

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**DETERMINACION DE LA DOSIS OPTIMA DE
Ca(OH)₂ y CaO PARA LA ESTABILIZACION DE
BIOSOLIDOS COMPOSTADOS DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “DORIS
MENDOZA” PROVINCIA DE CONCEPCIÓN**

PRESENTADO POR LA BACHILLER:
MENDOZA CIRIACO, FIORELLA STEFANY

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL
HUANCAYO-PERÚ**

2016

**DETERMINACION DE LA DOSIS OPTIMA DE
Ca(OH)₂ y CaO PARA LA ESTABILIZACION DE
BIOSOLIDOS PROVENIENTE DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “DORIS
MENDOZA” PROVINCIA DE CONCEPCIÓN**

DEDICATORIA

A Dios:

Por estar conmigo en todos los días de mi vida, por iluminarme en el camino hacia una meta más que ahora he logrado, y por permitirme que esta gran alegría pueda compartirla con las personas que amo.

A mis Papás: Sandro y Rocio

Por qué siempre creyeron en mí a pesar de mis errores en la vida, me brindaron su apoyo incondicional y su amor inmenso que me permite cumplir hoy en día una de mis metas con la mayor alegría y satisfacción.

A mis Abuelos: Artemio y Braulia

A ustedes papitos por haber guiado mis pasos desde muy pequeña por un buen camino, que me permite hoy en día cumplir una de mis metas en la vida. Me enseñaron valores, principios y principalmente amar a Dios por sobre todas las cosas. A ustedes queridos papitos mis agradecimientos eternos.

A Henry:

Por su apoyo incondicional, su motivación y su amor.

A mis familiares

Por apoyarme siempre, por brindarme su cariño y ser parte de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios porque siempre está conmigo a cada paso que doy, cuidándome, guiándome y dándome fortaleza para continuar siempre.

El presente trabajo de investigación hubiese sido imposible sin la participación de personas importantes en mi formación académica que aportaron día a día con sus conocimientos hacia mi persona facilitado las cosas para que este trabajo se desarrolle satisfactoriamente. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para ser justo y consecuente con ellas, expresándoles mis agradecimientos.

A la UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS por haberme aceptado ser parte de ella y por abrirme las puertas de su seno científico para poder estudiar la carrera que tanto anhele y de esta manera desenvolverme de manera eficiente en lo profesional.

A mi Asesor de tesis, Ing. Henry Ochoa León por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, también por haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

A todos y cada uno de los profesores que me dictaron catedra, por sus enseñanzas, su dedicación y su tiempo, en especial a Ing. Carmencita Lavado Meza, Ing. Ivan Luis Osorio Lopez, Ing. Dante García Jimenez, Ing. Orlando Vilca Moreno quienes además de enseñarme lo que hoy en día sé de esta hermosa carrera hicieron que mi paso por la universidad fuera agradable.

En realidad, son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los buenos y malos momentos de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga siempre.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	xix
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Caracterización de la Realidad Problemática	1
1.2. Formulación del problema.....	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación	4
1.5. Importancia	5
1.6. Limitaciones	6
CAPÍTULO II.....	7

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1. Marco referencial	7
2.1.1. Antecedentes de la investigación	7
2.1.2. Referencias históricas	11
2.2. Marco legal	15
2.3. Marco conceptual.....	16
2.4. Marco Teórico.....	19
2.4.1. Lodos de aguas residuales.....	19
2.4.2. Tipos de lodos	22
2.4.3. Clasificación de los lodos	23
2.4.4. Mecanismos para tratamiento de lodos	26
2.4.5. Factores limitantes en los lodos.....	29
2.4.6. Biosólidos	30
2.4.7. Características de los biosólidos	33
2.4.8. Biosólidos: beneficios y riesgos	36
2.4.9. Sistemas de composteo con biosólidos	40
2.4.10. Factores que Influyen sobre la evaluación del proceso de	
compostaje con biosólidos	45
2.4.11. Estabilización alcalina de lodos y/o biosólidos	47
2.4.12. Química de la estabilización alcalina	49
CAPÍTULO III.....	55
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	55
3.1. Metodología	55
3.1.1. Método	55

3.1.2.	Tipo de la Investigación	62
3.1.3.	Nivel de la Investigación	62
3.2.	Diseño de la Investigación	62
3.3.	Hipótesis de la Investigación.....	63
3.3.1.	Hipótesis General.....	63
3.3.2.	Hipótesis Específicas	63
3.4.	Variables.....	63
3.4.1.	Variable Independiente.....	63
3.4.2.	Variable Dependiente	63
3.5.	Cobertura del Estudio	64
3.5.1.	Universo	64
3.5.2.	Población	64
3.5.3.	Muestra	64
3.5.4.	Muestreo	64
3.6.	Técnicas e Instrumentos	64
3.6.1.	Técnicas de la Investigación.....	64
3.6.2.	Instrumentos de la Investigación	64
3.7.	Procesamiento Estadístico de la Información.....	65
3.7.1.	Estadísticos	65
3.7.2.	Representación	65
3.7.3.	Técnica de Comprobación de la Hipótesis.....	65
CAPITULO IV	66
4.	ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
4.1.	Resultados.....	66

4.1.1. Caracterización de los biosólidos	66
4.1.2. Pruebas experimentales	68
4.2. Discusión de Resultados.....	77
4.3. Contratación de Hipótesis	87
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100
ANEXOS.....	103

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

%	: Porcentaje
<	: Menor
>	: Mayor
b.s.	: Base seca
C	: Carbono
C/N	: Relación Carbono Nitrógeno
Ca	: Calcio
CO %	: Porcentaje de carbono orgánico
CO ₂	: Monóxido de Carbono
Cr	: Cromo
Cu	: Cobre
EPA	: Environmental Protection Agency USA
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
Fe	: Hierro
g	: Gramos
gST	: Gramos de sólidos totales
H	: Hidrogeno
Ha	: Hectárea
INE	: Instituto Nacional de Ecología
K	: Potasio
L	: Litros
M.S.	: Masa Seca
MO	: Materia orgánica
N	: Nitrógeno
NMX	: Norma Mexicana
NO ₃	: Nitratos
NOM	: Norma Oficial Mexicana
°C	: Grados Celsius

SEMARNAT	: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
UFC/g	: Unidades Formadoras de Colonias por gramo
USEPA	: United States Environmental Protection Agency
MINAM	: Ministerio de Medio Ambiente
ECAs	: Estandares de calidad ambiental
LMP	: Limite Maximo Permisible
NMP	: Numero más probable

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA.....	24
Tabla 2.2 Límite de calidad microbiológica de lodos	25
Tabla 2.3 Características de los metales pesados	30
Tabla 2.4 Aprovechamiento de Biosólidos	32
Tabla 2.5 Restricciones para la aplicación de biosólidos, relacionadas con la salud pública y los patógenos (Lovell, 1996).	40
Tabla 2.6 Escenarios típicos de aplicación de biosólidos	54
Tabla 3.1. Diseño experimental completamente al azar.....	62
Tabla 4.1 Caracterización de los biosólidos (materia orgánica)	67
Tabla 4.2 Caracterización bacteriológico de los biosólidos	67
Tabla 4.3 Monitoreo de la temperatura (°C) en los tratamientos.	68
Tabla 4.4. Monitoreo de la temperatura (°C) en los tratamientos (replica).....	69
Tabla 4.5 Monitoreo del pH en los tratamientos.	71
Tabla 4.6 Monitoreo del pH en los tratamientos (replica).	72
Tabla 4.7 Monitoreo bacteriológico en los tratamientos	74
Tabla 4.8 Monitoreo bacteriológico en los tratamientos (replica).....	75
Tabla 4.9 Temperatura promedio de los tratamientos	78
Tabla 4.10 pH promedio de los tratamientos.....	80
Tabla 4.11 Análisis microbiológico promedio de los tratamientos.	82
Tabla 4.12 Inactivación de microorganismos de coliformes totales aplicando $\log(N/N_0)$ en relación al % (p/p) material alcalinizante.	84
Tabla 4.13 Inactivación de microorganismos de coliformes fecales aplicando $\log(N/N_0)$ en relación al % (p/p) material alcalinizante.	85
Tabla 4.14 Parámetros para la cinética de microorganismos en el T4	86
Tabla 4.15 Resultados del NMP de coliformes totales y fecales con tratamientos de CaO	87

Tabla 4.16 Resultados del NMP de coliformes totales y fecales con.....
tratamientos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$91

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Elaboración de las filas o camellones por el método convencional.	41
Figura 2.2 Elaboración de las filas o camellones por el método convencional.	42
Figura 2.3 Esquema general del proceso de composteo en camellones.....	43
Figura 2.4 Tipos de sistemas de composteo en pila estática.	45
Figura 2.5 Curva de Temperatura y pH del proceso de compostaje..... (Labrador, 2011)	46
Figura 2.6 Dependencia del porcentaje de conversión de NH_4 a NH_3 con el pH ..	50
Figura 2.7 Evolución de las rutas de eliminación de lodos en la Comunidad Europea hasta el 2005 (Hall y Dalimier, 1994).	52
Figura 3.1 Ubicación geográfica de la PTAR “Doris Mendoza”	55
Figura 3.2 Realizando la toma de muestra de los biosólidos.....	56
Figura 3.3. Acondicionamiento de las 7 celdas de vidrio.....	59
Figura 3.4. Pesado de biosólidos.	59
Figura 3.5. Pesado del material alcalinizante.	59
Figura 3.6. Mezcla de biosólido con el material alcalinizante.	60
Figura 3.7. Medición de temperatura en el tratamiento 1 (T1).....	61
Figura 3.8. Medición de pH en el tratamiento 7 (T7).	61
Figura 4.1. Comportamiento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en los tratamientos.	68
Figura 4.2. Comportamiento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en los tratamientos (replica). 70	
Figura 4.3. Comportamiento del pH en los tratamientos.	71
Figura 4.4. Comportamiento del pH en los tratamientos (replica).....	73
Figura 4.5. Comportamiento de la temperatura promedio.	79
Figura 4.6. Comportamiento del pH promedio.....	81
Figura 4.7. Comportamiento de la inactivación de microorganismos..... de coliformes totales aplicando $\log(\text{N}/\text{No})$ en relación al % (p/p)	84
material alcalinizante.	84

Figura 4.8. Comportamiento de la inactivación de microorganismos.....	
de coliformes fecales aplicando $\log(N/N_0)$ en relación al % (p/p).....	
material alcalinizante.	85
Figura 4.9. Interval Plot of Coliformes totales vs Tratamientos CaO	89
Figura 4.10. Interval Plot of Coliformes fecales vs Tratamientos CaO.....	91
Figura 4.11. Interval Plot of Coliformes totales vs Tratamientos Ca(OH)_2	93
Figura 4.12. Interval Plot of Coliformes fecales vs Tratamientos Ca(OH)_2	95

RESUMEN

Los biosólidos, pueden ser nocivos para la salud por la presencia tanto de químicos, virus y bacterias, que pueden causar enfermedades, es por esto que los biosólidos requieren de un manejo adecuado para prevenir eventuales impactos negativos para la salud humana y para el medio ambiente. El proceso de estabilización, también llamado de desinfección o higienización es necesario para que sus características sanitarias sean compatibles con su uso y disposición final.

El tratamiento alcalino es uno de los más empleados para la estabilización o higienización de los biosólidos; es la estabilización alcalina en la cual una base, normalmente cal, se mezcla con el biosólido para elevar el pH y destruir la mayor parte de los microorganismos patógenos de esta manera permite mejorar sus características, aumentando su potencial de aplicación agrícola con menor riesgo a la salud pública. El biosólido alcalinizado, además de ser un material con un contenido de materia orgánica y nutrientes aprovechables para su uso agrícola (lo que reduce los costos de producción por la disminución de adquisición de fertilizantes), tiene un alto poder reactivo en el suelo debido al efecto alcalinizante remanente, por lo que su uso estaría enfocado principalmente a suelos que posean pH ácidos.

Se caracterizaron los biosólidos de la PTAR "Doris Mendoza" fisicoquímicamente donde se obtuvieron los siguientes resultados el pH de 6,23, conductividad de 0,49 S/m; Materia orgánica 31%, Nitrógeno 2,1%, Fosforo 2,32%, Potasio 0,64%, calcio 5,78%, Magnesio 0,86%, Humedad 16,42%, sodio 0,07% y relación de C/N de 7,78%; de igual manera se analizó bacteriológico obteniendo $2,0 \times 10^9$ NMP/100mL de Coliformes Totales y $2,0 \times 10^3$ NMP/100mL de Coliformes fecales (E. Coli). Se evaluaron las concentraciones de Ca(OH)_2 y CaO en los tratamientos en proporciones peso a peso con los biosólidos siendo la temperatura y el pH factores que influyen en la eliminación de microorganismos, el T4 logro elevar la temperatura hasta los 52,2 °C y el pH a 12,3 unidades por un periodo de 72 horas (3 días), en el T6 la temperatura llego a los 52,2 °C y el pH a 12,3 en un inicio y casi al final del

tratamiento, en el caso de T5 y T7 se llegó a elevar la temperatura a 51,5 °C y el pH a 12,4 unidades por un periodo de 72 horas (3 días).

Finalmente según los resultados obtenidos se determinó la dosis óptima del 15 % de CaO en proporción p/p con los biosólidos para la estabilización alcalina de los biosólidos compostados eliminando en su totalidad a los coliformes totales, y reduciendo a 2,48E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli) , estos resultados se encuentran dentro del rango de los límites máximos permisibles para su disposición final, el cual es clasificado como biosólido estabilizado de tipo A, según la Agencia de Protección Ambiental.

ABSTRACT

Biosolids can be harmful to health because of the presence of both chemicals, viruses and bacteria, which can cause disease, which is why biosolids require proper management to prevent possible negative impacts on human health and the environment. The stabilization process, also called disinfection or sanitization, is necessary so that its sanitary characteristics are compatible with its use and final disposal.

The alkaline treatment is one of the most used for the stabilization or sanitization of biosolids; Is the alkaline stabilization in which a base, usually lime, is mixed with the biosolids to raise the pH and destroy most of the pathogenic microorganisms in this way allows to improve its characteristics, increasing its potential of agricultural application with less risk to the public health. In addition to being a material with a content of organic matter and nutrients that can be used for agricultural purposes (which reduces production costs due to the reduction of fertilizer acquisition), alkaline biosolids have a high reactive power in the soil due to the effect Alkalinizing agent, so its use would be focused mainly on soils that have acidic pH.

The biosolids of the "Doris Mendoza" WWTP were characterized physicochemically where the following results were obtained: pH of 6,23, conductivity of 0,49 S/m; Organic matter 31%, Nitrogen 2,1%, Phosphorus 2,32%, Potassium 0,64%, Calcium 5,78%, Magnesium 0,86%, Humidity 16,42%, Sodium 0,07% and C/N ratio of 7,78%; Bacteriological analysis was performed, obtaining $2,0 \times 10^9$ NMP/100 mL of Total Coliforms and $2,0 \times 10^3$ NMP/100 mL of Fecal Coliforms (E. coli). The concentrations of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaO were evaluated in the treatments in weight-to-weight ratios with biosolids being the temperature and pH factors that influence the elimination of microorganisms, the T4 managed to raise the temperature to 52,2 °C And pH at 12,3 units for a period of 72 hours (3 days), at T6 the temperature reached 52,2 °C and the pH at 12,3 at the beginning and near the end of the treatment, In the case of T5 and T7, the temperature was raised to 51,5 °C and the pH to 12,4 units for a period of 72 hours (3 days).

Finally, according to the results, the optimum dose of 15% CaO in w/w ratio was determined with the biosolids for the alkaline stabilization of the composted biosolids, eliminating the total coliforms in total, and reducing to $2.48E+02$ NMP of Fecal coliforms (E. Coli), these results are within the range of maximum permissible limits for final disposal, which is classified as stabilized biosolids type A, according to the Environmental Protection Agency.

INTRODUCCIÓN

La Provincia de Concepción cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales – PTAR “Doris Mendoza” con modelo de lodos activados, esta se encarga de mejorar la calidad de agua vertida, originando subproductos como los lodos, que después de pasar por un proceso de digestión pasan a camas de lechos de secado y son llamados biosólidos, debido a los pocos reportes para la utilización de estos subproductos y a la ausencia de disposiciones generales acerca de la descarga, transporte o depósito de estos materiales en nuestro país, millones de toneladas de lodos y biosólidos, se disponen frecuentemente en sitios de relleno y demás lugares inadecuados, provocando impactos negativos sobre el ambiente y la salud por la presencia tanto de químicos, virus y bacterias, que pueden causar enfermedades a los seres vivos, es por esto que los biosólidos requieren de un manejo adecuado para prevenir eventuales impactos negativos para la salud humana y para el medio ambiente.

Entonces para dar solución a este problema es necesario, además de los procesos biológicos de digestión, un proceso adicional de estabilización, también llamado de desinfección o higienización para que sus características sanitarias sean compatibles con su uso.

La estabilización alcalina permite mejorar sus características, aumentando su potencial de aplicación agrícola con menor riesgo a la salud pública. El compost alcalinizado, además de ser un material con un contenido de materia orgánica y nutrientes aprovechables para su uso agrícola (lo que reduce los costos de producción por la disminución de adquisición de fertilizantes), tiene un alto poder reactivo en el suelo debido al efecto alcalinizante remanente, por lo que su uso estaría enfocado principalmente a suelos que posean pH ácidos.

Por tal motivo, el propósito de este trabajo de investigación es determinar la dosis óptima de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y cal viva (CaO) para la estabilización de biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza” de esta manera minimizar el impacto ambiental que estos generan mediante su reutilización como mejoradores de suelo o abono orgánico.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Caracterización de la Realidad Problemática

En México se tienen registradas hasta el año 2007, un número de 1 710 plantas en operación en el país que trataron 79,3 m³/s de aguas municipales (negras), es decir el 38,3% de los 207 m³/s, recolectados en los sistemas de alcantarillado. La mayoría de estas plantas no cuentan con un sistema de tratamiento de lodos. En México existen 417 plantas que usan lodos activados que equivalen al 44,32% del total de las plantas de tratamiento en México, estas tratan 35,14 m³/seg de aguas municipales, y llegan a producir 874,36 Ton/día de lodo seco en México solo con este tipo de tratamiento. Esto quiere decir que se genera una gran cantidad de lodos de estas instalaciones, a los cuales no se les está dando un uso o disposición adecuada (Castellanos, 2000).

La Provincia de Concepción vertía hace 5 años 110 L/seg de aguas negras al Río Mantaro, para contrarrestar esta contaminación se diseñó una planta de tratamiento de aguas residuales con modelo de lodos activados, esta se encarga de mejorar la calidad de agua vertida, originando subproductos como los lodos, que requieren de tratamiento para ser convertidos en

biosólidos, debido a los pocos reportes para la utilización de estos subproductos y a la ausencia de disposiciones generales acerca de la descarga, transporte o depósito de estos materiales, millones de toneladas de biosólidos, se disponen frecuentemente en sitios de relleno y demás lugares inadecuados, provocando impactos negativos sobre el ambiente y la salud (Celis, 2009).

Los biosólidos, pueden ser nocivos para la salud por la presencia tanto de químicos, virus y bacterias, que pueden causar enfermedades, es por esto que los biosólidos requieren de un manejo adecuado para prevenir eventuales impactos negativos para la salud humana y para el medio ambiente. La aplicación al terreno puede tener impactos negativos en el agua, el suelo y el aire si dicha aplicación no se realiza correctamente (Ortiz, Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, 1995).

Los impactos negativos en el agua resultan por la aplicación de biosólidos utilizando tasas que exceden los requerimientos nutritivos de la vegetación. El exceso de nutrientes en los biosólidos (principalmente los compuestos de nitrógeno) pueden lixiviarse del suelo y llegar al agua subterránea. La escorrentía pluvial puede también transportar un exceso de nutrientes al agua superficial. Los impactos negativos al suelo pueden resultar del mal manejo de la aplicación de biosólidos al terreno. Las normas ambientales contienen estándares relacionados con los metales de interés y la aplicación de biosólidos al terreno, y de cumplirse con dichos estándares se evita la acumulación de metales a niveles dañinos. (Flores, 2005) .

Los olores producidos por la aplicación de biosólidos representan el principal impacto negativo al aire. La mayoría de los olores asociados con la aplicación al terreno son una molestia más que una amenaza a la salud humana o al ambiente. La presencia de microorganismos patógenos hace necesario, además de los procesos biológicos de digestión, un proceso adicional de estabilización, también llamado de desinfección o higienización

para que sus características sanitarias sean compatibles con su uso. Los biosólidos que han sido desinfectados a través de la adición de cal pueden emitir olores de amoníaco, pero esto generalmente sucede en un área restringida y los olores se disipan de una manera rápida. La estabilización de biosólidos reduce los olores y da lugar a una operación que es menos desagradable que la aplicación de estiércol. (Ortiz, Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, 1995).

Uno de los limitantes del aprovechamiento agrícola de lodos y biosólido producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas PTARD es su calidad microbiológica y parasitológica. La estabilización alcalina utilizando Cal Hidratada Ca(OH)_2 y Cal Viva CaO como bases, en combinaciones con el biosólido compostado influirá en la reducción de microorganismos patógenos y el alcance de estándares para compost de clase A, de esta manera se pretende el aprovechamiento de los biosólidos en la agricultura.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es la dosis optima de cal hidratada (Ca(OH)_2) y cal viva (CaO) para la estabilización de biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Qué características fisicoquímicas y microbiológicas presentan los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza”?
- ¿Cómo influye la concentración de Ca(OH)_2 y CaO en la estabilización de los biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”?

- ¿Cuál es el NMP de la reducción de microorganismos patógenos en la estabilización alcalina de los biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la dosis optima de cal hidratada (Ca(OH)_2) y cal viva (CaO) para la estabilización de biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente y microbiológica los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”.
- Evaluar las concentraciones de Ca(OH)_2 y CaO en la estabilización de los biosólidos compostados provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”
- Determinar el NMP de la reducción de microorganismos patógenos en la estabilización alcalina de los biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”.

1.4. Justificación

Uno de los principales problemas de calidad que presentan los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas PTAR, es el contenido de microorganismos con restricción para uso agrícola. La concentración de microorganismos patógenos (huevo de helmito, *Escherichia coli*, *Salmonella*, coliformes fecales, coliformes totales, etc) y sustancias tóxicas como metales pesados (arsénico, Cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, zinc) puede afectar en el detrimento del crecimiento y producción de algunas especies vegetales; la aplicación directa

de biosólidos sin tratamiento previo representa riesgos para la salud humana y biótica entonces es necesario, además de los procesos biológicos de digestión, un proceso adicional de estabilización, también llamado de desinfección o higienización para que sus características sanitarias sean compatibles con su uso.

La estabilización alcalina permite mejorar sus características, aumentando su potencial de aplicación agrícola con menor riesgo a la salud pública. El compost alcalinizado, además de ser un material con un contenido de materia orgánica y nutrientes aprovechables para su uso agrícola (lo que reduce los costos de producción por la disminución de adquisición de fertilizantes), tiene un alto poder reactivo en el suelo debido al efecto alcalinizante remanente, por lo que su uso estaría enfocado principalmente a suelos que posean pH ácidos.

