

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS



Evaluación de diferentes tipos de cal y digestor enzimático de rastrojos en la disminución de Coliformes Fecales en lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, La paz, El Salvador.

Por:

Br. Agustín Lisandro Mendoza Miranda
Br. Edgar Geovany Reyes Melara

Ciudad Universitaria, febrero 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS



Evaluación de diferentes tipos de cal y digestor enzimático de rastrojos en la disminución de Coliformes Fecales en lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, La paz, El Salvador.

Por:

Br. Agustín Lisandro Mendoza Miranda
Br. Edgar Geovany Reyes Melara

Ciudad Universitaria, febrero 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO RURAL



Evaluación de diferentes tipos de cal y digestor enzimático de rastrojos en la disminución de Coliformes Fecales en lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, La paz, El Salvador.

Por:

Br. Agustín Lisandro Mendoza Miranda
Br. Edgar Geovany Reyes Melara

Requisito para optar al título de:
Ingeniero Agrónomo

Ciudad Universitaria, febrero 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

LIC. M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO:

Ing. M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO:

Ing. M. Sc. LUIS FERNANDO CASTANEDA ROMERO

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE DESARROLLO RURAL:

Ing. y Lic. EDGAR MARROQUÍN MENA

DOCENTE DIRECTOR

Ing. M. Sc. EFRAÍN ANTONIO RODRÍGUEZ URRUTIA

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACION

Ing. RAFAEL ANTONIO ESPINO BARAHONA

Resumen

La investigación se realizó en la Estación Experimental y de Prácticas de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la Universidad de El Salvador, ubicada en el cantón Tecualuya, municipio de San Luis Talpa, departamento de La Paz, en El Salvador; iniciando el 19 de marzo y culminando el 30 de septiembre de 2016.

Se evaluaron tres tipos de cal, que fueron: la cal Hidratada, cal Agrícola y la cal Yeso, y tres dosis de un Digestor Enzimático, con el objetivo de disminuir las concentraciones de Coliformes Fecales en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de San Luis Talpa, La Paz, la cual es administrada por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), y determinar si cumplen los parámetros establecidos en la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, para que puedan ser utilizados en la agricultura sin riesgos de contaminación.

Para ello fue necesario conocer las concentraciones de coliformes fecales en los lodos antes de establecer los diferentes tratamientos, obteniendo un promedio de 23,105,000 NMP/g, después de 26 días de estar los lodos en los patios de secado de la Planta de Tratamiento, según los resultados de los análisis de laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD), de la Universidad de El Salvador. Según la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, los lodos con esa concentración de coliformes fecales se clasifican en clase "C", lo que significa que no pueden ser utilizados en agricultura.

El mejor tratamiento de la investigación después de 40 días de aplicados los tratamientos, que es el tiempo necesario para que la cal y el digestor enzimático hagan su efecto, es la aplicación de dos libras de cal Hidratada más 0.61 cc de Digestor Enzimático en 9 libras de lodo, el cual disminuyó las poblaciones de coliformes fecales hasta en un 99.97% en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, en comparación con el testigo, lo que permite que puedan ser utilizados en la agricultura.

Palabras claves: lodos, coliformes fecales, cal, digestor enzimático, planta de tratamiento, aguas residuales, contaminación, El Salvador.

Abstract

The research was carried out at the Experimental and Practical Station of the Faculty of Agronomic Sciences, University of El Salvador, located in Tecualuya, municipality of San Luis Talpa, department of La Paz, El Salvador; Starting on March 19 and ending on September 30, 2016.

Three types of lime were evaluated: hydrated lime, Agric cal and lime plaster, and three doses of an Enzymatic Digester, with the objective of reducing concentrations of Fecal Coliforms in the sludge of the Wastewater Treatment Plant Of the municipality of San Luis Talpa, La Paz, which is administered by the National Administration of Aqueducts and Sewers (ANDA), and determine if they meet the parameters established in Mexican Standard NOM-004-SEMARNAT-2002, so that they can be used In agriculture without risk of contamination.

It was necessary to know the concentrations of fecal coliforms in the sludge before establishing the different treatments, obtaining an average of 23,105,000 NMP / g, after 26 days of being the sludge in the drying grounds of the Treatment Plant, according to the Results of laboratory analyzes of the Center for Research and Development in Health (CENSALUD), University of El Salvador. According to Mexican Standard NOM-004-SEMARNAT-2002, sludge with that concentration of fecal coliforms is classified in class "C", which means that they can not be used in agriculture.

The best treatment of the research after 40 days of applied treatments, which is the time required for the lime and the enzymatic digester to have their effect, is the application of two pounds of hydrated lime plus 0.61 cc of Enzyme Digester in 9 lbs Of sludge, which reduced fecal coliform populations by up to 99.97% in the sludge of the San Luis Talpa Wastewater Treatment Plant, compared to the control, which allows them to be used in agriculture.

Key words: sludge, fecal coliforms, lime, enzymatic digester, treatment plant, sewage, pollution, El Salvador.

Agradecimientos

A Dios

A mis padres: Natividad de Jesús Miranda y José Alfonso Mendoza Peña.

Al Ing. Agr. Juan Rosa Quintanilla, Decano de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la Universidad de El Salvador, 2015 – 2019.

Al Banco de Desarrollo de El Salvador (BANDESAL), por el apoyo en el financiamiento de los análisis de laboratorio.

Al laboratorio de Control de Calidad Microbiológico del Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD) de la Universidad de El Salvador.

Agustín Lisandro Mendoza Miranda

Agradecimientos

A mi madre Reina Isabel Melara por traerme al mundo y brindarme su apoyo incondicional en el recorrer de mi vida, siempre el apoyo la fuerza, fortaleza, determinación, sacrificio y amor en su mismo ser.

A Dios por la existencia de la vida en mi cuerpo para avanzar y obtener cada meta propuesta y ser una persona de bien para la humanidad.

A mi padre Ismael Reyes Merino por sus consejos de formación para ser una persona de bien para la sociedad.

A mis ocho hermanas: Marisol, Jesús, Mercedes, Claudia, Sara, Glenda, Jenny y Mirian, que siempre me han apoyado incondicionalmente en cada momento de mi vida
Al Ingeniero Efraín Antonio Rodríguez Urrutia por su apoyo como asesor de tesis y orientación en la vida profesional

Al Ing. Juan Rosa Quintanilla, Decano de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la Universidad de El Salvador, 2015 – 2019.

A la Licenciada Amy Elieth Moran Rodríguez por su apoyo y contribución académica y profesional en nuestra tesis.

Al Banco de Desarrollo de El Salvador (BANDESAL) por el apoyo brindado en la realización de nuestra investigación

A la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA)

A miembros de la “Kasa Noni” (pupilage) por su apoyo durante la formación profesional de mi carrera.

A los miembros de la Junta Directiva Asociación de Estudiantes de Ciencias Agronómicas (ASECAS) periodo 2015-2017.

A los amigos y compañeros cercanos que estuvieron incondicionalmente en apoyo durante mi formación profesional

A quienes hicieron posible este logro; a todas y todos ustedes agradecimientos infinitos.

Edgar Geovany Reyes Melara

Índice

| | Página |
|---|---------------|
| Resumen..... | iv |
| Agradecimientos..... | vi |
| Índice..... | viii |
| Índice de Cuadros..... | x |
| Índice de Figuras..... | xi |
| Índice de Anexos..... | xii |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Revisión Bibliográfica..... | 2 |
| 2.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible..... | 2 |
| 2.2. Desarrollo Rural..... | 3 |
| 2.3. Desarrollo Local..... | 3 |
| 2.4. Recursos Naturales..... | 4 |
| 2.5. Contaminación del agua y suelo..... | 4 |
| 2.6. Calidad de las aguas superficiales en El Salvador..... | 4 |
| 2.7. Aguas Residuales..... | 5 |
| 2.8. Tratamiento de aguas residuales..... | 5 |
| 2.8.1. Tratamiento Primario..... | 6 |
| 2.8.2. Estimación de cantidad de sólidos..... | 6 |
| 2.8.3. Cantidad y característica de los lodos..... | 7 |
| 2.9. Tratamiento de lodos..... | 8 |
| 2.9.1. Los lodos en la agricultura..... | 10 |
| 2.10 Legislación vigente en El Salvador sobre aguas residuales..... | 11 |
| 2.10.1 Ley de Medio Ambiente..... | 11 |
| 2.10.2 Norma Salvadoreña de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09..... | 11 |
| 2.10.3 Reglamento Especial de Aguas Residuales..... | 13 |
| 2.10.4 Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental..... | 13 |
| 2.11 Coliformes..... | 13 |
| 2.11.1 Coliformes totales..... | 14 |
| 2.11.2 Coliformes fecales..... | 14 |
| 2.12 Digestor de enzimático..... | 14 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.12.1. | Forma de actuar del Digestor enzimático | 15 |
| 2.12.2 | Usos de la cal en la estabilización de lodos..... | 16 |
| 2.13 | Estabilización del lodo de las aguas residuales | 17 |
| 2.13.1 | Cal Dolomita (Doble Carbonato de Calcio y Magnesio)..... | 17 |
| 2.13.2 | Hidróxido de Calcio (cal apagada, cal hidratada) | 18 |
| 2.13.3 | Cal yeso | 18 |
| 3 | Materiales y Métodos..... | 19 |
| 3.1. | Ubicación de la Investigación | 19 |
| 3.1.1 | Condiciones climáticas del lugar..... | 20 |
| 3.1.2 | Duración de la investigación | 20 |
| 3.2 | Fase de campo..... | 20 |
| 3.2.1. | Recolección de materiales y preparación del sitio | 20 |
| 3.2.2. | Montaje de la Investigación | 21 |
| 3.3 | Metodología estadística..... | 24 |
| 3.3.1. | Monitoreo de la investigación en campo..... | 25 |
| 3.4. | Análisis de laboratorio..... | 25 |
| 4 | Resultados y Discusión | 27 |
| 4.1. | Resultados de Bacterias coliformes fecales..... | 27 |
| 4.2. | Análisis estadístico..... | 34 |
| 4.2.1. | Prueba de Contrastes Ortogonales para tipos de cal..... | 35 |
| 4.2.2. | Análisis de Varianza (ANVA) para pH..... | 36 |
| 4.2.3. | Prueba de Contrastes Ortogonales para pH..... | 36 |
| 4.2.4. | Resultados de metales pesados | 37 |
| 4.3. | Inversión económica de los tratamientos | 39 |
| 4.4. | Propuesta de manejo de los lodos | 40 |
| 5. | Conclusiones..... | 41 |
| 6. | Recomendaciones..... | 42 |
| 7. | Bibliografía..... | 43 |
| 8. | Anexos | 51 |

Índice de Cuadros

| | Página |
|---|---------------|
| Cuadro 1. Norma Salvadoreña de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09. | 12 |
| Cuadro 2. Límites máximos permisibles para patógenos de lodos y biosólidos. | 13 |
| Cuadro 3. Composición química del digestor enzimático. | 15 |
| Cuadro 4. Composición química de los tipos de Cal. | 17 |
| Cuadro 5. Resultados promedios de laboratorio obtenidos de bacterias coliformes fecales. | 29 |
| Cuadro 6. Resultados promedio de pH obtenidos según los análisis de laboratorio. | 30 |
| Cuadro 7. Resultados promedio obtenidos de bacterias coliformes fecales por tratamiento. | 33 |
| Cuadro 8. Análisis de Varianza (ANVA) para bacterias Coliformes Fecales. | 35 |
| Cuadro 9. Prueba de Contrastes Ortogonales para tipos de cal. | 36 |
| Cuadro 10. Análisis de Varianza (ANVA) para pH. | 36 |
| Cuadro 11. Contrastes para comparación del testigo con los diferentes tipos de cal. | 37 |
| Cuadro 12. Contrastes para comparación del testigo con los diferentes tipos de cal. | 38 |
| Cuadro 13. Inversión económica por tratamiento. | 40 |

Índice de Figuras

| | Página |
|---|---------------|
| Figura 1. Ubicación de la Investigación. | 19 |
| Figura 2. Materiales utilizados en la fase de campo..... | 20 |
| Figura 3. Toma de muestras de lodos en la PTAR de San Luis Talpa, La Paz. | 21 |
| Figura 4. Recolección de lodos y colocación en las cajas de durapax..... | 22 |
| Figura 5. Traslado de las cajas de durapax | 22 |
| Figura 6. Ubicación de las cajas en un estante a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo. | 22 |
| Figura 7. Aplicación de una dosis de digester enzimático en uno de los tratamientos..... | 23 |
| Figura 8. Aplicación de una dosis de cal en uno de los tratamientos. | 24 |
| Figura 9. Recolección de muestras para enviarlas a los laboratorios. | 26 |
| Figura 10. Concentración de Coliformes Fecales después de la aplicación de los tipos de cal y el Digester enzimático, y la interacción entre ellos..... | 31 |
| Figura 11. Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos aplicados. | 34 |
| Figura 12. Concentración de metales pesados en lodos de la PTAR de San Luis Talpa, después de 40 días de aplicados los tratamientos. | 39 |

Índice de Anexos

| | Página |
|---|---------------|
| Anexo 1. Resultados de coliformes fecales en lodos antes de aplicados los tratamientos, repetición 1..... | 51 |
| Anexo 2. Resultados de laboratorio de coliformes fecales antes de aplicados los tratamientos, repetición 2 y 3. | 52 |
| Anexo 3. Resultados de coliformes fecales y pH de la repetición 1. | 53 |
| Anexo 4. Resultados de coliformes fecales y pH repetición 2. | 54 |
| Anexo 5. Resultados de coliformes fecales y pH repetición 3. | 55 |
| Anexo 6 . Resultados de metales pesados en lodos de 26 días de estar en patios de secado Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Luis Talpa. | 56 |
| Anexo 7. Resultados de metales pesados 40 días después de aplicados los tratamientos a lodos provenientes de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Luis Talpa..... | 57 |
| Anexo 8. Cálculos para determinación de dosis a aplicar a los lodos..... | 58 |
| Anexo 9. Calculo para determinar el costo de los tratamientos evaluados. | 58 |

1. Introducción

La depuración del agua mediante el uso de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) conlleva a la generación de subproductos principalmente lodos, los cuales presentan entre otros compuestos: materia orgánica, nutrientes, metales pesados y presencia de organismos patógenos, encontrándose la mayoría de las veces dificultades para su aprovechamiento y disposición final.

El trabajo de investigación está encaminado a la búsqueda de alternativas para el manejo y disposición final de los “lodos” generados en la PTAR del municipio de San Luis Talpa, departamento de La Paz, en El Salvador, el incremento en la producción de residuos sólidos urbanos es cada vez mayor, debido al aumento de la población y a la emigración de los habitantes rurales a las zonas urbanas.

