

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**TRATAMIENTO DE LODOS POR EL MÉTODO DE DIGESTIÓN
ANAEROBIA TERMOFÍLICA PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS PROVENIENTES DE LA
LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN SECUNDARIA DE AGUAS
SERVIDAS-PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

SARID VÁLERI NORIEGA BELTRAN

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TRATAMIENTO DE LODOS POR EL MÉTODO DE DIGESTIÓN
ANAEROBIA TERMOFÍLICA PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOSÓLIDOS ESTABILIZADOS PROVENIENTES DE LA
LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN SECUNDARIA DE AGUAS
SERVIDAS-PUNO**

**TESIS PRESENTADA POR:
SARID VÁLERI NORIEGA BELTRÁN
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO**



APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE :
Dr. GREGORIO PALOMINO CUELA

PRIMER MIEMBRO :
M.Sc. SALOMÓN TTITO LEÓN

SEGUNDO MIEMBRO :
D.Sc. LIDIA ENSUEÑO ROMERO IRURI

DIRECTOR DE TESIS :
M.Sc. JANETTE ROSARIO RAMOS PINEDA

ÁREA: Tecnología Ambiental

TEMA: Tratamiento de lodos residuales

LÍNEA: Tecnología ambiental y recursos naturales

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 06 DE NOVIEMBRE DEL 2018

*DEDICATORIA**A DIOS,*

*Por haberme permitido llegar a este
momento y haberme dado salud para seguir
logrando mis objetivos.*

A mis padres Teodora y Alain

*Por darme su amor, apoyo y confianza
incondicional a lo largo de mi vida y
enseñarme el camino de la superación.
¡Los quiero mamá y papá!*

A mis hermanos, Vladimir, Diego y Franco

*Porque a pesar de la distancia siempre me
brindan su apoyo y cariño incondicional.*

A Luis

*Por acompañarme y apoyarme en esta nueva
etapa de mi vida.*

Sarid Valeri Noriega Beltran

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco a Dios por la confianza que tuvo en mí, al igual que mis padres, mis hermanos, mis amigas y mis amigos que me dieron siempre esos ánimos para seguir adelante en todo instante.

Agradezco también a mis docentes de los centros de estudios primarios, secundarios y a mis docentes universitarios por compartir sus conocimientos y sabiduría, a lo largo de mi formación académica en la Facultad de Ingeniería Química de nuestra primera casa de estudios.

Agradezco a cada uno de los integrantes que conforman el equipo del proyecto Biocombustible, en especial al Dr. Nazario VILLAFUERTE PRUDENCIO por darme la oportunidad de formar y ser parte del equipo.

A mis jurados Dr. Gregorio PALOMINO CUELA, M.Sc. Salomón TTITO LEÓN, Dra. Lidia ENSUEÑO IRURI, por sus críticas y apreciaciones para lograr un buen trabajo.

A mi Directora y Asesora M.Sc. Janette RAMOS PINEDA por brindarme su apoyo y asesoría incondicional.

Y a todas las personas que formaron, forman y formarán parte de mi vida porque de cada persona me llevo lo grato y lo valioso de aprender de cada uno de ellos y que para conseguir algo el esfuerzo y sacrificio dado valdrá la pena al final del camino.

Este trabajo es para todos ellos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
I. INTRODUCCIÓN	15
II. REVISIÓN DE LITERATURA	17
2.1. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1.1. Lodos residuales	17
2.1.2. Características de los lodos residuales.....	17
2.1.2.1. Metales.....	18
2.1.2.2. Nutrientes.....	19
2.1.2.3. Contaminantes orgánicos.....	20
2.1.2.4. Patógenos	20
2.1.3. Estabilización de lodos residuales	21
2.1.4. Digestión anaerobia	22
2.1.5. Bioquímica de digestión anaerobia.....	24
2.1.6. Proceso de digestión anaerobia.....	28
2.1.7. Productos de la digestión anaerobia.....	29
2.1.7.1. Gas	29
2.1.7.2. Efluente (Lodo digerido)	30
2.1.8. Biofertilizante (Biosólidos estable)	30
2.1.9. Clasificación de los biosólidos	31
2.1.10. Factores que afectan la digestión anaerobia	34
2.1.10.1. Microorganismos y sustrato	34
2.1.10.2. Carga de alimentación	34
2.1.10.3. Mezclado	34
2.1.10.4. Condiciones anaerobias	35
2.2. ANTECEDENTES.....	40
III. MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. Recursos necesarios	43
3.1.1. Materiales, reactivos y equipo	43