1.5. Importancia

La disposición final de lodos más interesante para nuestro país, es el aprovechamiento de los biosólidos estabilizados como mejoradores de suelos, ya que, además de proporcionar nutrientes, incrementan la retención de agua, mejoran el suelo cultivable y restauran suelos erosionados.

Por tanto, al uso estrictamente agrícola hay que sumar la posibilidad de que se les pueda utilizar para regenerar suelos estériles o bien tratar suelos deforestados, lo que permitiría mejorar la cubierta vegetal, redundando en una menor escorrentía, permitiría controlar inundaciones como consecuencia de lluvias torrenciales y una mayor capacidad de infiltración de esos suelos mejorando, por tanto, la recarga de los acuíferos (Salcedo, 2000).

En suma, las partículas finas y orgánicas de los biosólidos estabilizados pueden incrementar características tales como humedad y disponibilidad de nutrientes. A largo plazo los biosólidos estabilizados entregan una continua y lenta liberación de nutrientes al sustrato, da un valor añadido, suponiendo a su vez un ahorro en fertilizantes, factor que debe ser tomado en cuenta.

El biosólido estabilizado enriquece y mejora las características texturales del suelo a través de una variedad de nutrientes, especialmente nitrógeno (N) y fósforo (P) los que con frecuencia se encuentran en forma limitada. En un corto plazo la adición de biosólido puede mejorar la productividad del suelo ya que éste entrega virtualmente un suministro inmediato y necesario para el desarrollo de la planta (Catherine, 2007).

1.6. Limitaciones

El trabajo de investigación presento limitaciones en la identificación de todos los microorganismos patógenos que contenían los biosólidos.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Marco referencial

2.1.1. Antecedentes de la investigación

Patricia Torres, Carlos Madera, Jorge Silva, en su trabajo de investigación denominado MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS dicen que uno de los principales problemas de calidad que presentan los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas es el contenido de microorganismos patógenos que los clasifica en muchos casos como Clase B con restricción para uso agrícola. Este estudio evaluó la estabilización alcalina de los biosólidos de la PTAR Cañaveralejo (Cali, Colombia) para mejorar su calidad microbiológica, empleando dos tipos de cal (hidratada y viva) en dosis entre 8 % y 25 % y dos tipos de ceniza con dosis entre 8 % y 40 % en unidades experimentales de 0,2 m² con un tiempo de contacto de 13 días. Los resultados mostraron que con cal se logró reducción total de las variables de respuesta evaluadas (coliformes

fecales, Salmonella spp y huevos de helmintos), mientras que el poder alcalinizante de las cenizas evaluadas fue insuficiente. El biosólido higienizado con cal presenta alto potencial de uso agrícola por su calidad microbiológica y por el contenido final de materia orgánica y nutrientes (N, P) que pueden beneficiar los suelos, pero es recomendable evaluar la optimización a escala piloto de la dosificación de cal y la aplicación del biosólido en diferentes tipos de suelos y cultivos para precisar los beneficios o medidas preventivas antes de la aplicación.

Según Ramiro Ramírez Pisco, Diana Cristina Velásquez Pomar y Elizabeth Acosta Baena, en su trabajo de investigación denominado EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSOLIDOS EN EL CRECIMIENTO DE Jacaranda mimosifolia (Gualanday) Y EN LAS CONDICIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO DEGRADADO dicen que los biosólidos, son materiales orgánicos, provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y su disposición final es uno de los principales problemas. El depósito en rellenos sanitarios, la incineración y la aplicación en suelos, son los principales métodos de disposición; los dos primeros son costosos, mientras que el último ha tenido aceptación debido a que puede ser usado como abono orgánico en cultivos y mejorar la fertilidad de suelos degradados, pero se pueden generar problemas de contaminación. En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de Jacaranda mimosifolia (Gualanday) y en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. En invernadero, se sembraron plántulas, utilizando un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y diez repeticiones. Los tratamientos correspondieron a contenidos de materia orgánica en la mezcla suelo-biosólido de 0 %, 2 %, 4 % y

8 %. Se muestreó mensualmente la sobrevivencia, altura, diámetro del tallo y número de hojas, y la biomasa seca al final del experimento. Se realizaron análisis físicos y químicos del suelo, al inicio del estudio y a los tres meses. Los análisis químicos incluyeron pH, carbono orgánico oxidable, Al, Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu, Zn, P, S, B, NO³⁻, NH⁺; y los análisis físicos estabilidad de agregados, densidad aparente, densidad real y retención de humedad. El análisis estadístico se realizó entre tratamientos por cada mes, mediante análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Duncan, 95 % nivel de confianza). Los tratamientos con 4 % y 8 % de materia orgánica, afectaron negativamente el crecimiento de *J. mimosifolia*, debido posiblemente a la alta concentración de nutrientes y metales pesados hallados en el suelo, lo que pudo generar toxicidad, antagonismo y/o sinergismo. Las condiciones físicas se favorecieron al adicionar biosólidos, aumentándose la estabilidad de agregados y la retención de humedad, y disminuyéndose la densidad aparente y densidad real.

Patricia Torres Lozada, Carlos Arturo Madera Parra y Genny Virginia Martínez Puentes en su trabajo de investigación denominado ESTABILIZACIÓN ALCALINA DE BIOSÓLIDOS COMPOSTADOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA afirman que, Uno de los limitantes del aprovechamiento agrícola de lodos y biosólidos producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas PTAR es su calidad microbiológica y parasitológica. Se evaluó la estabilización alcalina del compost obtenido a partir la planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo de Cali, Colombia (PTAR-C), utilizando ceniza de calderas de una industria papelera, Cal Hidratada (CH) y Cal Viva (CV), en combinaciones con

el compost del 8 %, 15 % y 30 % para CH y ceniza y de 15% para CV, En proporciones peso a peso. Durante 13 días se monitoreó temperatura, pH, humedad, coliformes fecales y huevos de helmintos. Los resultados obtenidos mostraron que CV y CH al 15% lograron elevar el pH a 12 unidades por más de 72 horas y obtener cero huevos de helmintos viables, lo que muestra una eficiente reducción de patógenos y el alcance de estándares para compost clase A, lo que no se alcanzó con la ceniza en las proporciones evaluadas. En términos de humedad, CV al 15% presentó mejor desempeño que CH, la cual requirió un 30% y de 3 días a 5 días para reducir la humedad hasta el 20% sugerido para la aplicación Agrícola de compost. Es recomendable evaluar rangos entre 8 y 15% de CV y CH, otras cenizas alcalinas y mezclas para reducir tiempos de tratamiento, requerimientos de área y costos, además considerar la remoción de otros indicadores en plantas y humanos como fitopatógenos y Salmonella.

Patricia Torres Lozada, Carlos Arturo Madera Parra y Genny Virginia Martínez Puentes en su trabajo de investigación denominado ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS EN BIOSÓLIDOS POR ESTABILIZACIÓN ALCALINA afirman que La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (PTAR-C) de Cali-Colombia, produce alrededor de 100 t/día de biosólidos que, aunque no tienen restricción por metales pesados, son clase B por el nivel de microorganismos patógenos y parásitos. En un diseño completamente al azar, conformado por seis tratamientos con su respectivo duplicado, se evaluó la estabilización alcalina con dosis del 9% peso a peso de cal viva e hidratada, aplicada a pilas de 0,5 t de biosólidos húmedos (66,5%) y secos a temperatura ambiente (25°C - 31°C) durante 72 h (humedad 50,1%). Con la estabilización

alcalina el pH aumentó a valores superiores a 12 unidades durante el tiempo suficiente para garantizar la reducción de patógenos y parásitos, alcanzando una material clase A; sin embargo, el biosólido seco facilitó la formación de grumos que dificultaron las labores de homogenización del sustrato con los alcalinizante, factor indeseable para la eficiente reducción de patógenos.

Jorge Silva Leal, Diego Bedoya Rios and Patricia Torres Lozada developed EFFECT OF THERMAL DRYING AND ALKALINE TREATMENT ON THE MICROBIOLOGICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOSOLIDS FROM DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANTS. We evaluated the effect of thermal drying (60 ° C to 75 ° C and times from 0 h to 12,58 h) and alkaline treatment ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaO at doses from 8% to 10%.) on the microbiological and chemical characteristics of biosolids from the Cañaveralejo WWTP. The results showed that in thermal drying all temperatures studied were sufficient to achieve the sanitation of biosolids. In the alkaline treatment the two types of lime showed the total elimination of fecal coliforms, E. coli and helminth eggs, however, the process of alkalization of biosolids had significant influences on organic carbon and calcium.

2.1.2. Referencias históricas

El valor de los desechos sólidos de origen humano y animal ha sido reconocido por muchos años. Los excrementos provenientes de letrinas han sido usados como fertilizantes y mejoradores de las propiedades físicas del suelo por siglos, en los países asiáticos. En algunas ciudades europeas existían fincas donde se habían utilizado estos lodos por décadas, por ejemplo en Edimburgo, Escocia, lo usaban desde la mitad del siglo XVII; también su uso fue extensivo y

exitoso en Berlín y París por los años 1850. (Acosta González Y, 2003).

En España y el resto de Europa se han utilizado con fines agrícolas y se tiene experiencia en relación a su naturaleza, formas de aplicación, dosis y efectos sobre el suelo, agua y salud humana. En los Estados Unidos, las aguas residuales han sido usadas para el riego de cultivos desde el siglo XIX. Sin embargo, aun cuando los lodos residuales han sido aplicados al suelo por muchos años, esta práctica no ha sido ampliamente reconocida. Hoy en día, en los países industrializados, la disposición de los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, está asociado con el objetivo primordial, de interés nacional, de mejorar la calidad ambiental. Sin embargo, la disposición se ha convertido en un problema difícil y costoso para los organismos encargados del control de calidad ambiental. Es por esto que la aplicación de los lodos residuales al suelo ha sido vista como una alternativa que puede proporcionarnos un método, ambientalmente aceptable, para manejar estos productos de desecho (Soárez, 2002).

En Colombia se enfrenta en estos momentos la mayor emergencia sanitaria de toda su historia, sus principales ríos y corrientes subterráneas están siendo contaminados a cada momento por el vertimiento indiscriminado de todo tipo de aguas residuales tanto de origen industrial como doméstico y no se conocen muchas experiencias en el manejo y disposición de lodos producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico y aún se sabe muy poco sobre su aplicación en el suelo con fines agrícolas. Se reportan trabajos de investigación realizados por Universidades como la Javeriana que ha dedicado su investigación a la caracterización biológica de los lodos residuales, la universidad

del Valle ha hecho trabajos de investigación en aplicación agrícola de lodos residuales compostados.

En Boyacá, de acuerdo con el estudio realizado por Cepeda (2006), se podrían utilizar en cultivos agrícolas y pastizales por su bajo contenido de metales pesados, pero debido al contenido de patógenos se deben atender las restricciones de emplazamiento enunciadas anteriormente. La utilización de los lodos en cultivos hortícolas comerciales debe obedecer a pruebas agronómicas a nivel de campo, donde se establezcan las proporciones adecuadas de aplicación y sus efectos en los cultivos a nivel fisiológico y productivo. (Colin, 1994) presenta algunas nuevas aplicaciones a partir de los lodos residuales, tales como; material de adsorción, medio de cultivo para la producción de ácido giberélico, materia prima para grasa grafitada, puntillas para lápices, entre otros, se desarrollan diversos métodos para cada aplicación del producto obtenido de los lodos residuales, por ejemplo; material de adsorción, nucleador en la formación de flóculos, medio de cultivo para la producción de ácido giberélico, materia prima para grasa de calzado, grasa grafitada, puntillas para lápices. Las principales prácticas para la disposición de lodos que se han llevado a cabo con mayor frecuencia pueden agruparse en: procesos térmicos, relleno de terrenos y aplicación a suelo.

En cuanto a los procesos térmicos y la incineración en particular, requieren de una evaluación de los costos y de asegurar una disposición segura o el uso del subproducto resultante. La ventaja principal que muestra el proceso térmico es la disminución de volumen de lodos residuales; sin embargo, estas técnicas no son bien aceptadas por la opinión pública como una práctica segura por las emisiones a la atmósfera. El mejoramiento de técnicas que disminuyan la emisión de otros contaminantes y la difusión de esta

información, podrían mejorar el panorama ante este tipo de prácticas. (Colin, 1994).

El relleno de terrenos es conveniente con lodos residuales donde el espacio es suficiente y la cantidad depositada es razonable, o bien, puede utilizarse como un material de cobertura mezclándose con otros elementos para mejorar su estructura y consistencia como en el caso del cemento. Esto representa una alternativa viable cuando la cantidad de metales pesados no representa un riesgo (Colin, 1994). La aplicación en suelo se contempla como la mejor opción para el futuro, particularmente para plantas de tratamiento pequeñas, que trabajan con aguas menos contaminadas con metales pesados, colorantes, microorganismos patógenos etc. y tienen sitios de disposición cercanos. Sin embargo el uso agrícola está sujeto a la variabilidad en el tiempo de siembra y el tipo de cultivo, así como a las condiciones climáticas (Colin, 1994).

(Grajales S. M., 2006) en su trabajo para la Universidad Tecnológica de Pereira menciona que dentro de las opciones disponibles para la disposición final de los lodos tratados, su uso como mejorador de suelos es el más eficiente, dado que este residuo encierra en su composición materia orgánica, macro y micro nutrientes, que hacen que su contribución en el suelo sea de suma importancia en lo que respecta al ahorro de recursos en la compra de fertilizantes, además de proporcionar una mejora en las características físicas, químicas y biológicas del suelo que lo recibe lo que se traduce en bajos costos de disposición final e impactos positivos al ambiente por el reciclaje de nutrientes en el suelo.

Las regulaciones sobre biosólidos en el mundo tienen varias consideraciones, por ejemplo, establecen límites y parámetros en las concentraciones de metales pesados; en EEUU y la Unión Europea existen normativas muy similares al respecto, las cuales han sido

imitadas en muchos otros países. La mayoría de normatividades regulan los mismos indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales y huevos de helminto), y establecen la necesidad de tratamiento de los lodos (digestión anaeróbica, aeróbica, secado térmico, estabilización química, etc.) para que al ser convertidos en biosólidos puedan ser aplicados al suelo (Dáguer, 2003).

2.2. Marco legal

El manejo de lodos y biosólidos ha sido liderado principalmente por países como Estados Unidos. El establecimiento de límites contaminantes, calidad microbiológica y atracción de vectores se convirtieron en los tres ejes centrales de la temática de disposición de lodos y biosólidos al ambiente (Dáguer, 2003).

En países como México, Brasil, Chile y Argentina, han logrado regular el uso y disposición de sus biosólidos con características similares a la norma de los Estados Unidos (Norma 40 CFR parte 503). En Colombia la norma se encuentra en proceso de aprobación (Salcedo, 2000).

En el país, debido a los pocos reportes para la utilización de estos subproductos y a la ausencia de disposiciones generales acerca de la descarga, transporte o depósito de estos materiales, millones de toneladas de biosólidos, se disponen frecuentemente en sitios de relleno y en lugares inadecuados, provocando impactos negativos sobre el ambiente (Catherine, 2007).

Por su parte, la Norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales (40 CFR Part 503 Rule: Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge), requiere que los biosólidos de las aguas residuales sean procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno. Este proceso, denominado “estabilización”, ayuda a minimizar la generación de olores, destruir los agentes patógenos (organismos causantes de diversas

enfermedades), y reducir las probabilidades de atracción de vectores (EPA, “Aplicación de biosólidos al terreno” , 2000).

Así mismo, la Norma 503 define dos tipos de biosólidos con respecto a la reducción de agentes patógenos, Clase A y Clase B, dependiendo del grado de tratamiento que los biosólidos hayan recibido. Los dos tipos son adecuados para la aplicación al terreno, pero se imponen requisitos adicionales en la Clase B. Éstos se detallan en la Norma 503 e incluyen actividades tales como el acceso restringido del público al terreno de aplicación, la limitación de consumo por el ganado, y el control de los periodos de cosecha (EPA, 2000). Además, son utilizados para la aplicación a granel en suelos agrícolas, bosques y sitios de restauración. Los lodos de esta calidad deben ser cubiertos al final de cada día de operación si van a ser dispuestos superficialmente (Jiménez, 2001). Por el contrario, los biosólidos de Clase A (biosólidos tratados de tal manera que no contengan agentes patógenos a niveles detectables) no están sujetos a estas restricciones (EPA, “Aplicación de biosólidos al terreno” , 2000).

2.3. Marco conceptual

- **Abono:** Es cualquier sustancia orgánica o inorgánica que mejora la calidad del sustrato, a nivel nutricional, para las plantas arraigadas en éste.
- **Acondicionamiento:** Técnica agrícola que permite mantener o mejorar la productividad de los suelos.
- **Actividad microbiana:** Interacción y actividad metabólica que llevan a cabo los microorganismos en el suelo.
- **Adsorción:** Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas.
- **Aguas residuales domésticas (ARD):** Son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de

alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación, también residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.

- **Aguas residuales:** Las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.
- **Almacenamiento:** Acumulación o depósito temporal de residuos, en recipientes o lugares, para su posterior recolección, aprovechamiento, transformación, comercialización o disposición final.
- **Análisis fisicoquímico:** Descripción de las características, como físicas como pH, Conductividad, Densidad, Porosidad, y químicas como Humedad, Nitrógeno, Fosforo, Carbono, Solidos totales, Solidos volátiles.
- **Aprovechamiento:** Proceso mediante el cual, a través de un manejo integral de los residuos sólidos, los materiales recuperados se reincorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio de la reutilización, el reciclaje, la incineración con fines de generación de energía, el compostaje o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales o económicos.
- **Biodegradabilidad:** Capacidad de descomposición rápida bajo condiciones ambientales naturales o controladas
- **Biosólidos:** Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles desaprovechamiento.
- **Coliformes fecales:** Bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos. Bacilos cortos Gram negativos no esporulados, también conocidos como coliformes termotolerantes. Puede identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44 °C a 45 °C.

Tienen la capacidad de fermentar la lactosa a temperatura de 44,5 °C. Incluyen al género Escherichia y algunas especies de Klebsiella.

- **Digestión anaerobia:** Es la transformación bioquímica de la materia orgánica que es transformada en gas metano, bióxido de carbono y agua por los microorganismos en ausencia de oxígeno.
- **Disposición final:** La acción de depositar de manera permanente lodos y biosólidos en sitios autorizados.
- **Estabilización alcalina:** Es el proceso mediante el cual se añade suficiente cal viva (óxido de calcio CaO) o cal hidratada (hidróxido de calcio Ca (OH)₂) o equivalentes, a la masa de lodos y biosólidos para elevar el pH.
- **Estabilización:** Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionamiento y posterior aprovechamiento o disposición final con el fin de evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente.
- **Límite máximo permisible:** Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido por los lodos y biosólidos para que puedan ser dispuestos o aprovechados.
- **Lodo activo:** Normalmente se caracteriza por la interacción de distintos tipos de bacterias y microorganismos, que requieren oxígeno para vivir, crecer y multiplicarse y consumen materia orgánica. El lodo resultante se llama lodo activo. Normalmente este lodo está en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta además de partes minerales y orgánicas adsorbida y almacenada.
- **Lodo primario:** El lodo primario es producido durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales. Esto ocurre después de las pantallas y desarenado y consiste en productos no disueltos de las aguas residuales.
- **Lodos:** Son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes de las plantas potabilizadoras y de las plantas de

tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

- **Mejoramiento de suelos:** Es la aplicación de productos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas.
- **Muestra:** Parte representativa de un universo o población finita, obtenida para conocer sus características
- **Patógeno:** Microorganismo capaz de causar enfermedades, si está presente en cantidad suficiente y condiciones favorables.
- **Sólidos Totales (ST):** Son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos, que han sido deshidratados entre 103°C a 105°C, hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.
- **Sólidos Volátiles (SV):** Son sólidos orgánicos totales presentes en los lodos y biosólidos, que se volatilizan cuando éstos se calcinan a 550°C en presencia de aire por un tiempo determinado.
- **Terrenos con fines agrícolas:** Son las superficies sobre las cuales se pueden cultivar productos agrícolas para consumo humano y animal, incluyendo los pastizales.
- **Tratamiento biológico:** Tratamiento tecnológico que utiliza bacterias u otros organismos para consumir residuos orgánicos.
- **Tratamiento:** Conjunto de operaciones, procesos o técnicas encaminadas a la eliminación, la disminución de la concentración o el volumen de residuos, o su conversión en formas más estables.

2.4. Marco Teórico

2.4.1. Lodos de aguas residuales

Son un subproducto del tratamiento de las aguas residuales, se pueden generar durante los tratamientos primario (físico y/o químico), secundario (biológico) y terciario; representan un residuo

acuoso, más o menos diluido, con una amplia variedad de coloides y otras partículas en diferentes formas; pueden existir también varios contaminantes peligrosos, como sales, contaminantes orgánicos y metales pesados. La cantidad de lodo producida depende de la eficiencia, del tipo de tratamiento (los fisicoquímicos y los biológicos aerobios producen más lodo que los biológicos anaerobios) y de la carga contaminante inicial del agua residual (Fernández A. R García R. R., 2006).

Se denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua; se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen, y cloacales porque son transportadas mediante cloacas nombre que se le da habitualmente al colector; están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno (Grajales S. , 2006).

Las diferentes actividades productivas y domésticas producen grandes cantidades de aguas residuales, las cuales contienen una diversidad amplia de contaminantes; estas aguas deben ser procesadas en las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales PTAR para su reúso o disposición con una calidad mayor (Grajales S. , 2006). En el tratamiento de aguas residuales, se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos:

2.4.1.1. Tratamiento preliminar:

De acuerdo con (Porta, 2003) está destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre- aireación. (Herrera, 2000) menciona que debe realizarse por

medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas negras y que pueda interferir los procesos de tratamiento. Debe cumplir dos funciones:

- Medir y regular el caudal de agua que ingresa al sistema, con estructuras como canaletas Parshall, vertederos, piezómetros, etc.
- Extraer los sólidos flotantes grandes y la arena, a través de tamices o cribas.

2.4.1.2. Tratamiento primario:

Comprende procesos de sedimentación y tamizado. Tiene como objetivo remover los sólidos en suspensión por medio de un proceso de sedimentación simple. Para complementar este proceso se pueden agregar compuestos químicos con el objeto de precipitar el fósforo, los sólidos en suspensión muy finos o aquellos en estado de coloide (Hilbert, 1999).

2.4.1.3. Tratamiento secundario:

Comprende procesos biológicos aerobios, anaerobios y fisicoquímicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), según Escobar (2011). Tiene como objetivo remover los sólidos en solución y en estado coloidal mediante un proceso de naturaleza biológica seguido de sedimentación. Este proceso biológico es un proceso natural controlado en el cual participan los microorganismos presentes en el agua servida más los que se desarrollan en el estanque secundario. Estos microorganismos, principalmente bacterias, se alimentan de los sólidos en suspensión y estado coloidal produciendo en su degradación en anhídrido carbónico y agua, originándose una

biomasa bacteriana que precipita en el estanque secundario (Celis, 2009).

