidos de huevecillos de helmintos y coliformes fecales. Para el primer indicador se observa que la adición de cal a los 5 días de secado colocó a las muestras con ambas dosificaciones dentro del biosólido clase A. En el caso de las muestras con 10 días de secado no se obtuvieron resultados tan favorables, esto porque durante el tiempo de contacto con la cal no se alcanzó el pH esperado. Un comportamiento similar se evidenció para los coliformes fecales, en donde el lodo con secado solar de 5 días dio mejores resultados que con el otro tiempo de secado, aunque este parámetro solo clasifique al biosólido como clase B.

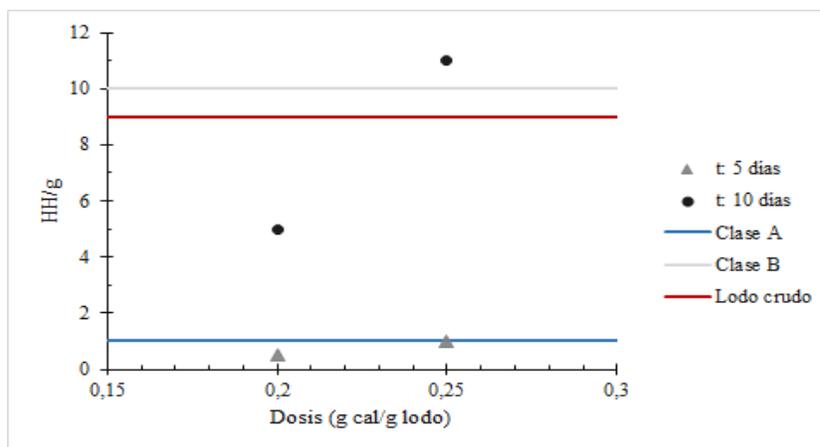


Figura 5.12. Determinación de Huevecillos de helmintos por gramo de materia seca en el tratamiento de secado solar + alcalinización.

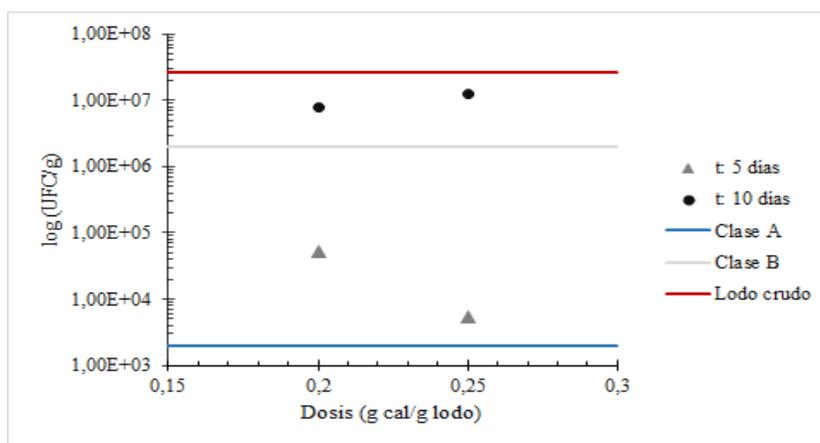


Figura 5.13. UFC de Coliformes Fecales por gramo de materia seca contabilizadas en las muestras tratadas con secado solar + alcalinización.

Strande et al. (2014) indican que los patógenos necesitan agua para su supervivencia, por lo que la deshidratación ayuda a reducir los microorganismos activos. Para que este proceso ocurra con eficiencia, el contenido de agua debe alcanzar cierto valor, donde los patógenos no tengan las condiciones adecuadas para sobrevivir. Por otra parte, la aplicación de cal

puede darse tanto antes como después de la deshidratación del lodo, pero se debe de tener en cuenta que en lodos muy húmedos se requiere mucho más alcalinizante.

5.3. Determinación de la técnica factible y el procedimiento operativo

5.3.1. Comparación de tratamientos

Como primer aspecto para determinar la técnica con mayor factibilidad se realizó una comparación de los tratamientos de secado solar y secado solar + alcalinización, con respecto a la norma para determinar los parámetros que propiciaron una desinfección adecuada y generaron un biosólido de mejor calidad.

Al comparar los resultados de la cuantificación de huevecillos de helmintos para todas las pruebas realizadas con secado solar con respecto a los del tratamiento combinado (secado solar junto con adición de cal), se demuestra que el secado solar por sí solo no contribuye a generar un biosólido seguro para su uso, ya que los valores se mantuvieron por encima del límite establecido para la clase B, e incluso son mayores que lo cuantificado en el lodo crudo (figura 5.14). Solamente en el caso del secado solar de 5 días el lodo contaba con 2 HH/g. En contraste con el tratamiento combinado, la adición de cal contribuyó a disminuir las concentraciones de huevecillos con ambas dosificaciones analizadas, siendo de igual forma la aplicación de cal después de 5 días de deshidratado el lodo, donde este contaba con un 80% de humedad.

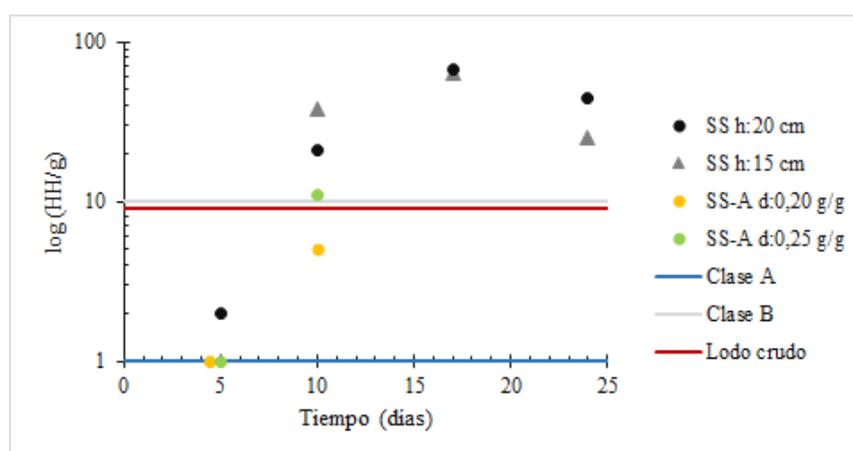


Figura 5.14. Comparación de los tratamientos de secado solar y secado solar + alcalinización mediante el parámetro Huevecillos de helmintos.

En la figura 5.15 se observa de manera gráfica el comportamiento de los coliformes fecales en el secado solar y el tratamiento combinado. Para el secado solar a pesar de que se encontró una disminución del indicador con respecto al lodo crudo, no todas las pruebas realizadas alcanzaron la clase B. Para el secado solar con posterior alcalinización se demostró que la aplicación de cal a los 10 días de secado no brinda los resultados buscados, sin embargo, tras 5 días de secado las muestras con ambas dosificaciones se encontraron dentro de la clase B.

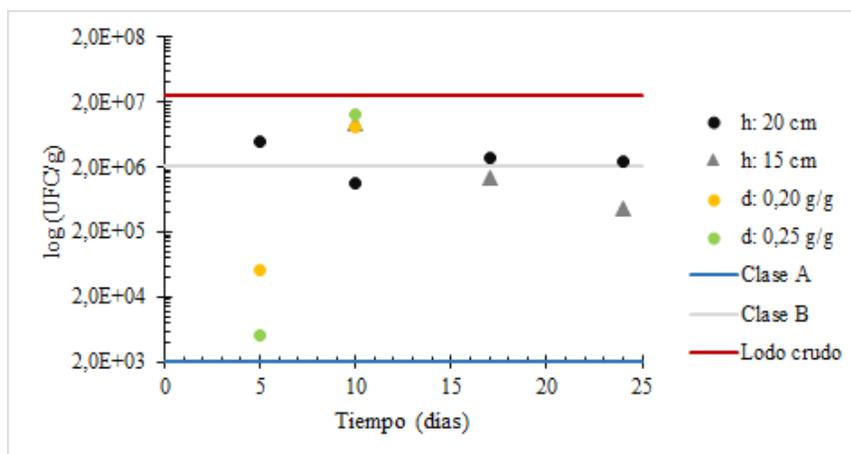


Figura 5.15. Comparación de los tratamientos de secado solar y secado solar + alcalinización mediante el parámetro Coliformes Fecales.

A pesar de que la dosis mayor (0,25 g/g) presenta mejores resultados para los coliformes fecales, ambas dosificaciones actúan correctamente para la generación de un biosólido clase B, pero una mayor dosis implica un gasto económico más grande. Tal y como afirman Strande et al. (2014), al momento de proponer un tratamiento químico con alcalinizante es necesario considerar todos los parámetros de diseño según las características del lodo, como la dosis de cal, el tiempo de contacto y el pH. Esto con el fin de obtener los resultados deseados de la manera más efectiva y económica que sea posible. De esta forma, en el cuadro 5.8 se resumen los parámetros seleccionados para el tratamiento propuesto.

Cuadro 5.8. Parámetros recomendados para el tratamiento de los lodos de la PTAR Lagos de Lindora.