El objetivo general del presente estudio es evaluar la factibilidad del aprovechamiento de los “lodos” mediante la aplicación de diferentes tipos de cal y dosis de un digestor enzimático de rastros para disminuir las poblaciones de coliformes en los lodos producidos en la PTAR de San Luis Talpa, administrada por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANANDA), con el fin de que éstos puedan ser reutilizados por los lugareños en agricultura, reducir el impacto ambiental que éstos producen y contribuir al proceso de gestión integrada de las aguas residuales de la PTAR, en cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a las políticas del desarrollo sostenible del país.

De los resultados obtenidos se determinó que hay alternativas para el uso de los lodos en agricultura, haciendo aplicaciones de cal y del digestor enzimático para disminuir los coliformes fecales, ya que éstos fueron clasificados según la Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental- Lodos y biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, en lodos clase A y clase B, ya que cumple los límites máximos permisibles para la manipulación y uso en la agricultura.

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para todas las naciones, pueblos y sectores de la sociedad son 17 objetivos:

- 1) Fin de la pobreza
- 2) Hambre cero
- 3) Salud y Bienestar
- 4) Educación de calidad
- 5) Igualdad de género
- 6) Agua limpia y saneamiento
- 7) Energía asequible y no contaminante
- 8) Trabajo decente y crecimiento económico
- 9) Industria, innovación e infraestructura
- 10) Reducción de las desigualdades
- 11) Ciudades y comunidades sostenibles
- 12) Producción y consumo responsable
- 13) Acción por el clima
- 14) Vida submarina
- 15) Vida de ecosistemas terrestres
- 16) Paz, justicia e instituciones solidas
- 17) Alianzas para lograr objetivos (ONU s. f.).

Este trabajo de investigación está enmarcado en el cumplimiento del objetivo 6: Agua limpia y saneamiento, el cual está relacionado al cuidado y protección de los recursos hídricos, que son de gran importancia para la sociedad.

El porcentaje de recursos hídricos usados por un país es un indicador complejo que refleja el desarrollo, la política nacional sobre el agua y su escasez material y económica. Cuando el nivel de desarrollo de un país es bajo, generalmente resulta ventajoso incrementar lo más posible la extracción de agua (Bonilla 2015).

2.2. Desarrollo Rural

El desarrollo rural se define como un proceso mediante el cual se enfrenta la problemática de las zonas rurales en un esfuerzo de cambio para producir transformaciones sustanciales en las condiciones de vida de la población que vive en el campo, en las estructuras económicas, políticas y sociales, que faciliten y hagan posible la plena incorporación de las personas rurales a las actividades de la vida nacional. Se concibe como una estrategia del desarrollo global del cual es un componente importante. La diversa gama de aspectos que conforman la problemática de las zonas rurales exige que el desarrollo rural sea sostenible (Bonilla 2015).

Estos procesos se logran a través de la participación consciente y crítica de las poblaciones de zonas rurales en el análisis de sus problemas, necesidades y de sus intereses, en el planteamiento de soluciones, en las decisiones y en la actuación para transformar su situación y superar los problemas de las comunidades.

2.3. Desarrollo Local

El desarrollo local se refiere a aquel proceso creciente, sostenido y equitativo de creación de condiciones para los hombres y mujeres residentes de un determinado territorio, de acceder a salud, educación, agua potable, trabajo productivo, información, ambiente sano y un marco jurídico e institucional para hacer valer sus derechos civiles, sin hipotecar o menoscabar con ello las oportunidades de las futuras generaciones. En El Salvador el desarrollo local tiene lugar a través de diversas iniciativas, tanto en el ámbito de municipios como en las asociaciones, microrregiones, mancomunidades de municipios o de las mismas cuencas hidrográficas apoyadas por diversos actores locales, nacionales e internacionales (Bonilla 2015).

Esto implica optimizar y racionalizar el empleo de los escasos recursos (eficiencia), el logro real de los objetivos y la solución de las necesidades comunitarias (eficacia), la satisfacción y receptividad de los usuarios o destinatarios de los proyectos y los servicios (efectividad), el impacto de las acciones en los diferentes sectores sociales y particularmente en los objetivos de reducción o mitigación de los niveles de pobreza (equidad), y la permanencia de los beneficios en el tiempo (sostenibilidad) de los recursos naturales.

2.4. Recursos Naturales

Los recursos naturales tierra, agua y material genético, son esenciales para la producción de alimentos, el desarrollo rural y los medios de subsistencia sostenibles. La FAO promueve una gestión sostenible del recurso tierra, que incrementa la producción, utiliza con eficacia los recursos y sustenta los servicios del ecosistema. Con los recursos hídricos tiene como objetivo incrementar la eficacia en la utilización y la productividad del agua mediante la modernización de las prácticas de irrigación, incremento de la productividad de los cultivos y mejores políticas de utilización del agua (FAO s. f.).

2.5. Contaminación del agua y suelo

El equilibrio de los cuerpos de agua puede ser interrumpido por un amplio rango de contaminantes provenientes de actividades humanas, industriales y agrícolas, que pueden ser dispersas o puntuales. Fuentes dispersas en ríos y lagos incluyen nutrientes como nitrógeno y fósforo que provienen de fertilizantes, tanques sépticos, plaguicidas usados en agricultura, descargas industriales y químicos tóxicos de rellenos sanitarios donde se les da un manejo no adecuado (Ortiz Moreno 2005).

Las personas contaminan el suelo con sus excretas y con la mala disposición de desechos líquidos y sólidos domésticos, comerciales e industriales. Esta contaminación se infiltra al suelo o es llevada por la lluvia a cuerpos de agua. Las personas también contaminan cuerpos de agua con efluentes de alcantarillado sin tratamiento (PROARCA 2003).

2.6. Calidad de las aguas superficiales en El Salvador

La calidad del agua de los ríos en el país es mala, solo el 5% del agua superficial es apta para ser potable mediante procesos convencionales. Casi todas las aguas rebasan los límites establecidos para una buena calidad medioambiental y sanitaria en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y coliformes fecales. La mala calidad de agua se debe principalmente a:

- 1) Alto grado de deforestación de bosques.

- 2) Crecimiento demográfico desordenado.
- 3) Mal manejo de desechos sólidos y aguas residuales domésticas e industriales, la mayoría de las cuales son descargadas en los ríos sin ningún tratamiento. Las bacterias más frecuentes en las aguas contaminadas son las coliformes fecales (MSPAS 2004).

2.7. Aguas Residuales

Son aguas que han recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes y vertidas a un cuerpo receptor. Ellas son de dos tipos:

- 1) Agua residual de tipo Ordinario: Son las aguas generadas por las actividades domésticas de los seres humanos, tales como: uso de servicios sanitarios, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa y otras similares.
- 2) Agua residual de tipo Especial: Son las aguas generadas por actividades agroindustriales, industriales, hospitalarias y todas aquéllas que no se consideran de tipo ordinario (MSPAS 2004).

2.8. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales puede incluir por diferentes procesos unitarios para garantizar un tratamiento compatible con las condiciones locales del cuerpo receptor. Según el Artículo 7 del Reglamento Especial de Aguas Residuales, toda persona natural o jurídica, pública o privada, titular de una obra, proyecto o actividad responsable de producir o administrar agua residual y de su vertido en un medio receptor, en lo sucesivo denominada el titular, deberá instalar y operar sistemas de tratamiento para que sus aguas residuales cumplan con las disposiciones de la legislación pertinente (Ayala Duran y Castillo Díaz 2008).

El objetivo de cualquier tratamiento es eliminar los componentes definidos como contaminantes, molestos o con efectos nocivos para el medio ambiente, ajustar la calidad del agua vertida a las especificaciones legales, proteger la salud y promover el bienestar de una sociedad en general. Los sistemas de tratamiento son nombrados de

acuerdo al principio de operación, por ejemplo: lodos, lodos activados, zanjas de oxidación, lagunas anaerobias, película fija, entre otros.

Cuando se tiene involucrado un sistema de tratamiento de aguas de tipo anaerobio o aerobio, consta de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persiguen eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en los efluentes tratados cumplan los límites legales existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores, se pueden distinguir hasta cuatro etapas, que comprenden los mencionados procesos químicos, físicos y biológicos (Rivera 2013).

2.8.1. Tratamiento Primario

El tratamiento primario se emplea para la eliminación de sólidos en suspensión y materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, bien directamente o pasando por una neutralización u homogeneización (Rivera 2013).

En el tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos:

- a) Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.
- b) Tratamiento primario que comprende procesos de sedimentación y
- c) Tratamiento secundario que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios, y físico-químicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO.
- d) Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos (Mayo Peternell 2010).

2.8.2. Estimación de cantidad de sólidos

La cantidad de “lodos” producidos en un clarificador primario es una función directa de su eficiencia. Es posible esperar remociones de 50% a 60% para aguas residuales domésticas ordinarias. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos

convencionales. El objetivo del tratamiento terciario es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales (Rivera 2013).

2.8.3. Cantidad y característica de los lodos

El lodo de aguas residuales se compone de sólidos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua residual cruda y removida en el clarificador primario, y de sólidos orgánicos generados en el tratamiento secundario y removidos en el clarificador secundario o en un proceso de espesamiento separado. La cantidad de sólidos en agua residual doméstica cruda es en general de 90 galones/día por habitante, con concentraciones reportadas de 100 a 350 mg/l dependiendo del flujo.

Entre los procesos de acondicionamiento se hallan la digestión de lodos aeróbica y anaeróbica, el compostaje, la adición química y los tratamientos con calor. Los lodos son un subproducto de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y su uso es valioso como fuente de nutrientes y acondicionador de suelos; sin embargo, no resultan inocuos porque provienen de sistemas de sedimentación y tienen altas concentraciones de bacterias patógenas, por ello, los lodos deben ser tratados (León s. f.).

Los lodos son ricos en materia orgánica (MO), macro y micro nutrientes y únicamente del 1% al 10% de la concentración total de elementos tóxicos se encuentran en formas solubles. Los resultados microbiológicos muestran la presencia de *Salmonella sp* y coliformes totales. Por su composición, los lodos se consideran adecuados para mejorar la calidad de los suelos (Ortiz *et al.* 1995).

El uso de lodos residuales como mejoradores de suelos con o sin tratamiento previo, dependiendo de las condiciones particulares de cada caso, presentan las siguientes bondades:

- ✓ Contienen elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (materia orgánica).
- ✓ Mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como estructura, permeabilidad y poder de amortiguamiento.

- ✓ Los elementos potencialmente tóxicos se presentan en formas insolubles y bajo las condiciones del suelo no deben tener posibilidad de solubilizarse.
- ✓ Los microorganismos patógenos contenidos en los lodos residuales se eliminan por exposición a los agentes ambientales que abaten su población, como las altas temperaturas.
- ✓ Los compuestos orgánicos se degradan y no contaminan cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales (Ortiz *et al.* 1995).

Se considera que antes de aplicar lodos a un suelo es necesario llevar a cabo:

- a) La caracterización de los lodos, especialmente en lo referente a elementos inorgánicos acumulables, ya que en el caso de los compuestos orgánicos se debe cuidar su degradación, pues no es posible una caracterización exhaustiva (ya que se considera que existen aproximadamente 400,000 sustancias peligrosas en este tipo de sistemas y una vez mezclado con un suelo esta cantidad aumenta).
- b) El composteo de los lodos, ya que la descomposición termofílica de los constituyentes orgánicos, producida por microorganismos aerobios, permite obtener un material relativamente estable, tal como el humus (Ehret y Walker 1977, citados por Ortiz *et al.* 1995).

Las excretas y lodos de plantas de tratamiento requieren almacenamiento previo para cumplir con la directriz de calidad helmíntica (menos de un huevo viable de nematodo por 100 g). Las excretas sin tratar deben almacenarse durante un periodo mínimo de un año a temperatura ambiente (León s. f.).

2.9. Tratamiento de lodos

Los lodos de las aguas residuales están constituidos por sólidos que se eliminan en las unidades de tratamiento primario y secundario, junto con el agua que se separa con ellos. En algunos casos es satisfactoria la disposición de ellos sin someterlos a tratamiento, generalmente es necesario tratarlos en alguna forma para prepararlos o acondicionarlos para disponer de ellos sin originar condiciones inconvenientes. Este tratamiento tiene dos objetivos, siendo el primero de éstos eliminar parcial o totalmente

el agua que contienen los lodos para disminuir su volumen en fuerte proporción y, en segundo lugar, para que se descompongan todos los sólidos orgánicos putrescibles, transformándose en sólidos minerales o sólidos orgánicos relativamente estables.

El tratamiento de los lodos sedimentados, se lleva a cabo en un reactor cuyo proceso de digestión puede ser anaeróbico (depuración de la materia orgánica por bacterias, sin oxígeno), o aeróbico (simplificación de la materia orgánica por bacterias, en presencia de oxígeno) (Monroy 2010).

Según Monroy (2010), complementario a la digestión, pueden utilizarse las técnicas siguientes para deshidratación de lodos:

1. Patios de secado. El procedimiento consiste en la disposición de los lodos a secar sobre una superficie al aire libre dotada de un buen drenaje. La altura de la capa extendida varía según las características del lodo. Para lodos urbanos digeridos se disponen capas de 20 a 30 cm, la superficie de los patios varían en función del clima de la zona. La “torta” de lodos se suele secar cuando la humedad de la misma desciende por debajo del 40%. Un puente rascador que se mueve sobre unos carriles, pueden emplearse en la extracción de la torta de lodo.
2. Filtro de Prensa. Se efectúa a través de un filtro prensa de banda y consiste en coagular el lodo mediante un químico biodegradable, posteriormente se filtra a través de bandas de tela dispuestas en placas de acero inoxidable o acero de carbón, las cuales ejercen presión para generar un producto final manejable.. Para estabilizar los lodos se procede a la aplicación de cal.
3. Sistemas de tratamiento por lodos activados. Las líneas de tratamiento de lodos residuales se encuentran enfocadas a dos aspectos fundamentales, que son:
 - a) Reducción del volumen: pueden obtenerse por un simple espesamiento (con el que la sequedad del producto podrá alcanzar en algunos casos el 10% o muy excepcionalmente el 20%, sin que por ello pueda manejarse con pala), deshidratación por drenaje natural, escurrido mecánico, secado térmico y como continuación de una deshidratación, por una incineración (Trejo y Cardona 2012).

- b) Reducción del poder de fermentación o estabilización: consiste en reducir su actividad biológica (tendencia a la putrefacción) y su contenido de microorganismos causantes de enfermedades. La estabilización puede obtenerse mediante procesos como: digestión anaerobia o aerobia, estabilización química, pasteurización, cocción, otras.

El tratamiento primario tiene la finalidad entre otros, de:

- Inhibir sustancias dañinas a la activación microbiana, tal como la presencia de cloro.
- Eliminar grandes cantidades de sólidos. Se utilizan cribas o rejillas en un tanque de sedimentación primaria para los sólidos fácilmente sedimentables.
- Acondicionar las aguas residuales con valores anormales de pH. Se debe realizar un proceso de neutralización el cual es indispensable para el desarrollo bacteriano.
- Desaguar grandes fluctuaciones de caudal y calidad de las aguas residuales incluyendo concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅). Se homogenizan las aguas en un tanque de igualación (Monroy 2010).