2.4.1.4. Tratamiento terciario o avanzado:

Está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos. (Celis, 2009) comenta que tiene como objetivo remover algunos contaminantes específicos presentes en el agua servida tales como los fosfatos que provienen del uso de detergentes domésticos e industriales y cuya descarga en curso de agua favorece la eutrofización, es decir, un desarrollo incontrolado y acelerado de la vegetación acuática la que agota el oxígeno, mata la fauna existente en el sector. Dentro del tratamiento de las aguas de desecho para la eliminarles los nutrientes están la precipitación, la sedimentación y la filtración. No todas las plantas tienen esta etapa ya que dependerá de la composición del agua servida y el destino que se le dará.

2.4.2. Tipos de lodos

Depende del nivel de tratamiento de las aguas residuales:

2.4.2.1. Lodos de decantación primaria:

Provenientes de decantación primaria son generalmente de consistencia limosa y color de marrón a gris, volviéndose sépticos y dando mal olor con gran facilidad.

2.4.2.2. Lodos de precipitación química:

Son generalmente de color negro y su olor, aunque puede llegar a ser desagradable, es menor que los de decantación primaria típica y la velocidad de descomposición de los lodos es mucho menor.

2.4.2.3. Lodos de tratamiento secundario:

Son de color marrón, relativamente ligeros, y por estar bien aireados en el caso general, no suelen producir olor con tanta rapidez como los fangos primarios; por no estar suficientemente aireados, su color se oscurece y producen un olor tan fuerte como el lodo primario.

2.4.2.4. Lodos provenientes de lechos bacterianos:

Color marrón y no producen olores molestos si están frescos; se degradan a una velocidad menor que los lodos procedentes del sistema secundario de lodos activados, salvo en el caso de que contengan una preponderancia de organismos superiores (por ejemplo, gusanos), en cuyo caso pueden llegar a dar malos olores muy rápidamente.

2.4.2.5. Lodos digeridos:

Color entre marrón oscuro y negro, y contienen cantidades relativamente grandes de gas, si está bien digerido prácticamente no produce olor o produce un olor relativamente débil que no es desagradable.

2.4.3. Clasificación de los lodos

Los lodos se clasifican principalmente de acuerdo al contenido de metales pesados y a su calidad microbiológica:

2.4.3.1. Lodo peligroso:

Presencia de contaminantes tóxicos de acuerdo a lo establecido por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) en sus apartados 260 y 261 (EPA, “Aplicación de biosólidos al terreno”, 2000).

2.4.3.2. Lodo no peligroso:

Los lodos no peligrosos pueden ser de Buena Calidad o de Mala Calidad según su contenido de metales pesados en forma más

rigurosa según la normatividad propuesta por la EPA, “Concentración del componente para una calidad excepcional”.

Tabla 2.1 Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA.

ELEMENTOS	Valores Límite (mg/Kg mat. Seca)	Tasa de carga acumulativa del elemento, (Kg/Ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional, (mg/Kg)	Tasa de carga anual del elemento
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	-	-	-	-
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	100	100	5.0
Zinc				

(EPA, “Aplicación de biosólidos al terreno”, 2000)

De acuerdo con los límites de calidad microbiológica de la EPA presentados en la Tabla 2.2 un lodo de buena calidad, se clasifica como Lodo Clase A o Lodo Clase B:

- **Lodo clase A:** no contienen niveles detectables de agentes patógenos, satisfacen los requerimientos estrictos de reducción de atracción de vectores y niveles bajos de contenido de metales y sólo tienen que solicitar permisos para garantizar que estas normas tan estrictas han sido cumplidas.

- **Lodo clase B:** reciben tratamiento, pero aún contienen niveles detectables de agentes patógenos; estos tienen restricciones al acceso público. La planeación del manejo de nutrientes garantiza que se apliquen biosólidos a la tierra agrícola en las cantidades y las calidades apropiadas.

Tabla 2.2 Límite de calidad microbiológica de lodos

PARÁMETRO	LODO CLASE A	LODO CLASE B
Coliformes Fecales o Salmonella	<1000 NMP/100 mL o UFC/g <3 NMP/4g	<2000000 NMP/100 mL o UFC/g
Huevos de helminto	1 huevo viable/4 g	-

(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno", 2000)

La EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) publicó la reglamentación concerniente a los sólidos biológicos, su uso y disposición bajo el Code of Federal Regulations (CFR), 40 CFR parte 503 de 1993. Para la aplicación en suelo, la reglamentación ofrece límites numéricos a 10 metales, guía en la práctica de manejo, requerimientos para el monitoreo, almacenamiento de registros y su publicación. Aspectos:

- Límite de metales.
- Prácticas de manejo.
- Alternativas para la reducción de organismos patógenos.
- Reducción de vectores.
- Restricciones para su disposición en suelos.

2.4.4. Mecanismos para tratamiento de lodos

La reglamentación que propone una clasificación de los lodos según su caracterización microbiológica, plantea mecanismos de tratamiento de los mismos para mejorar su calidad microbiológica, proporciona información sobre métodos analíticos y procedimientos de muestreo es el Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos residuales (Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge). EPA/625/R-92/013 de 1999. (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503. Los procesos de tratamiento del lodo son clasificados en cuanto a su capacidad de remoción de organismos patógenos en Procesos de Reducción Avanzada de Patógenos (PFRP) y Procesos de Significativa Reducción de Patógenos (PSRP).

Los procesos reconocidos por la EPA como Procesos de Significativa Reducción de Patógenos PRSP son:

2.4.4.1. Secado:

El lodo de agua residual es secado al aire, durante un mínimo de tres meses. Dos de los tres meses a una temperatura media diaria ambiente superiora 0°C.

2.4.4.2. Estabilización térmica:

Un lodo resultante de estos procesos de tratamiento, es denominado tipo A, según las condiciones especificadas por la norma EPA 40, el contenido de bacterias patogénicas, virus entéricos y huevos viables de helmintos son reducidos a los niveles detectables indicados en la normatividad. Estos lodos pueden ser aplicados en suelo para uso agrícola sin restricciones. Este lodo debe ser monitoreado para parámetros de huevos de helminto, coliformes fecales, Salmonellasp., asegurando que no ocurra recrecimiento.

2.4.4.3. Compostaje:

Constituye una forma viable de estabilización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales - PTAR; es un proceso en el cual la materia orgánica se degrada biológicamente hasta lograr un producto final estable. Aproximadamente del 20 al 30% de los sólidos volátiles son convertidos a dióxido de carbono y agua; adicionalmente las temperaturas alcanzadas pueden llegar a valores entre 50 °C y 60 °C que destruyen los organismos patógenos. El proceso de compostaje facilita su disposición final al poderlos aplicar directamente en áreas de cultivo para incrementar la producción y enriquecer o mejorar la calidad y estructura del suelo, mejorando el aporte de carbono, nitrógeno, azufre, potasio y fósforo y algunos micro- nutrientes como zinc, hierro y cobre que propician una situación favorable para el desarrollo de las plantas, sin embargo, su aplicación puede verse limitada por la presencia de algunos compuestos como los metales pesados presentes en los lodos (Fernández A. R García R. R., 2006).

2.4.4.4. Digestión aerobia:

El lodo de agua residual es agitado con una cantidad de oxígeno necesaria para mantener las condiciones aerobias, el tiempo medio de retención es de 40 días a 20 °C y de 60 días a 15 °C.

2.4.4.5. Digestión anaerobia:

Realizada en ausencia de oxígeno con tiempo medio de retención de 15 días, entre 35 °C – 55 °C y 60 días a 20 °C. En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en el en ausencia de oxígeno molecular; la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y secundarios se convierte en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) principalmente. El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado, los lodos se introducen

en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen dentro de estos tanques durante períodos de tiempo considerables; el lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos (Ortiz, Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, 1995).

Los dos tipos de digestores más empleados son los de alta y baja carga; en el proceso de digestión de baja carga, no se suele calentar ni mezclar el contenido del digestor, y los tiempos de retención varían entre 30 días y 60 días. En los procesos de digestión de alta carga el contenido del digestor se calienta y mezcla completamente; el lodo se mezcla mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración, y se calienta para optimizar la velocidad de digestión, el tiempo de retención generalmente es menor a 15 días. La combinación de estos dos procesos se conoce como proceso de doble etapa, el primer tanque se utiliza para la digestión, y se equipa con dispositivos para el mezclado. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y concentración del lodo digerido, y para la formación de un sobrenadante relativamente clarificado.

2.4.4.6. Tratamiento químico:

Se adiciona cal al lodo para elevar el pH, la cal es el reactivo que más se utiliza por su reducido costo y alcalinidad, realiza principalmente una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas; la estabilización alcalina pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y mantenerlo durante 72 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; adicionalmente, este valor de pH sobrepasa

los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos (EPA, “Aplicación de biosólidos al terreno”, 2000).

Los criterios de selección de la cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)₂) están en función también de aspectos específicos relacionados con el sitio de aplicación y aspectos técnicos y económicos; dentro de los primeros se encuentran la facilidad de adquisición, calidad del material, riesgos y requisitos de manipulación y dentro de los segundos están los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, costos del producto y costos asociados a su manipulación. El propósito principal de la estabilización alcalina es la reducción de patógenos a niveles por debajo del límite de la norma, que permitan su disposición segura o su uso en la agricultura sin restricciones (Celis, 2009).

Los lodos generados por estos procesos, son clasificados según las condiciones especificadas por la norma EPA 40; la selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y, la situación financiera en cada caso (Hilbert, 1999).

2.4.5. Factores limitantes en los lodos

2.4.5.1. La concentración de metales pesados

Entre los metales pesados existentes, algunos son micronutrientes esenciales para las plantas como el Cu y el Zn, pero otros como Cd, Pb, Cr, Ni, Hg y Co, no lo son y pueden, a partir de una determinada concentración, resultar tóxicos para algún componente de la cadena trófica suelo-planta-animal-hombre. Algunas de las características de los metales pesados resumidas por (Hernández Lehmann, 2002) se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características de los metales pesados

Metal	Características
Arsénico	Metaloides de amplia distribución, se emplea como conservador de la madera, en plaguicidas y en la fabricación de algunos medicamentos. En los cuerpos de agua se acumula en la cadena trófica, su ingestión, aun en dosis bajas, produce desórdenes gastrointestinales, afectación del tejido dérmico y alteraciones del sistema nervioso central.
Plomo	Elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, las actividades humanas como la fabricación de pinturas, insecticidas, vidrios y baterías eléctricas, además como antidetonante de la gasolina, provocan emisiones peligrosas al ambiente. El plomo afecta a los microorganismos retardando la degradación de la materia orgánica. En los animales superiores afectan los glóbulos rojos, hígado y riñones, causando gran diversidad de padecimientos.
Níquel	Se utiliza como catalizador en la industria metalúrgica y en la fabricación de cerámica. Inhibe la actividad biológica de los microorganismos. En el hombre afecta el pulmón y produce
Zinc	Se usa en la metalúrgica como recubrimiento de otros metales; no es muy tóxico.
Cadmio	Subproducto de la explotación de otros metales como el cobre, zinc y plomo. Se utiliza en el electroplateado, fabricación de pinturas y plásticos y, en la fabricación de baterías. Su forma tóxica es el ion Cd^{2+} su acumulación afecta hígado y riñones.
Cobre	Elemento muy abundante en la naturaleza, es un micronutriente esencial, en dosis
Cromo	Se utiliza en la industria del cromado, fabricación de acero y curtido de pieles.
Mercurio	Es uno de los metales más peligrosos, se usa en la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos en la industria del papel y en la agricultura. Su ingestión altera el sistema nervioso.
Selenio	Se considera un no metal. Normalmente se produce durante el refinamiento del cobre o la creación de ácido sulfúrico. A pesar de que es tóxico en grandes dosis, es un micronutriente esenciales en el cuerpo.

(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno", 2000)

2.4.6. Biosólidos

2.4.6.1. Concepto de biosólido

Sustancias sólidas sedimentables y decantables con un alto contenido de agua, biológicamente inestables, que contienen

partículas minerales inertes y materia orgánica fermentable, sobre los que se absorben y adsorben sales minerales y algunos patógenos (bacterias, virus, parásitos, etc.), que se encuentran inexorablemente en las aguas de desecho. (Celis, 2009)

Los biosólidos son residuos sólidos, semisólidos y líquidos generados durante el tratamiento de desechos sanitarios producidos por el tratamiento de aguas residuales. El término fue introducido por la industria de tratamiento de aguas residuales en 1991 para describir los residuos o sólidos generados durante el tratamiento de éstas (de aquí, bio-sólidos). La U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) adoptó el término “biosolids” para distinguir la alta calidad de los lodos tratados con los no tratados o que contienen excesivas concentraciones de potenciales contaminantes y patógenos; por lo tanto los lodos residuales deben ser procesados para cumplir con los estándares de uso benéfico de la USEPA para que puedan ser llamados biosólidos (Flores, 2005).

Los biosólidos son como los residuos sólidos remanentes del proceso de tratamiento de aguas de desecho, que están compuestas por materia orgánica residual no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables o potencialmente tóxicos y sales inocuas que se han removido durante el tratamiento. (Ortiz, Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, 1995).

Como ya se ha mencionado anteriormente, la norma NOM-004-SEMARNAT- 2002 define los biosólidos como lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales que, por su contenido de nutrientes y por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovecharse (Norma Oficial Mexicana, 2003).

2.4.6.2. Aprovechamiento de los biosólidos

El aprovechamiento, es el uso de los biosólidos como abonos, mejoradores o acondicionadores de los suelos por su alto contenido de materias orgánicas y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio (Norma Oficial Mexicana, 2003).

El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo (según el contenido en metales pesados) y clase (según el contenido en patógenos y parásitos), como se especifica en el Tabla 2.4 y con un contenido de humedad de hasta el 85% (Norma Oficial Mexicana, 2003).

Tabla 2.4 Aprovechamiento de Biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
excelente	A	<ul style="list-style-type: none">• Usos urbanos con contacto publico directo durante sus aplicaciones.• Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none">• Usos urbanos sin contacto publico directo durante su aplicación.• Los establecidos para clase C.
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none">• Usos forestales• Mejoramiento de suelos• Usos agrícolas

(EPA, Calidad de Biosolidos, 2000)

2.4.6.3. Importancia de los biosólidos en los agroecosistemas

Tradicionalmente, en México, la disposición de lodos ha consistido en depositarlos en rellenos sanitarios, en terrenos aledaños a las plantas de tratamiento de aguas residuales, en tiraderos de basura a cielo abierto, descargarlos al drenaje o incinerarlos (California Plant Health Association, 2004). Pero desde sus inicios, la aplicación al suelo ha sido la opción más difundida para la disposición de los biosólidos.

Según Castellanos (2000), los biosólidos tienen valor fertilizante y mejoran las propiedades físicas y químicas de los suelos. También (Fernández A. R García R. R., 2006) Justifican este uso de los biosólidos como mejorador del suelo y como fuente para la nutrición vegetal.

Aun así, el valor de los lodos residuales como fertilizantes no compensa los costos de tratamiento y transportación. Su valor real debe ser considerado en términos de restablecer un ciclo sostenible de nutrientes en los suelos y proteger los cuerpos de aguas de la contaminación y la eutrofización (Ortiz, Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, 1995).

Para el Comité de Uso de Biosólidos, el uso de este material en la agricultura ofrece un manejo ambientalmente seguro a la alternativa de eliminación de éste, ya que se reduce la cantidad de material que entraría al rellano sanitario o a un incinerador (Hilbert, 1999).

2.4.7. Características de los biosólidos

García (2009), indica que las características de los lodos son consecuencia del uso que se haya dado a las aguas y de los sucesivos procesos de depuración a los que se han visto sometidos y del tratamiento que les hayan dado a los lodos para su estabilización.

2.4.7.1. Características físicas

Los lodos de origen primario y secundario se presentan en forma de un líquido que contiene partículas heterogéneas en suspensión. Su volumen representa del 0,05 al 0,5% del volumen de agua tratada para los lodos frescos, mientras que es ligeramente inferior para los lodos activados y otros procedimientos biológicos. La floculación del

agua aumenta el volumen de los lodos, y sobre todo su peso, en aproximadamente un 10%.

El color de los lodos varía entre el pardo y el gris, y su olor es a menudo desagradable, puesto que se trata de productos fácilmente fermentables y existe un inicio de descomposición. Los principales parámetros físicos son: contenido de materia seca, contenido de materia volátil, contenido de agua intersticial, viscosidad, carga específica, resistencia específica, compresibilidad y poder calórico.

2.4.7.2. Características químicas

La composición química de los biosólidos varía dependiendo de su origen y el método de tratamiento que se les proporcione (Girovich, 1996). Los principales parámetros químicos son:

- **Materia Orgánica:** Corresponde a la materia volátil, y varía de 60 a 85% de la materia seca.
- **Elementos Nutrientes:** Se trata del contenido de nitrógeno total, fósforo y potasio. Son sustancias que favorecen el crecimiento de las plantas y que tienen mucha importancia para la utilización agrícola de los lodos.
- **Microcontaminantes Orgánicos:** Son sustancias que pueden tener una acción negativa sobre el tratamiento de los lodos y sobre su utilización en la agricultura. Se trata generalmente de productos de síntesis química que se utilizan comúnmente y que se encuentran en las aguas de desecho domésticas e industriales. Se hallan particularmente contenidos importantes de detergentes y medicinas (especialmente antibióticos que actúan sobre la flora de los lodos).
- **Microcontaminantes Minerales:** Los lodos contienen numerosos elementos minerales, algunos de ellos tienen una

acción positiva sobre las plantas o sobre los animales (Fe, Cu, Mn, Zn), sin embargo, otros tienen una acción negativa sobre el uso posterior de las aguas negras (Pb, Cd, Hg y Ni). Resulta pues, indispensable conocer el contenido mineral de los lodos antes de su utilización en la agricultura.

2.4.7.3. Características biológicas

Las aguas residuales contienen una flora y una fauna variadas que se encuentran en parte en los lodos. Los principales organismos presentes en los lodos son:

- **Bacterias:** Se encuentran diferentes tipos de bacterias en los lodos, una parte de estas bacterias es de tipo fecal y algunas provienen de portadores de gérmenes; por consiguiente, pueden ser patógenas. Las bacterias se pueden dividir en cuatro clases: aerobias estrictas, aerobias facultativas (ej. Aeromonas), anaerobias facultativas (ej. Lactobacillus) y anaerobias estrictas (ej. Clostridium). El tratamiento biológico de los lodos favorece el desarrollo de ciertas bacterias en detrimento de las otras y su almacenamiento permite a los organismos anaerobios desarrollarse.
- **Virus y parásitos:** Se encuentran enterovirus, adenovirus y reovirus absorbidos sobre la materia sólida de los lodos. Respecto a parásitos, hay numerosos, de origen fecal o telúrico; se trata de huevos de áscaris, tricocéfalos, helmintos, tenias o fasciolas hepáticas, o de formas enquistadas de Giardia o tricomonas. Su eliminación es muy difícil puesto que estos parásitos toman una forma vegetativa cuando las condiciones les son hostiles, mientras que se

desarrollan cuando se encuentran en los animales de sangre caliente o en el hombre.

- **Hongos y algas:** Respecto a hongos, se trata esencialmente de las levaduras y los saprófitos que están normalmente presentes en el aire; por lo general no son patógenos para los animales y el hombre, excepto algunos que pueden llegar a serlo cuando las condiciones son favorables, especialmente los hongos oportunistas; por el contrario, ciertos mohos son fitopatógenos y deben ser eliminados antes de la utilización de los lodos en la agricultura, como por ejemplo los del género *Fusarium*. No se encuentran algas en gran cantidad en los lodos primarios y secundarios; por el contrario, en las lagunas naturales, gran parte de los lodos están constituidos por detritus de algas.
- **Macrofauna:** En lodos activados o en los lechos bacterianos, además de los patógenos mencionados anteriormente, se encuentran gusanos, larvas de insectos, crustáceos y arañas pequeñas.

2.4.8. Biosólidos: beneficios y riesgos

2.4.8.1. Beneficios

A corto plazo, la adición de lodos residuales puede mejorar la productividad del suelo cultivable, ya que por el alto contenido de MO (60 – 85% en materia seca), se facilita la disponibilidad, suministro inmediato y transporte de nutrientes necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas (principalmente N, P y nutrientes menores).

- **Materia Orgánica:** La MO contenida en los biosólidos ayuda a retener agua en el suelo. Esta retención extra de agua puede reducir la frecuencia de riego y facilita la conservación de agua. Los biosólidos, gracias a la MO, también son

beneficiosos para mejorar la estructura del suelo. La materia orgánica ayuda a mantener la porosidad del suelo, cosa que permite el paso del agua y aire a través del suelo. Esta porosidad puede perderse a través del uso excesivo del suelo, y es necesario mantener el suelo rico en oxígeno para las raíces de la planta.

- **Nitrógeno:** Es un nutrimento esencial en la nutrición de las plantas, que es principalmente absorbido como amonio y nitrato. En los biosólidos está en forma de amonio, nitratos y nitrógeno orgánico. El nitrógeno del amonio y nitratos está listo para ser usado por la planta. El nitrógeno orgánico es liberado lentamente durante muchos meses, proveyendo continuamente a los cultivos y minimizando el movimiento potencial a las aguas del subsuelo.
- **Fósforo:** Es un nutriente básico para el crecimiento de la planta y está presente en todos los biosólidos en diferentes concentraciones.
- **Micronutrientes:** Se incluyen diferentes sales y metales, necesarios para el crecimiento de la planta y presentes en los biosólidos en diferentes cantidades.

A largo plazo, el biosólido entrega nutrientes de forma lenta pero continua, y mejora las propiedades físicas del suelo, tales como estructura, permeabilidad y poder de amortiguamiento.

Al respecto, Hall et al, (1986) mencionan que la aplicación de biosólidos como enmienda orgánico-mineral para la recuperación de suelos degradados, implica dos soluciones ambientales: i) una alternativa de bajo costo para su aplicación y ii) la adición al suelo de un material orgánico que libera nutrientes y mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

2.4.8.2. Riesgos

El aprovechamiento de los lodos procedentes de PTARs para la obtención de cultivos causa preocupación en lo que respecta a la contaminación ambiental y sanitaria.

Dentro de este contexto se entiende como contaminante a una sustancia orgánica, inorgánica, una combinación de ambos tipos u organismos patógenos que después de su descarga a través de diversas vías de exposición ingestión o asimilación por un organismo directamente del medio ambiente o indirectamente por ingestión en la cadena alimenticia puede causar muerte, enfermedades, mutaciones genéticas, entre otros (Felipó, 1995).

Felipó (1995) y González (2000) mencionan que, en la actualidad, el aprovechamiento de lodos residuales y biosólidos en suelos agrícolas representa una fuente contaminante debido a la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, organismos patógenos y nutrimentos en exceso.

- **Microcontaminantes:**

Los lodos contienen, en poca cantidad, varios productos que pueden ser tóxicos para las plantas, presentar inconvenientes o hasta ser peligrosos para el hombre a través de las plantas. Estos Microcontaminantes pueden ser divididos en orgánicos y minerales (Gamrasni, 1985).