Parámetro	Valor
Tiempo de secado solar	17 días como mínimo
Dosis de cal	0,20 g cal / g lodo
Día de aplicación de cal	Día 5 del secado solar
Altura del lecho	0,20 m

Cabe destacar que la aplicación de cal debe darse de la mano de los procedimientos de salud y seguridad. Es de carácter obligatorio para los operadores utilizar equipo de protección personal como lentes de seguridad, guantes, botas y vestimenta adecuada, al ser este producto químico muy corrosivo y presentar riesgo para la piel, ojos y el sistema respiratorio. Adicionalmente, el almacenamiento del producto debe ser apropiado, garantizando su protección a factores como el fuego y la humedad (Strande et al., 2014).

5.3.2. *Parámetros de diseño*

Para determinar si la infraestructura actual de la PTAR en cuanto a los lechos de secado cumple los requerimientos para el tratamiento propuesto se realizaron una serie de cálculos y comparaciones con respecto a los parámetros de operación actuales. A continuación, se presenta la memoria de cálculo correspondiente.

En el cuadro 5.9 se encuentran las dimensiones de cada lecho de secado, la PTAR cuenta con 4 de estas unidades. Actualmente se maneja una altura de lodo concentrado de 0,25 m. El lodo concentrado es aquel cuyo sobrenadante ha sido decantado posterior a la purga en el lecho.

Cuadro 5.9. Dimensiones actuales de cada lecho de secado de la PTAR Lagos de Lindora.

Dimensión	Valor
Ancho	3,5 m
Largo	6 m
Área del lecho	21 m ²
Altura actual de aplicación de lodo concentrado	0,25 m

Se calculó el volumen de lodo concentrado según la altura actual con la ecuación 5.1.

$$V_1 = A \times h_1 \text{ (ec.5.1)}$$

Donde:

V_1 = volumen de lodo concentrado actual (m³)

A = área del lecho (m²)

h_1 = altura actual de lodo concentrado (m)

$$V_1 = 21 \text{ m}^2 \times 0,25 \text{ m}$$

$$V_1 = 5,25 \text{ m}^3$$

Tomando en cuenta que la frecuencia de purga es cada 7 días (una vez a la semana) y que el volumen de lodo concentrado actual es de $5,25 \text{ m}^3$ en cada purga, el volumen de lodo concentrado que se maneja en la planta es de 21 m^3 por mes, utilizando los 4 lechos existentes. Según esto es posible calcular el caudal diario de lodo con la fórmula 5.2.

$$Q_{diario} = \frac{V_{1 \text{ mensual}}}{30 \text{ días}} \text{ (ec.5.2)}$$

Donde:

Q_{diario} = caudal diario de lodo ($\text{m}^3/\text{día}$)

$V_{1 \text{ mensual}}$ = volumen mensual de lodo (m^3)

$$Q_{diario} = \frac{21 \text{ m}^3}{30 \text{ días}}$$

$$Q_{diario} = 0,70 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Para el tratamiento propuesto se definió una frecuencia de descarte del lodo de 6 días, el nuevo volumen de lodo concentrado está dado por la fórmula 5.3.

$$V_2 = fd \times Q_{diario} \text{ (ec.5.3)}$$

Donde:

V_2 = volumen de lodo concentrado con el tratamiento propuesto (m^3)

fd = frecuencia de descarte (día)

$$V_2 = 6 \text{ días} \times 0,70 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$V_2 = 4,2 \text{ m}^3$$

Con dicho volumen y el área del lecho se calcula la nueva altura de lodo concentrado para el tratamiento propuesto (ecuación 5.4).

$$h_2 = \frac{V_2}{A} \text{ (ec.5.4)}$$

Donde:

h_2 : altura de lodo concentrado con el tratamiento propuesto (m)

$$h_2 = \frac{4,20 \text{ m}^3}{21 \text{ m}^2}$$

$$h_2 = 0,20 \text{ m}$$

Se demuestra de esta forma que el volumen de lodo concentrado propuesto según el área disponible de cada lecho permite tener una altura de lodo concentrado de 0,20 m, tal y como se planteó en los parámetros del nuevo tratamiento (secado solar + alcalinización). Por último, se verificó el número de lechos o módulos necesarios según el tiempo de secado y la frecuencia de descarte, con la fórmula 5.5.

$$\text{Número de módulos} = \frac{\text{Tiempo de secado por purga}}{fd} \text{ (ec.5.5)}$$

$$\text{Número de módulos} = \frac{24 \text{ días}}{6 \text{ días}} = 4 \text{ unidades}$$

Se tomó en cuenta que el tiempo máximo que el lodo puede mantenerse dentro del lecho es de 24 días, para que la cantidad de lechos de secado con los que cuenta actualmente la PTAR sean suficientes para llevar a cabo el tratamiento de secado solar + alcalinización según los parámetros recomendados. Este tiempo por purga comprende la purga y el concentrado del lodo en el lecho, los procesos de encalado y secado solar y la extracción del lodo seco. En las figuras 5.16 y 5.17 se muestra gráficamente la rutina de operación en dos escenarios, tomando en cuenta una sola purga en cada lecho cada 6 días (escenario 1) y doble purga en cada lecho con una frecuencia de descarte de 3 días (escenario 2).

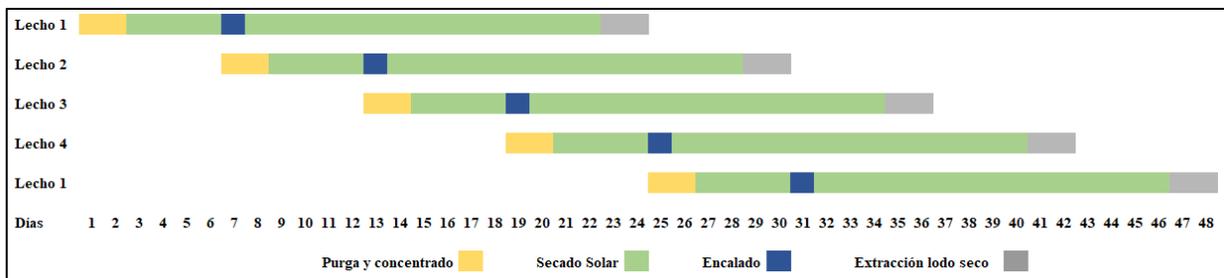


Figura 5.16. Rutina de operación para el escenario 1.

Para el escenario 1 se tienen 2 días para el proceso de purga y concentrado en el lecho. El tratamiento de secado solar da inicio posterior a este proceso, al día 5 del secado se realiza el proceso de encalado de forma manual y se deja el lodo en el lecho hasta completar mínimo

17 días de secado solar. Tomando como ejemplo el lecho 1 de la figura 5.15, la purga y el concentrado se realizan los días 1 y 2, a partir del día 3 comienza el tratamiento de secado solar. Tras 5 días de secado (en el día 7) se agrega la cantidad de cal correspondiente y se deja secar hasta el día 22 (en total se consideraron 20 días de secado solar). Durante los días 23 y 24 se realiza la extracción del lodo seco y el lecho queda habilitado para un nuevo ciclo.

Tal y como se observa, se utilizan los 4 lechos de forma simultánea según la frecuencia de purga y conforme se realiza la extracción del lodo en cada lecho y este queda desocupado, se le realiza una nueva purga. Adicionalmente, con este escenario existe la posibilidad de hacer doble purga en cada lecho, la primera en el día 1 y la segunda en el día 2, si estas se realizan en horas de la mañana para que el lodo pueda concentrarse de una manera óptima.

Para el escenario 2 (figura 5.17) se contempla una frecuencia de descarte de 3 días, haciendo doble purga en cada uno de los lechos. El tratamiento de secado solar inicia después de la segunda purga y concentrado cuando la altura del lodo sea de 0,20 m. De igual forma que en el caso anterior, el secado debe durar mínimo 17 días y el agregado de la cal se debe realizar al día 5 del tratamiento.

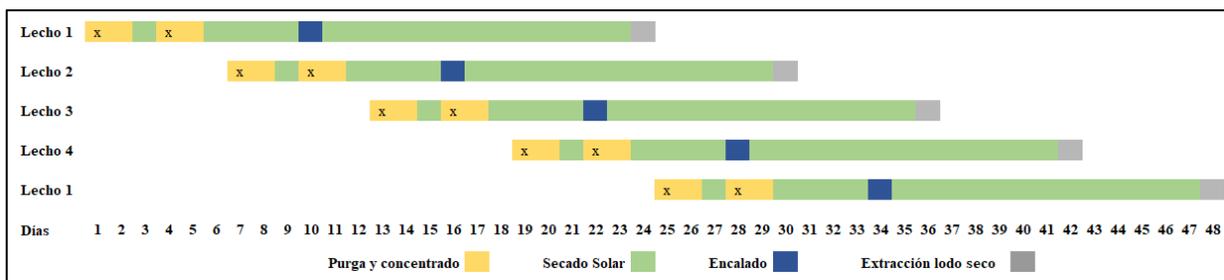


Figura 5.17. Rutina de operación para el escenario 2.