2.9.1. Los lodos en la agricultura

Los lodos sin tratar o parcialmente tratados solo deben aplicarse en zanjas cubiertas antes de la temporada de cultivo o deben inyectarse al suelo. En cambio, los lodos totalmente tratados (digeridos y sin agentes patógenos) pueden aplicarse en el terreno sin riesgo para la salud (Anónimo s. f.).

Los residuos orgánicos cuyos tratamientos se ajusten a las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad helmíntica, pueden contener altas concentraciones de agentes bacterianos y víricos, y presentar mayor riesgo para los trabajadores del campo que el riesgo limitado con agua residual, solo podrá reducirse mediante el control de la exposición (León s. f.).

2.10 Legislación vigente en El Salvador sobre aguas residuales

Por su importancia en el tipo de tratamientos a implantar, objeto fundamental de este trabajo, se hace hincapié en la Norma Salvadoreña de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09 y en el Reglamento Especial de Aguas Residuales, que tiene por objeto velar porque las aguas residuales no alteren la calidad de los medios receptores, para contribuir a la recuperación, protección y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico respecto de los efectos de la contaminación (CONACYT 2009), actualmente Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica (OSARTEC).

2.10.1 Ley de Medio Ambiente

En esta ley se menciona que la prevención y control de la contaminación, y disposiciones especiales (deberes de las instituciones del Estado) se basa en la aprobación de las Normas Técnicas de calidad ambiental. Así también, establece el control sobre la protección y la contaminación, protección del agua, el aire y suelo, priorizando las zonas más afectadas. La Ley de Medio Ambiente en los Artículos 46, 47, 49 y 70, menciona que el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) es el responsable de vigilar la disponibilidad y calidad del agua, del tratamiento previo de vertidos y sustancias contaminantes. Elaborará los reglamentos necesarios para la gestión, uso, protección y manejo de las aguas, basados en la legislación vigente (MARN 1998).

2.10.2 Norma Salvadoreña de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09

En esta Norma el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) establece las características y valores físico-químicos, microbiológicos y radiactivos permisibles que debe presentar el agua residual para proteger y rescatar los cuerpos receptores (cuadro 1). Esta Norma se aplica en todo el país para las descargas de aguas residuales vertidas a cuerpos receptores superficiales y deben cumplirse los valores permisibles establecidos. A pesar de estar vigente, no se está cumpliendo en su

totalidad, ya que existen muchas residenciales que descargan sus aguas directamente a cuerpos de agua sin un tratamiento previo (CONACYT 2009).

Según el reporte estadístico de ANDA (2010), se estima que de los 262 municipios que conforman el país, el suministro de agua potable es administrado por ANDA en 168 municipios y 89 municipios son administrados por las Alcaldías Municipales, Juntas de Aguas, Empresas de capital mixto, otras. De los administrados por ANDA, 81 municipios cuentan con sistemas de alcantarillado sanitario, y de estos solamente ocho cuentan con planta de tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico. Respecto a la calidad de las aguas residuales, la situación es alarmante, ya que la mayor parte es arrojada a los ríos sin ningún tratamiento, por lo que se estima que solo un 3% de las aguas residuales reciben tratamiento.

Cuadro 1. Norma Salvadoreña de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09.

| Parámetros | Unidad | Valores máximos permisibles |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| DQO | mg/l | 150 |
| DBO ₅ | mg/l | 60 |
| Sólidos sedimentables | ml/l | 1 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/l | 60 |
| Coliformes fecales | Número Más Probable/100 ml | 2,000.00 |
| Coliformes totales | Número Más Probable/100 ml | 10,000.00 |
| pH | - | 5.50 - 9.00 |
| Hierro total | mg/l | 10 |
| Manganeso | mg/l | 2 |
| Sulfatos | mg/l | 1,000 |
| Aluminio | mg/l | 5 |
| Arsénico | mg/l | 0.1 |
| Cadmio | mg/l | 0.1 |
| Plomo | mg/l | 0.4 |
| Zinc | mg/l | 5 |

Fuente: CONACYT (2009).

2.10.3 Reglamento Especial de Aguas Residuales

El Reglamento sobre Calidad del Agua, el Control de Vertidos y las Zonas de Protección, tiene por objeto desarrollar los principios de la Ley de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, y su Reglamento se orienta a evitar, controlar o reducir la contaminación del agua por vertidos domésticos, industriales o de cualquier índole, a la vez establece normas sobre depuración y tratamiento de aguas, y sus respectivas sanciones (MIPLAN 1987).

2.10.4 Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental

La Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental- Lodos y biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, establece la protección ambiental de lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana, establecen los límites máximos permisibles para patógenos de lodos y biosólidos (cuadro 2).

Cuadro 2. Límites máximos permisibles para patógenos de lodos y biosólidos.

| Clase | Indicador Bacteriológico | |
|-------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | Coliformes fecales NMP/g en base seca | Huevos de helmintos/g en base seca |
| A | Menor de 1,000 | Menor de 1* |
| B | Menor de 1,000 | Menor de 10 |
| C | Menor de 2,000,000 | Menor de 35 |

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

*Huevos de helmintos viables

Clase A: Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.

Clase B: Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.

Clase C: Usos forestales, Mejoramiento de suelos, usos agrícolas (NOM-004-SEMARNAT-2002).

2.11 Coliformes

Los coliformes son bacilos cortos que se han definido como bacterias aerobias o anaerobias facultativas, que fermentan la lactosa con producción de gas. Las principales especies de bacterias coliformes son el *Escherichia coli* y *Enterobacter*

aerogenes; no obstante, las especies que es posible que se ajusten a estos criterios son más de veinte (Rivera 2013).

2.11.1 Coliformes totales

Las coliformes totales incluyen una amplia variedad de bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gran negativos y no esporulantes, capaces de proliferar en presencia de concentraciones relativamente altas de sales biliares fermentando la lactosa y produciendo ácido o aldehído en 24 horas a 35° – 37° C. *Escherichia coli* y los coliformes termolatentes son un subgrupo del grupo de los coliformes totales que pueden fermentar la lactosa a temperaturas más altas. Las bacterias pertenecientes al grupo de los coliformes totales (excluida *E. coli*) están presentes tanto en aguas residuales como en aguas naturales. Algunas de estas bacterias se excretan en las heces de las personas y animales, pero muchos coliformes son heterótrofos y capaces de multiplicarse en suelos y medios acuáticos. Los coliformes totales pueden también sobrevivir y proliferar en sistemas de distribución de agua, sobretodo en presencia de biopelículas (Bonilla 2015).

2.11.2 Coliformes fecales

Para llegar a este grupo en un análisis de laboratorio hay que determinar primero los coliformes totales. Este grupo incluye a los coliformes capaces de crecer a temperatura elevada de 44.5° o 45° C. Para *Escherichia coli* la temperatura óptima de crecimiento del microorganismo es de 37° C, con un intervalo de crecimiento de 10° a 40° C. Su pH óptimo de crecimiento es de 7.0 a 7.5, con un pH mínimo de crecimiento de valor de 4.0 y un pH máximo de crecimiento de 8.5. Este microorganismo es relativamente termo-sensible y puede ser destruido con facilidad a temperaturas de pasteurización (Rivera Guerrero 2013).

2.12 Digestor de enzimático

El digestor enzimático promueve mejores beneficios bioquímicos reteniendo los nutrientes del suelo, el agua, reduce la erosión y acelera la descomposición de los residuos agrícolas y agroindustriales, contiene materias primas grado alimenticio como

ácidos orgánicos y polisacáridos, además de contener cierta cantidad de macro y micronutrientes que alimentan a los microorganismos benéficos. Esta energía promueve desde una perspectiva ecológica balanceada una rápida degradación de los residuos orgánicos provenientes de las cosechas y otros subproductos orgánicos (pulpas, estiércoles, aguas residuales, entre otros), convirtiéndolos en un invaluable humus para el suelo (Montero e Hidalgo s. f.).

2.12.1. Forma de actuar del Digestor enzimático

Su acción se encuentra en el proceso de liberación de energía tomada de la celulosa en la etapa de oxidación completa por la vía de la glicolisis aeróbica. Este complejo enzimático, regulador del crecimiento bacteriano heterogéneo toma en cuenta en todo momento la segmentación específica de la celulosa y de fibras de lignina.

Debido a que la mayor parte de las bacterias del suelo como las mixobacterias inician la degradación de la celulosa desde puntos terminales, este complejo enzimático inicia la segmentación bacteriana natural del suelo. Por otro lado, las enzimas que componen el degradador poseen la habilidad de trabajar bajo límites de baja presión de oxígeno (Leiva 1988).

En algunos casos, la reducción de la resistencia de las fibras de residuos vegetales o de subproductos como la pulpa de café, como consecuencia de la degradación se reduce a un porcentaje muy bajo (15 a 20%) de lo normal (cuadro 3). El hecho de que un sistema de celulosa de células enlazadas se emplee en la digestión de celulosa como la empleada en este producto enzimático sobre sistemas de celulosas libres, apunta hacia la actividad rápida y relativamente específica del degradador sobre límites de temperatura entre 10° y 32° C.

Cuadro 3. Composición química del digestor enzimático.

| Ingredientes | Función específica |
|---------------------|---|
| Ácido Fosfórico | Potencializador de acidez |
| Sacarosa | Alimento de los microorganismos benéficos (Bacterias, Hongos, entre otros.) |

Fuente: Elaboración propia con datos de la etiqueta del producto comercial.

Dentro del proceso natural de descomposición de los rastrojos, el degradador tiende a actuar básicamente en las siguientes funciones:

- ✓ Aumentar la actividad de las celulasas.
- ✓ Adición de fracciones proteínicas específicas.

Efectos del degradador enzimático de rastrojos:

- ✓ Liberación de energía carbohidratada para acelerar los procesos de crecimiento bacterial.
- ✓ Reducción en las necesidades de aumento de Nitrógeno para la digestión de los desechos residuales de la cosecha.
- ✓ Una actividad incrementada de las bacterias del suelo en respuesta a reguladores de crecimiento tales como la citoquinona (Leiva 1988).

2.12.2 Usos de la cal en la estabilización de lodos

La cal es un producto químico utilizado en el tratamiento de agua potable y aguas industriales; para mejorar la calidad del agua, especialmente para su suavización.

Ha demostrado ampliamente sus características higiénicas en la estabilización de lodos de aguas de deshecho, donde el lodo es removido mediante vacío o filtrado a presión. La cal y el cloruro férrico son usados como filtros auxiliares en el acondicionamiento del lodo y para la clarificación final del efluente (National Lime Association s. f.) (cuadro 4).

Cuadro 4. Composición química de los tipos de Cal.

| Nombre de la cal | Nombre técnico | Contenido de elementos (porcentaje) | Poder de neutralización |
|-------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| Cal Hidratada | Hidróxido de calcio | 40% Ca 22% Mg | 136 |
| Cal Agrícola | Carbonato de calcio | 40% Ca | 90 -100 |
| Cal Dolomita | Carbonato de calcio y magnesio | 22% Ca 12% Mg | 95 - 108 |
| Cal Dolomita NUTRICAL | Carbonato de calcio y magnesio | 35% Cal 15% Mg 15% S | 90 - 100 |
| Cal Yeso | Sulfato de calcio hidratado | 18% Ca 15% S | - |

Fuente: CENTA, FAO-HOLANDA (1999).

2.13 Estabilización del lodo de las aguas residuales

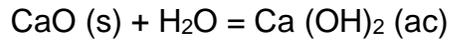
Una nueva aplicación para la cal se refiere a la estabilización de los lodos provenientes de aguas residuales, donde es añadida suficiente cal al lodo para mantener el pH a 12.4 por un mínimo registro de reducción de 2.4 para el indicador de estreptococos fecales y reducir el mal olor producido por las bacterias. Asimismo, cumple con los criterios gubernamentales del tratamiento PSRP (Proceso Para Reducir Patógenos Sustancialmente), donde el desperdicio de aguas de desecho puede ser regado sobre tierras de cultivo como un acondicionador de suelos (National Lime Association s. f.).

2.13.1 Cal Dolomita (Doble Carbonato de Calcio y Magnesio)

Está constituida por el sustrato de rocas carbónicas, es el carbonato doble de calcio y magnesio. La Dolomita pura contiene hasta 25% de calcio mínimo y 8% de magnesio, por eso son apreciados en los fines agrícolas, ya que el magnesio es un elemento esencial para los cultivos y frecuentemente es deficiente en suelos ácidos. La cal Dolomita es de color blanco, con una humedad aproximada menor del 10%, un brillo vítrico algo aperlado, con una dureza entre 3.5 - 4.0, una densidad de entre 2.86 - 3.10 g/cm³ y un pH aproximado de 8.5 (Ortiz 2013).

2.13.2 Hidróxido de Calcio (cal apagada, cal hidratada)

Está compuesto de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, químicamente puro más agua bidestilada, para formar una pasta, o más carboximetil celulosa para formar un hidrogel. El hidróxido de calcio es un polvo blanco que se obtiene por la calcinación del carbonato cálcico:



El Hidróxido de Calcio tiene múltiples aplicaciones, entre ellas:

- Aditivo en la producción de diferentes compuestos químicos.
- Estabilizante de cementos.
- Tratamiento de agua (National Lime Association s. f.).

2.13.3 Cal yeso

El yeso agrícola es un mineral común utilizado como enmienda y fertilizante. Su composición varía de 17-20% de calcio y de 14-18% de azufre(s). En el suelo, los productos finales de la disolución del yeso son Ca^{2+} y SO_4^{2-} , que participan en las reacciones de intercambio catiónico y aniónico, formación de complejos iónicos y precipitados. Es importante mencionar que este compuesto no modifica el pH del suelo ya que su valor neutralizante es cero, pero está muy bien documentado los beneficios que tiene en la raíz, debido a que mejora el ambiente radicular, permitiendo el adecuado crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas (Intagri. s. f.).

3 Materiales y Métodos

3.1. Ubicación de la Investigación

La investigación se realizó en la Estación Experimental y de Prácticas (EEP) de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la Universidad de El Salvador (UES), ubicada en el cantón Tecualuya, municipio de San Luis Talpa, departamento de La Paz, El Salvador (figura 1), con coordenadas geográficas O 13°47'49.71" y 89°09'60.63" N, a 50 metros sobre el nivel del mar (msnm). Los lodos utilizados en la investigación son de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicada en el municipio de San Luis Talpa, en el departamento de La Paz, administrada por ANDA, la cual se encuentra ubicada a 50 m de la EEP, de la Facultad de Ciencias Agronómicas, de la UES.