Dentro de los microcontaminantes orgánicos se encuentra una serie de sustancias como AOX (halógenos adsorbidos y enlazados orgánicamente), PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos), PCB (bifenilos policlorados), LAS (aquilbencenos sulfonatos lineales), DEHP (etil exil ftalato), NPE (nonilfenol etoxilato) y PCDD/PCDF (policlorodibenzodioxina y policlorodibenzofuranos) (González, 2000).

Por otro lado, los microcontaminantes minerales son esencialmente metales pesados (Gamrasni, 1985). Los metales pesados contenidos en los lodos, como elementos potencialmente tóxicos (EPT), representan la mayor limitante en su uso en agricultura. Si se aplican cantidades excesivas de EPT en el suelo, éstos pueden contaminar las aguas subterráneas, producir toxicidad en plantas, y tener efectos adversos en los microorganismos del suelo o acumularse en los tejidos de la planta. Los animales herbívoros pueden acumular metales pesados y pasarlos a otros animales que coman estos últimos contaminados. Omran y Waly (1988), Alloway (1995) y García (2000) señalan que los lodos pueden contener EPT que representan una amenaza para la salud humana, como Cd, Pb y Hg; y otros fitotóxicos cuando aumenta excesivamente su concentración en el suelo, como B, Cu, Ni, Zn y Mn.

- **Microorganismos Patógenos:**

Los lodos, al igual que los suelos, contienen un número muy elevado de gérmenes inofensivos; pero junto con éstos, en los lodos, están concentrados microorganismos de origen fecal que son a priori dañinos para el hombre y los animales (Gamrasni, 1985). Es necesario que los biosólidos sean especialmente tratados o desinfectados para destruir estos patógenos, que se presentan en concentraciones significativas de bacteria, virus y parásitos.

Por lo anterior, para que cualquier vertido de lodos sea seguro, se precisa la eliminación o una inactivación suficiente de agentes patógenos (Bontoux et al., 2002). Además, esta cuestión de salud pública puede prevenirse con un control apropiado del acceso del público a las zonas de aplicación, y restricciones en el uso y siembra de ciertos cultivos en las áreas tratadas.

Así, la aplicación de estos lodos puede suponer una limitación debido al tiempo de espera para la cosecha o para la alimentación del ganado (Tabla 2.5). Este periodo es necesario para reducir el número de patógenos que permanecen en los biosólidos después de la estabilización (Bigeriego, 1993; Lovell, 1996).

Tabla 2.5 Restricciones para la aplicación de biosólidos, relacionadas con la salud pública y los patógenos (Lovell, 1996).

CULTIVO	TIEMPO DE ESPERA PARA LA COSECHA DESPUES DE LA APLICACION
Heno	3 semanas
Pasto para porcinos, ovinos y caprinos	2 meses
Pastos comerciales	6 meses
Frutas pequeñas	15 meses
Árboles frutales y vid	3 meses
Legumbres	12 meses
Tabaco	No se recomienda aplicar
Jardines residenciales	No se recomienda aplicar
Campos de golf y recreación	Se recomienda aplicar solo si hay estabilización adicional aparte de la digestión que se usa para reducir el contenido de patógenos.

(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno" , 2000)

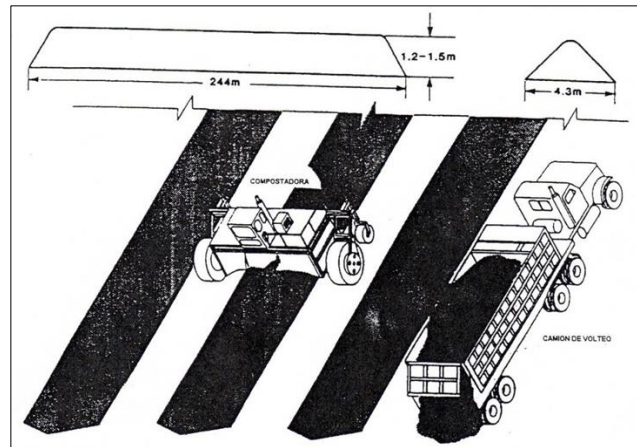
2.4.9. Sistemas de composteo con biosólidos

2.4.9.1. Composteo en filas o camellones

Es el más sencillo, en él se colocan la mezcla de biosólidos y el material acondicionador o aditivo, en grandes filas que después se voltean usando equipo mecánico. Hay dos tipos de proceso, el convencional y el aireado. En el convencional, los biosólidos y el aditivo se colocan dentro de camiones de volteo que al descargar van formando las filas o camellones. Después los materiales se mezclan

usando equipo móvil de composteo. Este viaja a lo largo del camellón, mientras que un sistema de alta velocidad con dientes fijos u oscilatorios va mezclando los materiales como se muestra en la figura 2.1.

Figura 2.1 Elaboración de las filas o camellones por el método convencional.



(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno" , 2000)

La longitud mínima del camellón puede ser de 30 m, mientras que la máxima puede ser hasta 245 m. La altura promedio del camellón va de 1,2 a 1,5 m, máximo 2 m, y el ancho puede ser hasta 4,2 m. Después de construida la composta requiere de 30 a 50 días o hasta más para completar el ciclo, esto depende del clima y la estación del año. La lluvia y el frío retardan el proceso. El camellón debe voltearse al menos tres veces por semana. El volteo contribuye con algunos requerimientos del proceso tales como:

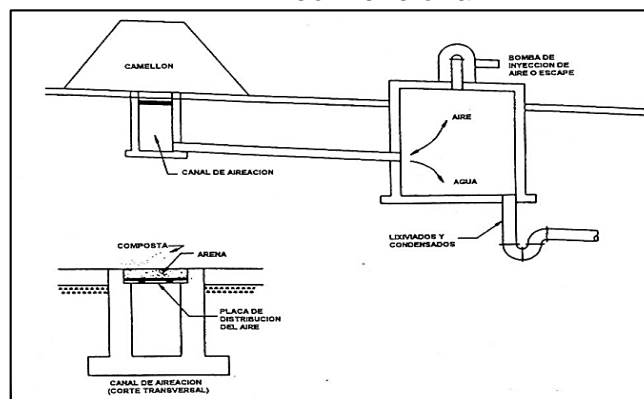
- Reducción del tamaño de las partículas
- Mezcla y homogeniza los materiales
- Incrementa la porosidad y favorece las condiciones aerobias
- Permite el secado al incrementar la evaporación
- Expone todo el material a la temperatura interior para inactivar eficientemente los patógenos

Si la composta está bien construida y recibe los volteos necesarios, en pocas semanas se alcanzarán o rebasarán los 55 °C, permaneciendo así durante casi todo el proceso. Es útil para matar patógenos y deshidratar la composta. Los bajo niveles de nutrimentos y humedad ocasionan que la actividad microbiana disminuya al final del proceso y causa decremento de la temperatura. El secado ocurre por el movimiento natural del aire a través del montón y los volteos, lo que evapora la humedad (Rendón, 2003).

2.4.9.2. Composta aireada en camellón

Se le proporciona aireación mecánica, además de volteos periódicos. Los camellones se construyen a lo largo de canales de aireación o túneles que suministran aire por la base del camellón. El canal de aireación distribuye el aire a lo largo de la composta ayudado por una placa de aireación, mientras que otra red de tubos colecta los lixiviados y condensados del proceso. El buen funcionamiento depende en gran medida de que se coloque una capa de arena sobre la placa de aireación, cuidando que no tape los orificios por donde sale el aire, y reemplazándola aproximadamente cada seis meses

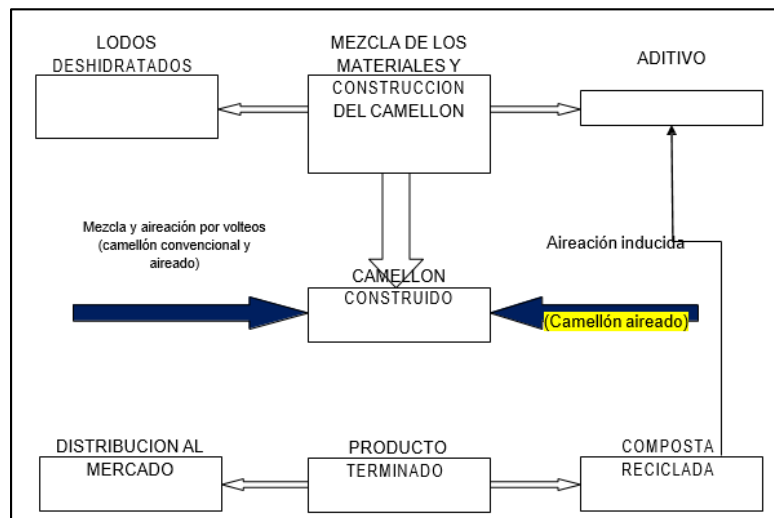
Figura 2.2 Elaboración de las filas o camellones por el método convencional.



(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno", 2000)

Los sistemas de aireación pueden ser de dos tipos: con ventilación o presión y con ventilación al vacío. La ventaja de este último es que recoge los olores desagradables para darles tratamiento antes de liberarlos al ambiente. En algunas plantas de composteo, se utiliza este sistema los primeros 10 o 15 días del proceso para capturar los gases y olores desagradables que se desprenden; después se utiliza ventilación a presión para propiciar el secado. La ventaja principal de este método es que las condiciones aeróbicas están garantizadas durante todo el proceso.

Figura 2.3 Esquema general del proceso de composteo en camellones



(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno", 2000)

2.4.9.3. Composteo en pila estática

La mezcla se prepara cuidando el contenido de sólidos (mínimo 40%), para crear una masa con suficiente porosidad que permita un flujo uniforme de aire a través de la pila. Los aditivos o acondicionadores más comunes son las astillas de madera, ramas, cortezas, hojas, carbón, aserrín y ceniza. Una vez terminado el proceso, el aditivo se recupera con el cribado y se vuelve a utilizar para preparar la mezcla. Una mezcla inadecuada da lugar a

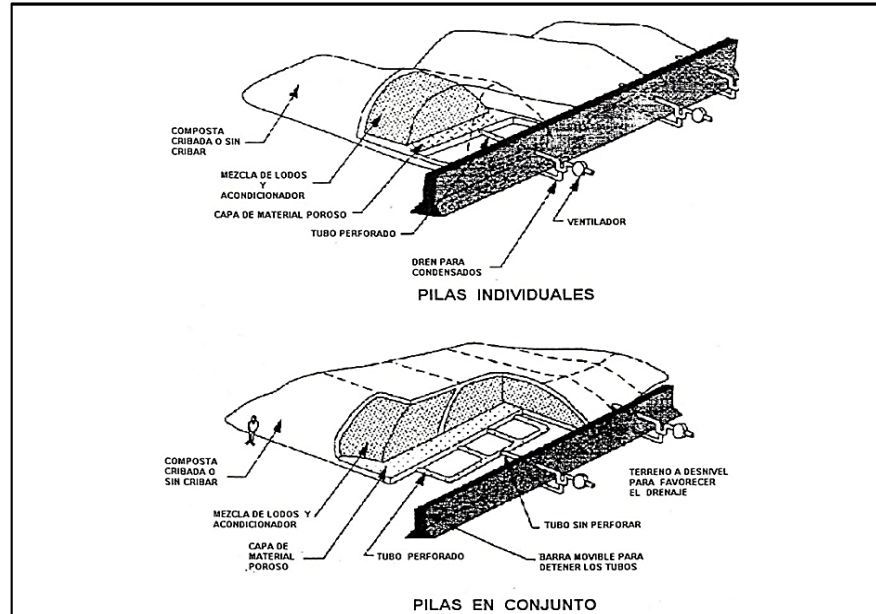
condiciones anaerobias y olores desagradables en porciones de la pila, además de que no se alcanzan temperaturas suficientemente altas para destruir a los patógenos.

Se agrega aditivo fresco o reciclado a los biosólidos y se mezclan juntos, usando equipo móvil o estacionario. Una vez hecha la mezcla, se coloca sobre la placa de aireación que, al igual que en el método anterior, consiste en una red de tubos o conductos conectados a bombas de aireación. Se coloca una capa de 30 o 45 cm de espesor de astillas de madera u otro material poroso, sobre la placa de aireación, y arriba de esta se pone la mezcla. Conformada la pila, se cubre con una capa de 30 a 50 cm de espesor de composta cribada o sin cribar. Esta capa ayuda a que la temperatura se eleve, a contener la salida de olores desagradables y previene los problemas de olores.

La ventilación se provee con aire a presión que pasa por los tubos y la placa de aireación y penetra de abajo hacia arriba de la pila (modo positivo), o por difusión del aire impulsado con ventiladores de arriba hacia abajo a través de la pila (modo negativo). Durante la primera se debe mantener una cantidad de aireación que permita alcanzar de 55 a 60 °C de temperatura para eliminar patógenos; después de 7 o 10 días de composteo, se debe mantener una temperatura de 55 °C por lo menos durante tres días consecutivos. Esto servirá para acelerar el secado de la composta.

Hay dos maneras de organizar las pilas en las plantas de composteo; pilas individuales o pilas en conjunto (Figura 2.4). Las ventajas de las pilas en conjunto son que requiere menos terreno, flujo de aire y la temperatura son más uniformes, y se maneja menos cantidad de material para cubrir la pila. La ventaja de las pilas individuales es que se pueden manejar biosólidos con diferentes características.

Figura 2.4 Tipos de sistemas de composteo en pila estática.



(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno", 2000)

2.4.10. Factores que Influyen sobre la evaluación del proceso de compostaje con biosólidos

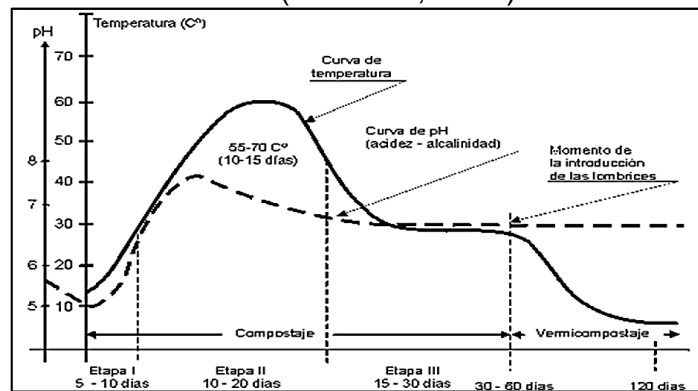
2.4.10.1. Sustrato

- a) **Naturaleza del Sustrato:** Según sea agrícola, ganadero, forestal, urbano, industrial, etc. La importancia de su origen está en relación directa con las peculiaridades, características físicas y químicas.
- b) **Tamaño de la Partícula:** El tamaño ideal es de 1 a 5 cm. A menor tamaño mayor facilidad para el ataque microbiano y mayor velocidad de transformación. Los residuos líquidos o semilíquidos deben mezclarse con materiales que les aporten mayor porosidad.
- c) **Composición de los Materiales.** Además del carbono y el nitrógeno, otros macro nutrientes, como el fósforo y la mayoría de los micronutrientes, son esenciales para la síntesis de enzimas y el metabolismo microbiano. Tan importante como su cantidad es su equilibrada proporción.

2.4.10.2. El proceso

- a) **Temperatura:** La temperatura del montón varía en función de la actividad microbiana, dividiéndose el proceso en fases: mesófila, termófila, de enfriamiento y maduración. El calentamiento inicial no debe sobrepasar 60-70 °C.
- b) **pH:** Al igual que la temperatura, es un indicador del buen funcionamiento del proceso. El valor óptimo está comprendido entre 5 y 8. Las bacterias prefieren un pH cercano al neutro, y los hongos prefieren pH ácido. En la (Figura 2.5) se presenta una curva de Temperatura y pH del proceso de compostaje donde se puede observar efecto de la temperatura y pH en las diversas etapas que presenta.

Figura 2.5 Curva de Temperatura y pH del proceso de compostaje (Labrador, 2011)



(Colin, 1994)

- c) **Aireación:** Un exceso de ventilación puede provocar el enfriamiento de la masa y el retardo del proceso de compostaje. Poco oxígeno menos del 20% provoca condiciones anaerobias y producción de H₂S y otros productos intermedios fitotóxicos. Entre el 28 y 55% de O₂ en el medio esta al máximo la actividad microbiana.

- d) **Humedad:** La humedad debe ser adecuada durante la etapa de descomposición, actividad preferentemente bacteriana mayor del 35 al 40%; en la etapa de estabilización, actividad preferente de actinomicetos y hongos; la humedad requerida es menor. Si la humedad es escasa, disminuye la actividad microbiana. La óptima está situada entre el 30 y 60%.
- e) **Relación Carbono/Nitrógeno:** Los microorganismos requieren 30 partes de carbono por una de nitrógeno es decir 30/1, estando el óptimo entre 26/35. Si la relación es inferior habrá mayor contenido de nitrógeno, y se producen perdidas del mismo en forma amoniacal; si es mayor, el proceso se hace lento. Si se utilizan lodos, la relación óptima es entre 15 y 20.

2.4.10.3. El tipo de Sistema.

- a) **Sistema Abierto:** Los montones de compost se sitúan al aire, pudiendo realizarse en pilas de composta estática con aireación forzada, pilas de compost con volteo periódico o bien pilas de composta con ventilación forzada y volteos periódicos.
- b) **Sistema Cerrado:** En aparatos especiales para fermentar, reactores verticales u horizontales (Labrador, 2001).

2.4.11. Estabilización alcalina de lodos y/o biosólidos

En el proceso de estabilización alcalina se añaden materiales alcalinos (CaO o Ca(OH)_2) al lodo y/o biosólido en cantidades suficientes como para elevar su pH a 12, al menos durante dos horas. El pH alto inactiva los microorganismos presentes en el lodo y, por consiguiente, estabiliza la materia orgánica. Los inconvenientes de la estabilización con cal, radican en el aumento de la masa de los lodos, significa más lodo para deshidratar y disponer, un costo relativamente alto, y demás, en que el pH alto es una desventaja en la aplicación en terreno de suelos agrícolas. Dentro de las ventajas

de la estabilización con cal se encuentran tiempos de reacción cortos, la simplicidad del proceso y, en donde hay condiciones de suelo ácido, el pH alto del lodo actúa de manera benéfica en la aplicación en suelo.

La cal hidratada, siendo un compuesto básico, eleva el pH de la torta deshidratada por encima de 12,0 y el calor generado en esta reacción química generalmente calienta la mezcla hasta 50° C (122° F). El ambiente de alto pH y de temperatura moderadamente alta es desapropiado para la supervivencia de la mayoría de microorganismos patogénicos (coliformes fecales y huevos de helmintos). Los biosólidos producidos por el proceso atienden a los criterios del lodo "Clase B", determinados por la "Norma 40 CFR part 503" de la EPA.

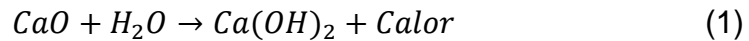
De tres procesos comparados (elaboración de composta, secado con calor y estabilización alcalina), la estabilización alcalina es la que presenta un menor costo unitario. El costo unitario de la elaboración de composta es de 15 a 30% mayor que el costo de la estabilización por cal; y el costo unitario para el proceso de secado con calor es de 55 a 75 % más alto para los mismos volúmenes.

Estudios demostraron que la estabilización alcalina en sistemas abiertos y con dosis de 15% m/m de CaO reducen hasta de 7,4 a 3,5 log en coliformes fecales y de 90 a 22,3 HH viables /g ST, generándose biosólidos clase C de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT- 2002. Por otro lado, con dosis de 30% m/m de CaO se obtuvieron resultados de reducción de 7,4 a 2,29 log en coliformes fecales y de 90 a 9,33 HH viables /g ST, generando biosólidos clase B de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002. Se concluyó que con dosis mayores de 20% m/m se obtienen biosólidos clase B de acuerdo a la normatividad vigente (Méndez et al, 2002).

2.4.12. Química de la estabilización alcalina

2.4.12.1. Generación de calor

La reacción principal del proceso es la del óxido de calcio con el agua, la cual produce hidróxido de calcio y calor. La reacción es:



Esta es considerada como la principal reacción del proceso, ya que la producción de calor favorece el incremento de la temperatura la cual es una variable fundamental para la inactivación de microorganismos (Harrison y Wauford, 1993).

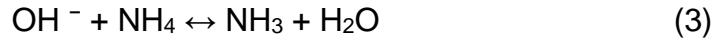
Por otra parte, el dióxido de carbono producido por la descomposición del lodo junto con el de la atmósfera reaccionan con el CaO para producir carbonato de calcio y calor (43,000 cal/g mol) mediante la siguiente reacción:



Esta reacción es altamente exotérmica, sin embargo, incrementa en menor medida la temperatura de los lodos que la reacción debido a la baja concentración de CO₂ en el lodo y en la atmósfera (Girovich, 1996).

2.4.12.2. Olores

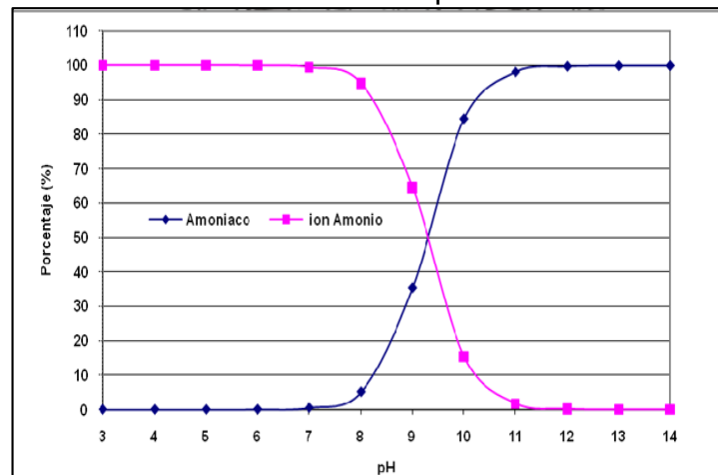
Los olores en los lodos son producidos principalmente por la descomposición de la materia orgánica y son percibidos por el proceso en sistemas abiertos. El incremento del pH por la adición de materiales alcalinos puede provocar la emanación de gases; a altos valores de pH (a pH mayor que 10,5) el gas amoníaco (N-NH₃) puede liberarse a la atmósfera, (Girovich, 1996), según la reacción:



Si el pH de la solución se eleva por arriba de 7, el ión amonio se convierte en amoniaco (NH_3), el cual tiene una densidad menor que la del aire y se volatiliza con facilidad. Las emanaciones producen un olor característico y provocan un problema social y de higiene en las áreas de trabajo. De hecho, este problema es una de las principales desventajas del proceso e incluso puede limitar su uso.

La dependencia del porcentaje de conversión de amonio a amoniaco con el pH, se presenta valores por arriba de 12 durante el proceso, provoca que el hidróxido de amonio (NH_4OH) se transforme en un 99.98% a su forma no ionizada (NH_3) (Figura 2.6). La cantidad de amoniaco producido dependerá del contenido de nitrógeno amoniacal originalmente presente en el lodo crudo y del pH alcanzado durante la estabilización alcalina.