Como se observa en el diagrama, tomando como ejemplo el lecho 1, la primera purga y concentrado del lodo se realiza durante los días 1 y 2, tomando el primero para purgar y el segundo para concentrar, la siguiente corresponde a los días 4 y 5. Con esto se debe alcanzar la altura del lodo ya definida. Posterior a esto es cuando da inicio el secado solar, el cual va del día 6 al 23, realizando el proceso de encalado durante el día 10 en este caso (para un total de 18 días de tratamiento). El último día se hace la extracción del lodo seco para cumplir el máximo de 24 días que el lodo puede permanecer en el lecho en un ciclo. Al día siguiente este lecho queda habilitado para una nueva purga.

5.3.2.1. Dosificación de alcalinizante

De acuerdo con las características del lodo y los parámetros de diseño del tratamiento, se calculó la cantidad de cal viva requerida para cada lecho. Se consideró una densidad de 1,16 g/ml, lo equivalente a 1 160 000 g/m³, este es un valor típico para lodos provenientes de la tecnología de lodos activados. Con la fórmula 5.6 se calculó el volumen de lodo a los 5 días de tratamiento, cuando la altura del lecho era de 0,05m.

$$V_3 = A \times h_3 \text{ (ec.5.6)}$$

Donde:

V_3 = volumen de lodo a los 5 días de secado (m³)

h_3 = altura del lecho a los 5 días de secado (m)

$$V_3 = 21 \text{ m}^2 \times 0,05 \text{ m}$$

$$V_3 = 1,05 \text{ m}^3$$

La masa del lodo se determinó con la ecuación 5.7.

$$M_{lodo} = \rho \times V_3 \text{ (ec.5.7)}$$

Donde:

M_{lodo} = masa del lodo a los 5 días de secado (g)

ρ = densidad del lodo a los 5 días de secado (g/m³)

$$M_{lodo} = 1\,160\,000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \times 1,05 \text{ m}^3$$

$$M_{lodo} = 1\,218\,000 \text{ g}$$

Con la masa del lodo y la dosis de cal propuesta (0,20 g/g) se calcula con la fórmula 5.8 la cantidad de cal a aplicar en el lecho.

$$D_{CaO} = M_{lodo} \times \text{dosis de cal} \text{ (ec.5.8)}$$

Donde:

D_{CaO} = dosificación de cal viva (g)

$$D_{CaO} = 1\,218\,000 \text{ g lodo} \times 0,20 \frac{\text{g cal}}{\text{g lodo}}$$

$$D_{CaO} = 243\,600 \text{ g cal}$$

$$D_{CaO} = 243,6 \text{ kg cal}$$

Para conocer cuántos sacos de cal se deben agregar a cada lecho por ciclo de tratamiento se utilizó la fórmula 5.9, tomando en cuenta una presentación de cada saco de 23 kg.

$$\text{Sacos de cal a aplicar} = \frac{D_{CaO}}{\text{presentación saco}} \text{ (ec.5.9)}$$

$$\text{Sacos de cal a aplicar} = \frac{243,6 \text{ kg}}{23 \text{ kg}}$$

$$\text{Sacos de cal a aplicar} = 10,59$$

De esta forma se obtuvo que para cada lecho se deben utilizar aproximadamente 10 sacos y medio de CaO de 23 kg cada uno, para asegurar la higienización del lodo.

5.3.3. Manual de operación y mantenimiento

El manual de operación y mantenimiento (O&M) para el tratamiento de los lodos de la PTAR Lagos de Lindora indica los pasos a seguir para el manejo e higienización de dicho material según lo propuesto en el presente estudio. Se incluye el equipo de protección personal y herramientas necesarias, las actividades a realizar, la frecuencia con las que estas se deben llevar a cabo y otras recomendaciones. El manual se encuentra en el apéndice 10.2 “Manual de Operación y Mantenimiento para el tratamiento de lodos de la PTAR Lagos de Lindora”.

5.3.4. Análisis económico

Para el análisis económico se tomaron en cuenta dos posibles escenarios. En el primero solo se incluyeron parámetros económicos que implican gastos directos (compra de la cal) y posibles ingresos o ahorros, como la venta del biosólido y el ahorro generado por la no disposición del material en el relleno sanitario.

En el caso de la cal se tomó en cuenta un costo de ¢2 400 por un saco de 23 kg. Como se determinó en el apartado 5.3.2.1, para cada lecho se requieren 10,6 de estos sacos, por lo que el costo por la alcalinización de cada lecho es de ¢25 440. Para calcular el costo anual se utilizó la fórmula 5.10, tomando en cuenta que las purgas se realizan semanalmente.

$$\text{Costo anual CaO} = \frac{\text{costo } (\text{C})}{\text{semana}} \times \frac{4,28 \text{ semanas}}{\text{mes}} \times \frac{12 \text{ meses}}{\text{año}} \text{ (ec.5.10)}$$

$$\text{Costo anual CaO} = \frac{\text{C}25\,440}{\text{semana}} \times \frac{4,28 \text{ semanas}}{\text{mes}} \times \frac{12 \text{ meses}}{\text{año}}$$

$$\text{Costo anual CaO} = \frac{\text{C}1\,306\,598,40}{\text{año}}$$

Para la comercialización del biosólido se tomó en cuenta el precio de un abono orgánico producto del tratamiento de lodos de tanques sépticos, el cual es de C5050 para la presentación de 35 kg, así cada kilogramo ronda los C144,29. Este valor se multiplicó por los 30 816 kg de biosólido producido por año en la PTAR Lagos de Lindora, resultando en un valor económico de C4 446 308,57 anuales.

El costo de transporte al relleno sanitario de lodo tratado es de aproximadamente C40 000 por tonelada. En la PTAR se generan 30,8 toneladas anuales, por lo que cada año se genera un ahorro de C1 232 640 por no disponer este material en el relleno sanitario. La ganancia se obtuvo con la diferencia del total de gastos y los ingresos o ahorros. En el cuadro 5.10 se muestran los resultados.

Cuadro 5.10. Análisis económico anual bajo un escenario netamente financiero.

Detalle	Valor económico
Gastos	
Cal viva (CaO)	C 1.306.598,40
Ingresos/ahorros	
Comercialización del biosólido	C 4.446.308,57
Costo evitado por transporte a relleno sanitario	C 1.232.640,00
Ganancia	C 4.372.350,17

Se observa que la ganancia es positiva, con un valor anual de C4 372 350,17. Es importante mencionar que se toma en cuenta la comercialización del biosólido ya que es un material con la calidad óptima para ser utilizado en diferentes actividades, pudiendo ser aprovechado por otros usuarios como un mejorador de suelos, el cual es ambiental y sanitariamente seguro siempre y cuando se sigan las recomendaciones dadas para un biosólido clase B.

Los lodos fecales, más que un residuo generado por el tratamiento de las aguas residuales, son un material con un gran potencial de aprovechamiento. En Costa Rica desde hace varios años se ha introducido el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), el cual se utiliza como estrategia para que el ente que genera los residuos los maneje adecuadamente (Aguilar, 2010). Según la ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos N°8839 (2010) este principio se debe aplicar a los residuos especiales, los cuales son aquellos que debido a “su composición, necesidades de transporte, condiciones de almacenaje, formas de uso o valor de recuperación, o por una combinación de esos, implican riesgos significativos a la salud y degradación sistemática de la calidad del ecosistema” (p.6).

Si bien esto se ha venido aplicando a otro tipo de productos, el modelo dispone puntos claros que son aplicables al biosólido de la PTAR. Por ejemplo, se establece que el ente generador debe confeccionar planes efectivos de aprovechamiento o valorización de los residuos, así como establecer alianzas estratégicas con las municipalidades para mejorar la gestión integral de los residuos (Aguilar, 2010). De esta forma, se pueden crear convenios con productores de la zona, gobiernos locales y otros entes para darle un buen uso al biosólido, ya sea en actividades agropecuarias, recuperación de suelos degradados o erosionados, evitando también la disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios.

En el escenario de costo-beneficio, aparte de los parámetros tomados en cuenta en el análisis anterior, se incluyeron impactos ambientales que pueden evitarse con el uso adecuado del biosólido. Se consideró que el biosólido puede utilizarse en actividades agrícolas debido a su buen contenido de nutrientes, por lo que puede sustituir el uso de parte de los fertilizantes químicos utilizados en los cultivos. De esta forma, también existe un ahorro asociado por las emisiones de CO₂ equivalente que se evitan al aplicar menor cantidad de fertilizantes.

Para calcular la cantidad de fertilizante químico que puede evitarse al sustituirlo por el mejorador de suelos se tomó como parámetro de comparación el contenido de nitrógeno, tanto del biosólido como de un fertilizante químico. Las consideraciones tomadas para este análisis se encuentran en el cuadro 5.11.

Cuadro 5.11. Características del fertilizante químico y del biosólido en estudio.