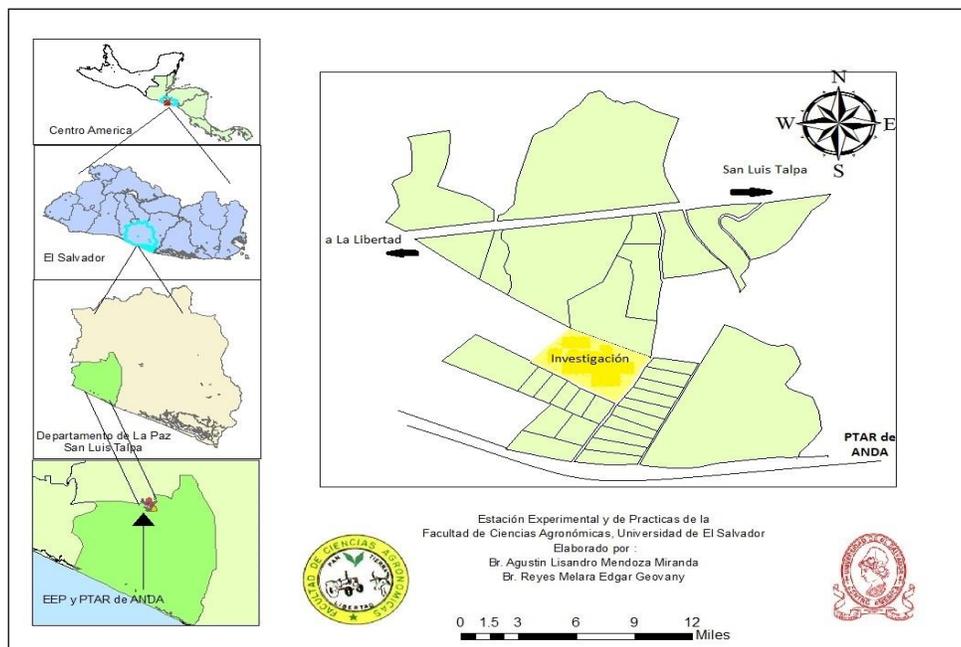


Figura 1. Ubicación de la Investigación.

3.1.1 Condiciones climáticas del lugar

La temperatura promedio es de 33° C, vientos con velocidades promedio de 25 km/h, humedad relativa promedio de 65-95%, precipitación promedio de 1,500 mm/año (Merlos Osorio et al, 2011).

3.1.2 Duración de la investigación

La fase de campo se inició el 19 de marzo de 2016 y finalizó el 19 de agosto de 2016. La fase de laboratorio inició el 22 agosto 2016 y culminó el 30 de septiembre de 2016.

3.2 Fase de campo

3.2.1. Recolección de materiales y preparación del sitio

Se utilizaron 16 cajas de durapax de 0.40 x 0.60 x 0.10 m, 18 frascos de polietileno de alta resistencia de 500 ml cada uno, una pala plástica, una caja de guantes descartables, una caja de mascarillas descartables, 15 kg de cal hidratada, 45.56 kg de cal dolomita, 45.56 kg de cal yeso y dos litros de un digestor enzimático (figura 2).

Los materiales fueron trasladados a la Estación Experimental y de Prácticas (EEP) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador. Se limpió y adecuó el lugar donde se estableció la investigación en un área de 20 m².



Figura 2. Materiales utilizados en la fase de campo.

3.2.2. Montaje de la Investigación

Previo al montaje de las Unidades Experimentales, se tomaron dos muestras de lodos de 26 días de secado de los patios de secado de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Luis Talpa, La Paz, una muestra se envió al laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador para realizar análisis de metales pesados (con el equipo de absorción atómica) y para medir el pH; la otra muestra fue enviada al Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD), de la Universidad de El Salvador, para analizar coliformes fecales, aplicando la metodología de enzima base bajo la técnica del Número Más Probable (NMP), según la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (figura 3).

Se ha utilizado la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, para comparar y analizar los resultados obtenidos de los laboratorios, porque en El Salvador no existe Norma para lodos, y considerando que geográficamente, México se encuentra cerca de El Salvador, las condiciones climáticas son bastante similares, permite obtener resultados confiables al aplicar las recomendaciones que la Norma hace para el uso y disposición final de los lodos.



Figura 3. Toma de muestras de lodos en la PTAR de San Luis Talpa, La Paz.

Para el montaje de las Unidades Experimentales, los demás lodos (de 26 días de secado) se colocaron nueve libras en cada caja de durapax, haciendo un total de 16 cajas, las cuales fueron trasladadas a la Estación Experimental y de Prácticas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, donde fueron colocadas en el sitio que se había limpiado, a una altura de un metro del nivel del suelo (figura 4, 5 y 6).



Figura 4. Recolección de lodos y colocación en las cajas de durapax.



Figura 5. Traslado de las cajas de durapax con 9 lb de lodo cada una.



Figura 6. Ubicación de las cajas en un estante a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo.

Según Horcalsa (s. f.) se deben agregar 500 lb de cal viva por tonelada métrica de lodos para producir resultados efectivos en la disminución de coliformes, basado en dicha afirmación se extrapolo para conocer la necesidad por cada nueve libras de lodos, resultando en dos libras de cal (anexo 1), dicha cantidad se pesó en una balanza de reloj y se incorporó a los lodos.

Inmediatamente después de aplicada la cal se aplicó el digestor enzimático, que según Cinco Ache (s. f.) la dosis que se recomienda son 100 cc por tonelada métrica de lodo, para la investigación se evaluaron tres dosis, las cuales fueron: 100 cc, 150 cc y 210 cc, estas dosis fueron diluidas en 20 litros de agua (figura 7 y 8).



Figura 7. Aplicación de una dosis de digestor enzimático en uno de los tratamientos.

Al realizar el cálculo (anexo 8) para las 9 lb de lodo en estudio, resultó que se debía de aplicar 0.41 cc, 0.61 cc y 0.85 cc de digestor enzimático por cada 9 lb de lodo, lo cual se diluyó en 0.082 L, 0.12 L y 0.17 L de agua, se midieron las dosis utilizando jeringas, posteriormente se aplicó el producto con una asperjadora de mano sobre las 9 lb de lodo y se removió.



Figura 8. Aplicación de una dosis de cal en uno de los tratamientos.

3.3 Metodología estadística

Además del análisis de los resultados de laboratorio, para el análisis de los datos se aplicó el arreglo factorial tres por tres, bajo un diseño simple completamente al azar, con tres repeticiones, y por tener efecto significativo entre tratamientos y factores se aplicó la prueba estadística de Análisis de Varianza y de Contrastes Ortogonales, todo esto con probabilidad de 0.05%, apoyados del software Infostat versión 9.0.

Los tratamientos que se establecieron fueron:

T 1 = 2 lb de cal Hidratada + 0.41 cc de digestor enzimático.

T 2 = 2 lb de cal Hidratada + 0.61 cc de digestor enzimático.

T 3 = 2 lb de cal Hidratada + 0.85 cc de digestor enzimático.

T 4 = 2 lb de cal Hidratada + 0.00 cc de digestor enzimático.

T 5 = 2 lb de cal Yeso + 0.41 cc de digestor enzimático.

T 6 = 2 lb de cal Yeso + 0.61 cc de digestor enzimático.

T 7 = 2 lb de cal Yeso + 0.85 cc de digestor enzimático.

T 8 = 2 lb de cal Yeso + 0.00 cc de digestor enzimático.

T 9 = 2 lb de cal Agrícola + 0.41 cc de digestor enzimático.

T 10 = 2 lb de cal Agrícola + 0.61 cc de digestor enzimático.

T 11 = 2 lb de cal Agrícola + 0.85 cc de digestor enzimático.

T 12 = 2 lb de cal Agrícola + 0.00 cc de digestor enzimático.

T 13 = 0 cal + 0.41 cc de digestor enzimático.

T 14 = 0 Cal + 0.61 cc de digestor enzimático.

T 15 = 0 Cal + 0.85 cc de digestor enzimático.

T 16 = 0 Cal + 0.00 cc de digestor enzimático.

3.3.1. Monitoreo de la investigación en campo

Se realizaron monitoreos cada ocho días para identificar posibles cambios de color y obtener muestras para enviarlas al laboratorio de CENSALUD y analizar el pH.

3.4. Análisis de laboratorio

La recolección de las muestras se realizó 40 días después de aplicado los tratamientos, para lo cual se extrajo una muestra de cada tratamiento en frascos de polietileno de alta resistencia de 500 ml cada uno, para ser enviados al laboratorio de CENSALUD, en la Universidad de El Salvador, donde se realizaron análisis de coliformes fecales por el método de enzima sustrato, por la técnica del Número Más Probable según la Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002 Protección ambiental-lodos y biosólidos-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, y la determinación de pH se hizo por el método potenciómetro, según TC WI: 2003.

También se enviaron muestras al laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, para analizar el comportamiento de los metales pesados Zn, Cu y Pb, por el método de absorción atómica, según la Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002 Protección

ambiental-lodos y biosólidos-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (figura 9).



Figura 9. Recolección de muestras para enviarlas a los laboratorios.

4 Resultados y Discusión

4.1. Resultados de Bacterias coliformes fecales

La determinación de bacterias coliformes fecales en lodos de 26 días de estar en los patios de secado de la PTAR de San Luis Talpa, La Paz, se realizó según la Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental- Lodos y biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, de lo cual se obtuvo una población promedio de bacterias coliformes fecales de 23,105,000 NMP/g (dato promedio del anexo 1 y 2).

Al hacer la comparación con la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, estos lodos están clasificados como clase C, lo que significa que no se pueden usar en la agricultura, debido a su alto contenido de bacterias patógenas que afectan la salud de los humanos.

Aplicados los tratamientos respectivos a los lodos, se monitorearon por un tiempo de 40 días y después de ese tiempo se tomaron muestras para enviarlas al laboratorio para su análisis respectivo, obteniendo los resultados siguientes:

Los resultados de coliformes fecales (expresados en gramos de base seca) demuestran que al aplicar 2 lb de cal Hidratada más 0.61 cc de digestor enzimático (promedio de las dosis evaluadas) a 9 lb de lodo de la PTAR, las bacterias coliformes fecales disminuyen hasta en un 99.99% (de 23,105,000 NMP/g a 9.67 NMP/g) (cuadro 5, anexo 3, 4 y 5) en comparación con los lodos analizados a los 26 días de secado; así mismo, la aplicación de la cal Hidratada aumento el pH de 6.0 a 11.4 (cuadro 6 y anexo 3, 4 y 5), lo cual disminuyó las poblaciones de bacterias coliformes fecales, permitiendo que se clasifiquen en lodos clase A, según la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 (cuadro 5).

La interacción de la cal hidratada con el digestor enzimático disminuyeron las poblaciones de coliformes fecales en 99.90% en comparación con el tratamiento testigo (de 37,070 NMP/g a 18.95 NMP/g) (cuadro 5 y anexo 3, 4 y 5).

La interacción de 2 libras de cal yeso con 0.61 cc de digestor enzimático disminuyó las poblaciones de bacterias coliformes fecales en 95.83% en comparación a la aplicación de solo cal yeso (de 10,476.66 NMP/g a 436.67 NMP/g) (cuadro 5 y anexo 3, 4 y 5).

La interacción de 2 libras de cal agrícola con 0.61 cc de digestor enzimático disminuyó las poblaciones de coliformes fecales en 89.04% en comparación con el Testigo (cuadro 5 y anexo 3, 4 y 5), y al aplicar solo 2 libras de cal agrícola las disminuye en 94.19% en comparación con el Testigo (37,070 NMP/g a 2,153.33 NMP/g) (cuadro 5 y anexo 3, 4 y 5); y solo la dosis de 0.85 cc de digestor enzimático disminuyó las poblaciones de coliformes fecales en 98.71%, clasificando los lodos en clase A (cuadro 5 y anexo 3, 4 y 5).

| Tratamientos | Resultados promedio de tres repeticiones de Coliformes Fecales (NMP/g) | Especificación de los lodos en clase |
|--|---|---|
| T1 = 2 lb de cal Hidratada + 0.41 cc de digestor enzimático | 16.53 | A |
| T 2 = 2 lb de cal Hidratada + 0.61 cc de digestor enzimático | 9.67 | A |
| T 3 = 2 lb de cal Hidratada + 0.85 cc de digestor enzimático | 30.67 | A |
| T 4 = 2 lb de cal Hidratada + 0.00 cc de digestor enzimático | 750.33 | A |
| T 5 = 2 lb de cal Yeso + 0.41 cc de digestor enzimático | 7,688.67 | B |
| T 6 = 2 lb de cal Yeso + 0.61 cc de digestor enzimático | 436.67 | A |
| T 7 = 2 lb de cal Yeso + 0.85 cc de digestor enzimático | 1,176.67 | B |
| T 8 = 2 lb de cal Yeso + 0.00 cc de digestor enzimático | 7,176.67 | B |
| T 9 = 2 lb de cal Agrícola + 0.41 cc de digestor enzimático | 47,133.33 | B |

| Cuadro 5. Resultados promedios de laboratorio obtenidos de bacterias coliformes fecales. | 4,000.00 | B |
|--|-----------|---|
| T 10 = 2 lb de cal Agrícola + 0.61 cc de digestor enzimático | 4,000.00 | B |
| T 11 = 2 lb de cal Agrícola + 0.85 cc de digestor enzimático | 7,166.67 | B |
| T 12 = 2 lb de cal Agrícola + 0.00 cc de digestor enzimático | 2,153.33 | B |
| T 13 = 0 cal + 0.41 cc de digestor enzimático | 16,040.33 | B |
| T 14 = 0 Cal + 0.61 cc de digestor enzimático | 2,403.33 | B |
| T 15 = 0 Cal + 0.85 cc de digestor enzimático | 477.67 | A |
| T 16 = 0 Cal + 0.00 cc de digestor enzimático | 37,070.00 | B |

Fuente: Elaboración propia con datos del laboratorio de CENSALUD 2016 (anexo 3, 4 y 5).

Según Araque Manrique (2006), los tratamientos térmicos y alcalinos de lodos (desinfección con cal), garantizan que al mantener valores de pH sobre 12 por más de 10 semanas, con una dosis de 2% de óxido de calcio o cal viva (CaO), destruyen todos los huevos de helmintos viables, los cuales son fuentes de contaminación, se dejaron por un periodo de 21 días para evaluarlos y se determinó que no existió recrecimiento. Además, dichos autores mencionan que la desinfección de lodos con cal para subir el pH crea un ambiente que mata y retarda las reacciones microbianas que generan olores y atracción de vectores, el proceso inactiva virus, bacterias y otros microorganismos patógenos presentes, ya que los agentes alcalinos inducen cambios en la naturaleza coloidal del protoplasma, lo que causa la muerte de la célula y valores de pH superiores a 11 producen la desnaturalización de la capa proteínica de los virus y la destrucción de los mismos.

Lo anterior respalda los resultados obtenidos en esta investigación, que al aplicar dos libras de cal Hidratada más 0.61 cc de digestor enzimático, se logran valores promedio de pH de 11.40 en las repeticiones realizadas (cuadro 6 y figura 10).