Figura 2.6 Dependencia del porcentaje de conversión de NH_4 a NH_3 con el pH



(Colin, 1994)

De manera contraria al amoniaco, la cal aplicada, también reduce la emisión de sulfuros volátiles y ácidos grasos, disminuyendo los malos olores de forma considerable. El incremento de pH impide la

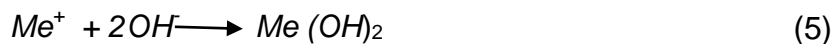
liberación del ácido sulfhídrico (H₂S) mediante la captura de gases de azufre como sulfuros según la reacción.



Finalmente, Vázquez, (1999) menciona que la cal reduce el índice de putrefacción de la materia orgánica por la inactivación o destrucción de los microorganismos, con lo cual se previenen los malos olores y se controlan las fuentes de infección.

2.4.12.3. Inmovilización de metales

El alto pH de los lodos estabilizados origina que los iones de metales solubles (excepto el molibdeno y el selenio) sean precipitados por sus hidróxidos o carbonatos (Sales insolubles) la reacción base es:



Dicha característica minimiza la retención de los metales en algunas especies vegetales y a su vez, reduce el lixiviado de los mismos a los mantos acuíferos.

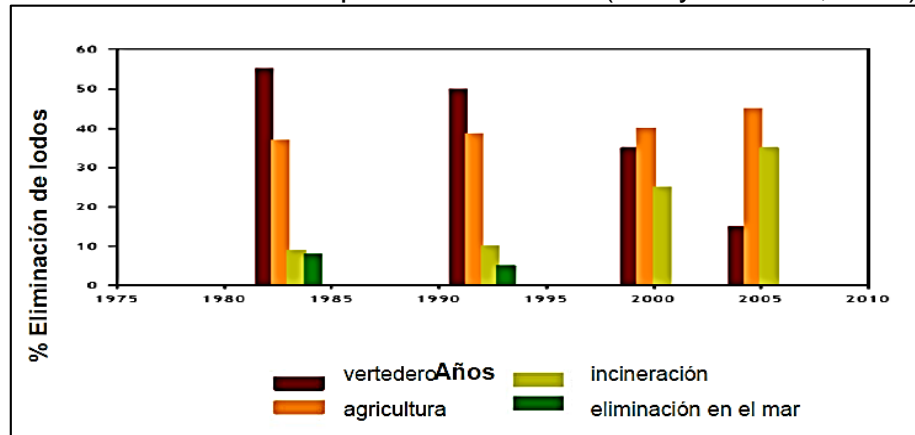
2.4.12.4. Uso de biosólidos en la agricultura

Los lodos residuales han sido usados en la agricultura por muchos años como fertilizante, y en la actualidad existe un creciente interés sobre el aprovechamiento de los mismos en el sector (Figura 2.7). La cantidad necesaria a aplicar en el terreno, las características del lodo y el suelo, el clima y el cultivo que se piensa sembrar son factores influyentes en su aprovechamiento.

La aplicación de biosólidos en suelos es la práctica más empleada en diversos países de La Unión Europea, así como en los Estados Unidos, representando aproximadamente un 45% y 56% respectivamente (Bastian, 1997). Alemania aplica el 45%, Inglaterra

55%, Holanda 54%, Francia 38%, Italia 32% y EEUU 42% de los lodos producidos (Bastian, 1997).

Figura 2.7 Evolución de las rutas de eliminación de lodos en la Comunidad Europea hasta el 2005 (Hall y Dalimier, 1994).



(EPA, "Aplicación de biosólidos al terreno" , 2000)

En América Latina se iniciaron investigaciones en 1995 para ver la posibilidad de su uso en agricultura y, en 1996 surgieron prácticas específicas sobre el reciclaje de lodos y uso agrícola, ya que ofrecen una alternativa ambientalmente aceptable y agrónomicamente favorable de reciclar componentes importantes como MO, macro y micronutrientes (Magnarelli, 2002).

Aunque son muy diversos los posibles usos de los biosólidos en la agricultura, su valor se concreta en tres variantes: como mejorador de suelo, para sustrato de plántulas y como abono por el aporte de nutrientes. El mejoramiento de suelos consiste en la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas (NOM-004-SEMARNAT- 2002).

Respecto a su uso como abono, los lodos contienen una riqueza en N y P varias veces superior a los compuestos orgánicos de origen ganadero. Por otro lado, su uso principal está determinado por el objetivo final de su aplicación. El uso de este material en la

agricultura, ofrece un manejo ambientalmente seguro a la alternativa de eliminación de éstos, por lo tanto, se reduce la cantidad de material que entraría al relleno sanitario o a un incinerador (Salcedo, 2000).

La aplicación de residuos orgánicos urbanos como enmienda orgánico-mineral para la recuperación de suelos degradados implicaría dos soluciones ambientales: a) una alternativa para su aplicación de bajo costo y b) adicionar al suelo un material orgánico que libera nutrientes, con lo que se mejorarían las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. El uso de residuos no está exento de riesgos, debido principalmente a su contenido en metales pesados; si bien en ecosistemas semiáridos la probabilidad de que los elementos trazas se lixivien hacia las aguas subterráneas es muy baja, debido a que estos suelos son generalmente calcáreos y tienen un pH elevado, lo que favorece la inmovilización de dichos metales (Rostagno y Sosebee, 2001).

La concentración y la disponibilidad de metales pesados es probablemente el principal factor que se debe tener en cuenta cuando los biosólidos son aplicados al suelo como abonos o mejoradores del suelo (Walter et al, 2006). Otro problema es la naturaleza fitotóxica de los desechos orgánicos principalmente como resultado de la combinación de varios factores, tales como su alta salinidad y de un exceso de iones amonio, compuestos orgánicos, o cualquier ácido graso de bajo peso molecular que ellos puedan transportar. Todos ellos pueden también inhibir la germinación de las semillas (Wong et al., 2001).

La mejor estrategia para decidir la dosis de aplicación deberá basarse en la composición específica de los biosólidos en cada área, con el propósito de verificar la máxima aplicación de biosólidos. Sin embargo, en muchos casos estos materiales son aplicados a los

suelos sin esta información debido al costo y el tiempo que toma su caracterización (Gálvez-Sola et al., 2011).

En cuanto a la aplicación de estos materiales, Lovell (1996) menciona algunos puntos a considerar, como es la fecha de aplicación, evitando hacerlo cuando se pueda compactar el suelo o cuando los equipos de aplicación puedan tener problemas durante el trabajo.

La cantidad de biosólidos que podrían ser aplicados a un terreno está en función de la cantidad de nutrientes requerido por la vegetación y de la concentración de metales en los biosólidos. En la Tabla 2.6 resume la frecuencia, los periodos y las dosis de aplicación para diversos tipos de áreas.

Tabla 2.6 Escenarios típicos de aplicación de biosólidos

Tipo de área/vegetación	Periodo	Frecuencia de aplicación	Tasa de aplicación
Terreno agrícola Maíz	abril, mayo, luego de la cosecha	Anualmente	5 a 10 toneladas secas / acre
Granos pequeños	marzo a junio, agosto y en el otoño	Hasta 3 veces por año	2 a 5 toneladas secas / acre
Semilla de soya	abril a junio y en el otoño	Anualmente	5 a 20 toneladas secas / acre
Heno	Después de cada poda	Hasta tres veces por año	2 a 5 toneladas secas / acre
Área de bosques	Todo el año	Una vez cada 2 a 5 años	5 a 100 toneladas secas / acre
Terreno de pastoreo	Todo el año	Una vez cada 1 a 2 años	2 a 60 toneladas secas / acre
Áreas de recuperación	Todo el año	Una vez	60 a 100 toneladas secas / acre

(Colin, 1994)

CAPÍTULO III

3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1. Metodología

3.1.1. Método

3.1.1.1. Ubicación geográfica

La planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza” se encuentra ubicada en el sector Palia, distrito y provincia de Concepción entre las coordenadas UTM (WGS-84) 464608 m-E y 8681446 m-N a 3257 m.s.n.m.

Figura 3.1 Ubicación geográfica de la PTAR “Doris Mendoza”



3.1.1.2. Procedimiento para la toma de muestra

Para realizar la toma de muestra de los biosólidos, nos dirigimos hacia los lechos de secado ubicados dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza”, tomando en cuenta el siguiente procedimiento:

- a) Se acondicionaron 3 costales totalmente limpios de una capacidad para 50 kg cada uno.
- b) Al llegar a la planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza”, utilizamos los equipos de protección personal EPP, para evitar cualquier riesgo durante la manipulación.
- c) En los puntos de muestreo, se solicitó la colaboración necesaria del personal técnico para efectuar el muestreo.
- d) Con ayuda del geoposicionador determinamos las coordenadas y altitud del sitio exacto de muestreo.
- e) Se utilizó un balde pequeño totalmente limpio para coger las muestras de biosólidos.
- f) Finalmente, los costales con biosólido fueron amarradas cuidadosamente, para evitar derrames.

Figura 3.2 Realizando la toma de muestra de los biosólidos.



3.1.1.3. Preparación de Ca(OH)_2 para la dosificación

Según el método ASTM C110. Se utilizó la referencia de 100 gramos de CaO para obtener Ca(OH)_2 con 400 mL de agua durante 15 minutos de mezcla.

Se aplicó una regla de tres simples para obtener la cantidad de agua destilada para los distintos tratamientos como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$100g \text{ CaO} \rightarrow 400 \text{ mL de H}_2\text{O} \quad (06)$$

$$1000g \text{ CaO} \rightarrow X \text{ mL de H}_2\text{O} \quad (07)$$

$$X = 4000 \text{ mL de H}_2\text{O} \quad (08)$$

Las mezclas realizadas para los tratamientos fueron las siguientes que se representa en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. mezcla para la obtención de Ca(OH)_2

N°	CaO (Kg)	AGUA DESTILADA (L)
T3	1,0	4
T5	1,5	6
T7	3,0	12

3.1.1.4. Acondicionamiento de las unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron 7 celdas de vidrio de 0,3 m de ancho, 0,4 m de largo y 0,25 metros de alto y espaciamiento entre las unidades de 0,1 metros, las cuales se ubicaron aleatoriamente sobre un piso en cemento. Tanto el biosólido como el material alcalinizante fueron pesados y mezclados previamente para garantizar una mezcla homogénea e inmediatamente después ser dispuestas en cada una de las celdas de acuerdo con las combinaciones según el diseño experimental a distintas proporciones

con porcentaje peso a peso (% p/p), al tratamiento 1 (T1) o blanco, se le adiciono 10 kg de biosólido el cual fue representado por el 100 % de sustrato, al tratamiento 2 (T2) y tratamiento 3 (T3) se le adiciono 9 kg de biosólido los cuales fueron representados por el 92 %, para la adición del material alcalinizante en el caso del tratamiento 2 (T2) se adiciono 1 kg de óxido de cal (CaO) equivalente al 8 % simbolizado en el diseño experimental como cal viva (CV) , para el tratamiento 3 (T3) se realizó la disolución de 1kg de óxido de cal con agua destilada para obtener dióxido de calcio (Ca(OH)₂) equivalente al 8 % simbolizado en el diseño experimental como cal hidratada (CH), al tratamiento 4 (T4) y tratamiento 5 (T5) se le adiciono 8.5 kg de biosólido los cuales fueron representados por el 85 %, para la adición del material alcalinizante en el caso del tratamiento 4 (T4) se adiciono 1,5 kg de óxido de cal (CaO) equivalente al 15 % simbolizado en el diseño experimental como cal viva (CV) , para el tratamiento 5 (T5) se realizó la disolución de 1,5 kg de óxido de cal con agua destilada para obtener dióxido de calcio (Ca(OH)₂) equivalente al 15 % simbolizado en el diseño experimental como cal hidratada (CH), al tratamiento 6 (T6) y tratamiento 7 (T7) se le adiciono 7 kg de biosólido los cuales fueron representados por el 70%, para la adición del material alcalinizante en el caso del tratamiento 6 (T6) se adiciono 3 kg de óxido de cal (CaO) equivalente al 30 % simbolizado en el diseño experimental como cal viva (CV) y finalmente para el tratamiento 7 (T7) se realizó la disolución de 3 kg de óxido de cal con agua destilada para obtener dióxido de calcio (Ca(OH)₂) equivalente al 30 % simbolizado en el diseño experimental como cal hidratada (CH).

Figura 3.3. Acondicionamiento de las 7 celdas de vidrio.



Figura 3.4. Pesado de biosólidos.



Figura 3.5. Pesado del material alcalinizante.



Figura 3.6. Mezcla de biosólido con el material alcalinizante.



3.1.1.5. Monitoreo y análisis de las unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron evaluadas por duplicado. El sustrato evaluado fue el biosólido producido por la PTAR “Doris Mendoza”, el cual fue caracterizado en términos de pH, temperatura, nitrógeno total, potasio total, fósforo total, relación carbono nitrógeno (C/N) y coliformes totales y fecales, se utilizó cal viva (CV) y cal hidratada (CH) como material alcalinizante.

El período de exposición y monitoreo de los tratamientos fueron de 13 días considerando el día de aplicación como el día 0. Los principales parámetros para la identificación de la efectividad del tratamiento fueron el pH, la temperatura, coliformes fecales y totales. Se observó si el pH se mantenía por encima de 12 unidades por un periodo mayor o igual a 72 horas como lo recomienda la EPA (Environmental Protection Agency (EPA), 2003).

La temperatura fue medida directamente en el interior de la celda en 3 profundidades y luego promediada, se observó si la temperatura se mantenía a 52°C por un periodo mínimo de 24 horas. Para los otros parámetros se tomaron porciones de material en 3 puntos aleatorios de las celdas y se mezclaron (aproximadamente 500 g de muestra

para los análisis de materia orgánica y microbiológico) para hacer más representativa la medición.

Cabe resaltar que las muestras para los análisis de materia orgánica fueron enviadas a la Universidad Nacional Agraria La Molina – Facultad de Agronomía – Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes con hoja de referencia N° 56272, y las muestras para los análisis microbiológicos fueron enviados a la Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de ingeniería Química – Laboratorio de análisis microbiológico.

Figura 3.7. Medición de temperatura en el tratamiento 1 (T1).



Figura 3.8. Medición de pH en el tratamiento 7 (T7).



3.1.2. Tipo de la Investigación

El tipo de investigación aplicada para el presente trabajo fue el experimental, porque se realizó la manipulación de las concentraciones de cal viva y cal hidratada bajo diferentes condiciones estrictamente controladas (pH y T°) para la obtención de biosólido estabilizado.

3.1.3. Nivel de la Investigación

El nivel de investigación para el presente trabajo fue correlacional por que se persiguió medir el grado de relación existente entre cal viva y cal hidratada a distintas concentraciones para la obtención de biosólido estabilizado.

3.2. Diseño de la Investigación

Se empleó el diseño experimental completamente al azar, donde se asumió que todas las unidades experimentales son homogéneas y los tratamientos asignados fueron de manera aleatoria. Donde se tiene 2 variables independientes a 3 distintas concentraciones, obteniéndose un total de 7 tratamientos, el cual es representado en el la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Diseño experimental completamente al azar.

N° TRATAMIENTO	BIOSOLIDO %	MATERIAL ALCALINIZANTE %
T1	100	0
T2	92	8 CV
T3	92	8 CH
T4	85	15 CV
T5	85	15 CH
T6	70	30 CV
T7	70	30 CH

En el estudio se consideró al tratamiento 1 (T1) como blanco o testigo consistente en la proporción 100% sustrato (10 kg de compost) sin adicionar material alcalinizante. Se realizaron 6 tratamientos con un duplicado cada

uno, considerando el óxido de cal (CaO) con la simbología CV (cal viva) y el dióxido de cal (Ca(OH)₂) con la simbología CH (cal hidratada).

3.3. Hipótesis de la Investigación

3.3.1. Hipótesis General

- La dosificación de cal hidratada (Ca(OH)₂) y cal viva (CaO) es óptima para la estabilización de biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”.

3.3.2. Hipótesis Específicas

- Las características fisicoquímicas y microbiológicas que contienen los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza” sobrepasan los límites permisibles en la normativa.
- La variación de las concentraciones de Ca(OH)₂ y CaO influye en la estabilización de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales “Doris Mendoza”.
- El NMP en la reducción de microorganismos patógenos es significativa en la estabilización alcalina de los biosólidos compostados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza”.

3.4. Variables

3.4.1. Variable Independiente

- Bases alcalinas (Ca(OH)₂ y CaO)

Indicador

Concentraciones de cal (mg/L)

- Masa de biosólidos

Indicador

Peso (Kg)

3.4.2. Variable Dependiente

- Estabilización de biosólidos

Indicador

Disminución de microorganismos patógenos (NMP/100mL)

3.5. Cobertura del Estudio

3.5.1. Universo

- Biosólidos de los lechos de secado de la PTAR “Doris Mendoza” - Concepción.

3.5.2. Población

- Biosólidos de un lecho de secado de la PTAR “Doris Mendoza” - Concepción.

3.5.3. Muestra

- 60 kg de biosólidos de la PTAR “Doris Mendoza” - Concepción.

3.5.4. Muestreo

El muestreo de lodos fue realizado por la tesista conjuntamente con el personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR - Concepción. Para la realización del muestreo se aplicó el método de cuarteo para obtener una muestra homogénea.

3.6. Técnicas e Instrumentos

3.6.1. Técnicas de la Investigación

Observación de procesos experimentales según la manipulación de las variables (variación de las concentraciones de cal viva y cal hidratada) y el monitoreo de pH y temperatura.

3.6.2. Instrumentos de la Investigación

Los instrumentos de la investigación fueron los reportes de los procesos experimentados por los laboratorios correspondientes (análisis de materia orgánica y bacteriológico), los reportes que se obtuvieron en campo con respecto al pH y temperatura.

3.7. Procesamiento Estadístico de la Información

3.7.1. Estadísticos

Software

- Microsoft Excel
- Programa estadístico Minitab

3.7.2. Representación

Las representaciones de la parte experimental se dieron por medio de reportes de laboratorios y gráficas, las relaciones de variables mediante ecuaciones matemáticas que pueda fundamentar la investigación.

3.7.3. Técnica de Comprobación de la Hipótesis

Para el trabajo de investigación se utilizó el Análisis de varianza (one - way ANOVA) por que se estudió los posibles efectos causados por diferentes niveles de la cal viva sobre la variable dependiente (biosólido estabilizado). Es decir, determinar la estabilización del biosólido mediante las variaciones en los niveles de cal viva y biosólido compostado.

CAPITULO IV

4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados

4.1.1. Caracterización de los biosólidos

Para la caracterización de los biosólidos provenientes de la PTAR “Doris Mendoza” - Concepción, se tomaron las muestras según la metodología explicada en el capítulo anterior para los análisis de materia orgánica y microbiológico.

4.1.1.1. Materia orgánica

Las muestras para los análisis de materia orgánica fueron enviadas a la Universidad Nacional Agraria La Molina – Facultad de Agronomía – Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes con hoja de referencia N° 56272, obteniendo los siguientes resultados representados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Caracterización de los biosólidos (materia orgánica)

MUESTRA DEL BIOSOLIDO		
Parámetros	expresados como	resultados
Potencial de Hidrogeno	pH	6,23
Conductividad eléctrica	S/m	0,49
Materia orgánica	%	31
Nitrógeno	%	2,1
Fosforo	%	2,32
Potasio	%	0,64
Calcio	%	5,78
Magnesio	%	0,86
Humedad	%	16,42
Sodio	%	0,07
Carbono orgánico C/N	%	7,98

4.1.1.2. Bacteriológico

Las muestras para los análisis microbiológicos fueron enviados a la Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de ingeniería Química – Laboratorio de análisis microbiológico con reporte N° 118-2016, obteniendo los siguientes resultados representados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Caracterización bacteriológico de los biosólidos

MUESTRA DEL BIOSOLIDO			
parámetros	condiciones	expresados como	resultados
Coliformes Totales	24 Hrs/37°C	NMP/100mL	$2,0 \times 10^9$
Coliformes fecales (E.Coli)	24 Hrs/37°C	NMP/100mL	$2,0 \times 10^3$

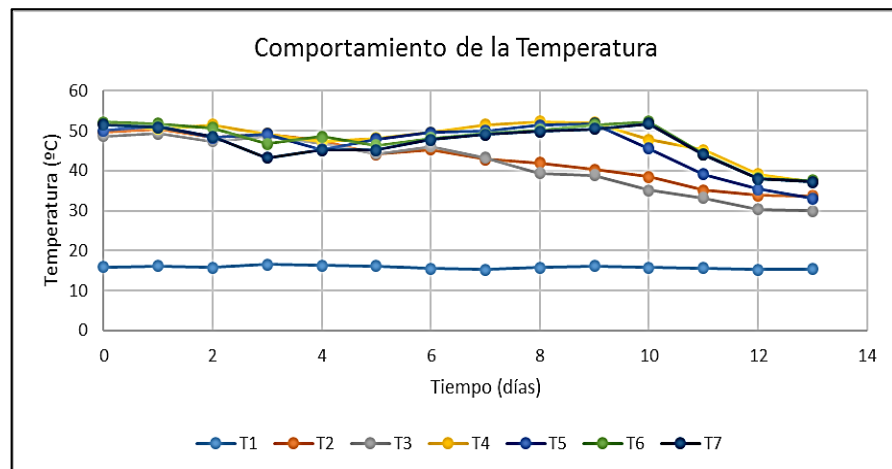
4.1.2. Pruebas experimentales

Tabla 4.3 Monitoreo de la temperatura (°C) en los tratamientos.

tratamiento	periodo de exposición (días)													
	día 0	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
T1	15,9	16,2	15,8	16,5	16,3	16,1	15,5	15,3	15,8	16,1	15,8	15,6	15,3	15,4
T2	49,5	50,3	48,3	49,1	47,6	44,1	45,3	42,8	41,9	40,3	38,5	35,1	33,8	33,7
T3	48,7	49,3	47,3	48,5	46,8	44,2	46,1	43,2	39,3	38,8	35,1	33,2	30,3	29,9
T4	51,9	50,4	51,5	49,2	47,3	48,1	49,6	51,5	52,2	52	47,7	45,2	39,1	37,3
T5	50,1	51,2	48,3	49,1	45,3	47,9	49,5	50	51,3	51,8	45,5	39,1	35,3	33,1
T6	52,1	51,8	50,7	46,7	48,5	46,3	48,1	49,3	50,2	51,5	52,2	44,1	38,1	37,5
T7	51,5	50,8	48,5	43,2	45,1	45,2	47,7	49	49,8	50,5	51,7	44	37,9	37,2

En la tabla 4.3 se muestran las temperaturas promedio registradas durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos según el diseño experimental planteado que varían entre 15,3 °C llegando a los 52,2 °C, en T1 (blanco) se registra la temperatura más baja de 15,3 °C en los días 7 y 12, en T4 y T6 se registran las temperaturas más altas llegando a 52,2 °C, estos datos registrados indican que la variación de la temperatura fue adecuada para eliminación de microorganismos bacteriológicos.

Figura 4.1. Comportamiento de la temperatura (°C) en los tratamientos.