Producto	Contenido de N	costo/kg
Fertilizante químico	7 %	₡ 1059,14
Biosólido	3 %	₡ 144,29

Con la fórmula 5.11 se calculó para ambos productos el costo de la fracción nitrogenada por cada kilogramo.

$$\text{Costo FN} = \text{contenido de N} \times \frac{\text{costo } (\$)}{\text{kg}} \text{ (ec.5.11)}$$

Donde:

Costo FN = valor de la fracción nitrogenada de cada producto ($\$/\text{kg}$)

$$\text{Costo FN}_{\text{fertilizante}} = 7\% \times \frac{\$ 1059,14}{\text{kg}} = \frac{\$ 74,14}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo FN}_{\text{biosólido}} = 3\% \times \frac{\$ 144,29}{\text{kg}} = \frac{\$ 4,33}{\text{kg}}$$

Para determinar el ahorro por la sustitución del fertilizante químico se calculó la diferencia entre el costo de la fracción nitrogenada de fertilizante y la del biosólido (ecuación 5.12).

$$\text{Ahorro} = \text{Costo FN}_{\text{fertilizante}} - \text{Costo FN}_{\text{biosólido}} \text{ (ec.5.12)}$$

$$\text{Ahorro} = \frac{\$ 74,14}{\text{kg}} - \frac{\$ 4,33}{\text{kg}}$$

$$\text{Ahorro} = \frac{\$ 69,81}{\text{kg}}$$

En la PTAR Lagos de Lindora la cantidad producida en términos de nitrógeno anualmente está dada por la fórmula 5.13.

$$\text{Cantidad anual de N} = \text{BP} \times \text{contenido de N} \text{ (ec.5.13)}$$

Donde:

BP = biosólido producido ($\text{kg}/\text{año}$)

$$\text{Cantidad anual de N} = \frac{30\,816 \text{ kg}}{\text{año}} \times 3\%$$

$$\text{Cantidad anual de N} = \frac{924,48 \text{ kg}}{\text{año}}$$

Con los kilogramos de N aprovechable por año y el ahorro calculado con la fórmula 5.12, se determinó el ahorro anual con la ecuación 5.14.

$$\text{Ahorro anual} = \text{Ahorro} \times \text{Cantidad anual de N (ec.5.14)}$$

$$\text{Ahorro anual} = \frac{\$ 69,81}{\text{kg}} \times \frac{924,48 \text{ kg}}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro anual} = \frac{\$ 64 539,08}{\text{año}}$$

Se consideró importante estimar el ahorro generado por las emisiones de CO₂ evitadas al dejar de utilizar cierta cantidad de fertilizante químico. Tomando en cuenta las concentraciones de nitrógeno presentadas en el cuadro 5.11, se calculó que por cada kilogramo de biosólido se evita el uso de 0,43 kg de fertilizante. Así, los 30 816 kg de biosólido producidos por año en la PTAR sustituyen el uso de 13 206,86 kg/año de fertilizante químico. Con estos datos y la información presentada en el cuadro 5.12 se calcularon las emisiones de CO₂ equivalente (ecuación 5.15).

Cuadro 5.12. Datos para el cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente.

Factor de emisión*	Potencial de calentamiento global*	Costo UCC/t CO ₂ equivalente**
0,01 kg N ₂ O-N/ kg N	310 kg CO ₂ / kg N ₂ O	\$ 7,5

* IPCC, 2019

** FONAFIFO, 2018.

$$\text{Emisiones} = \text{kg fertilizante} \times \frac{\text{Contenido de N}}{\text{kg fertilizante}} \times \text{factor emisión} \times \text{Potencial CG}$$

(ec.5.15)

$$\text{Emisiones} = \frac{13 250,88 \text{ kg fert.}}{\text{año}} \times \frac{7\% \text{ kg N}}{\text{kg fert.}} \times \frac{0,01 \text{ kg N}_2\text{O-N}}{\text{kg N}} \times \frac{310 \text{ kg CO}_2}{\text{kg N}_2\text{O}} \times \frac{1 \text{ t CO}_2}{1000 \text{ kg CO}_2}$$

$$\text{Emisiones} = \frac{2,87 \text{ t CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{año}}$$

En el país, el método para compensar las emisiones de CO₂ es mediante la compra de las Unidades Costarricenses de Compensación (UCC). La fórmula 5.16 considera el valor de estas unidades con respecto a las emisiones evitadas calculadas.

$$\text{Ahorro por emisiones evitadas} = \text{Emisiones} \times \frac{\$ 7,5}{t \text{ CO}_2} \times \text{tipo de cambio} \frac{\text{C}}{\$} \text{ (ec.5.16)}$$

$$\text{Ahorro por emisiones evitadas} = \frac{2,87 t \text{ CO}_2 \text{ equivalente}}{\text{año}} \times \frac{\$ 7,5}{t \text{ CO}_2} \times \frac{\text{C} 617}{\$}$$

$$\text{Ahorro por emisiones evitadas} = \frac{\text{C} 13 261,90}{\text{año}}$$

En el cuadro 5.13 se muestran los valores económicos estimados para cada concepto.

Cuadro 5.13. Análisis económico anual bajo un escenario costo-beneficio.

Detalle	Valor económico	
Gastos		
Cal viva (CaO)	C	1.306.598,40
Total gastos	C	1.306.598,40
Ingresos/ahorros		
Comercialización del biosólido	C	4.446.308,57
Ahorro por fertilizante químico evitado	C	64.539,08
Emisiones evitadas de CO ₂ fertilizante químico	C	13.261,90
Costo evitado por transporte a relleno sanitario	C	1.232.640,00
Total ingresos/ahorros	C	5.756.749,55
Indicadores		
Beneficio-Costo	C	4.450.151,15
Beneficio/Costo		4

El resultado del beneficio obtenido menos el costo es positivo y la relación costo/beneficio tiene un valor mayor a 1, lo cual demuestra que los beneficios del tratamiento de los lodos son mayores que el gasto que este pueda implicar. Se debe de tener en cuenta que los ingresos o ahorros económicos no siempre los va a recibir el generador de los lodos, en este caso la PTAR Lagos de Lindora, sino que dichos beneficios serán percibidos por diferentes actores que puedan aprovechar el biosólido.

Además, la sustitución de productos químicos por otros con una menor huella ambiental causa impactos positivos con respecto a los efectos del cambio climático. Por ejemplo, el uso de un biosólido tratado localmente va a tener una menor huella ambiental que un fertilizante importado desde otro país. Así mismo, Gherghel et al. (2019) indican que la mala disposición de los lodos causa el 40% del total de emisiones de gases de efecto invernadero en una PTAR, por lo que al aplicar el concepto de economía circular y ver el lodo como un producto aprovechable reduce este porcentaje.

Tal y como estos, hay muchos otros ejemplos y escenarios de impactos ambientales que pueden evitarse, generando a su vez una serie de beneficios económicos y sociales a una gran cantidad de personas. Andreoli (2001) comparte este pensamiento, ya que afirma que el tratamiento y aplicación de biosólidos en suelos para su valorización es una alternativa con ventajas técnicas, ambientales y económicas debido a que es una excelente fuente de nutrientes como nitrógeno y fósforo, especial para regiones agrícolas con uso intensivo del suelo o reforestación. Esto fortalece la idea de que el aprovechamiento de biosólidos es factible.

6. CONCLUSIONES

- El análisis de nutrientes mostró que el lodo cuenta con un buen porcentaje de N (3%), P (0,46%) y Ca (1,42%), además de valores aceptables de Cu (113 mg/kg), Mn (330 mg/kg) y B (22 mg/kg) para abonos orgánicos.
- El secado solar no contribuyó a la estabilización del lodo en términos de materia orgánica (SV).
- Las variables propuestas para el tratamiento de secado solar no fueron suficientes para la desinfección del lodo según los indicadores microbiológicos.
- La alcalinización contribuye a la eliminación de microorganismos patógenos del lodo, pero es necesario aplicar un tratamiento complementario para la deshidratación debido al alto porcentaje de humedad del material crudo.
- El secado solar junto con una adición de cal mostró resultados favorables para la generación de un biosólido clase B, con una altura de lecho de 0,20 m, secado solar de 17 días y una dosis de cal de 0,20 g cal/g lodo aplicada después de 5 días de secado.
- Con el análisis financiero para el tratamiento propuesto bajo un escenario netamente financiero se muestra una ganancia de ¢4 372 350,17 mientras que para el escenario costo-beneficio se obtuvo una ganancia de ¢4 450 151,15 y una relación costo/beneficio de 4, lo cual indica que el proceso operativo que se sugiere es factible.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda efectuar un mayor control de los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos durante las diferentes etapas del tratamiento, para asegurar la correcta higienización del biosólido.
- En estudios posteriores se recomienda explorar otras dosis de alcalinizante con el fin de determinar la factibilidad de generar un biosólido clase A con este tratamiento.
- Se recomienda efectuar análisis de contenido de ST y SV al lodo después de agregada la cal para ver si la alcalinización afecta o contribuye en la degradación de la materia orgánica.
- Analizar con detalle y cuantificar la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos como los metales pesados, microplásticos y nanopartículas que se puedan encontrar en el biosólido.
- Determinar las vías factibles para la comercialización y uso del biosólido, por ejemplo, en cultivos que se ajusten a las recomendaciones de uso del mejorador de suelos.
- Se recomienda considerar este estudio como base en la creación de planes y mejoras en los procedimientos operativos para el tratamiento del lodo de otras PTARs con características similares a la PTAR Lagos de Lindora.