Cuadro 6. Resultados promedio de pH obtenidos según los análisis de laboratorio.

| Tratamientos | pH (valor promedio) |
|--|------------------------------------|
| T1 = 2 lb de cal Hidratada + 0.41 cc de digestor enzimático | 9.82 |
| T 2 = 2 lb de cal Hidratada + 0.61 cc de digestor enzimático | 11.40 |
| T 3 = 2 lb de cal Hidratada + 0.85 cc de digestor enzimático | 10.43 |
| T 4 = 2 lb de cal Hidratada + 0.00 cc de digestor enzimático | 8.94 |
| T 5 = 2 lb de cal Yeso + 0.41 cc de digestor enzimático | 6.47 |
| T 6 = 2 lb de cal Yeso + 0.61 cc de digestor enzimático | 6.67 |
| T 7 = 2 lb de cal Yeso + 0.85 cc de digestor enzimático | 6.38 |
| T 8 = 2 lb de cal Yeso + 0.00 cc de digestor enzimático | 7.00 |
| T 9 = 2 lb de cal Agrícola + 0.41 cc de digestor enzimático | 7.16 |
| T 10 = 2 lb de cal Agrícola + 0.61 cc de digestor enzimático | 7.21 |
| T 11 = 2 lb de cal Agrícola + 0.85 cc de digestor enzimático | 7.26 |
| T 12 = 2 lb de cal Agrícola + 0.00 cc de digestor enzimático | 7.17 |
| T 13 = 0 cal + 0.40 cc de digestor enzimático | 5.75 |
| T 14 = 0 Cal + 0.61 cc de digestor enzimático | 5.62 |
| T 15 = 0 Cal + 0.85 cc de digestor enzimático | 5.61 |
| T 16 = 0 Cal + 0.00 cc de digestor enzimático | 5.79 |

Fuente: Elaboración propia con datos de CENSALUD (anexo 3).

Galvis Toro (2013) y Rivera Guerrero (2013) mencionan que el pH óptimo para el crecimiento y supervivencia de coliformes fecales es de 7.0 a 7.5, con un pH mínimo de 4.0 y un pH máximo de 8.5. Estos microorganismos son relativamente termosensibles y pueden ser destruidos con facilidad a temperaturas de pasteurización.

Abu-Orf et al. (2004) citado por Araque Manrique (2006), utilizaron cal viva para la eliminación de microorganismos patógenos y en la reducción de olores ofensivos, las

dosis empleadas fueron de 50, 100 y 200 g de cal viva por kilogramo de biosólido durante 356 días de seguimiento, los resultados mostraron una eliminación total de huevos de helmintos (*Ascaris lumbricoides*), esporas de *Clostridium pefringens* y reovirus, los cuales son indicadores de la presencia o no de coliformes fecales, a los 69 días de tratamiento.

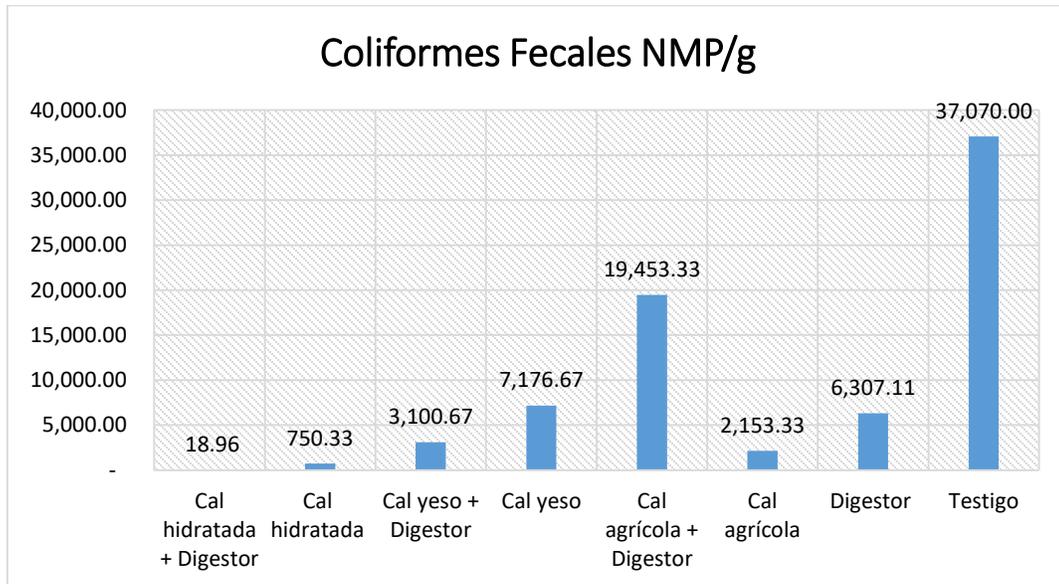


Figura 10. Concentración de Coliformes Fecales después de la aplicación de los tipos de cal y el Digestor enzimático, y la interacción entre ellos.

Según Araque Manrique (2006), la concentración de coliformes fecales fue disminuida en 24 horas hasta niveles no detectables, y no se observó recrecimiento de estos microorganismos durante 43 días de monitoreo. Se demostró además, que al utilizar 10% de óxido de calcio (CaO), los microorganismos patógenos *Salmonella* y *enterococci*, con un pH mayor a 10.7, fueron destruidos totalmente, ya que los lodos se evaluaron después de 60 días del tratamiento.

Los resultados obtenidos por Araque Manrique (2006) respaldan los valores promedio obtenidos en esta investigación, ya que los tratamientos aplicados utilizando diferentes tipos de cal, digestor enzimático y las combinaciones entre ellos, determinó que los tratamientos que produjeron mejores efectos en la disminución de coliformes fecales

fue la interacción de 2 libras de cal Hidratada con 0.61 cc de digestor enzimático (figura 10).

Keller et al (2004) citado por Araque Manrique (2006), afirman que al utilizar oxido de calcio (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)₂) como material alcalino, la hidratación que sufre este compuesto al reaccionar con la humedad del lodo, aumenta la temperatura y el pH, que son factores que en combinación, eliminan el contenido patogénico del lodo.

La estabilización con cal modifica ciertas características del lodo, como la sequedad y el pH; sin embargo, en el lodo líquido, su contenido de materia seca no fue afectado por el tratamiento, mientras que en el sólido, el porcentaje de materia seca aumento desde 23% hasta 31% con la dosis de 45% de cal, se alcanzaron valores de pH de 10, 11.5 y 12 para las dosis 15%, 30% y 45%, respectivamente (Araque Manrique 2006).

Torres et al, (2009) evaluaron la estabilización alcalina con cal hidratada de los biosólidos deshidratados de reactores UASB de una PTAR en Brasil, las proporciones peso a peso evaluadas fueron 30%, 40% y 50% del biosólido y el tiempo del ensayo fue 60 días. La mejor proporción fue 50%, en la cual se encontraron reducciones máximas de 6 unidades logarítmicas para los coliformes fecales y la eliminación total de huevos de helmintos, permitiendo su uso en la agricultura sin restricción acorde con la legislación brasilera. Con esta proporción de cal se presentaron pérdidas de nitrógeno total en el biosólido del 59% a 72%, debidas probablemente a la volatilización del amonio. La temperatura se mantuvo entre 24° C y 36° C, y el pH fue mayor de 11 unidades durante los 60 días de seguimiento.

En esta investigación, al dejar los lodos 66 días al ambiente, sin aplicar ningún tratamiento (testigo), las concentraciones de coliformes fecales disminuyeron de 23,105,000 NMP/g a 37,070 NMP/g, los cuales según la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 se clasifican en clase B por presentar cantidades mayores a 1,000 NMP/g base seca, lo cual limita el uso de estos en la agricultura.

Al evaluar el digestor enzimático de forma individual, dio como resultado la disminución de coliformes fecales hasta en un 82.98% con respecto al tratamiento testigo (de 37,070 NMP/g disminuyó a 6,307.11 NMP/g; sin embargo, al interactuar con la cal hidratada produce un mejor efecto (cuadro 7).

Así también, se demuestra que la cal agrícola produjo efectos en la disminución de coliformes fecales en 94.19% en comparación con el tratamiento testigo (de 37,070 NMP/g a 2,153.33 NMP/g) (cuadro 7).

Cuadro 7. Resultados promedio obtenidos de bacterias coliformes fecales por tratamiento.

| Tratamiento | Resultados promedios de tres repeticiones de Coliformes Fecales (NMP/g) | Especificación de bacterias Coliformes Fecales |
|----------------------------|--|---|
| Cal hidratada más Digestor | 18.96 | A |
| Cal hidratada | 750.33 | A |
| Cal yeso más Digestor | 3,100.67 | B |
| Cal yeso | 7,176.67 | B |
| Cal agrícola más Digestor | 19,453.33 | B |
| Cal agrícola | 2,153.33 | B |
| Digestor | 6,307.11 | B |
| Testigo | 37,070.00 | B |

Fuente: Elaboración propia con datos de CENSALUD (2016).

Otros resultados obtenidos en esta investigación demuestran lo siguiente: la aplicación de solo cal hidratada disminuye las poblaciones de coliformes fecales en 97.97%; la interacción de 2 libras de cal yeso y 0.61 cc de digestor enzimático disminuyen las poblaciones de coliformes fecales en un 91.63% en relación con el Testigo y al aplicar solo cal yeso las reduce 80.64%.

Al utilizar dos libras de cal agrícola disminuye las poblaciones de coliformes fecales en 94.19%; y el digestor enzimático en 82.98%, en relación al Testigo (figura 10, cuadro 7).

En la figura 11 se observa que la interacción de la cal hidratada y el digestor enzimático produjeron valores más altos de pH (10.55), el cual es el tratamiento más efectivo en la disminución de coliformes fecales; seguido por la interacción de la cal yeso y el digestor enzimático que mantuvo un pH de 9.74, lo cual demuestra que la interacción de los diferentes tipos de cal con el digestor enzimático son más efectivos en el aumento del pH y en la disminución de coliformes fecales.

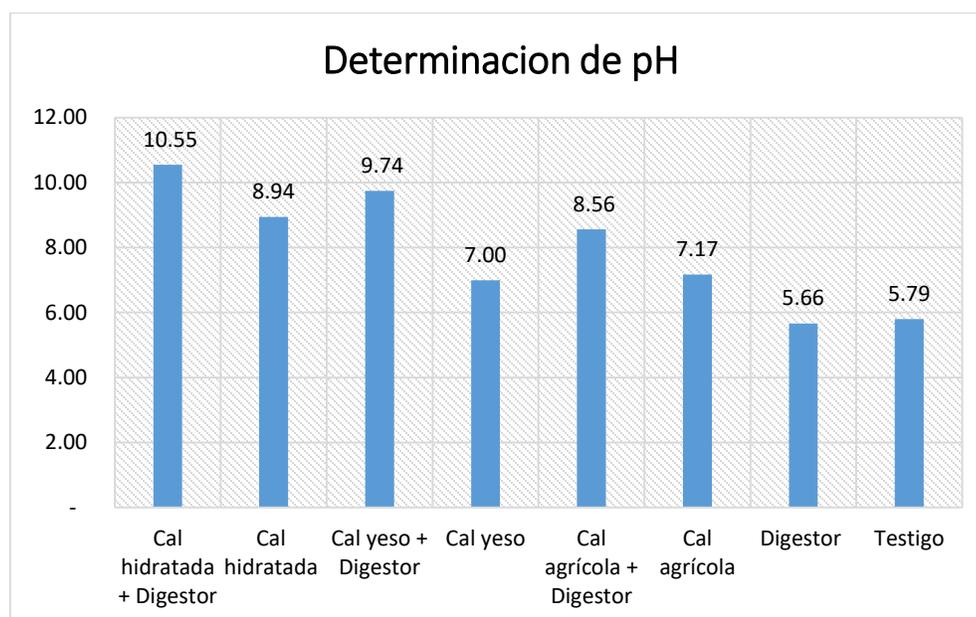


Figura 11. Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos aplicados.

4.2. Análisis estadístico

Para determinar el efecto de los tipos de cal, las dosis del digestor enzimático y la interacción de los dos factores en la disminución de bacterias coliformes fecales, se realizaron análisis de Varianza con el programa Infostat.

Según los resultados estadísticos del cuadro 8:

- Los tipos de cal producen efectos significativos en la disminución de las poblaciones de Coliformes Fecales, con p-valor <0.0001.
- El Digestor enzimático no produce efectos significativos en la disminución de Coliformes Fecales, p-valor igual 0.3486.

- La interacción de los tipos de cal y las dosis de digestor enzimático no produjo efectos significativos en la disminución de coliformes fecales, p-valor igual a 0.5222.

Cuadro 8. Análisis de Varianza (ANVA) para bacterias Coliformes Fecales.

| Variable | N | R ² | R ² AJ | CV | |
|---|-------|----------------|-------------------|-------|---------|
| Coliformes Fecales | 48 | 0.63 | 0.45 | 34.56 | |
| Cuadro de Análisis de Varianza (SC tipo III) | | | | | |
| Factor de variación | SC | GI | CM | F | P-Valor |
| Modelo | 46.2 | 15 | 3.08 | 3.6 | 0.0011 |
| Tipos de Cal | 36.21 | 3 | 12.07 | 14.10 | <0.0001 |
| Dosis de Digestor | 2.92 | 3 | 0.97 | 1.14 | 0.3486 |
| Cal x Digestor | 7.07 | 9 | 0.79 | 0.92 | 0.5222 |
| Error | 27.39 | 32 | 0.86 | | |
| Total | 73.59 | 47 | | | |

Fuente: Elaboración propia, programa Infostat.

4.2.1. Prueba de Contrastes Ortogonales para tipos de cal

Para determinar cuál tipo de cal produce disminución de poblaciones de Coliformes Fecales fue necesario realizar la prueba de Contrastes Ortogonales (cuadro 9).

- ✓ Contraste 1: Se comparó el testigo con la cal hidratada, la cal yeso y la cal agrícola, produciendo efectos no significativos (p-valor 0.1342) en la disminución de Coliformes Fecales.
- ✓ Contraste 2: se comparó la cal agrícola con la cal yeso y la cal hidratada, produciendo efectos significativos (p-valor<0.0001) en la disminución de Coliformes Fecales, siendo mejor la cal yeso y la cal hidratada en 3.18 unidades más que la cal agrícola.
- ✓ Contraste 3: se comparó la cal yeso con la cal hidratada, produciendo efectos significativos (p-valor<0.0003) en la disminución de Coliformes Fecales, siendo mejor la cal hidratada en 1.52 unidades más que la cal yeso.
- ✓

Cuadro 9. Prueba de Contrastes Ortogonales para tipos de cal.

| N° | Contraste | Contraste | E. E | Sc | GI | Cm | F | P-valor |
|-------|---------------------------------|-----------|------|-------|----|-------|-------|---------|
| 1 | Testigo con C. H; C. Y; y C. A. | 1.42 | 0.93 | 2.02 | 1 | 2.02 | 2.36 | 0.1342 |
| 2 | C. A; con C. Y y C. H. | 3.18 | 0.65 | 20.24 | 1 | 20.24 | 23.65 | <0.0001 |
| 3 | C. Y con C. H. | 1.52 | 0.38 | 13.94 | 1 | 13.94 | 16.28 | 0.0003 |
| Total | | | | 36.21 | 3 | 12.07 | 14.1 | <0.0001 |

Fuente: Elaboración propia con el programa Infostat.