3.1.1.1. Material de origen orgánico-inorgánico:	43
3.1.1.2. Infraestructura	43
3.1.1.3. Materiales.....	43
3.1.1.4. Instrumentos.....	45
3.1.1.5. Equipos	45
3.1.1.6. Reactivos.....	46
3.2. Localización del proyecto:	46
3.2.1. Extensión y características	47
3.3. Tipo diseño de investigación.....	48
3.4. Metodología	48
3.4.1. Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los biosólidos estabilizados obtenidos en el tratamiento por el método de digestión anaerobia termofílica de los lodos provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno.	48
3.4.2. Determinar el efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado.	56
3.4.3. Determinar el comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión de anaerobia termofílica.	56
3.4.4. Técnicas analíticas empleadas	57
3.5. Pruebas estadísticas que se utilizarán.....	58
3.5.1. Variables a ser analizadas:.....	58
3.5.2. Transformada de variables.....	59
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1. Resultados	60
4.1.1. Determinación de las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los biosólidos estabilizados obtenidos en el tratamiento por el método de digestión anaerobia termofílica de los lodos provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno.	60
4.1.1.1. Parámetros medidos in-situ del lugar de muestreo.	61
4.1.1.2. Parámetros medidos en el laboratorio.....	62
4.1.1.3. Caracterización de los lodos residuales de los diferentes puntos de muestreo de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno.	62

4.1.1.4. Caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica del biosólido estabilizado obtenido de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno.....	65
4.1.1.5. Discusiones	67
4.1.2. Determinación del efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado.	83
4.1.2.1. Análisis estadístico	84
4.1.3. Determinación del comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión de anaerobia termofílica.	89
4.1.3.1. Análisis estadístico	90
V. CONCLUSIONES	97
VI. RECOMENDACIONES	99
VII. REFERENCIAS	100
ANEXOS	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas del proceso de digestión anaerobia.....	24
Figura 2: Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos..	25
Figura 3: Plano de la ubicación de la Laguna de Estabilización "El Espinar"	47
Figura 4: Mapa satelital de la laguna de estabilización primaria y secundaria "El Espinar"	48
Figura 5: Mapa satelital de los puntos de muestreo.....	49
Figura 6: Protocolo para la toma de muestras para lodos de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno	51
Figura 7: Incubadora para los ensayos de biodegradabilidad.....	54
Figura 8: pH Vs. Tiempo	67
Figura 9: Conductividad Vs. Tiempo	68
Figura 10: Materia Orgánica Vs. Tiempo	69
Figura 11: Nitrógeno Vs. Tiempo.....	70
Figura 12: Fósforo Vs. Tiempo.....	70
Figura 13: Potasio Vs. Tiempo	71
Figura 14: Coliformes fecales (NMP/g)	72
Figura 15: Coliformes fecales Vs. pH	73
Figura 16: Coliformes fecales Vs. Temperatura.....	73
Figura 17: <i>Salmonella ssp.</i> (NMP/g)	74
Figura 18: <i>Salmonella ssp.</i> Vs. pH	75
Figura 19: <i>Salmonella ssp.</i> Vs. Temperatura.....	75
Figura 20: Huevos de Helminthos (HH/g).....	76
Figura 21: Huevos de Helminthos Vs. pH.....	76
Figura 22: Huevos de Helminthos Vs. Temperatura	77
Figura 23: Arsénico (As) mg/kg	78
Figura 24: Cadmio (Cd) mg/kg.....	78
Figura 25: Cobre (Cu) mg/kg.....	79
Figura 26: Cromo (Cr) mg/kg.....	79
Figura 27: Mercurio (Hg) mg/kg	80
Figura 28: Molibdeno (Mo) mg/kg	80
Figura 29: Níquel (Ni) mg/kg	81
Figura 30: Plomo (Pb) mg/kg	81