8. REFERENCIAS

- Aguilar, S. (2010). Gestión de residuos y la responsabilidad extendida del productor (REP). *Éxito Empresarial*, (132).
- Al-Gheethi, A., Ismail, N., Efaq, A., Bala, J., y Al-Amery, R. (2015). Solar disinfection and lime stabilization processes for reduction of pathogenic bacteria in sewage effluents and biosolids for agricultural purposes in Yemen. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(2).
- Al-Gheethi, A., Efaq, A., Bala, J., Ismail, N., Abdel.Monem, M., y Ab.Kadir, M. (2018). Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes. *Applied Water Science*, 8(2).
- Andreoli, C. (Ed). (2001). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Río de Janeiro, Brasil: PROSAB.
- Arthurson, V. (2008). Proper Sanitization of Sewage Sludge: a Critical Issue for a Sustainable Society. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(17), 5267-5275.
- Acueductos y Alcantarillados, Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud. (2016). Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales. San José, Costa Rica.
- Acueductos y Alcantarillados. (2017). AyA Invierte en Saneamiento de Aguas Residuales y Mejoramiento Ambiental. San José, Costa Rica.
- Baird, R., Eaton, A., Rice, E. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd Edition). Washington D.C, Washington.: American Public Health Association.
- Baudrit, J. (2015). *Caracterización física, química y microbiológica de los lodos generados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales ordinarias y sus posibles usos* (Tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Bedoya-Urrego, K., Acevedo-Ruíz, J., Peláez-Jaramillo, C., Agudelo-López, S. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Pública*, 15(5), 778-790.
- Bina, B., Movahedian, H., Kord, I. (2004). The effect of lime stabilization on the microbiological quality of sewage sludge. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1(1), 34-38.
- Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G., Ulgiati, S. (2016). Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological Indicators*, 94, 13-23.
- Campos, M., Beltrán, M., Fuentes, N., Moreno, G. (2018). Huevos de helmintos como indicadores de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. *Biomédica*, 38(1), 42-53.
- Castellanos-Rozo, J., Galvis-López, J., Merchán-Castellanos, N., Manjarres-Hernández, E., Rojas, A. (2020). Assessment of two sludge stabilization methods in a wastewater treatment plant in Sotaquirá, Colombia. *Universitas Scientiarum*, 25(1), 17-36.

- Castro, A., Henríquez, C., Bertsch, F. (2009). Capacidad de suministro de N, P y K de cuatro abonos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33(1): 31-43.
- Coelho, B., Machado, E., Franco, H., Dutra, C., Calábria, J., Teixeira, A. (2018). Effect of alkaline treatment on pathogens, bacterial community and antibiotic resistance genes in different sewage sludges for potential agriculture use. *Environmental Technology*, 41(4).
- Consejo Nacional de Planificación Urbana. (2013). Plan de la Gran Área Metropolitana 2013. San José, Costa Rica.
- Cota-Espericueta, A., Ponce-Corral, C. (2008). Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(4), 161-170.
- Decreto Ejecutivo N°39316. Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 02 de diciembre del 2015.
- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. (2018). Desarrollo y comercialización: Compensación de emisiones de GEI. Costa Rica: FONAFIFO. Recuperado de: <https://www.fonafifo.go.cr/es/servicios/desarrollo-y-comercializacion/>
- Foster-Martínez, M., Variano, E. (2018). Biosolids as a marsh restoration amendment. *Ecological Engineering*, 117, 165-173.
- Gherghel, A., Teodosiu, C., De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 228, 244-263.
- Gualoto, J. (2016). *Propuesta de gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua residual de la parroquia rural de Nono* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Haldeman, M., Nolan, M., Ng'habi, K. (2020). Human hookworm infection: Is effective control possible? A review of hookworm control efforts and future directions. *Acta Tropica*, 201.
- Hee, S., Dello, F., Antmann, E., y Chorath, P. (2015). Sustainable approaches for minimizing biosolids production and maximizing reuse options in sludge management: A review. *Journal of Environmental Management*, 158, 133-145.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Switzerland.
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijalkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almas, A., Ram., B. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39-46.
- Ley N° 8839. Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, 13 de julio de 2010.
- López, J., Ramírez, B., Gomes, C., Morgan-Sagatsume, J. (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. Programa EnRes, México.

- Melo, A., Rodríguez, A., González, J. (2017). Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 217-226.
- Mishra, M., Arukha, A., Patel, A., Behera, N., Mohanta, T., Yadav, D. (2018). Multi-Drug Resistant Coliform: Water Sanitary Standards and Health Hazards. *Frontiers in Pharmacology*, 9.
- Mosquera-Losada, R., Amador-García, A., Muñoz-Ferreiro, N., Santiago-Freijanes, J., Ferreiro-Domínguez, N., Romero-Franco, R., Rigueiro-Rodríguez, A. (2017). Sustainable use of sewage sludge in acid soils within a circular economy perspective. *Catena*, 149, 341-348.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Diario oficial de la Federación, México, 6 de enero de 1997.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Diario oficial de la Federación, México, 15 de agosto del 2003.
- Núñez, S. (2014). Informe fin de gestión. Recuperado de <https://www.aya.go.cr>
- Öğleni, N., Özdemir, S. (2010). Pathogen reduction effects of solar drying and soil application in sewage sludge. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34(6).
- Omondi, O., Bangding, X. (2017). Understanding wastewater treatment mechanisms: A review on detection, removal and purification efficiencies of faecal bacteria indicators across constructed wetlands. *Environmental Reviews* 25(4).
- Özdemir, S., Yetilmezsoy, K., Dede, G., Sazak, M. (2018). Application of solarization for sanitization of sewage sludge compost. *Journal of King Saud University*, 32, 443-449.
- Paluszak, Z., Skowron, K., Sypula, M. y Jadwiga, K. (2012). Microbiological Evaluation of the Effectiveness of Sewage Sludge Sanitization with Solar Drying Technology. *International Journal of Photoenergy*, 2012.
- Posligua, P., Peñaherrera, M., Villegas, E., Banchón, C. (2018). Gravimetric evolution during sewage sludge biostabilization. *Journal of Ecological Engineering*, 19(5), 76-85.
- Presidencia. (2017). Mapa de Obras Administración Solís Rivera. San José, Costa Rica. Recuperado de <https://mapa.administracionsolisrivera.cr>
- Programa Estado de la Nación. (2017). Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017. San José, Costa Rica.
- Programa Estado de la Nación. (2019). Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019. San José, Costa Rica.
- Rico, J., Gómez-Lucas, I., Navarro-Pedreño, J., Jordán, M., Bech, J., Nieto, V., y Portell, N. (2017). Environmental consequences from the use of sewage sludge in soil restoration related to microbiological pollution. *Journal of Soils and Sediments*, 18(7), 2172-2178.
- Segura, F. (2018). *Saneamiento y disposición de biosólidos provenientes de lodos sépticos residuales* (Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Shanahan, E., Roiko, A., Tindale, N., Thomas, M., Walpole, R., Kurtböke, I. (2010). Evaluation of pathogen removal in a solar sludge drying facility using microbial

- indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 565-582.
- Silva-Leal, J., Bedoya-Rios, D., Torres-Lozada, P. (2013). Effect of thermal drying and alkaline treatment on the microbiological and chemical characteristics of biosolids from domestic wastewater treatment plants. *Química Nova*, 36(2), 207-214.
- Singh, S., Mohan, R., Rathi, S., Raju, N. (2017). Technology options for faecal sludge management in developing countries: Benefits and revenue from use. *Environmental Technology and Innovation*, 7, 203-2018.
- Smith, S. (2009). Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 367, 4005-4041.
- Solano, A., León, D. (2018). Parasitosis debidas a helmintos intestinales: una actualización sobre su abordaje y tratamiento farmacológico en Costa Rica. *Revista del Colegio de Microbiólogos y Químicos Clínicos de Costa Rica*, 24, 9-26.
- Strande, L., Ronteltap, M., Brdjanovic, D. (Eds.). (2014). *Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation*. London, United Kingdom: IWA Publishing.
- Zhou, N., Thompson, E., y Meschke, J. (2016). Microbiological Sampling of Wastewater and Biosolids. En Yates, M., Nakatsu, C., Miller, R., y Pillai, S. (Ed.), *Manual of Environmental Microbiology*. Washington, United States: ASM Press.

9. ANEXOS

9.1. Procedimiento para la determinación de huevecillos de helmintos en muestras de lodo.

En este anexo se describe el procedimiento seguido para la determinación y el conteo del indicador huevecillos de helmintos, así como el equipo y los reactivos utilizados en el Laboratorio Nacional de Aguas, lugar donde se llevó a cabo el análisis. En el cuadro 9.1 se observan las principales características del equipo de laboratorio.

Cuadro 9.1. Equipo utilizado en el procedimiento de determinación de huevecillos de helmintos.