*C.H. = cal hidratada, C. Y. = cal Yeso, C. A. = Cal Agrícola.

4.2.2. Análisis de Varianza (ANVA) para pH

Según los resultados estadísticos del cuadro 10, los tipos de cal producen efectos altamente significativos en el pH (p-valor < 0.0001). El digestor enzimático no produce efectos significativos (p-valor igual 0.7895). La interacción de tipos de cal y dosis de digestor enzimático no produce efectos significativos en el pH (p-valor igual a 0.7972).

Cuadro 10. Análisis de Varianza (ANVA) para pH.

| Variable | N | R ² | R ² | CV | |
|---|--------|----------------|----------------|-------|---------|
| Coliformes Fecales | 48 | 0.73 | 0.61 | 17.26 | |
| Cuadro de análisis de Varianza (SC tipo III) | | | | | |
| Factor de variación | SC | GI | CM | F | P-Valor |
| Modelo | 143.34 | 15 | 9.56 | 5.83 | <0.0001 |
| Tipos de Cal | 132.96 | 3 | 44.32 | 27.05 | <0.0001 |
| Dosis de Digestor | 1.72 | 3 | 0.57 | 0.35 | 0.7895 |
| Cal x Digestor | 52.43 | 32 | 0.96 | 0.59 | 0.7972 |
| Error | 195.77 | 47 | | | |

Fuente: Elaboración propia con el programa Infostat.

4.2.3. Prueba de Contrastes Ortogonales para pH

Según la prueba de Contrastes Ortogonales para determinar cuál tipo de cal produjo un mayor cambio en el pH de los lodos, estadísticamente se comparó el tratamiento testigo con los tres tipos de cal utilizados: cal agrícola, cal yeso y cal hidratada, y es la cal Hidratada la que produce el mayor efecto en el pH (cuadro 11).

Contraste 1: Se comparó el testigo con la cal hidratada, la cal yeso y la cal agrícola, produciendo un efecto significativo (p-valor <0.0001) en el pH, siendo mejor los tres

tipos de cal que el testigo en 6.89 unidades más.

Contraste 2: se comparó la cal agrícola con la cal yeso y la cal hidratada, produciendo efectos significativos (p-valor < 0.0132) en el pH, siendo mejor la cal yeso y la cal hidratada en 2.38 unidades más que la cal agrícola.

Contraste 3: se comparó la cal yeso con la cal hidratada, produciendo efectos significativos (p-valor <0.0001) en el pH, siendo mejor la cal hidratada en 3.52 unidades que la cal yeso.

Cuadro 11. Contrastes para comparación del testigo con los diferentes tipos de cal.

| N° | Contraste | Contraste | E. E | Sc | GI | Cm | F | P-valor |
|-------|----------------------------------|-----------|------|--------|----|-------|-------|---------|
| 1 | Testigo con C. H; C. Y.; y C. A. | 6.89 | 1.28 | 47.47 | 1 | 47.47 | 28.97 | <0.0001 |
| 2 | C. A. con C. Y. y C. H. | 2.38 | 0.91 | 11.28 | 1 | 11.28 | 6.89 | 0.0132 |
| 3 | C. y con C. H. | 3.52 | 0.52 | 74.20 | 1 | 74.20 | 45.29 | <0.0001 |
| Total | | | | 132.96 | 3 | 44.32 | 27.05 | <0.0001 |

Fuente: Elaboración propia con el programa Infostat.

*C. H. = cal hidratada; C. Y. = cal Yeso; C. A. = cal Agrícola.

4.2.4. Resultados de metales pesados

Según los resultados de los análisis realizados en el laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES, para determinar metales pesados en lodos de 26 días de estar en los patios de secado de la PTAR de San Luis Talpa, se encontraron los siguientes resultados: 58.41 mg/kg de Zn, 905.97 mg/kg de Cu, 11,781.27 mg/kg de Pb, con un pH 6.12 (anexo 6).

La Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental- Lodos y biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, clasifica los biosólidos en excelentes y buenos en función del contenido de metales presentes, y según los resultados de esta investigación, para el caso del zinc (Zn) y el cobre (Cu) son Excelentes, ya que los valores son bajos en comparación con la Norma (2,800 mg/kg para Zinc y 1,500 mg/kg para Cu); para el caso del Plomo (Pb) que sobrepasa los límites máximos permisibles por la Norma (300 mg/kg), este no clasifica ni como Bueno ni Excelente.

En el cuadro 12 se presentan los resultados de laboratorio de metales pesados 40 días después de haber aplicado los diferentes tratamientos en los lodos, para el zinc se incrementaron pero siempre quedan clasificados como Excelentes, el cobre y plomo disminuyeron los valores en comparación del tratamiento testigo.

Cuadro 12. Contrastes para comparación del testigo con los diferentes tipos de cal.

| Metales pesados (mg/kg) y pH | | | | | Clasificación según la Norma Mexicana | | |
|------------------------------|--------|-------|-------|-------|---------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Tratamiento | Zn | Cu | Pb | pH | Zn (mg/kg) | Cu (mg/kg) | Pb (mg/kg) |
| Testigo | 847 | 58.28 | 22.71 | 6.07 | Excelentes 2,800 | Excelentes 1,500 | Excelentes 300 |
| Cal Agrícola | 571 | 45.06 | 20.98 | 6.88 | | | |
| Cal Yeso | 688.48 | 46.25 | 21.13 | 6.32 | Buenos 7,500 | Buenos 4,300 | Buenos 840 |
| Cal Hidratada | 689.38 | 61.28 | 23.68 | 10.98 | | | |
| Digestor enzimático | 864.5 | 59.94 | 23.76 | 6.42 | | | |

Fuente: Elaboración con datos del laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas, UES.

En la figura 12 se presenta la comparación de los resultados de laboratorio de metales pesados del testigo y de los diferentes tratamientos con tipos de cal y las dosis del digestor enzimático, y se demuestra que la cal agrícola y la cal yeso disminuyeron las cantidades de Zinc, Cobre y Plomo en comparación con el Testigo, pero la cal hidratada y el digestor enzimático incrementaron las cantidades de metales pesados en comparación con el tratamiento testigo.

En el caso del Cobre, la absorción puede ser tan fuerte que son estabilizados, formando quelatos muy estables, como puede pasar con el Plomo y el Zinc, que en muchos casos se forman complejos organometálicos, lo que facilita la solubilidad del metal, otras condiciones de oxidación-reducción son responsables de que los metales se encuentren en estado oxidado o reducido, la presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de los pH altos y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados; el aumento de la salinidad también puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos, primeramente, los cationes sodio y potasio pueden reemplazar a metales pesados en lugares del intercambio catiónico.

En una segunda fase, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con el Plomo, Zinc y Cobre (Galán Huertos y Romero Baena 2008).

La cal es un reactivo de bajo costo, que sirve de precipitación y sedimentación química, llevadas a cabo de manera independiente o en combinación con reacciones de oxidación-reducción, se utiliza para eliminación de metales, para retirar cadmio, níquel o plomo. Suele adicionarse en la etapa de precipitación con cal un agente de captación para estos compuestos que está formado de silicatos, carbonatos y fosfatos de metales alcalino (Simón 2008).

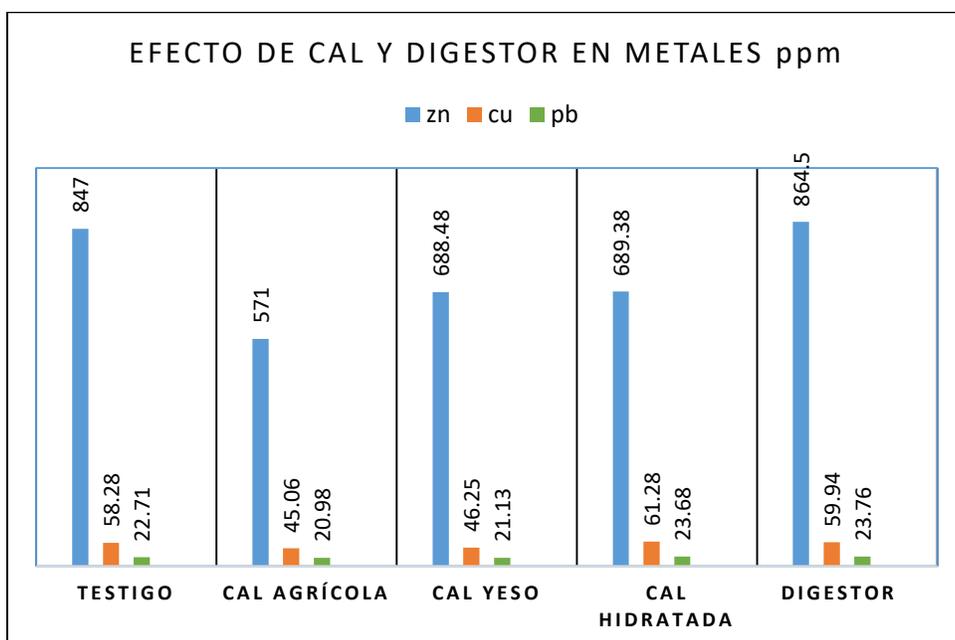


Figura 12. Concentración de metales pesados en lodos de la PTAR de San Luis Talpa, después de 40 días de aplicados los tratamientos.

4.3. Inversión económica de los tratamientos

En el cuadro 13 se detalla el costo de los tipos de cal y digestor enzimático, la presentación del producto de venta en el mercado, la cantidad de producto por tonelada métrica para aplicarla al lodo de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

La inversión económica a realizar en el tratamiento más efectivo de la investigación: 2 libras de cal Hidratada más 0.61 cc de Digestor Enzimático aplicados en 9 libras de lodo, que es equivalente a 500 libras de cal Hidratada más 1,000 cc de Digestor Enzimático por tonelada de lodo, es de \$112.10 dólares por tonelada de lodos tratados o estabilizados.

Cuadro 13. Inversión económica por tratamiento

| Tratamiento | Cantidad por tonelada métrica | Costo (\$) / tonelada métrica |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Cal hidratada | 500 libras | 102.10 |
| Cal hidratada más digestor | 500 libras más 1litro | 112.10 |
| Cal yeso | 500 libras | 134.50 |
| Cal yeso más digestor | 500 libras más 1litro | 144.50 |
| Cal agrícola | 500 libras | 70.00 |
| Cal agrícola más digestor | 500 libras más 1litro | 80.00 |
| Digestor enzimático | 1 Litro | 10.00 |

Fuente: elaboración propia cuadro de costos (anexo 9).

4.4. Propuesta de manejo de los lodos

Los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa deben de manejarse de la siguiente manera:

- Los lodos deben de permanecer en los patios de secado como mínimo 26 días expuestos al sol.
- Después de los 26 días de estar los lodos en los patios de secado, se les debe de aplicar 500 libras de cal Hidratada más 1,000 cc de Digestor Enzimático por tonelada de lodo, para disminuir las poblaciones de coliformes fecales.
- Los lodos estabilizados después de 40 días de haber aplicado el tratamiento, pueden ser utilizados en agricultura, principalmente como enmienda en suelos con pH bajos y en suelos con uso intensivo.

5. Conclusiones

Los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa después de 26 días de estar en los patios de secado tenían poblaciones de coliformes de 23,105,000 NMP/g, los cuales según la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 están en Clase C, lo que significa que no pueden ser utilizados en agricultura.

El mejor tratamiento de la investigación es la aplicación de dos libras de cal hidratada más 0.61 cc de digestor enzimático en 9 libras de lodo, que disminuyó las poblaciones de coliformes fecales hasta en un 99.97% en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, en comparación con el testigo, lo que permite que puedan ser utilizados en la agricultura con una inversión de \$ 112.10 por tonelada métrica.

El digestor enzimático disminuyó las poblaciones de coliformes fecales en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, hasta en un 82.77% en comparación con el testigo, lo que permite que puedan ser utilizados en la agricultura con una inversión de \$10.00 por tonelada métrica.

La cal yeso disminuye las poblaciones de coliformes fecales en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, hasta en un 71.62% en comparación con el testigo, lo que permite que puedan ser utilizados en la agricultura con una inversión de \$134.50 por tonelada métrica.

La cal agrícola disminuye las poblaciones de coliformes fecales en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, hasta en un 56.78% en comparación con el testigo, lo que permite que puedan ser utilizados en la agricultura con una inversión de \$70.00 por tonelada métrica.

En cuanto a metales pesados no hay riesgo, ya que los lodos presentan cantidades de metales pesados menores a las cantidades que la Norma mexicana permite para el uso en la agricultura.

6. Recomendaciones

Según los resultados obtenidos en esta investigación, los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa, tratados con dos libras de cal hidratada y 0.61 cc de digestor enzimático aplicados a 9 libras de lodos, pueden ser utilizados en la agricultura, ya que es el mejor tratamiento en la disminución de coliformes.

Evaluar otras dosis de cal y de digestor enzimático en futuras investigaciones en lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Para la manipulación de lodos es necesario utilizar equipo de protección, para evitar contaminación, ya que las cantidades de bacterias patógenas son altas según los análisis de laboratorio realizados por CENSALUD.

Evaluar en nuevas investigaciones el tiempo de secado de los lodos que se realiza en las diferentes Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Realizar investigaciones a futuro en cuanto al contenido de nutrientes disponibles después de aplicados los tratamientos utilizados.

La presencia de metales pesados como Zinc, Cobre y Plomo en los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, demuestran que en el sistema de alcantarillado de San Luis Talpa hay conexiones diferentes a las aguas residuales ordinarias, por lo que ANDA debe hacer un monitoreo continuo de las mismas.

Aplicar 500 libras de cal hidratada más 1 litro de digestor enzimático en una tonelada métrica de lodo, disminuye la poblaciones de coliformes fecales en un 99.97%, con una inversión de 112.10 dólares.

7. Bibliografía

ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, El Salvador). 2010. Boletín Estadístico (en línea). Consultado 4 de marzo 2016. Disponible en http://www.anda.gob.sv/administrator/components/com_docestandar/upload/documentos/boletin-estadistico-2010.pdf.

Anónimo. s. f. Propuesta para el tratamiento de aguas residuales y diagnóstico ambiental (en línea). Citado 10 de septiembre de 2016. Disponible en http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/007855/007855_Cap6.pdf.

Anónimo. s. f. Aplicación en terrenos agrícolas de lodos estabilización con cal (en línea). Consultado el 17 de febrero 2016. Disponible en http://anfagal.org/media/Biblioteca_Digital/Agricultura/Uso_Agricola_de_Lodos_Estabilizados_con_Cal/APLICACION_EN_TERRENOS_AGRICOLAS_DE_LODOS_ESTABILIZADOS_CON_CAL.pdf.

Anónimo s. f. Estabilización con cal de lodos provenientes de plantas de tratamientos de aguas residuales municipales (en línea). Consultado el 17 de febrero 2016. Disponible en http://anfagal.org/media/Biblioteca_Digital/Usos_Ecologicos/Tratamiento_de_Lodos/ESTABILIZACION_CON_CAL_DE_LODOS_PROVENIENTES_DE_PLANTAS_DE_TRTAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MUNICIPALES.pdf.