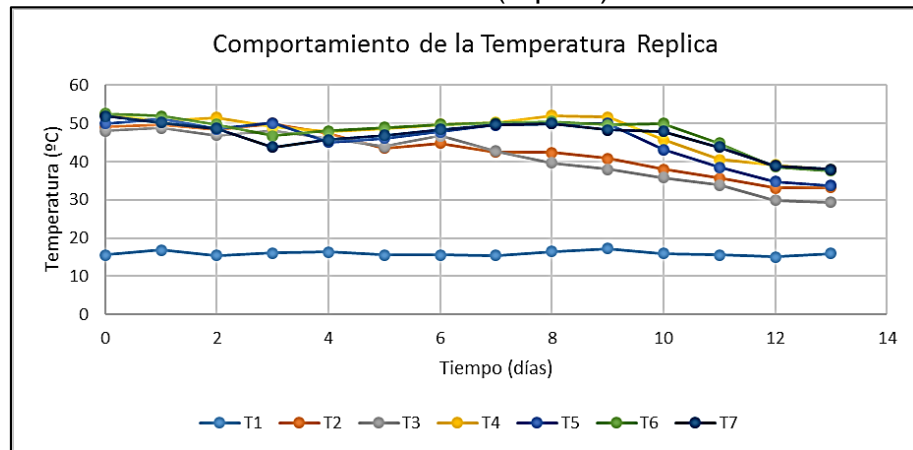
La figura 4.1 representa el comportamiento de los promedios de la temperatura durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos, observándose que en T1 (blanco) la temperatura no vario significativamente y no sobrepaso los 16,5 °C, a diferencia de los demas tratamientos desde el dia 0 al dia 1 tendieron a mantener temperaturas cercanas a 51 °C, a partir del dia 2 las temperaturas empezaron a desender notoriamente llegando a los 30 °C, a diferencia de T4, T5 y T6 donde la temperatura ascendio a 52,2 °C a partir del dia 7.

Tabla 4.4. Monitoreo de la temperatura (°C) en los tratamientos (replica).

tratamiento	periodo de exposición (días)													
	día 0	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
T1	15,6	16,8	15,4	16,1	16,3	15,6	15,5	15,4	16,5	17,2	15,9	15,6	15,1	15,9
T2	49,1	49,8	48,5	50	47,3	43,5	44,9	42,5	42,4	40,9	38	35,7	33,1	33,2
T3	48,1	48,9	46,9	48,1	46,1	44	46,8	42,8	39,7	38	35,8	33,9	29,9	29,4
T4	52,3	50,8	51,6	49,1	47,8	48,7	49,8	50,3	52	51,7	45,7	40,6	39,2	37,9
T5	50	51,1	48,6	50,1	45,1	46,1	47,8	49,6	50	50	43,1	38,5	34,8	33,7
T6	52,6	51,9	49,8	46,8	48,1	49	49,7	50,1	50,5	49,6	50	44,8	38,7	37,6
T7	51,9	50,3	48,7	43,8	45,7	46,9	48,5	49,7	50	48,3	48	43,8	38,9	38

En la tabla 4.4 se muestran las temperaturas promedio registradas durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos según el diseño experimental planteado que varían entre 15,1 °C llegando a los 52,6 °C, en T1 (blanco) se registra la temperatura más baja de 15,1 °C en el día 7, en T6 se registra la temperatura más alta de 52,6 °C en el día 0 también llamado día de aplicación, estos datos registrados son réplicas de los tratamientos los cuales indican que la variación de la temperatura fue adecuada para eliminación de microorganismos bacteriológicos.

Figura 4.2. Comportamiento de la temperatura (°C) en los tratamientos (replica).



La figura 4.2 representa el comportamiento de los promedios de la temperatura durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos, observándose que en T1 (blanco) la temperatura no vario significativamente y no sobrepaso los 17,2 °C, a diferencia de los demas tratamientos desde el día 0 al día 1 tendieron a mantener temperaturas cercanas a 52,5 °C, a partir del día 2 las temperaturas empezaron a desender notoriamente llegando a los 29,9 °C, a diferencia del día 8 el tratamiento 6 (T6) la temperatura ascendio a 50,5 °C, estos datos registrados son réplicas de los tratamientos.

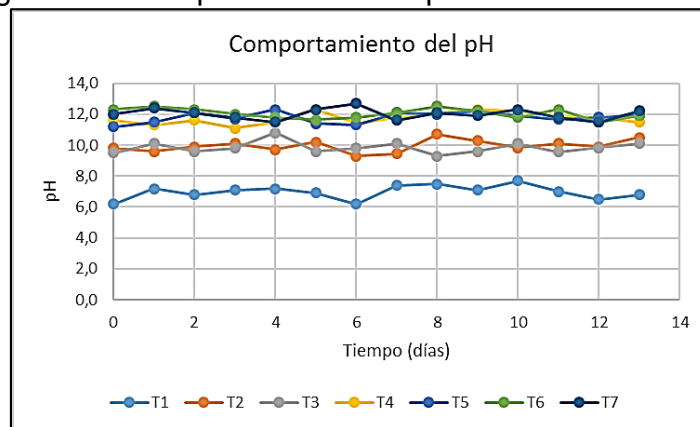
Para el monitoreo del pH se sacaron muestras representativas de cada celda de tratamiento (composteras) con una frecuencia para el día 0 de 3 veces al día, del día 1 al día 2 dos veces al día y del día 3 al día 13 una vez al día, todas estas muestras fueron mezcladas con agua destilada para su medición.

Tabla 4.5 Monitoreo del pH en los tratamientos.

Tratamiento	periodo de exposición (días)													
	día 0	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
T1	6,2	7,2	6,8	7,1	7,2	6,9	6,2	7,4	7,5	7,1	7,7	7,0	6,5	6,8
T2	9,8	9,6	9,9	10,1	9,7	10,2	9,3	9,5	10,7	10,3	9,8	10,1	9,9	10,5
T3	9,5	10,1	9,6	9,8	10,8	9,6	9,8	10,1	9,3	9,6	10,1	9,6	9,8	10,1
T4	11,6	11,3	11,6	11,1	11,5	12,3	11,4	11,8	12,1	12,3	12,2	11,9	11,8	11,5
T5	11,2	11,5	12,1	11,7	12,3	11,4	11,3	12,1	12,0	12,2	11,9	11,7	11,8	12,0
T6	12,3	12,5	12,3	12,0	11,8	11,6	11,8	12,1	12,5	12,2	11,8	12,3	11,5	11,9
T7	12,0	12,4	12,1	11,8	11,5	12,3	12,7	11,6	12,1	11,9	12,3	11,8	11,5	12,2

En la tabla 4.5 se muestran los promedio de los valores de pH registrados durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos según el diseño experimental planteado que varían entre 6,2 (neutro) llegando a 12,7 (básico o alcalino) , en T1 (blanco) se registra un pH mínimo de 6,2 en el día 0 (día de aplicación), en T7 se registra un pH máximo de 12,7 debido a la acción de la base alcalina ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), estos datos registrados indican que el pH adecuado para la eliminación e inactivación de microorganismos bacteriológicos debe llegar a 12 en la escala de pH por un periodo de 72 horas (3 días).

Figura 4.3. Comportamiento del pH en los tratamientos.



La figura 4.3 representa el comportamiento del pH durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos, observándose que en T1 (blanco) el pH no vario significativamente y no sobrepaso valores mayores de 7,5 (neutro) durante los 13 dias, a diferencia de T2 y T3 que registraron valores que llegaron a valores de 10,7 (ligeramente basico) en el transcurso de los 13 dias debido a la accion de las bases alcalinas en menor proporcion, y finalmente T4, T5, T6 y T7 registraron valores que llegaron a los 12,7 (basico) al transcurrir los 13 dias debido a la accion de las bases alcalinas a mayores proporciones.

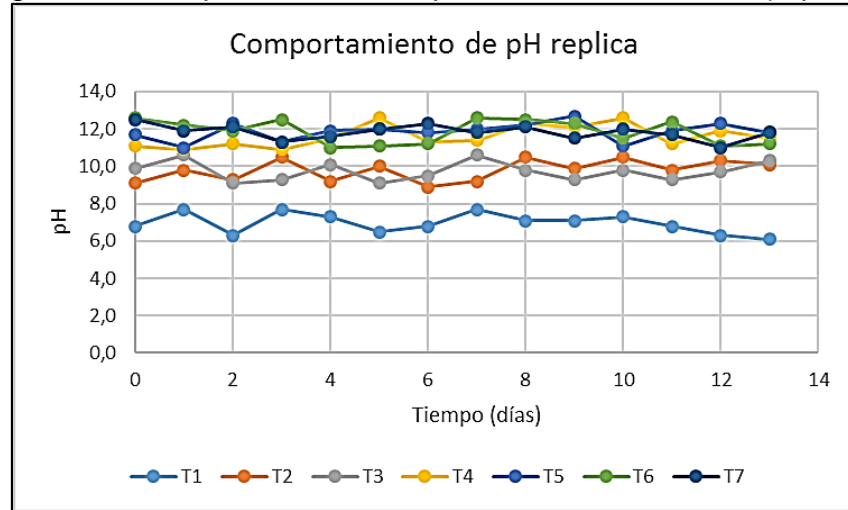
Tabla 4.6 Monitoreo del pH en los tratamientos (replica).

Tratamiento	periodo de exposición													
	día 0	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
T1	6,8	7,7	6,3	7,7	7,3	6,5	6,8	7,7	7,1	7,1	7,3	6,8	6,3	6,1
T2	9,1	9,8	9,3	10,5	9,2	10,0	8,9	9,2	10,5	9,9	10,5	9,8	10,3	10,1
T3	9,9	10,6	9,1	9,3	10,1	9,1	9,5	10,6	9,8	9,3	9,8	9,3	9,7	10,3
T4	11,1	10,9	11,2	10,9	11,5	12,6	11,3	11,4	12,3	12,1	12,6	11,2	11,9	11,5
T5	11,7	11,0	12,3	11,3	11,9	12,0	11,8	12,0	12,2	12,7	11,1	11,9	12,3	11,8
T6	12,6	12,2	11,9	12,5	11,0	11,1	11,2	12,6	12,5	12,3	11,5	12,4	11,1	11,2
T7	12,5	11,9	12,1	11,3	11,6	12,0	12,3	11,8	12,1	11,5	12,0	11,7	11,0	11,8

En la tabla 4.6 se muestran los promedio de los valores de pH registrados durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos según el diseño experimental planteado que varían entre 6,1 (neutro) llegando a 12,7 (básico o alcalino) , en T1 (blanco) se registra un pH mínimo de 6,1 en el día 0 (día de aplicación), en T5 se registra un pH máximo de 12,7 debido a la acción de la base alcalina , estos datos registrados son réplicas de los tratamientos que indican el pH adecuado para la eliminación e inactivación de

microorganismos bacteriológicos debe llegar a 12 en la escala de pH por un periodo de 72 horas (3 días).

Figura 4.4.Comportamiento del pH en los tratamientos (replica).



La figura 4.4 representa el comportamiento del pH durante los 13 días de las pruebas experimentales en los siete tratamientos, observándose que en T1 (blanco) el pH no vario significativamente y no sobrepaso valores mayores de 7,7 (neutro) durante los 13 días, a diferencia de T2 y T3 que registraron valores que llegaron a valores de 10,6 (ligeramente basico) en el transcurso de los 13 días debido a la accion de las bases alcalinas en menor proporcion, y finalmente T4, T5, T6 y T7 registraron valores que llegaron a los 12,6 (basico) al transcurrir los 13 dias debido a la accion de las bases alcalinas a mayores proporciones, estos datos registrados son réplicas de los tratamientos.

Para el monitoreo bacteriológico se sacaron muestras representativas de los tratamientos (composteras), en los días 0,6 y 13 y fueron llevadas al Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ingeniería Química – Universidad Nacional del Centro del Perú.

Tabla 4.7 Monitoreo bacteriológico en los tratamientos

Tratamiento	% (p/p) material alcalinizante	día 0		día 6		día 13	
		Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)
T1	0	2,00E+09	2,00E+03	2,00E+09	2,00E+03	2,00E+09	2,00E+03
T2	8 CV	1,50E+04	1,70E+03	1,10E+04	1,30E+03	8,00E+02	5,00E+02
T3	8 CH	2,00E+04	1,80E+03	1,30E+04	1,60E+03	8,50E+02	7,00E+02
T4	15 CV	1,20E+03	1,20E+03	9,00E+02	8,00E+02	0,00E+00	2,50E+02
T5	15 CH	1,50E+03	1,50E+03	1,00E+03	1,00E+03	1,00E+00	3,00E+02
T6	30 CV	1,00E+00	5,00E+02	0,00E+00	3,00E+02	0,00E+00	1,50E+02
T7	30 CH	8,00E+00	7,00E+02	2,00E+00	5,00E+02	2,00E+00	2,00E+02

En la tabla 4.7 se observan los análisis bacteriológicos de las pruebas experimentales realizadas en los días 0, 6 y 13 para los 6 tratamientos y un blanco con distintas proporciones de material alcalinizante, los microorganismos bacteriológicos fueron los coliformes totales y coliformes fecales, en T1 (blanco) el valor en los tres días fue de 2,00E+09 NMP de coliformes totales y 2,00E+03 NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T2 en el día 0 se registró un valor máximo de 1,50E+04 NMP de coliformes totales y 1,70E+03 de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de 8,00E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli) y 5,00E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T3 en el día 0 se registró un valor máximo de 2,00E+04 NMP de coliformes totales y 1,80E+03 de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de 8,50E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli) y 7,00E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T4 en el día 0 se registró un valor máximo de 1,20E+03 NMP de coliformes totales y 1,20E+03 de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de 0,00E+00 NMP de coliformes fecales (E. Coli) el cual indica la eliminación total de estos microorganismos bacteriológicos y 2,50E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T5 en el día 0 se

registró un valor máximo de 1,50E+03 NMP de coliformes totales y 1,50E+03 de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de 1,00E+00 NMP de coliformes fecales (E. Coli) y 3,00E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T6 en el día 0 se registró un valor máximo de 1,00E+00 NMP de coliformes totales y 5,00E+02 de coliformes fecales (E. Coli), en los días 6 y 13 registro un valor mínimo de 0,00E+00 NMP de coliformes fecales (E. Coli) el cual indica la eliminación total de estos microorganismos bacteriológicos y en el día 13 registra un valor de 1,50E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli) finalmente en el en T7 en el día 0 se registró un valor máximo de 8,00E+00 NMP de coliformes totales y 5,00E+05 de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de 2,00E+00 NMP de coliformes fecales (E. Coli) y 2,00E+02 NMP de coliformes fecales (E. Coli).

Tabla 4.8 Monitoreo bacteriológico en los tratamientos (replica)

Tratamiento	% (p/p) material alcalinizante	día 0		día 6		día 13	
		Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)
T1	0	1,90E+09	2,10E+03	2,00E+09	2,00E+03	2,00E+09	2,00E+03
T2	8 CV	1,60E+04	1,75E+03	1,09E+04	1,25E+03	8,10E+02	4,90E+02
T3	8 CH	2,00E+04	1,83E+03	1,29E+04	1,54E+03	8,40E+02	7,10E+02
T4	15 CV	1,30E+03	1,10E+03	8,30E+02	7,94E+02	0,00E+00	2,45E+02
T5	15 CH	1,60E+03	1,45E+03	1,04E+03	9,30E+02	2,00E+00	3,10E+02
T6	30 CV	1,00E+00	4,20E+02	0,00E+00	3,01E+02	0,00E+00	1,40E+02
T7	30 CH	6,00E+00	6,80E+02	3,00E+00	5,20E+02	3,00E+00	2,05E+02

En la tabla 4.8 se observan los análisis bacteriológicos de las pruebas experimentales realizadas en los días 0, 6 y 13 para los 6 tratamientos y un blanco con distintas proporciones de material alcalinizante, los microorganismos bacteriológicos fueron los coliformes totales y coliformes fecales, en T1 (blanco) el valor en los

tres días fue de $2,00E+09$ NMP de coliformes totales y $2,00E+03$ NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T2 en el día 0 se registró un valor máximo de $1,60E+04$ NMP de coliformes totales y $1,75E+03$ de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de $8,10E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) y $4,90E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T3 en el día 0 se registró un valor máximo de $2,00E+04$ NMP de coliformes totales y $1,83E+03$ de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de $8,40E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) y $7,10E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T4 en el día 0 se registró un valor máximo de $1,30E+03$ NMP de coliformes totales y $1,10E+03$ de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de $0,00E+00$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) el cual indica la eliminación total de estos microorganismos bacteriológicos y $2,45E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T5 en el día 0 se registró un valor máximo de $1,60E+03$ NMP de coliformes totales y $1,45E+03$ de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de $2,00E+00$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) y $3,10E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli), en T6 en el día 0 se registró un valor máximo de $1,00E+00$ NMP de coliformes totales y $4,20E+02$ de coliformes fecales (E. Coli), en los días 6 y 13 registro un valor mínimo de $0,00E+00$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) el cual indica la eliminación total de estos microorganismos bacteriológicos y en el día 13 registra un valor de $1,40E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) finalmente en el en T7 en el día 0 se registró un valor máximo de $6,00E+00$ NMP de coliformes totales y $6,80E+05$ de coliformes fecales (E. Coli), en el día 13 registro un valor mínimo de $3,00E+00$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) y $2,05E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli) estos datos registrados son réplicas de los tratamientos.

4.2. Discusión de Resultados

Se analizaron los biosólidos de la PTAR “Doris Mendoza” fisicoquímicamente obteniendo los siguientes resultados el pH de 6,23, conductividad de 4,9 DS/m; Materia orgánica 31%, Nitrógeno 2,1%, Fosforo 2,32%, Potasio 0,64%, calcio 5,78%, Magnesio 0,86%, Humedad 16,42%, sodio 0,07% y relación de C/N de 7,78%; de igual manera se realizó el análisis bacteriológico obteniendo $2,0 \times 10^9$ NMP/100mL de Coliformes Totales y $2,0 \times 10^3$ NMP/100mL de Coliformes fecales (E.Coli), según los resultados podemos afirmar que los biosólidos contienen elementos como Nitrógeno, Fósforo y Potasio, además de micronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como Zinc, Hierro y Magnesio. Los biosólidos son ricos en materia orgánica según los resultados obtenidos que mejora la calidad del suelo, aumentando la capacidad de retención de agua; también acondicionan su estructura para un mejor transporte del aire y del agua a través de él, sus partículas finas y orgánicas pueden incrementar características tales como humedad y nutrientes en el suelo (EPA, Calidad de Biosolidos, 2000) , los resultados también muestran las cantidades elevadas de NMP de microorganismos biológicos (coliformes totales y coliformes termotolerantes) que contienen los biosólidos de la PTAR “Doris Mendoza”, esto se debe al origen municipal (viviendas, centros comerciales, farmacias, etc) de las aguas residuales que son transportadas por el alcantarillado hasta llegar a la PTAR “Doris Mendoza” que en el proceso de tratamiento del agua residual genera los lodos residuales, los cuales pasan por un proceso biológico de digestión para finalmente pasar a los lechos de secado y convertir a estos lodos residuales en biosólidos, según los resultados de caracterización sus características sanitarias no se encuentran dentro de los valores permisibles para su disposición final los cuales pueden generar impactos a la salud, y al medio ambiente.

Se evaluaron las concentraciones de Ca(OH)_2 y CaO en el proceso de estabilización de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Doris Mendoza” con diferentes concentraciones en proporciones de p/p en porcentajes de los biosólidos y material alcalinizante para cada tratamiento, se evaluó la temperatura en ($^{\circ}\text{C}$) como uno de los factores que influye en la inactivación de los microorganismos bacteriológicos como podemos observar en la tabla 4.9, que representa las temperaturas promedio de cada tratamiento por un periodo de 13 días y el día cero considerado como día de aplicación.

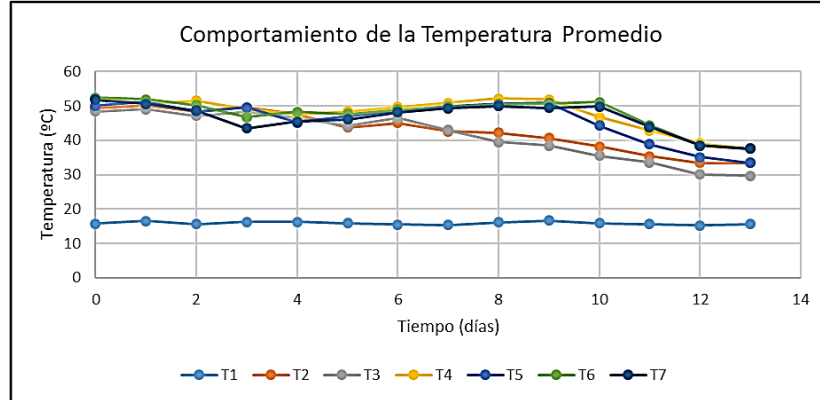
Tabla 4.9 Temperatura promedio de los tratamientos

tratamiento	periodo de exposición promedio (días)													
	día 0	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
T1	15,8	16,5	15,6	16,3	16,3	15,9	15,5	15,4	16,2	16,7	15,9	15,6	15,2	15,7
T2	49,3	50,1	48,4	49,6	47,5	43,8	45,1	42,7	42,2	40,6	38,3	35,4	33,5	33,5
T3	48,4	49,1	47,1	48,3	46,5	44,1	46,5	43	39,5	38,4	35,5	33,6	30,1	29,7
T4	52,1	50,6	51,6	49,2	47,6	48,4	49,7	50,9	52,1	51,9	46,7	42,9	39,2	37,6
T5	50,1	51,2	48,5	49,6	45,2	47	48,7	49,8	50,7	50,9	44,3	38,8	35,1	33,4
T6	52,4	51,9	50,3	46,8	48,3	47,7	48,9	49,7	50,4	50,6	51,1	44,5	38,4	37,6
T7	51,7	50,6	48,6	43,5	45,4	46,1	48,1	49,4	49,9	49,4	49,9	43,9	38,4	37,6

En la tabla 4.9 se observa el comportamiento de la temperatura en los tratamientos, en T1 se observa que la variación es ligeramente mínima ya que este cambio se da debido a que no se agregó ningún material alcalinizante y solo se adecuó al medio ambiente que lo rodea, en los otros tratamientos la temperatura tiene un incremento significativo y variado como en los tratamientos T2, T4 y T6, el dióxido de carbono producido por la descomposición del biosólido junto con el de la atmósfera reaccionan con el CaO para producir carbonato de calcio y calor de 43 000 cal/g mol (Salcedo, 2000), mientras que en los tratamientos T3, T5 y T7 la reacción principal del proceso es del óxido de calcio con el agua, la cual produce hidróxido de calcio

y calor de 15 300 calorías/g mol (Salcedo, 2000), esto explica por qué las diferencias de la temperatura.

Figura 4.5. Comportamiento de la temperatura promedio.



En la figura 4.5 la temperatura del biosólido al inicio de la prueba experimental fue de 15,8 °C y no presentó variaciones significativas durante el periodo de experimentación; en los otros tratamientos, las temperaturas monitoreadas durante los primeros 13 días que fueron aplicados con material alcalinizante se incrementaron a mayores de 48 °C el cual se mantuvo por varios días y luego fueron descendiendo, la temperatura tiene un efecto inhibitor sobre los microorganismos patógenos ya que su estructura puede ser modificada por el efecto térmico (Catherine, 2007).