Nombre del equipo	Marca	Especificaciones
Balanza granataria	Shimadzu	Capacidad de 600 a 3200 g.
Licuadaora	Waring	Capacidad de 1 L y dos velocidades.
Tamiz	Fieldmaster	Malla N°60, 250 µm.
Bomba de vacío	Sartorius	-
Centrífuga	IEC Centra GP8R	Capacidad para 4 recipientes de 750 ml.
Centrífuga de tubos de ensayo	Fisher Scientific	Capacidad para 12 tubos de ensayo de 15 ml.
Micropipeta	Biohit	Capacidad de 1 a 10 ml
Microscopio	Zeiss Primo Star	Objetivos 4x, 10x, 40x y 100x.

Materiales y reactivos:

- Agua destilada
- Tween 80 al 0,1%
- Sulfato de Zinc heptahidratado
- Acetato de etilo
- Alcohol-ácido
- Recipientes de 5 L
- Tubos de ensayo de 15 ml
- Cámara de conteo
- Recipientes de centrífuga, 750 ml
- Beakers de 1 L

Procedimiento:

1. Para cada muestra de lodo se pesó la cantidad de gramos de materia húmeda equivalentes a 10 g de materia seca.

* Para efectos de este estudio cuando la cantidad de sólidos secos resultó ser muy pequeña se realizó el procedimiento con un mínimo de 2 g de muestra, con el fin de garantizar su representatividad.
2. Para eliminar basuras de la muestra, se licuó con 150 ml de detergente Tween 80, a la velocidad más alta por aproximadamente 2 minutos. En los casos en donde el lodo estaba muy seco se procedió a hidratarlo antes de licuarlo, por aproximadamente 2 horas con Tween 80, para facilitar su manejo.
3. Posteriormente, la mezcla se pasó por un tamiz de 250 μm . Se realizaron los lavados necesarios a la licuadora y el tamiz garantizando que toda la muestra se filtrara y se retuviera la mayor cantidad de basura posible.
4. Se agregó agua destilada hasta llevar la muestra a 5 litros y se dejó sedimentar toda la noche. Al día siguiente se obtuvo un botón o sedimento de lodo (este se logra apreciar más en muestras poco húmedas) y un sobrenadante de agua.
5. Con una bomba de vacío se aspiró el sobrenadante hasta estar muy cerca del botón o cuando se observó que este se comenzaba a mover. Es importante mencionar que, al aspirar, la boquilla de la bomba debe ir cerca del límite del líquido, para evitar mover el sedimento.
6. La muestra se trasvasó cuantitativamente a un recipiente de centrifuga debidamente etiquetado, realizando algunos lavados. Posteriormente se centrifugó a 2000 rpm por 5 minutos, lo cual hace que los huevecillos se sedimenten.
7. Nuevamente se aspiró el sobrenadante, para recuperar el sedimento. Se agregaron 200 ml de Sulfato de Zinc para re suspender los huevecillos y se centrifugó a 2000 rpm por 5 min.
8. Con una micropipeta se recuperó el sobrenadante en un beaker de 1 L, y se descartó el botón. Para eliminar el efecto del Sulfato de Zinc y que los huevecillos vuelvan a sedimentarse se agregó a la muestra 1 L de agua destilada y se dejó sedimentar durante toda la noche.

9. Se recuperó el botón aspirando el sobrenadante y se centrifugó la muestra a 2000 rpm por 5 min en los recipientes para centrífuga. Después de este proceso, se aspiró cierta cantidad de la muestra para disminuir la cantidad de líquido.
10. Se llenaron la cantidad necesaria de tubos de ensayo hasta los 15 ml con una micropipeta y se centrifugaron para asentar los huevecillos.
11. Se aspiró el sobrenadante hasta dejar todos los tubos con 2 ml. Posteriormente se mezclaron en un solo tubo, haciendo lavados con agua destilada y mezclando bien los botones.
12. La muestra se centrifugó en el equipo de centrifugado para tubos, a 2000 rpm por 5 minutos. Se aspiró el sobrenadante dejando al menos 7,5 ml libres en el tubo de ensayo.
13. A la muestra se le agregaron con micropipeta los siguientes reactivos: 3 ml de acetato de etilo y 4,5 ml de alcohol-ácido. Se mezcló suavemente liberando el gas de vez en cuando y se centrifugó nuevamente en las mismas condiciones.
14. Se pudo observar una separación de fases, se aspiró la fase superior y luego se llevó la muestra hasta 2 ml aproximadamente.
15. La muestra final se observó toda al microscopio con el objetivo 10x, en los casos en los que esta quedó muy cargada o turbia se diluyó con agua destilada. Para el conteo de huevecillos se utilizó una cámara Sedgewick-Rafter marca Hausser Scientific, además del software uEye Cockpit de la compañía IDS, que permite guardar imágenes.
16. Una vez que se obtuvo la cantidad de huevecillos encontrados en la muestra, se aplicó la fórmula 9.1 para reportar el resultado.

$$\frac{\text{Cantidad de huevecillos de helmintos}}{\text{g de materia fresca}} = \frac{HH}{g} \text{ (ec. 9.1)}$$

10. APÉNDICES

10.1. Información meteorológica utilizada para la comparación de condiciones climáticas entre el sitio de estudio y el utilizado para realizar las pruebas.

Cuadro 10.1. Datos meteorológicos tomados de la estación del ITCR en Cartago durante el mes de junio para el tratamiento de secado solar.

Día	Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m ²)	Promedios diarios		
						Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m ²)
1	8/6/2020	8:00 a.m.	21,44	68,55	0,68	23,23	71,7	0,84
		12:00 p.m.	24,74	68,55	1,05			
		4:00 p.m.	23,5	78	0,78			
2	9/6/2020	8:00 a.m.	19,05	100	0,49	21,85	100	0,59
		12:00 p.m.	23,68	100	0,85			
		4:00 p.m.	22,83	100	0,42			
3	10/6/2020	8:00 a.m.	21,1	76	0,58	21,7	72	0,64
		12:00 p.m.	23,5	61	0,66			
		4:00 p.m.	20,5	79	0,68			
4	11/6/2020	8:00 a.m.	21,2	77	0,61	20,4	84,33	0,67
		12:00 p.m.	22,4	76	1,22			
		4:00 p.m.	17,6	100	0,19			
5	12/6/2020	8:00 a.m.	19,1	84	0,36	20,87	79,33	0,53
		12:00 p.m.	23,7	62	1,07			
		4:00 p.m.	19,8	92	0,15			
6	13/6/2020	8:00 a.m.	20,1	87	0,47	20,53	86,33	0,55
		12:00 p.m.	23,1	72	0,68			
		4:00 p.m.	18,4	100	0,51			
7	14/6/2020	8:00 a.m.	19,4	90	0,29	22,2	77	0,53
		12:00 p.m.	25	67	1,08			
		4:00 p.m.	22,2	74	0,23			
8	15/6/2020	8:00 a.m.	21	90	0,75	21,33	83	0,71
		12:00 p.m.	24,3	69	1,29			
		4:00 p.m.	18,7	90	0,1			
9	16/6/2020	8:00 a.m.	20,7	82	0,59	21,7	80,33	0,59
		12:00 p.m.	24,7	68	1,07			
		4:00 p.m.	19,7	91	0,11			
10	17/6/2020	8:00 a.m.	20,5	79	0,68	22,33	75,67	0,85
		12:00 p.m.	23,9	75	1,2			

Día	Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m2)	Promedios diarios		
						Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m2)
		4:00 p.m.	22,6	73	0,68			
11	18/6/2020	8:00 a.m.	18,4	100	0,1	20,33	86	0,5
		12:00 p.m.	20,7	81	0,79			
		4:00 p.m.	21,9	77	0,6			
12	19/6/2020	8:00 a.m.	23,3	69	1,38	22,73	74	1,21
		12:00 p.m.	23,3	69	1,38			
		4:00 p.m.	21,6	84	0,86			
13	20/6/2020	8:00 a.m.	17,3	100	0,06	18,83	93,33	0,13
		12:00 p.m.	18,4	100	0,11			
		4:00 p.m.	20,8	80	0,23			
14	21/6/2020	8:00 a.m.	21,4	80	0,34	21,1	84,33	0,63
		12:00 p.m.	23,2	73	0,97			
		4:00 p.m.	18,7	100	0,57			
15	22/6/2020	8:00 a.m.	20,3	82	0,71	21,4	80,67	0,93
		12:00 p.m.	23,7	68	1,11			
		4:00 p.m.	20,2	92	0,96			
16	23/6/2020	8:00 a.m.	17,9	100	0,12	20,9	85	0,65
		12:00 p.m.	22,8	75	1,12			
		4:00 p.m.	22	80	0,7			
17	24/6/2020	8:00 a.m.	19,9	87	0,54	20,6	84,33	0,59
		12:00 p.m.	21,8	79	0,92			
		4:00 p.m.	20,1	87	0,3			
18	25/6/2020	8:00 a.m.	18,3	100	0,57	21	74,67	0,79
		12:00 p.m.	22,8	64	1,16			
		4:00 p.m.	21,9	60	0,63			
19	26/6/2020	8:00 a.m.	17,5	96	0,55	18,8	92	0,63
		12:00 p.m.	20,2	89	1,17			
		4:00 p.m.	18,7	91	0,16			
20	27/6/2020	8:00 a.m.	23,5	62	0,77	21,33	79,33	0,77
		12:00 p.m.	21,9	79	1,21			
		4:00 p.m.	18,6	97	0,33			
21	28/6/2020	8:00 a.m.	18,5	90	0,4	20,7	79,67	0,79
		12:00 p.m.	21,8	70	0,99			
		4:00 p.m.	21,8	79	0,97			
22	29/6/2020	8:00 a.m.	18,9	91	0,09	20,97	83,33	0,56
		12:00 p.m.	23,9	67	1,11			
		4:00 p.m.	20,1	92	0,47			
23	30/6/2020	8:00 a.m.	17,3	100	0,57	19,6	84,33	0,72
		12:00 p.m.	22,4	69	1,35			
		4:00 p.m.	19,1	84	0,25			