Araque Manrique, M. 2006. Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección de lodo generado en la PTAR El Salitre. Tesis Ing. Civil. Bogotá, Colombia. Universidad de Los Andes. 60 p.

Ayala Duran, CA; Castillo Díaz, E. 2008. Manual para el diseño de unidades de tipo biológico en plantas de tratamientos de aguas residuales domésticas en El Salvador. Tesis Ing. Civil. San Salvador, El Salvador. Universidad de El Salvador. 569 p.

Bonilla, BL. 2015. Diagnóstico de la calidad de los recursos hídricos y diseño de una propuesta para su manejo y sostenibilidad en las cuencas El Jute y San Antonio, La Libertad, El Salvador. Tesis Maestría. San Salvador. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de El Salvador. 172 p.

CENTA, FAO-HOLANDA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova”, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1999. Manejo Integrado de la fertilidad del suelo en zonas de ladera. Manual. El Salvador. 146 p.

Camacho, A. 2009. Técnicas para el análisis microbiológico de alimentos (en línea). Universidad Nacional de Mexico, MX. Formato PDF. Consultado 12 abril 2016. Disponible en http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Colif-tot-fecales-Ecoli-NMP_6529.pdf.

Cinco Ache. s. f. Ecodigestor: digestor ecológico balanceado. San Salvador, El Salvador. 1 plegable. 4 p.

CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, El Salvador). 2009. Norma Salvadoreña Obligatoria de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor NSO 13.49.01:09 (en línea). Consultado 25 febrero 2016. Disponible en http://estadisticas.cne.gob.sv/docs/Legislacion/ambiental/Norma_Aguas_Residuales.pdf

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). s. f. Recursos naturales (en línea) Consultado 7 de marzo de 2016. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-am859s/am859s12.pdf>.

Galán Huertos, E; Romero Baena, A. Sevilla. 2008. Revista de la sociedad española de mineralogía. (N° 10, 2008, mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química) Contaminación de suelos por metales pesados. España 13 p (en línea) consultado 03 de noviembre de 2016. Disponible en. http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf.

Galvis Toro, J; Rivera Guerrero, X. 2013. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamientos de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira. Trabajo de grado tecnóloga química. Universidad Tecnológica de Pereira. 101 p.

Horcalsa. s. f. Cal para medio ambiente (en línea). S. I. formato html. Consultado 11 abr 2016. Disponible en <http://horcalsa.com/cal-para-medio-ambiente/>.

INTAGRI. (Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura, México). s. f. Beneficios del uso de Yeso Agrícola en suelos ácidos (en línea). Consultado 9 de diciembre de 2016. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/suelos/beneficios-del-uso-de-yeso-agricola-en-suelos-acidos#sthash.QVSdkEqd.W6P8RbkE.dpbs>.

IBEROARSEN. 2009. Metodologías analíticas para la determinación y especificación de arsénico en aguas y suelos (en línea) consultado 10 de Abril de 2016. Disponible en. http://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/Monografia2_000.pdf

Jiménez, B; Barrios, JA; Maya, C. 2014. Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento Primario avanzado (en línea). Consultado 17 de febrero 2016. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/267546332_ESTABILIZACION_ALCALINA_DE_LODOS_GENERADOS_EN_UN_TRATAMIENTO_PRIMARIO_AVANZADO

Leiva Pérez, JR. 1988. Evaluación de degradador enzimático de rastrojo (Stubble Digester Plus) en la descomposición de la pulpa de café. Tesis. Ing. Agrónomo. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos (en línea). Consultado 11 de abril de 2016. Disponible en. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_1273.pdf. 61 p.

León, SG. s. f. Protección sanitaria en el uso de aguas residuales y lodos de plantas de tratamiento (en línea) Consultado 6 de enero de 2016. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aya2/tema03.pdf>. 10 p.

MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 1998. Informe de la calidad de los ríos de El Salvador 2011 (en línea). Consultado 4 de marzo 2016. Disponible en <http://www.snet.gob.sv/ver/hidrologia/monitoreo+hidrologico/calidad+de+agua/calidad+de+agua+2011/>

Mayo Peternell, EF. 2010. Proyecto ejecutivo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para la Localidad de Xochiapa. Tesis ing. Civil. Veracruzana. Facultad de ingeniería civil. Universidad Veracruzana. 98 p (en línea) consultado 9 de diciembre de 2016. Disponible en <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30564/1/FernandezMayo.pdf>.

Monroy, KM. 2010. Evaluación de la eficiencia de las técnicas aeróbicas (Burbuja fina, burbuja gruesa y aireador venturi Jet) a utilizar en el tratamiento de aguas residuales domiciliar para el sistema de lodos activados modalidad de aireación extendida. Tesis Grado. Facultad de Agronomía. Guatemala, USAC. 151 p.

MIPLAN (Ministerio de Planificación y Coordinación del Desarrollo Económico y Social, El Salvador). 1987. Reglamento sobre la calidad del agua, el control de vertidos y las zonas de protección (en línea). Consultado 4 de marzo 2016. Disponible en <http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/leyes/Decreto%20No.50.pdf>.

Montero Hernández, M; Hidalgo Uglade, G. s. f. Evaluación de tres dosis de digestor enzimático a diferentes intervalos de remoción en pulpa prensada y sin prensar (en línea). Consultado 12 de febrero de 2016. Disponible en https://books.google.com.sv/books?id=5ChtAAAAIAAJ&pg=PA65&lpg=PA65&dq=digestor+de+rastrojos&source=bl&ots=r4OR2m1Ovy&sig=YiF5pn9I7wKzSNdJK9HwhCvQ5lo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj_o_KPtfLKAhVHmx4KHajRDQQ6AEIKjAD#v=onepage&q=digestor%20de%20rastrojos&f=false.

Merlos Osorio, RE; Murillo Arévalo, V; Villalta Menjivar, S. 2011. El manejo técnico de los procesos agropecuarios y su influencia sobre los recursos naturales, para fomentar el desarrollo agroecoturístico en la Estación Experimental y de Prácticas de la Facultad de Ciencias Agronómicas, San Luis Talpa, departamento de La Paz. Tesis. Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agronómicas. San Salvador. Universidad de El Salvador. 135 p.

MSPAS (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, El Salvador). 2004. Boletín Integrado de Indicadores en Salud (en línea). Consultado 4 de marzo 2016. Disponible en http://www.salud.gob.sv/archivos/pdf/Boletin_de_indicadores_del_Sistema_Nacional_de_Salud_2009.pdf

National Lime Association. s. f. Aplicaciones químicas de la cal (en línea) Consultado 22 de febrero de 2016. Disponible en http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Quimica/APLICACIONES_QUIMICAS_DE_LA_CAL.pdf

Norma Oficial Mexicana NO-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental-Lodos y biosólidos- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (en línea). Consultado 25 de febrero de 2016. Disponible en <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Publicaciones/CDs2006/CDAmbiente/pdf/NOM52.pdf>.

ONU (Organización de las Naciones Unidas, Estados Unidos). s. f. Lista Oficial Objetivo del Desarrollo del Milenio (en línea). Consultado 25 febrero. 2016. Disponible en <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Home.aspx>.

Ortiz Moreno, EJ. 2005. La experiencia de Holanda y Alemania en el uso de cargos por vertimientos de aguas residuales como instrumento para el control de la contaminación hídrica. Elementos para decidir los parámetros a ser tenidos en consideración. Volumen 4 número 1: 56-87.

Ortiz, AI. 2013. Impacto de lodos residuales de la planta de tratamiento de la UAAAN en calabacita tipo zucchini (*Cucúrbita pepo L.*). Tesis. Ing. Agr. UAAAN. México. 66 p (en línea) Consultado 10 de octubre de 2016. Disponible en <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4494/62671%20%20ORTIZ%20RAMOS%2c%20AXEL%20IVAN%20%20TESIS.pdf?sequence=1>

Ortiz, HL; Gutiérrez, RM; Sánchez, SE. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. 11 p (en línea). Consultado 4 de febrero de 2016. Disponible en <http://132.248.8.213/rica/index.php/rica/article/view/30992/28704>

PROARCA (Programa Ambiental Regional para Centro América, Colombia). 2003. Guía para el Manejo de Excretas y Aguas Residuales Municipales. Colombia. 83 p.

Promical. s. f. Cales agrícolas (en línea).Antioquia CL. Formato html. Consultado 12 abril. 2016. Disponible en: <http://promical.com.co/contacto/>.

Rivera Guerrero. 2013. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa Jugos Hit de la ciudad de Pereira. Tesis tecnológica Química. Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira. 101 p.

Román, F; Monge, J; de Aguilar, M; Franco, M. 2012. Planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Metapán en Santa Ana, estudio de pre-factibilidad. 83 p. (en línea). Consultado 18 de enero 2016. Disponible en. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00HSSC.pdf

Simón, E. 2008. Los metales pesados en las aguas residuales. Grupo de fisicoquímica de procesos industriales y medioambientales. Universidad complutense de Madrid (en línea). Consultado 15 de septiembre de 2016. Disponible en <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>.

Torres, P; Madera, CA; Martínez, GV. 2007. Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola (en línea). Consultado 18 de febrero 2016. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a19v61n1>.

Trejo Vélez, M; Cardona, N. 2012. Propuesta para el aprovechamiento de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa “Comestibles La Rosa” como alternativa para la generación de biosólido. Proyecto de grado Administrador Ambiental. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. 104 p.

TC WI. 2003. Determination of dry matter and water content on a mass basis in sediment, sludge, soil, and waste – Gravimetric method (en línea). Consultado 12 Julio de 2016. Disponible en. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=20886

Torres, P; Madera, C; Silva J. 2009. Mejoramiento de la calidad Microbiológica de biosólido generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Antioquia, Medellín, Colombia. 17 p. (en línea). Consultado el 16 de noviembre 2016. Disponible en. www.scielo.org.co/pdf/eia/n11/n11a03.pdf.

Torres Arias, G, Saleh Vargas, DA. 2013. Manejo de la acidez en suelos cafetaleros. Programa de café Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal " Enrique Álvarez Córdova" CENTA. (Brochur). 2p.

8. Anexos

Anexo 1. Resultados de coliformes fecales en lodos antes de aplicados los tratamientos, repetición 1.



INFORME DE ANÁLISIS

Nombre de la muestra: LODO PLANTA DE TRATAMIENTO Código: 210409
DE AGUAS RESIDUALES

Punto de muestreo: Eras de secado

Procedencia: Planta de Tratamiento, San Luis Talpa.
Edgar Giovani Reyes

Solicitante: Agustín Lisandro Mendoza Fecha de emisión: 15-08-2016

Método: 1. Determinación de Coliformes Fecales por el Método de enzima sustrato, por la técnica de Número más Probable (NMP), según NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos.
2. Porcentaje de Sólidos Totales, por método gravimétrico, según ISO 11465:1993, Calidad de suelos – Determinación de materia seca y contenido de agua en una masa base.

Fecha de Muestreo: 26-04-2016 Hora de Muestreo: No especificada

Persona que tomó la muestra: Edgar Giovani Reyes / Agustín Lisandro Mendoza

Fecha de recepción de la muestra: 26-04-2016

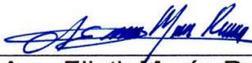
Descripción: Sólido de consistencia granulosa y humedad palpable, color negro con presencia de pelo y hojas.

SIN TRATAMIENTO. SECADO PREVIO: 26 DÍAS.

| DETERMINACIÓN | RESULTADOS | ESPECIFICACIONES ⁽¹⁾ |
|----------------------------------|-----------------------------|--|
| Determinación de sólidos totales | 72.02 % | ----- |
| Bacterias coliformes fecales | 4.6 x 10 ⁷ NMP/g | CLASE A: Menor de 1000 NMP/g ⁽²⁾ CLASE B: Menor de 1000 NMP/g ⁽²⁾ CLASE C: Menor de 2x10 ⁶ NMP/g ⁽²⁾ |

NMP: Número más Probable; **g:** gramos
Resultados de coliformes fecales expresados en gramos de base seca.

OBSERVACIONES:
(1) Especificaciones basadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. – Lodos y biosólidos. – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
(2) Resultados de coliformes fecales expresados en gramos de base seca de la muestra.
(3) El presente informe corresponde únicamente a la muestra remitida y ensayada.


MSc. Amy Elieth Morán Rodríguez
QUIMICO-FARMACEUTICA



Fecha de análisis: 26-04-2016

Anexo 2. Resultados de laboratorio de coliformes fecales antes de aplicados los tratamientos, repetición 2 y 3.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN SALUD
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD MICROBIOLÓGICO



162 Años
Al servicio de la
Educación Superior

Ciudad Universitaria
Final 25 Avenida Norte
San Salvador, El Salvador

Telefax No. (503) 2511-2028

INFORME DE ANÁLISIS

Nombre de la muestra: LODO PLANTA DE TRATAMIENTO Código: 160501
DE AGUAS RESIDUALES

Punto de muestreo: Eras de secado

Procedencia: Planta de Tratamiento, San Luis Talpa.
Edgar Giovani Reyes

Solicitante: Agustín Lisandro Mendoza Fecha de emisión: 15-08-2016

Método:

1. Determinación de Coliformes Fecales por el Método de enzima sustrato, por la técnica de Número más Probable (NMP), según NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos.
2. Porcentaje de Sólidos Totales, por método gravimétrico, según ISO 11465:1993, Calidad de suelos – Determinación de materia seca y contenido de agua en una masa base.

Fecha de Muestreo: 13-05-2016 Hora de Muestreo: No especificada

Persona que tomó la muestra: Edgar Giovani Reyes / Agustín Lisandro Mendoza

Fecha de recepción de la muestra: 16-05-2016

Descripción: Sólido de consistencia granulosa y humedad palpable, color negro con presencia de pelo y hojas.
SIN TRATAMIENTO. SECADO PREVIO: 26 DÍAS.

| DETERMINACIÓN | RESULTADOS | ESPECIFICACIONES ⁽¹⁾ |
|----------------------------------|-------------------------|--|
| Determinación de sólidos totales | 61.10 % | ----- |
| Bacterias coliformes fecales | 2.1×10^5 NMP/g | CLASE A: Menor de 1000 NMP/g ⁽²⁾ CLASE B: Menor de 1000 NMP/g ⁽²⁾ CLASE C: Menor de 2×10^6 NMP/g ⁽²⁾ |

NMP: Número más Probable; **g:** gramos
Resultados de coliformes fecales expresados en gramos de base seca.

OBSERVACIONES:
(1) Especificaciones basadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. – Lodos y biosólidos. – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
(2) Resultados de coliformes fecales expresados en gramos de base seca de la muestra.
(3) El presente informe corresponde únicamente a la muestra remitida y ensayada.