Con base al comportamiento de la temperatura, el material alcalinizante alcanzante presenta mejor desempeño es el tratamiento T4 que registra una temperatura constante de 52,2 °C por un periodo de 72 horas (3 días) este valor de temperatura según la Agencia de Protección Ambiental es el óptimo para la inactivación de microorganismos bacteriológicos , se libera calor en contacto con el dióxido de carbono presente en el biosólido, inhibiendo el crecimiento y la presencia de patógenos, los tratamientos T4 y T6, al ser mezclado con el biosólido incrementaron sus temperaturas alcanzando a los 52 °C siendo suficiente para la reducción de patógenos, no se consideró al

tratamiento 6 optimo debido a que requirió mayor proporción de material alcalinizante (30 % CaO) , a diferencia del T4 que trabajo con una proporción menor de material alcalinizante (15 % CaO).

De igual manera se evaluó el pH como otro de los factores que influye en la inactivación de los microorganismos bacteriológicos como podemos observar en la tabla 410, que representa los pH promedios de cada tratamiento por un periodo de 13 días y el día cero considerado como día de aplicación.

Tabla 4.10 pH promedio de los tratamientos

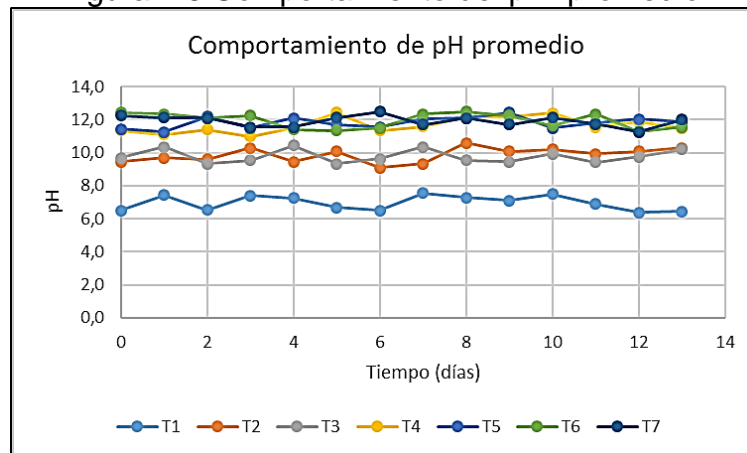
Tratamiento	periodo de exposición promedio													
	día 0	día 1	día 2	día 3	día 4	día 5	día 6	día 7	día 8	día 9	día 10	día 11	día 12	día 13
T1	6,5	7,5	6,6	7,4	7,3	6,7	6,5	7,6	7,3	7,1	7,5	6,9	6,4	6,5
T2	9,5	9,7	9,6	10,3	9,5	10,1	9,1	9,3	10,6	10,1	10,2	10,0	10,1	10,3
T3	9,7	10,4	9,4	9,6	10,5	9,4	9,7	10,4	9,6	9,5	10,0	9,4	9,8	10,2
T4	11,4	11,1	11,4	11,0	11,5	12,5	11,4	11,6	12,2	12,2	12,4	11,6	11,9	11,5
T5	11,5	11,3	12,2	11,5	12,1	11,7	11,6	12,1	12,1	12,5	11,5	11,8	12,0	11,9
T6	12,5	12,4	12,1	12,3	11,4	11,4	11,5	12,4	12,5	12,3	11,7	12,4	11,3	11,6
T7	12,3	12,2	12,1	11,6	11,6	12,2	12,5	11,7	12,1	11,7	12,2	11,8	11,3	12,0

En la tabla 4.10 se observa el comportamiento del pH en los diferentes tratamientos que se realizaron, el pH del biosólido al inicio de la prueba experimental fue de 6,9 y no presentó variaciones significativas durante el periodo de experimentación; en los otros tratamientos, los pH monitoreados durante los primeros 13 días que fueron aplicados con material alcalinizante se incrementaron a valores superiores de 12, esto ocasiona la desnaturalización de proteínas y ácidos nucleicos que inactiva a los patógenos y además modifico las características físicas y químicas de los biosólidos, el control de olor se produce como resultado de la inhibición de los procesos biológicos que generan subproductos de este tipo (Clair N.

Sawyer, 2000). De hecho, la elevación del pH provoca la desorción de algunos gases (a pH > 10,5 se libera amoníaco).

El tiempo de contacto y dosis de cal debe ser suficiente para suministrar una alcalinidad residual y mantener un pH elevado por varios días. El decaimiento del pH ocurre por la disolución del CO₂ de la atmósfera generando un ácido débil (H₂CO₃) que en forma lenta consume la alcalinidad. Llegado cierto punto, la actividad biológica se reinicia y en caso de ocurrir reacciones anaerobias, la producción de ácidos orgánicos disminuirá aún más el pH por estas razones hay que tener mucho cuidado en el descenso del pH.

Figura 4.6. Comportamiento del pH promedio.



En la figura 4.6 los tratamientos T4, T5, T6 y T7 son los que tienden a subir el pH al inicio de la prueba con valores aproximados a 12 esto causa la emanación de gases; a altos valores de pH (a pH mayor que 10,5) el gas amoníaco (N-NH₃) se libera a la atmósfera. Si el pH de la solución se eleva por arriba de 7, el ión amonio se convierte en amoníaco (NH₃), el cual tiene una densidad menor que la del aire y se volatiliza con facilidad (Colin, 1994). Las emanaciones producen un olor característico y provocan un problema social y de higiene en las áreas de trabajo. La dependencia del porcentaje de conversión de amonio a amoníaco con el pH, se presenta valores por arriba de 12 durante el proceso, provocando que el hidróxido de amonio (NH₄OH)

se transforme en un 99.98% a su forma no ionizada (NH_3), La cantidad de amoníaco producido dependerá del contenido de nitrógeno amoniacal originalmente presente en el biosólido y del pH alcanzado durante la estabilización alcalina (Clair N. Sawyer, 2000). De manera contraria al amoníaco, la cal aplicada, también reduce la emisión de sulfuros volátiles y ácidos grasos, disminuyendo los malos olores de forma considerable. El incremento de pH impide la liberación del ácido sulfhídrico (H_2S) mediante la captura de gases de azufre como sulfuros por lo tanto la cal reduce el índice de putrefacción de la materia orgánica por la inactivación o destrucción de los microorganismos (Clair N. Sawyer, 2000). El tratamiento T4 registra un pH constante de 12,2 unidades por un periodo de 72 horas (3 días) este valor según la Agencia de Protección Ambiental es el óptimo para la inactivación de microorganismos bacteriológicos, los tratamientos T4 y T6, al ser mezclado con el biosólido incrementaron su pH alcanzando los 12,4 unidades siendo suficiente para la reducción de patógenos, no se consideró al tratamiento 6 óptimo debido a que requirió mayor proporción de material alcalinizante (30 % CaO) , a diferencia del T4 que trabajo con una proporción menor de material alcalinizante (15 % CaO).

Tabla 4.11 Análisis microbiológico promedio de los tratamientos.

Tratamiento	% (p/p) material alcalinizante	día 0		día 6		día 13	
		Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)
T1	0	1,95E+09	2,05E+03	2,00E+09	2,00E+03	2,00E+09	2,00E+03
T2	8 CV	1,55E+04	1,73E+03	1,10E+04	1,28E+03	8,05E+02	4,95E+02
T3	8 CH	2,00E+04	1,82E+03	1,30E+04	1,57E+03	8,45E+02	7,05E+02
T4	15 CV	1,25E+03	1,15E+03	8,65E+02	7,97E+02	0,00E+00	2,48E+02
T5	15 CH	1,55E+03	1,48E+03	1,02E+03	9,65E+02	1,50E+00	3,05E+02
T6	30 CV	1,00E+00	4,60E+02	0,00E+00	3,01E+02	0,00E+00	1,45E+02
T7	30 CH	7,00E+00	6,90E+02	2,50E+00	5,10E+02	2,50E+00	2,03E+02

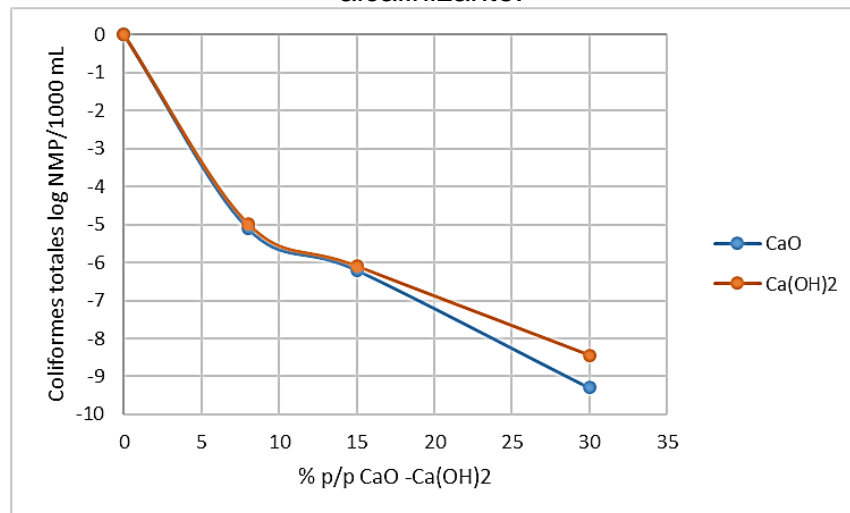
En la tabla 4.11 se observa el análisis promedio de los tratamientos, para ello se evaluó el efecto del óxido de calcio y el hidróxido de calcio en la estabilización alcalina de biosólidos, de tal manera que se pudiera determinar la dosis óptima para la inactivación de microorganismos bacteriológicos (coliformes fecales y coliformes totales), aplicándose diferentes dosis de (8 ,15 30% p/p), se evaluaron la inactivación de los microorganismos el día cero o también llamado día de aplicación del material alcalinizante, logrando demostrar el efecto bactericida sobre este grupo de microorganismos patógenos. Como se muestra en la tabla 4,11 se logró inactivar a los coliformes totales en el día 6 en el tratamiento T6 mientras que en el día 13 se llegó a inactivar en el tratamiento T4, para los coliformes fecales según la Agencia de Protección Ambiental deben encontrarse en rangos menores a 1000, en el día cero se puede cumplir con esto en los tratamientos T6 y T7, mientras que en el día 6, se cumple con los tratamientos T4 y T5 y para el día 13 se cumpliría en los tratamientos T2 y T3. Según los resultados el tratamiento T4 es el óptimo para la estabilización o higienización de los biosólidos debido a que elimina en su totalidad a los coliformes totales e inactiva a los coliformes fecales, estando estos dentro de los parámetros límites máximos permisibles según la Agencia de Protección ambiental, no se considera al tratamiento T6 optimo a pesar que este elimina en su totalidad a los coliformes totales e inactiva a los coliformes fecales a partir del día 6 debido a que requiere una dosis mayor que el tratamiento T4, por tal razón el tratamiento T4 requiere de más tiempo de exposición con el material alcalinizante para alcanzar la eliminación de coliformes totales y la inactivación de coliformes fecales a una menor dosis y obteniendo los mismos resultados con el tratamiento T6, reduciendo de esta manera costos económicos para su aplicación como una de las ventajas.

Tabla 4.12 Inactivación de microorganismos de coliformes totales aplicando $\log(N/N_0)$ en relación al % (p/p) material alcalinizante.

Nº	% (p/p) material alcalinizante	CaO	Ca(OH) ₂	CaO	Ca(OH) ₂
		Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Totales Log(N/N ₀)	Nº Coliformes Totales Log(N/N ₀)
1	0	1,95E+09	1,95E+09	0	0
2	8	1,55E+04	2,00E+04	-5,09970	-4,98900
3	15	1,25E+03	1,55E+03	-6,19312	-6,09970
4	30	1,00E+00	7,00E+00	-9,29003	-8,44494

En la tabla 4.12 se analizó la inactivación de microorganismos de coliformes totales aplicando $\log(N/N_0)$ en relación al % (p/p) material alcalinizante de 0, 8, 15 y 30% para CaO y Ca(OH)₂, en el día cero o día de aplicación.

Figura 4.7. Comportamiento de la inactivación de microorganismos de coliformes totales aplicando $\log(N/N_0)$ en relación al % (p/p) material alcalinizante.



En la Figura 4.7 se observa el comportamiento de la inactivación de microorganismos de coliformes totales, que va disminuyendo según las dosis aplicadas del material alcalinizante y haciendo una comparación el CaO tiene mejores resultados debido a la temperatura que se genera en la reacción con

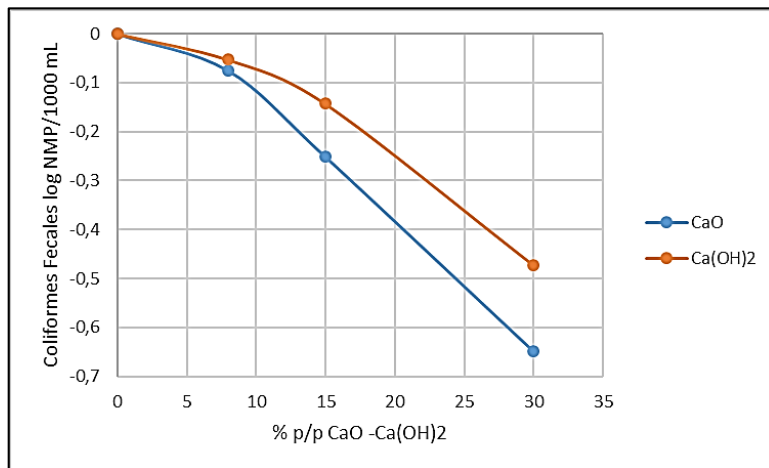
el CO₂ y la elevación del pH debido a la generación de calor en el día 0 también llamado día de aplicación.

Tabla 4.13 Inactivación de microorganismos de coliformes fecales aplicando log(N/No) en relación al % (p/p) material alcalinizante.

Nº	% (p/p) material alcalinizante	CaO	Ca(OH) ₂	CaO	Ca(OH) ₂
		Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Fecales Log(N/No)	Nº Coliformes Fecales Log(N/No)
1	0	2,05E+03	2,05E+03	0	0
2	8	1,73E+03	1,82E+03	-0,07496	-0,05288
3	15	1,15E+03	1,48E+03	-0,25106	-0,14296
4	30	4,60E+02	6,90E+02	-0,64900	-0,47290

En la tabla 4.13 se analizó la inactivación de microorganismos de coliformes Fecales aplicando log(N/No) en relación al % (p/p) material alcalinizante de 0, 8, 15 y 30% para CaO y Ca(OH)₂, en el día cero o día de aplicación.

Figura 4.8. Comportamiento de la inactivación de microorganismos de coliformes fecales aplicando log(N/No) en relación al % (p/p) material alcalinizante.



En la Figura 4.8 se observa el comportamiento de la inactivación de microorganismos de coliformes fecales, que va disminuyendo según las dosis aplicadas del material alcalinizante y haciendo una comparación el CaO tiene

mejores resultados debido a la temperatura que se genera en la reacción con el CO₂ y la elevación del pH debido a la generación de calor en el día 0 también llamado día de aplicación al igual que los coniformes totales.

Se realizó el estudio del coeficiente cinético de los datos experimentales para el tratamiento T4 debido a que se llegó a obtener un biosólido estabilizado de tipo A según la clasificación de biosólidos proporcionado por la Agencia de Protección Ambiental con una dosis optima de 15% de CaO, en un periodo de 14 horas donde se monitorio la temperatura y el pH como se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Parámetros para la cinética de microorganismos en el T4

Tiempo (Hrs)	Temp. °C	pH	Nº Coliformes Totales	Nº Coliformes Fecales (E.Coli)	Nº Coliformes Totales Log(N/No)	Nº Coliformes Fecales (E.Coli) Log(N/No)
0	16,8	6,48	2,00E+09	2,00E+03	0,000	0,000
2	26,6	10,52	1,00E+09	1,90E+03	-0,301	-0,022
4	38,9	10,89	1,80E+08	1,80E+03	-1,046	-0,046
6	44,8	11,25	2,80E+06	1,60E+03	-2,854	-0,097
8	46,8	10,99	1,50E+06	1,60E+03	-3,125	-0,097
10	50,9	11,78	4,50E+05	1,50E+03	-3,648	-0,125
12	52,1	12,02	1,25E+04	1,20E+03	-5,204	-0,222
14	52	12,5	1,20E+03	1,20E+03	-6,222	-0,222

En la tabla 4.14 se observa los parámetros de temperatura, pH y microorganismos en función del tiempo al iniciar el tratamiento a las condiciones de T4 para encontrar los coeficientes cinéticos de la inactivación de los microorganismos estudiados, también se observa el incremento de la temperatura que inicio en 16,8 °C hasta llegar a los 52 °C de igual manera el incremento del pH de 6,48 a 12,5.

4.3. Contratación de Hipótesis

Tabla 4.15 Resultados del NMP de coliformes totales y fecales con tratamientos de CaO

Tratamientos CaO	Coliformes totales	Coliformes Fecales
T1	2,00E+09	2,00E+03
T2	8,00E+02	5,00E+02
T4	0,00E+00	2,50E+02
T6	0,00E+00	1,50E+02
T1	2,00E+09	2,00E+03
T2	8,10E+02	4,90E+02
T4	0,00E+00	2,45E+02
T6	0,00E+00	1,40E+02

One-way ANOVA: Coliformes totales versus Tratamientos CaO

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$
 Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Tratamientos CaO	4	T1; T2; T4; T6

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tratamientos CaO	3	6,00000E+18	2,00000E+18	1,60000E+17	0,000
Error	4	50	13		
Total	7	6,00000E+18			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,53553	100,00%	100,00%	100,00%

Interpretación de la estadística

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) mediante la prueba de FISHER, en el software estadístico MINITAB, ingresando los valores de la Tabla 4.15, donde nos muestran los resultados del NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales) como respuesta a los tratamientos de estabilización alcalina de las diferentes pruebas experimentales, obteniendo como resultado un P-value de 0,000 siendo menor al valor de significancia

del 0,05; según este resultado se rechaza la hipótesis que los tratamientos no tienen variación significativamente en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales), y el error del análisis estadístico alcanza un valor de 13,0.

Means

Tratamientos

CaO	N	Mean	StDev	95% CI
T1	2	2000000000	0	(1999999993; 2000000007)
T2	2	805,00	7,07	(798,06; 811,94)
T4	2	0,000000	0,000000	(-6,941113; 6,941113)
T6	2	0,000000	0,000000	(-6,941113; 6,941113)

Pooled StDev = 3,53553

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Tratamientos

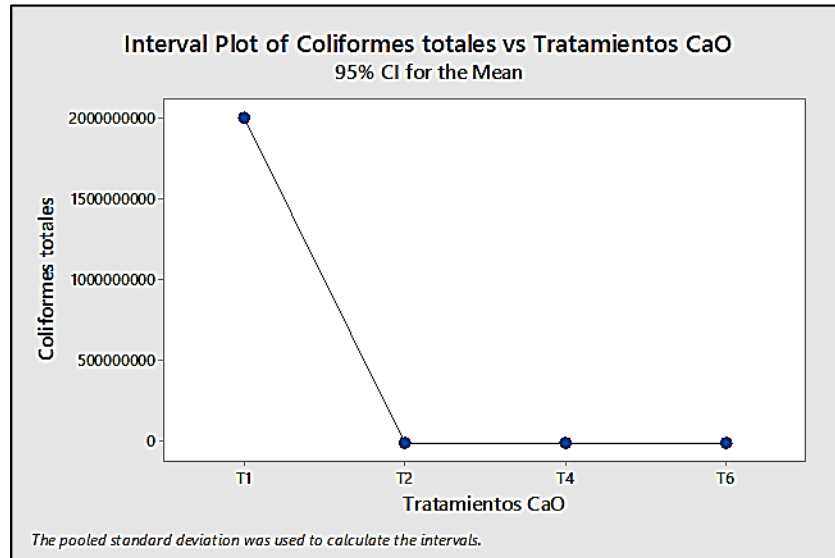
CaO	N	Mean	Grouping
T1	2	2000000000	A
T2	2	805,00	B
T6	2	0,000000	C
T4	2	0,000000	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Interpretación de la estadística

Según la comparación de Fisher con el software Minitab, a partir de los resultados obtenidos de NMP del microorganismo bacteriológico (coliformes totales), según esta comparación de medias existe variación significativa en los tratamientos de estabilización alcalina, formándose tres grupos A, B y C de los cuales los tratamientos T6 y T4 son óptimos para la reducción de microorganismos bacteriológicos.

Figura 4.9. Interval Plot of Coliformes totales vs Tratamientos CaO



En la figura 4.9 se observa que existe diferencia significativa respecto a las medias de los tratamientos de estabilización alcalina, por lo tanto, los intervalos de confianza se encuentran distantes, esto se debe a la variación de los % de aplicación CaO según p/p esto interviene en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales).

One-way ANOVA: Coliformes Fecales versus Tratamientos CaO

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Tratamientos CaO	4	T1; T2; T4; T6

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tratamientos CaO	3	4485784	1495261	53164,85	0,000
Error	4	112	28		
Total	7	4485897			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5,30330	100,00%	100,00%	99,99%

Interpretación de la estadística

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) mediante la prueba de FISHER, en el software estadístico MINITAB, ingresando los valores de la Tabla 4.15, donde nos muestran los resultados del NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes fecales) como respuesta a los tratamientos de estabilización alcalina de las diferentes pruebas experimentales, obteniendo como resultado un P-value de 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado se rechaza la hipótesis que los tratamientos no tienen variación significativamente en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales), y el error del análisis estadístico alcanza un valor de 112,0

Means

Tratamientos

CaO	N	Mean	StDev	95% CI
T1	2	2000	0	(1990; 2010)
T2	2	495,00	7,07	(484,59; 505,41)
T4	2	247,50	3,54	(237,09; 257,91)
T6	2	145,00	7,07	(134,59; 155,41)

Pooled StDev = 5,30330

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Tratamientos

CaO	N	Mean	Grouping
T1	2	2000	A
T2	2	495,00	B
T4	2	247,50	C
T6	2	145,00	D

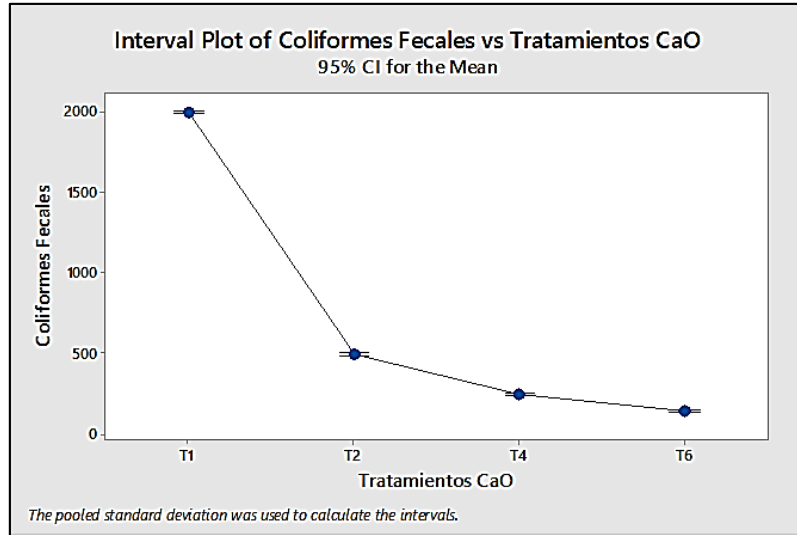
Means that do not share a letter are significantly different.