Cuadro 10.2. Datos meteorológicos tomados de la estación del Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños en San José durante el mes de junio para el tratamiento de secado solar.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m ²)	Promedios diarios		
					Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m ²)
8/6/2020	8:00 a.m.	23,65	79,76	0,58	25,33	79,84	0,76
	12:00 p.m.	26,25	79,76	1,14			
	4:00 p.m.	26,1	80	0,56			
9/6/2020	8:00 a.m.	23,8	95,7	0,5	24,21	95,70	0,51
	12:00 p.m.	27,56	95,7	0,81			
	4:00 p.m.	21,26	95,7	0,21			
10/6/2020	8:00 a.m.	23,8	63	0,45	23,43	74,33	0,44
	12:00 p.m.	25,4	67	0,7			
	4:00 p.m.	21,1	93	0,17			
11/6/2020	8:00 a.m.	SD	SD	SD	SD	SD	SD
	12:00 p.m.	SD	SD	SD			
	4:00 p.m.	SD	SD	SD			
12/6/2020	8:00 a.m.	SD	SD	SD	SD	SD	SD
	12:00 p.m.	SD	SD	SD			
	4:00 p.m.	SD	SD	SD			
13/6/2020	8:00 a.m.	22	81	0,32	22,57	79,00	0,65
	12:00 p.m.	24,2	72	1,25			
	4:00 p.m.	21,5	84	0,37			
14/6/2020	8:00 a.m.	20,4	88	0,17	22,80	83,33	0,52
	12:00 p.m.	25,7	72	1,25			
	4:00 p.m.	22,3	90	0,15			
15/6/2020	8:00 a.m.	24	70	0,57	22,30	79,33	0,62
	12:00 p.m.	22,5	76	1,24			
	4:00 p.m.	20,4	92	0,05			
16/6/2020	8:00 a.m.	24,8	67	0,5	24,53	73,00	0,66
	12:00 p.m.	26,6	65	1,21			
	4:00 p.m.	22,2	87	0,27			
17/6/2020	8:00 a.m.	21,7	73	0,57	24,07	72,67	0,76
	12:00 p.m.	27,7	58	1,15			
	4:00 p.m.	22,8	87	0,55			
18/6/2020	8:00 a.m.	22,7	74	0,12	24,17	72,67	0,46
	12:00 p.m.	26,5	58	0,68			
	4:00 p.m.	23,3	86	0,57			
19/6/2020	8:00 a.m.	24,7	69	1,1	23,70	74,67	0,96
	12:00 p.m.	24,7	69	1,1			

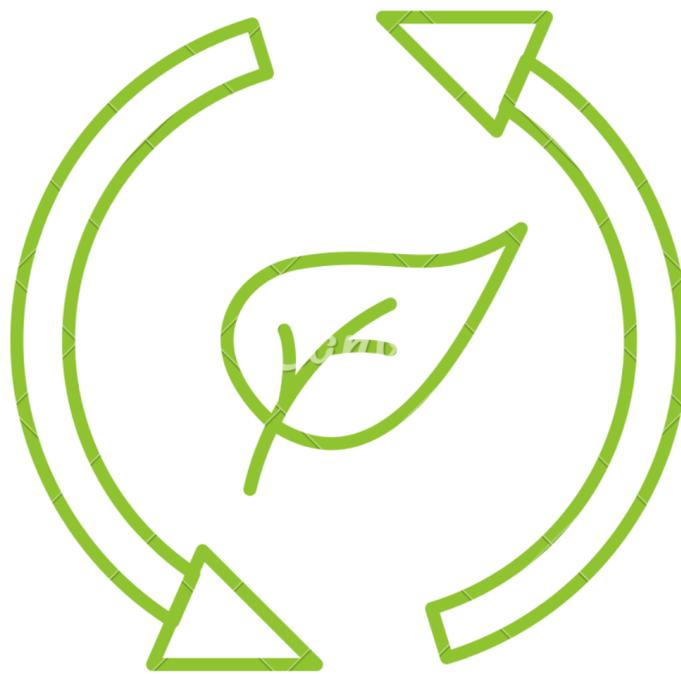
Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m2)	Promedios diarios		
					Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Horaria Máxima (kW/m2)
	4:00 p.m.	21,7	86	0,69			
20/6/2020	8:00 a.m.	20,3	90	0,06	21,43	86,33	0,12
	12:00 p.m.	23	76	0,12			
	4:00 p.m.	21	93	0,18			
21/6/2020	8:00 a.m.	23	70	0,34	23,57	74,00	0,59
	12:00 p.m.	26,4	66	1,14			
	4:00 p.m.	21,3	86	0,28			
22/6/2020	8:00 a.m.	23,7	70	0,7	25,07	70,33	0,81
	12:00 p.m.	28,3	55	1,04			
	4:00 p.m.	23,2	86	0,69			
23/6/2020	8:00 a.m.	22,1	77	0,14	24,07	75,33	0,69
	12:00 p.m.	26,9	61	1,26			
	4:00 p.m.	23,2	88	0,66			
24/6/2020	8:00 a.m.	23,4	70	0,42	24,17	66,33	0,49
	12:00 p.m.	24,5	67	0,79			
	4:00 p.m.	24,6	62	0,26			
25/6/2020	8:00 a.m.	22,2	71	0,46	24,17	61,67	0,67
	12:00 p.m.	25,8	55	0,94			
	4:00 p.m.	24,5	59	0,62			
26/6/2020	8:00 a.m.	22	69	0,34	23,30	65,67	0,58
	12:00 p.m.	25,2	62	1,17			
	4:00 p.m.	22,7	66	0,23			
27/6/2020	8:00 a.m.	24,7	70	0,46	22,87	79,33	0,80
	12:00 p.m.	23,5	75	1,42			
	4:00 p.m.	20,4	93	0,52			
28/6/2020	8:00 a.m.	23,2	67	0,24	23,23	73,00	0,42
	12:00 p.m.	25,6	61	0,65			
	4:00 p.m.	20,9	91	0,37			
29/6/2020	8:00 a.m.	21	87	0,3	22,20	84,33	0,52
	12:00 p.m.	25,7	70	1,25			
	4:00 p.m.	19,9	96	0,02			
30/6/2020	8:00 a.m.	21,7	72	0,19	23,13	69,33	0,58
	12:00 p.m.	26	58	1,36			
	4:00 p.m.	21,7	78	0,19			

*SD: sin datos

TRATAMIENTO DE LODOS

**MANUAL DE
OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO**

PTAR LAGOS DE LINDORA



2020



EQUIPO EJECUTOR

ERICKA SÁNCHEZ CASTILLO

Estudiante de Ingeniería Ambiental

ING. DIANA ZAMBRANO PIAMBA

Tutora

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Centro de Investigación en Protección Ambiental

CONTENIDO

Definiciones.....	4
Equipo de seguridad.....	5
Herramientas.....	6
Actividades.....	7
Purga de lodos.....	7
Secado solar.....	8
Encalado.....	8
Extracción del biosólido.....	9
Cronograma de operación y mantenimiento.....	10

DEFINICIONES

Lodos:

Parte sólida o semisólida de las aguas residuales.

Biosólidos:

Lodos que han sido tratados y son seguros para su reutilización.

Purga de lodos:

Eliminación del excedente de lodos de los sistemas de tratamiento mediante bombeo.

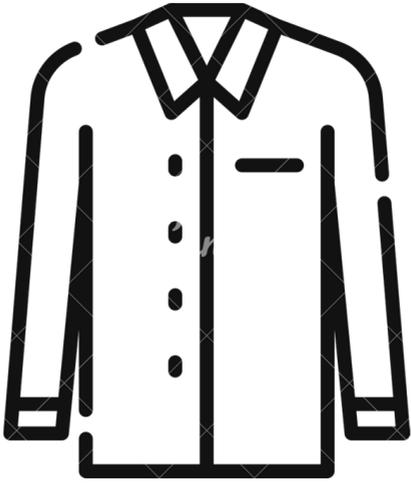
Secado Solar:

Tratamiento que permite reducir la humedad y el volumen del lodo, volviéndolo más manejable. A su vez contribuye a la desinfección.