MSc. Amy Elieth Morán Rodríguez
QUIMICO-FARMACEUTICA


Fecha de análisis: 16-05-2016

Anexo 3. Resultados de coliformes fecales y pH de la repetición 1.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN SALUD
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD MICROBIOLÓGICO



162 Años
Al servicio de la
Educación Superior

Ciudad Universitaria
Final 25 Avenida Norte
San Salvador, El Salvador

Telefax No. (503) 2511-2028

INFORME DE ANÁLISIS

Nombre de la muestra: LODO PLANTA DE TRATAMIENTO Códigos: 060601 al 16
 Punto de muestreo: Eras de secado Procedencia: Planta de Tratamiento, San Luis Talpa.
 Solicitante: Edgar Giovani Reyes / Agustín Mendoza Fecha de emisión: 15-08-2016
 Método:

1. Determinación de Coliformes Fecales por el Método de enzima sustrato, por la técnica de Número más Probable (NMP), según NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos.
2. Porcentaje de Sólidos Totales, por método gravimétrico, según ISO 11465:1993, Calidad de suelos – Determinación de materia seca y contenido de agua en una masa base.
3. Determinación de pH, por método potenciométrico, según TC WI:2003 Determinación del pH en suelos, lodos de depuradora y residuos biológicos

Fecha de Muestreo: 04-06-2016 Hora de Muestreo: No especificada
 Persona que tomó la muestra: Edgar Giovani Reyes / Agustín Lisandro Mendoza
 Fecha de recepción de la muestra: 06-06-2016

Descripción: Sólido de consistencia granulosa y humedad palpable, color negro con presencia de pelo y hojas, con diferentes tratamientos.

| Código de la muestra | Nombre de la muestra (proporcionado por el solicitante) | DETERMINACIONES / RESULTADOS | | |
|----------------------|--|--|---------------------|---|
| | | pH (valor promedio de pH ± desviación estándar) | Sólidos totales (%) | Bacterias coliformes fecales (NMP/g de base seca) ⁽¹⁾ |
| 060601 | R1T1 | 13.02 ± 0.01 | 82.450 % | Menor de 3 NMP/g |
| 060602 | R1T2 | 13.08 ± 0.12 | 90.095 % | Menor de 3 NMP/g |
| 060603 | R1T3 | 12.83 ± 0.04 | 85.650 % | Menor de 3 NMP/g |
| 060604 | R1T4 | 11.54 ± 0.34 | 88.256 % | 240 NMP/g |
| 060605 | R1T5 | 7.09 ± 0.04 | 83.980 % | 23,000 NMP/g |
| 060606 | R1T6 | 7.50 ± 0.07 | 80.180 % | 150 NMP/g |
| 060607 | R1T7 | 7.28 ± 0.12 | 79.395 % | 2,400 NMP/g |
| 060608 | R1T8 | 7.11 ± 0.13 | 86.525 % | 20,000 NMP/g |
| 060609 | R1T9 | 7.47 ± 0.03 | 87.830 % | 46,000 NMP/g |
| 060610 | R1T10 | 7.46 ± 0.18 | 90.245 % | 11,000 NMP/g |
| 060611 | R1T11 | 7.55 ± 0.11 | 85.045 % | 2,900 NMP/g |
| 060612 | R1T12 | 7.40 ± 0.02 | 81.760 % | 930 NMP/g |
| 060613 | R1T13 | 6.26 ± 0.05 | 82.190 % | 46,000 NMP/g |
| 060614 | R1T14 | 6.16 ± 0.06 | 76.790 % | 2,400 NMP/g |
| 060615 | R1T15 | 6.09 ± 0.04 | 71.875 % | 43 NMP/g |
| 060616 | R1T16 | 6.60 ± 0.04 | 83.205 % | 110,000 NMP/g |

Página 1 de 2

Fecha de análisis: 06-06-2016



Anexo 4. Resultados de coliformes fecales y pH repetición 2.



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN SALUD
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD MICROBIOLÓGICO**

CENSALUD

162 Años
Al servicio de la
Educación Superior

Ciudad Universitaria
Final 25 Avenida Norte
San Salvador, El Salvador

Telefax No. (503) 2511-2028

INFORME DE ANÁLISIS

Nombre de la muestra: LODO PLANTA DE TRATAMIENTO Códigos: 200601 al 16

Punto de muestreo: Eras de secado Procedencia: Planta de Tratamiento, San Luis Talpa.

Solicitante: Edgar Giovani Reyes / Agustín Mendoza Fecha de emisión: 15-08-2016

Método:

1. Determinación de Coliformes Fecales por el Método de enzima sustrato, por la técnica de Número más Probable (NMP), según NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos.
2. Porcentaje de Sólidos Totales, por método gravimétrico, según ISO 11465:1993, Calidad de suelos – Determinación de materia seca y contenido de agua en una masa base.
3. Determinación de pH, por método potenciométrico, según TC WI:2003 Determinación del pH en suelos, lodos de depuradora y residuos biológicos

Fecha de Muestreo: 18-06-2016 Hora de Muestreo: No especificada

Persona que tomó la muestra: Edgar Giovani Reyes / Agustín Lisandro Mendoza

Fecha de recepción de la muestra: 20-06-2016

Descripción: Sólido de consistencia granulosa y humedad palpable, color negro con presencia de pelo y hojas, con diferentes tratamientos.

| Código de la muestra | Nombre de la muestra (proporcionado por el solicitante) | DETERMINACIONES / RESULTADOS | | |
|----------------------|---|---|---------------------|--|
| | | pH (valor promedio de pH \pm desviación estándar) | Sólidos totales (%) | Bacterias coliformes fecales (NMP/g de base seca) ⁽¹⁾ |
| 200601 | R2T1 | 8.22 \pm 0.16 | 59.759 % | 3.6 NMP/g |
| 200602 | R2T2 | 11.20 \pm 0.34 | 56.766 % | 23 NMP/g |
| 200603 | R2T3 | 8.48 \pm 0.80 | 60.547 % | 14 NMP/g |
| 200604 | R2T4 | 5.92 \pm 0.16 | 67.824 % | 2,000 NMP/g |
| 200605 | R2T5 | 5.94 \pm 0.11 | 54.706 % | 23 NMP/g |
| 200606 | R2T6 | 6.04 \pm 0.14 | 53.315 % | 930 NMP/g |
| 200607 | R2T7 | 6.29 \pm 0.05 | 64.549 % | 930 NMP/g |
| 200608 | R2T8 | 6.99 \pm 0.02 | 66.697 % | 1,100 NMP/g |
| 200609 | R2T9 | 6.76 \pm 0.02 | 74.204 % | 93,000 NMP/g |
| 200610 | R2T10 | 7.04 \pm 0.04 | 67.619 % | 750 NMP/g |
| 200611 | R2T11 | 7.20 \pm 0.06 | 70.981 % | 14,000 NMP/g |
| 200612 | R2T12 | 7.20 \pm 0.06 | 70.407 % | 4,600 NMP/g |
| 200613 | R2T13 | 5.56 \pm 0.06 | 56.541 % | 21 NMP/g |
| 200614 | R2T14 | 5.39 \pm 0.02 | 50.598 % | 210 NMP/g |
| 200615 | R2T15 | 5.28 \pm 0.01 | 52.995 % | 460 NMP/g |
| 200616 | R2T16 | 5.36 \pm 0.05 | 54.583 % | 930 NMP/g |



Anexo 5. Resultados de coliformes fecales y pH repetición 3.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN SALUD
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD MICROBIOLÓGICO

CENSALUD

162 Años
 Al servicio de la
 Educación Superior

Ciudad Universitaria
 Final 25 Avenida Norte
 San Salvador, El Salvador

Teléfono No. (503) 2511-2028

INFORME DE ANÁLISIS

Nombre de la muestra: LODO PLANTA DE TRATAMIENTO Códigos: 200617 al 32

Punto de muestreo: Eras de secado Procedencia: Planta de Tratamiento, San Luis Talpa.

Solicitante: Edgar Giovanni Reyes / Agustín Mendoza Fecha de emisión: 15-08-2016

Método:
 1. Determinación de Coliformes Fecales por el Método de enzima sustrato, por la técnica de Número más Probable (NMP), según NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos.
 2. Porcentaje de Sólidos Totales, por método gravimétrico, según ISO 11465:1993, Calidad de suelos – Determinación de materia seca y contenido de agua en una masa base.
 3. Determinación de pH, por método potenciométrico, según TC WI:2003 Determinación del pH en suelos, lodos de depuradora y residuos biológicos

Fecha de Muestreo: 18-06-2016 Hora de Muestreo: No especificada

Persona que tomó la muestra: Edgar Giovanni Reyes / Agustín Lisandro Mendoza

Fecha de recepción de la muestra: 20-06-2016

Descripción: Sólido de consistencia granulosa y humedad palpable, color negro con presencia de pelo y hojas, con diferentes tratamientos.

| Código de la muestra | Nombre de la muestra (proporcionado por el solicitante) | DETERMINACIONES / RESULTADOS | | |
|----------------------|---|---|---------------------|--|
| | | pH (valor promedio de pH ± desviación estándar) | Sólidos totales (%) | Bacterias coliformes fecales (NMP/g de base seca) ⁽¹⁾ |
| 200617 | R3T1 | 8.21 ± 0.15 | 58.212 % | 43 NMP/g |
| 200618 | R3T2 | 9.91 ± 0.49 | 60.488 % | Menor de 3 NMP/g |
| 200619 | R3T3 | 9.97 ± 0.98 | 63.670 % | 75 NMP/g |
| 200620 | R3T4 | 9.36 ± 0.12 | 55.845 % | 11 NMP/g |
| 200621 | R3T5 | 6.39 ± 0.19 | 58.424 % | 43 NMP/g |
| 200622 | R3T6 | 6.46 ± 0.06 | 56.415 % | 230 NMP/g |
| 200623 | R3T7 | 5.56 ± 0.14 | 57.695 % | 200 NMP/g |
| 200624 | R3T8 | 6.89 ± 0.14 | 62.220 % | 430 NMP/g |
| 200625 | R3T9 | 7.26 ± 0.08 | 64.160 % | 2,400 NMP/g |
| 200626 | R3T10 | 7.12 ± 0.13 | 56.675 % | 430 NMP/g |
| 200627 | R3T11 | 7.03 ± 0.13 | 63.022 % | 4,600 NMP/g |
| 200628 | R3T12 | 6.90 ± 0.17 | 57.920 % | 930 NMP/g |
| 200629 | R3T13 | 5.44 ± 0.06 | 47.659 % | 2,100 NMP/g |
| 200630 | R3T14 | 5.30 ± 0.16 | 53.375 % | 4,600 NMP/g |
| 200631 | R3T15 | 5.47 ± 0.05 | 50.512 % | 930 NMP/g |
| 200632 | R3T16 | 5.42 ± 0.05 | 49.405 % | 280 NMP/g |



Anexo 6 . Resultados de metales pesados en lodos de 26 días de estar en patios de secado
Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Luis Talpa.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE QUIMICA AGRICOLA

RESULTADO DE ANÁLISIS

Fecha: Ciudad Universitaria, 10 de febrero de 2017
Fecha de ingreso: 19 /04 / 2016
Tipo de Muestra: Lodos Planta de Tratamiento de Aguas-San Luis Talpa
No. de muestra: 73
Análisis solicitado: pH, Arsenico, Cobre, Plomo y Zn.
Usuario: Geovany Reyes Melara, Agustin Lisandro Mendoza.

| No. | Identificacion muestra | ppm | | | | |
|-----|------------------------|--------|----------|--------|-------|------|
| | | As | Pb | Cu | Zn | ph |
| 73 | Lodos | 1620.2 | 11781.27 | 905.97 | 58.41 | 6.12 |

Analista: Lic. Mario Antonio Hernández Melgar

Atentamente,

“HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA”

Ing. Agr. Oscar Mauricio Carrillo Turcios
Jefe del Departamento de Química Agrícola



Anexo 7. Resultados de metales pesados 40 días después de aplicados los tratamientos a lodos provenientes de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales de San Luis Talpa.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
DEPARTAMENTO DE QUIMICA AGRICOLA

RESULTADO DE ANÁLISIS

Fecha: Ciudad Universitaria, 14 de febrero de 2017
Fecha de ingreso: 06 /06 / 2016
Tipo de Muestra: Lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Luis Talpa.
No. de muestra: 124-128
Análisis solicitado: Arsenico, Plomo, Cobre, Zn, pH..
Usuario: Geovany Reyes Melara, Agustin Lisandro Mendoza.

| No. de muestra | Identificacion muestra tratamiento | ppm | | | pH |
|----------------|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | Zn | Cu | Pb | |
| 125 | TESTIGO | 847.00 | 58.28 | 22.71 | 6.07 |
| 127 | CAL HIDRATADA | 689.38 | 61.28 | 23.68 | 10.98 |
| 126 | CAL Y YESO | 688.48 | 46.25 | 21.13 | 6.32 |
| 124 | CAL AGRICOLA | 571.00 | 45.06 | 20.98 | 6.88 |
| 128 | ECODIGESTOR | 864.50 | 59.94 | 23.76 | 6.42 |

Analista: Lic. Mario Antonio Hernández Melgar

Atentamente,

"HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA"

Ing. Agr. Oscar Mauricio Carrillo Turcios
Jefe del Departamento de Química Agrícola



Final 25 Av. Norte, Ciudad Universitaria. Tel.: 2225-1506 y 2226-2043

Anexo 8. Cálculos para determinación de dosis a aplicar a los lodos.

Determinación de necesidad de cal

2,204.62 lb de lodo _____ 500 lb de Cal

9 lb de lodo _____ x = 2 lb Cal

Determinación de necesidad de digestor enzimático

2,204.62 lb _____ 100 cc digestor enzimático

9 lb _____ X = 0.41 cc de digestor enzimático

2,204.62 lb _____ 150 cc digestor enzimático

9 lb _____ X = 0.61 cc de digestor enzimático

2,204.62 lb _____ 210 cc digestor enzimático

9 lb _____ X = 0.85 cc de digestor enzimático

Anexo 9. Calculo para determinar el costo de los tratamientos evaluados.

| Tratamientos | Presentación | Cantidad por tonelada métrica | Costo / bolsas \$ | Costo total \$ |
|---------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|----------------|
| Cal Hidratada | Bolsas de 100 libras | 5 | 20.42 | 102.10 |
| Cal yeso | Bolsas de 100 libras | 5 | 26.90 | 134.50 |
| Cal Agrícola | Bolsas de 100 libras | 5 | 14.00 | 70.00 |
| Digestor enzimático | Litros | 1 | 10 | 10.00 |

1. Costo de inversión para una tonelada métrica de lodo en la aplicación de cal hidratada más digestor enzimático.
Costo: \$ 102.10 + \$ 10.00 = **\$ 112.10**
2. Costo de inversión para una tonelada métrica en la aplicación de cal yeso más digestor enzimático.
Costo: \$ 134.50 + \$ 10.00 = **\$ 144.50**
3. Costo de inversión para una tonelada métrica de lodo en la aplicación de cal Agrícola más digestor enzimático.
Costo: \$ 70 + \$ 10.00 = **\$ 80.00**