Interpretación de la estadística

Según la comparación de Fisher con el software Minitab, a partir de los resultados obtenidos de NMP del microorganismo bacteriológico (coliformes fecales), según esta comparación de medias existe variación significativa en los tratamientos de estabilización alcalina, formándose cuatro grupos A, B, C

y D de los cuales el tratamiento T4 es óptimo para la reducción de microorganismos bacteriológicos.

Figura 4.10. Interval Plot of Coliformes fecales vs Tratamientos CaO



En la figura 4.10 se observa que existe diferencia significativa respecto a las medias de los tratamientos de estabilización alcalina, por lo tanto, los intervalos de confianza se encuentran distantes, esto se debe a la variación de los % de aplicación CaO según p/p esto interviene en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes fecales).

Tabla 4.16 Resultados del NMP de coliformes totales y fecales con tratamientos de Ca(OH)_2

Tratamientos Ca(OH)_2	Coliformes totales_1	Coliformes Fecales_1
T1	2,00E+09	2,00E+03
T3	8,50E+02	7,00E+02
T5	1,00E+00	3,00E+02
T7	2,00E+00	2,00E+02
T1	2,00E+09	2,00E+03
T3	8,40E+02	7,10E+02
T5	2,00E+00	3,10E+02
T7	3,00E+00	2,05E+02

One-way ANOVA: Coliformes totales_1 versus Tratamientos Ca(OH)₂

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$
 Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Tratamientos Ca(OH) ₂	4	T1; T3; T5; T7

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tratamientos Ca(OH) ₂	3	6,00000E+18	2,00000E+18	1,56863E+17	0,000
Error	4	51	13		
Total	7	6,00000E+18			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,57071	100,00%	100,00%	100,00%

Interpretación de la estadística

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) mediante la prueba de FISHER, en el software estadístico MINITAB, ingresando los valores de la Tabla 4.16, donde nos muestran los resultados del NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales) como respuesta a los tratamientos de estabilización alcalina de las diferentes pruebas experimentales, obteniendo como resultado un P-value de 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado se rechaza la hipótesis que los tratamientos no tienen variación significativamente en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales), y el error del análisis estadístico alcanza un valor de 51,0.

Means

Tratamientos

Ca(OH) ₂	N	Mean	StDev	95% CI
T1	2	2000000000	0	(1999999993; 2000000007)
T3	2	845,00	7,07	(837,99; 852,01)
T5	2	1,500	0,707	(-5,510; 8,510)
T7	2	2,500	0,707	(-4,510; 9,510)

Pooled StDev = 3,57071

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Tratamientos

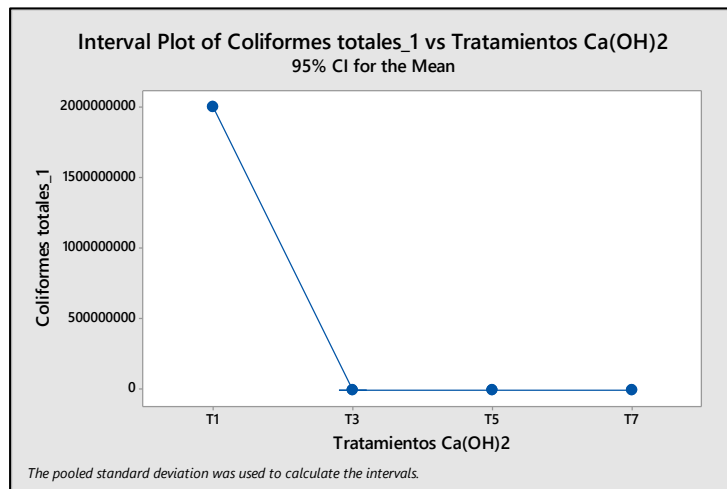
Ca(OH) ₂	N	Mean	Grouping
T1	2	2000000000	A
T3	2	845,00	B
T5	2	2,500	C
T7	2	1,500	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Interpretación de la estadística

Según la comparación de Fisher con el software Minitab, a partir de los resultados obtenidos de NMP del microorganismo bacteriológico (coliformes totales), según esta comparación de medias existe variación significativa en los tratamientos de estabilización alcalina, formándose cuatro grupos A, B, C y D de los cuales los tratamientos T5 y T7 son óptimos para la reducción de microorganismos bacteriológicos.

Figura 4.11. Interval Plot of Coliformes totales vs Tratamientos Ca(OH)₂



En la figura 4.11 se observa que existe diferencia significativa respecto a las medias de los tratamientos de estabilización alcalina, por lo tanto, los intervalos de confianza se encuentran distantes, esto se debe a la variación

de los % de aplicación Ca(OH)₂ según p/p esto interviene en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales).

One-way ANOVA: Coliformes Fecales_1 versus Tratamientos Ca(OH)₂

```
Method
Null hypothesis          All means are equal
Alternative hypothesis   At least one mean is different
Significance level      α = 0,05
Equal variances were assumed for the analysis.
Factor Information
Factor                  Levels  Values
Tratamientos Ca(OH)2   4      T1; T3; T5; T7
Analysis of Variance
Source                  DF      Adj SS  Adj MS  F-Value  P-Value
Tratamientos Ca(OH)2   3      4102034 1367345  48616,70 0,000
Error                   4          113      28
Total                   7      4102147
Model Summary
          S      R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
5,30330  100,00%  100,00%    99,99%
```

Interpretación de la estadística

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) mediante la prueba de FISHER, en el software estadístico MINITAB, ingresando los valores de la Tabla 4.16, donde nos muestran los resultados del NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes fecales) como respuesta a los tratamientos de estabilización alcalina de las diferentes pruebas experimentales, obteniendo como resultado un P-value de 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado se rechaza la hipótesis que los tratamientos no tienen variación significativamente en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes totales), y el error del análisis estadístico alcanza un valor de 113,0.

```
Means
Tratamientos
Ca(OH)2      N      Mean  StDev      95% CI
T1           2      2000    0      ( 1990; 2010)
T3           2      705,00  7,07    (694,59; 715,41)
T5           2      305,00  7,07    (294,59; 315,41)
T7           2      202,50  3,54    (192,09; 212,91)
```

Pooled StDev = 5,30330

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Tratamientos

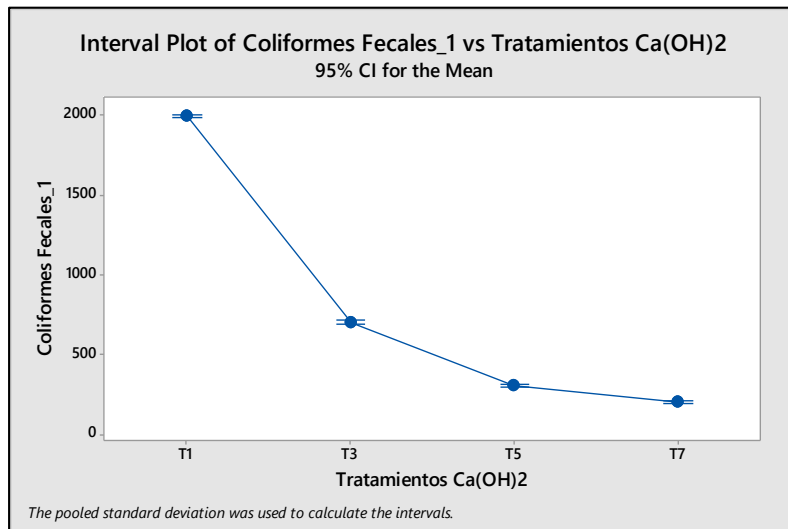
Ca(OH) ₂	N	Mean	Grouping
T1	2	2000	A
T3	2	705,00	B
T5	2	305,00	C
T7	2	202,50	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Interpretación de la estadística

Según la comparación de Fisher con el software Minitab, a partir de los resultados obtenidos de NMP del microorganismo bacteriológico (coliformes fecales), según esta comparación de medias existe variación significativa en los tratamientos de estabilización alcalina, formándose cuatro grupos A, B, C y D de los cuales los tratamientos T4 y T6 son óptimos para la reducción de microorganismos bacteriológicos.

Figura 4.12. Interval Plot of Coliformes fecales vs Tratamientos Ca(OH)₂



En la figura 4.12 se observa que existe diferencia significativa respecto a las medias de los tratamientos de estabilización alcalina, por lo tanto, los intervalos de confianza se encuentran distantes, esto se debe a la variación de los % de aplicación Ca(OH)_2 según p/p esto interviene en la reducción de NMP de microorganismo bacteriológicos (coliformes fecales).

CONCLUSIONES

Se caracterizaron los biosólidos de la PTAR “Doris Mendoza” fisicoquímicamente donde se obtuvieron los siguientes resultados el pH de 6,23, conductividad de 0,49 S/m; Materia orgánica 31%, Nitrógeno 2,1%, Fosforo 2,32%, Potasio 0,64%, calcio 5,78%, Magnesio 0,86%, Humedad 16,42%, sodio 0,07% y relación de C/N de 7,78%; de igual manera se analizó bacteriológico obteniendo $2,0 \times 10^9$ NMP/100mL de Coliformes Totales y $2,0 \times 10^3$ NMP/100mL de Coliformes fecales (E. Coli).

Se evaluaron las concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaO en los tratamientos en proporciones peso a peso con los biosólidos siendo la temperatura y el pH factores que influyen en la eliminación de microorganismos, el T4 logro elevar la temperatura hasta los 52,2 °C y el pH a 12,3 unidades por un periodo de 72 horas (3 días), en el T6 la temperatura llego a los 52,2 °C y el pH a 12,3 en un inicio y casi al final del tratamiento, en el caso de T5 y T7 se llegó elevar la temperatura a 51,5 °C y el pH a 12,4 unidades por un periodo de 72 horas (3 días).

Se determino el NMP de la reducción de microorganismos patógenos en la estabilización alcalina de los biosólidos compostados para el día cero (día de aplicación) en los tratamientos T6 y T7 se llegó a reducir de $1,95\text{E}+09$ NMP de coliformes totales a $1,00\text{E}+00$ y $7,00\text{E}+00$ NMP de coliformes totales respectivamente, en el día 6 se redujo en el tratamiento T6 a cero el NMP de coliformes totales y en el día 13 se redujo en el T4 a cero el NMP de coliformes totales, en la reducción de coliformes fecales (E. Coli) en el día cero en el tratamiento T6 se llegó a reducir de $2,05\text{E}+03$ a $4,60\text{E}+02$ el NMP de coliformes fecales (E. Coli), en el día 6 continua reduciéndose el tratamiento T6 a $3,01\text{E}+02$ el NMP de coliformes fecales (E. Coli) y finalmente en el día 13 se reduce en el tratamiento 6 a $1,45\text{E}+02$ el NMP de coliformes fecales (E. Coli).

Se considera al tratamiento 4 (T4) óptimo para la estabilización de los biosólidos ya que se requirió menor cantidad de CaO para la eliminación en su totalidad de coliformes totales y la reducción de coliformes fecales dentro del rango de los LMP este puede ser aplicado sin ningún tipo de restricciones como recuperadores de suelos ácidos y áridos, en comparación con el tratamiento 6 (T6) que requirió de mayor cantidad de CaO para obtener los mismos resultados registrados con el tratamiento 4 (T4) los cuales pueden endurecer los suelos debido a su alta concentración de CaO.

Se determinó la dosis óptima del 15 % de CaO en el tratamiento 4 en proporción p/p con los biosólidos para la estabilización alcalina de los biosólidos compostados eliminando en su totalidad a los coliformes totales, y reduciendo a $2,48E+02$ NMP de coliformes fecales (E. Coli), estos resultados se encuentran dentro del rango de los límites máximos permisibles para su disposición final, el cual es clasificado como biosólido estabilizado de tipo A, según la Agencia de Protección Ambiental.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas complementarias de estabilización alcalina para reducir la dosis mínima requerida de cal viva e hidratada, evaluando un rango entre el 8 y el 15% para reducir tiempos de tratamiento y por lo tanto costos y requerimientos de área.
- Se recomienda realizar estudios de pH y características del suelo donde se va a aprovechar o a disponer el biosólido estabilizado.
- Se recomienda evaluar la reducción de otros organismos causantes de enfermedades en las plantas y en la salud pública como los fitopatógenos y la salmonella.

BIBLIOGRAFÍA

1. 832-F-00-064, E. (2000). *“Aplicación de biosólidos al terreno”* . Folleto informativo de tecnología de biosólidos .
2. Acosta González Y, G. E. (2003). *Poder Fertilizante de los Lodos Residuales provenientes del Tratamiento de Aguas Servidas*. Venezuela: Universidad del Zulia, Núcleo Punto Fijo.
3. California Plant Health Association. (2004). *Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento*. México: Limusa.
4. Castellanos, J. Z. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas* . Guanajuato, México.: Colección INCAPA.
5. Catherine, M. W. (2007). *“Estabilización de lodos de la piscicultura coipue mediante compostaje”*. Departamento de ciencias químicas.
6. Celis, J. S. (2009). *Actividad Respiratoria de Microorganismos en un Suelo Patagónico Enmendado con Lodos Salmonícolas*. Arch. Med.
7. Clair N. Sawyer, P. I. (2000). *Química para Ingeniería Ambiental*. Mexico: Mc Graw Hill.
8. Colin, C. (1994). *Nuevas aplicaciones de Lodos Residuales*. México: Facultad de Química. Universidad Autónoma del estado de México.
9. Dáguer, G. (2003). Gestión de Biosólidos en Colombia: Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos de depuradora. *Revista Acodal 202. EPA. Agencia de Protección Ambiental*.
10. EPA. (2000). *“Aplicación de biosólidos al terreno”*. Folleto informativo de tecnología de biosólidos.
11. EPA. (2000). *Calidad de Biosólidos*. FOLLETO INFORMATIVO DE TECNOLOGÍA DE AGUAS RESIDUALES.
12. Fernández A. R García R. R., G. P. (2006). *“Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales”*.

13. Flores, T. F. (2005). *Los biosólidos de la planta tratadora de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes: Características i Usos*. Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes.
14. García, A. (2009). "El desarrollo del uso de biosólidos en el Noroeste de España". España: Medio Ambiente Online.
15. Grajales, S. (2006). "Programa de Manejo Integral de los Lodos Generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira". Facultad de Ciencias Ambientales.
16. Grajales, S. M. (2006). *Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Scientia et Technica.
17. Hernández Lehmann, A. (2002). "Manual de Diseño de Estaciones Depuradoras de aguas residuales". España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Segunda edición.
18. Hernández, M. ((1999)). "Depuración de aguas residuales". España: Colegio de Ingenieros, Canales y Puentes, Tercera edición.
19. Herrera, A. y. (2000). *¿Sequía?, ¿Inundaciones? El Potasio Ayuda al Maíz a Soportar el Estrés Hídrico*. INFOPOS. Informaciones Agronómicas.
20. Hilbert, J. (1999). "Manual Para la Producción de Biogás". Instituto de ingeniería rural.
21. Norma Oficial Mexicana, N.-0.-S.-2. 2. (2003). *Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Mexico: Diario Oficial de la Federación. México.
22. Ortiz, H. M. (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: Revista Internacional de Contaminación Ambiental.
23. Porta, C. J. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España: Mundi-Prensa.

24. Salcedo, P. (2000). *“Alternativas de uso agrícola y forestal de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras”*. Universidad Autónoma de Chapingo.
25. Soárez, M. (2002). *Manual de Tratamiento, Reciclado, Aprovechamiento y Gestión de Aguas Residuales de las industrias agroalimentarias*. España: Ediciones Mundiprensa.

ANEXOS

BIOSOLIDOS DE LA PTAR “DORIS MENDOZA” - CONCEPCION



TOMA DE MUESTRA DE LOS BIOSOLIDOS DE LA PTAR “DORIS MENDOZA”



COMPOSTERAS DE VIDRIO PARA LOS TRATAMIENTOS DE ESTABILIZACION



MEZCLA DE BIOSOLIDOS PARA MAYOR HOMOGENIZACION



PESADO DE LOS BIOSOLIDOS DE LA PTAR "DORIS MENDOZA"



PESADO DEL OXIDO DE CAL (CaO)



ADICION DEL OXIDO DE CAL CON LOS BIOSOLIDOS EN LAS
COMPOSTERAS



MEZCLA DEL OXIDO DE CAL CON EL BIOSOLIDO



TRATAMIENTOS CON OXIDO DE CAL Y BIOSOLIDO



PREPARACION DEL HIDROXIDO DE CALCIO ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)



ADICION DEL HIDROXIDO DE CALCIO EN LAS COMPOSTERAS



MEZCLA DEL HIDROXIDO DE CALCIO CON LOS BIOSOLIDOS



TRATAMIENTOS CON HIDROXIDO DE CALCIO Y BIOSOLIDO



IDENTIFICACION MEDIANTE LETREROS DE LOS TRATAMIENTOS



MEDICION DE LA TEMPERATURA EN EL TRATAMIENTO 4



ADICION DE AGUA DESTILADA EN LA MUESTRA REPRESENTATIVA



MEZCLA DEL AGUA DESTILADA CON LA MUESTRA REPRESENTATIVA DEL
BIOSOLIDO



MEDICION DEL pH EN LA MUESTRA REPRESENTATIVA



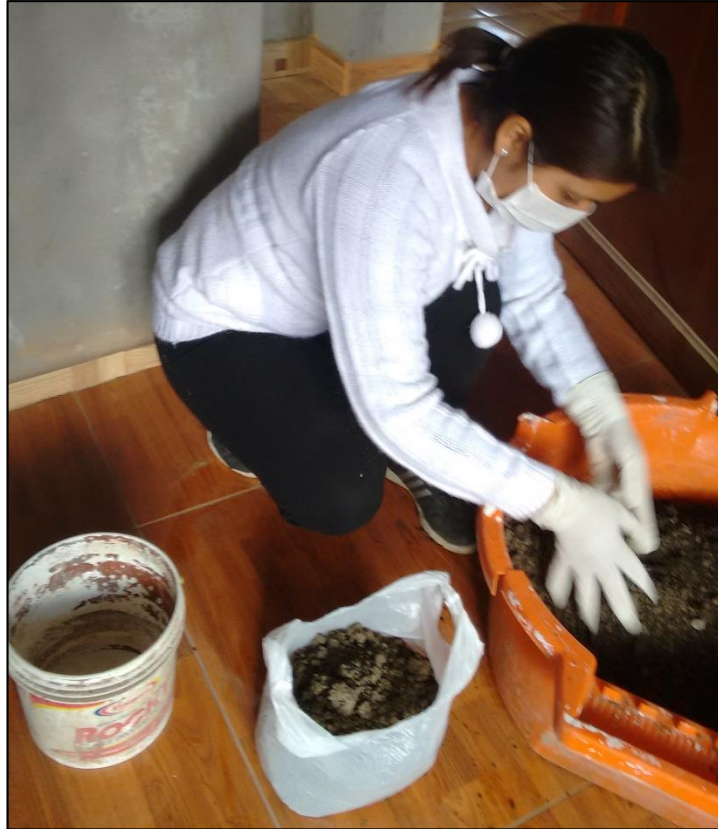
MEDICION DE LA TEMPERATURA EN EL TRATAMIENTO 1



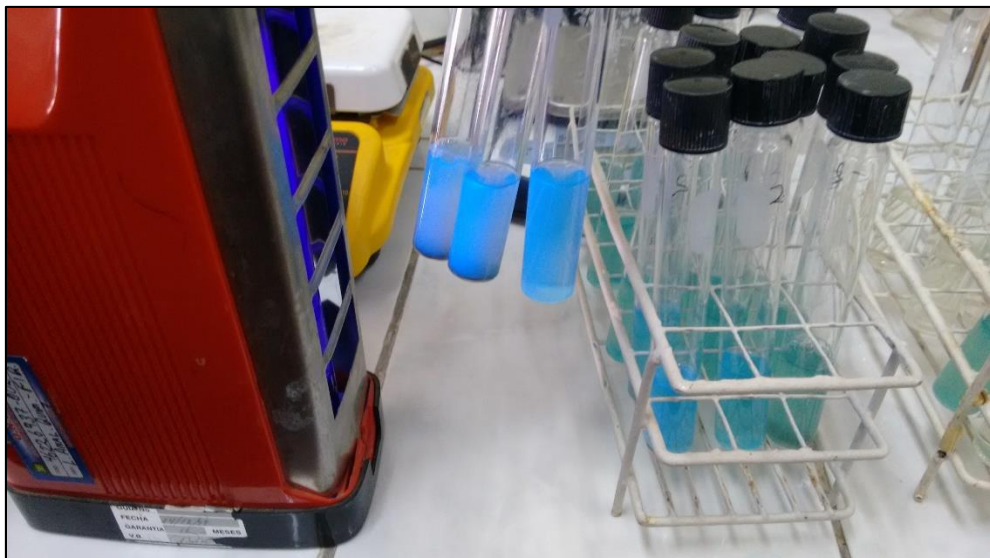
MEDICION DEL pH EN EL TRATAMIENTO 1



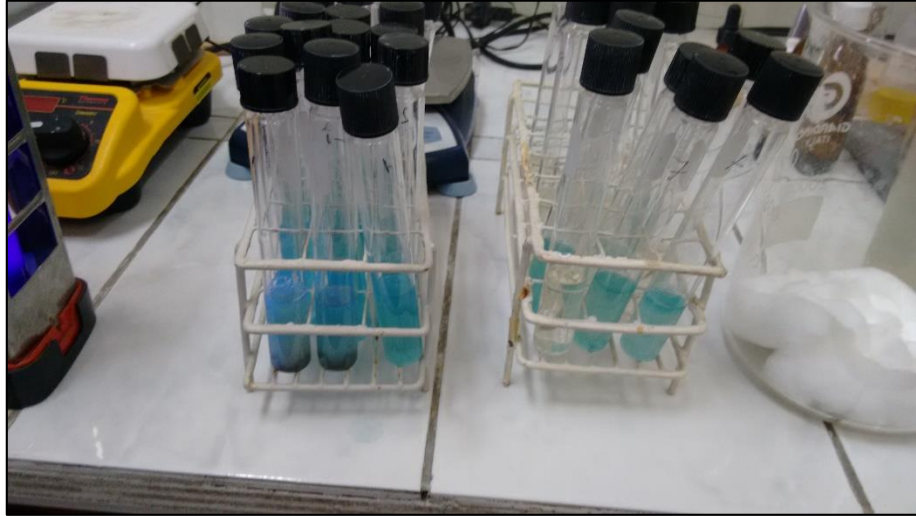
SEPARACION DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA PARA LOS ANALISIS MICROBIOLÓGICOS



ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO DE LAS MUESTRAS REPRESENTATIVAS



TUBOS MULTIPLES PARA EL ANALISIS BACTERIOLOGICO



INACTIVACIÓN DE COLIFORMES TOTALES DEL TRATAMIENTO 4