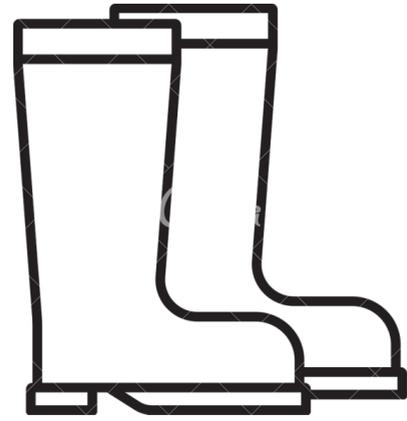
Encalado:

Adición de cal al lodo, aumenta el pH a 12 causando una reducción de los microorganismos patógenos.

EQUIPO DE SEGURIDAD



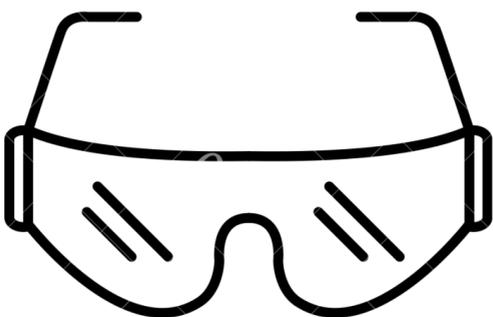
Vestimenta adecuada
Manga larga
Pantalón largo



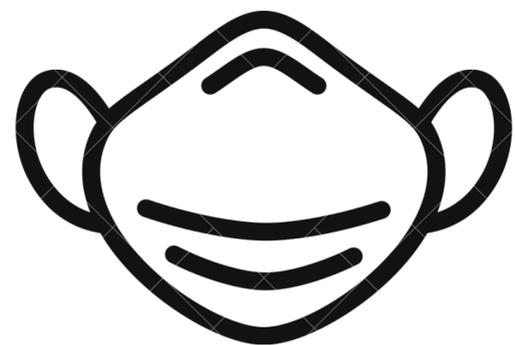
Botas



Guantes

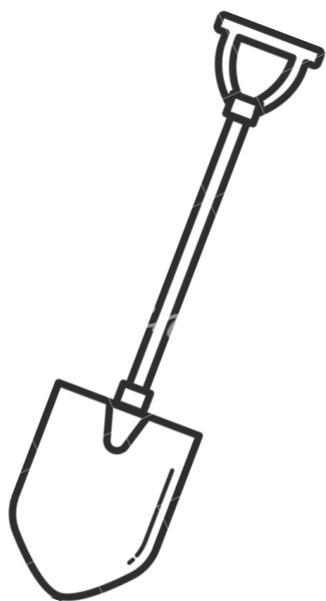


Lentes de seguridad

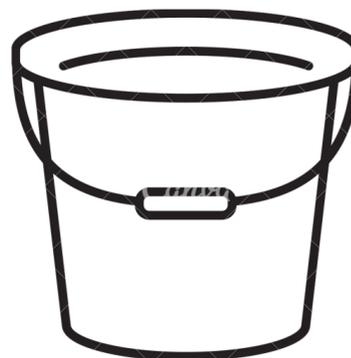


Mascarilla

HERRAMIENTAS



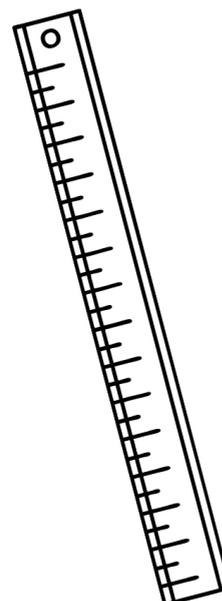
Pala



Balde



Carretillo



Vara graduada

ACTIVIDADES

1 Purga de lodos

Con ayuda de una bomba, el lodo del sistema de tratamiento se pasa al lecho de secado, se deja sedimentar para decantar el agua que queda en la superficie y que el lodo quede concentrado.



Altura del lodo concentrado

0,20 m



Frecuencia de purga

6 días

En caso de doble purga:

Sí es cada 6 días

Purgar en la mañana, decantar el agua cuando se sedimente el lodo para concentrar. Al día siguiente realizar el mismo procedimiento para la purga doble.

Sí es cada 3 días

Realizar la primera purga, al día siguiente decantar el agua y concentrar. A los 3 días realizar el mismo procedimiento para la purga doble.

ACTIVIDADES

2 Secado solar

Este tratamiento se inicia cuando el lodo ya se encuentra concentrado en el lecho, después de una sola purga o de la doble purga.

Duración

17 días
mínimo



3 Encalado

Se agregan los sacos de cal al lecho y de forma manual con una pala se mezcla con el lodo.

Utilizar equipo de seguridad



Momento de aplicación

Día 5 del
secado



Cantidad de cal

11 sacos



Tipo de cal

Cal viva
(CaO)

ACTIVIDADES

4 Extracción del biosólido

Cuando el material está seco se retira del lecho con pala y carretillo. Se deben quitar semillas germinadas de forma manual con guantes.

Frecuencia

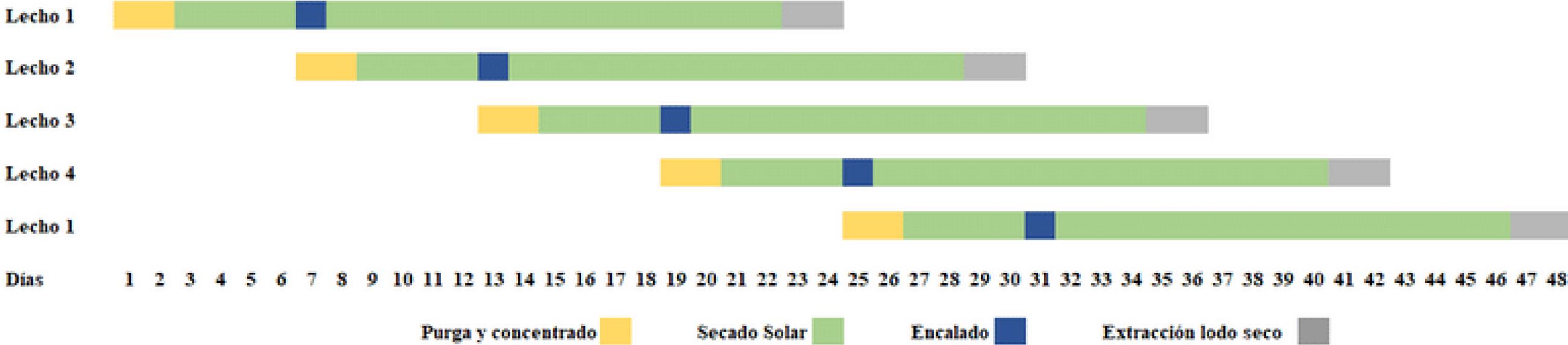
24 días
después de
la purga



Advertencias:

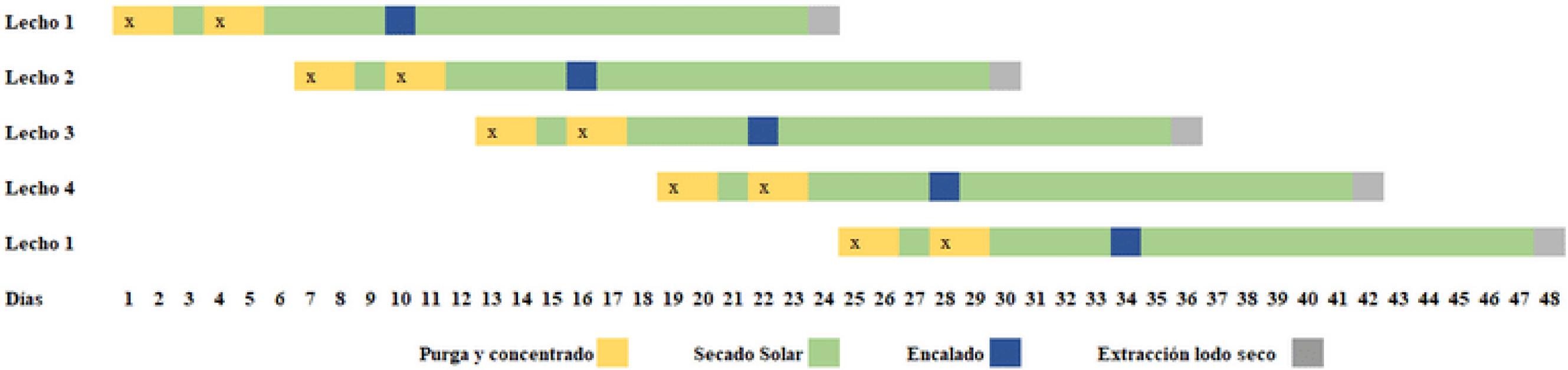
- El biosólido debe disponerse en lugares donde no exista contacto directo con las personas.
- Si se usa en agricultura la disposición debe terminar 2 semanas antes de la cosecha.
- Si se aplica en terrenos de pastoreo, este debe evitarse en los 15 días siguientes a la finalización de la disposición.

CRONOGRAMA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO



Para purga simple o doble
cada 6 días

CRONOGRAMA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO



Para purga doble cada 3 días