Figura 31: Selenio (Se) mg/kg	82
Figura 32: Zinc (Zn) mg/kg	82
Figura 33: Temperatura vs. Tiempo	84
Figura 34: Diagrama de Pareto Estandarizado (DPE)	86
Figura 35: Superficie de respuesta estimada.....	89
Figura 36: pH vs. Tiempo	90
Figura 37: Diagrama de Pareto Estandarizado (DPE)	92
Figura 38: Superficie de respuesta estimada.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización y composición de lodos	18
Tabla 2: Valores típicos para metales en lodos residuales.....	19
Tabla 3: Temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de patógenos	21
Tabla 4: Ventajas del proceso de digestión anaerobia	23
Tabla 5: Principales ácidos grasos durante la digestión.	26
Tabla 6: Bacterias involucradas en la digestión anaerobia	28
Tabla 7: Componentes del biogás en función del substrato utilizado.....	30
Tabla 8: Contenido de parámetros parasitológicos y microbiológicos en los biosólidos de acuerdo a USEPA 503 y comparación de valores con países de América Latina	32
Tabla 9: Contenido de metales máximos permisibles en mg/ kg (base seca) en los biosólidos de acuerdo a USEPA 503 y comparación de valores con países de América Latina	33
Tabla 10: Efecto de la temperatura en el tiempo de digestión anaerobia	36
Tabla 11: Rangos de pH en el proceso de digestión anaerobia	38
Tabla 12: Puntos de muestreo de la laguna secundaria de Estabilización de aguas servidas de la ciudad de Puno.....	50
Tabla 13: Condiciones ambientales trabajadas en el laboratorio para el proceso de digestión anaerobia termofílica.....	53
Tabla 14: Comparación del contenido microbiológico y parasitológico del biosólido estabilizado obtenido con los valores de la Norma 40CFR parte 503 de EPA.	55
Tabla 15. Comparación del contenido de metales del biosólido estabilizado obtenido con los valores de la Norma 40CFR parte 503 de EPA	56
Tabla 16: Caracterización analítica de la muestra de lodos residuales de la Laguna de Estabilización Secundaria de aguas servidas de la ciudad de Puno y biosólido estabilizado obtenido del tratamiento de digestión anaerobia termofílica.	57
Tabla 17: Operacionalización de variables	58
Tabla 18: Parámetros medidos in-situ día 0.....	61
Tabla 19. Parámetros medidos en el Megalaboratorio del día 1	62
Tabla 20: Resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica de los lodos residuales de la laguna de estabilización de Puno antes de la experimentación del día 0	63

Tabla 21: Resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica de los biosólidos estabilizado obtenido de la laguna de estabilización de Puno después de la experimentación del día 33	65
Tabla 22: Resultados de la temperatura con respecto al tiempo.....	83
Tabla 23: Resumen estadístico	84
Tabla 24: Efectos estimados para el tiempo (días) del proceso de digestión anaerobia termofílica.....	85
Tabla 25: Análisis de varianza.....	86
Tabla 26: Coeficiente de regresión para tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica- Diseño Factorial 2 ⁴	87
Tabla 27: Resultados estimados para el tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica.....	88
Tabla 28: Resultados del pH con respecto al tiempo.....	89
Tabla 29: Resumen estadístico	91
Tabla 30: Efectos estimados para el tiempo (días) del proceso de digestión anaerobia termofílica.....	91
Tabla 31: Análisis de varianza.....	92
Tabla 32: Coeficiente de regresión para tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica- Diseño Factorial 2 ⁴	94
Tabla 33: Resultados estimados para el tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica.....	95

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AGV	: Ácidos grasos volátiles
APHA	: American Public Health Association (Asociación Americana de Salud Pública)
AWWA	: American Water Works Association (Asociación Americana de Obras de Agua)
CONAMA	: Congreso Nacional del Medio Ambiente
CRF	: Código Regional Federal
EPA	: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
EPS	: Empresa Prestadora de Servicio
HH	: Huevos de helmintos
INACAL	: Instituto Nacional de Calidad
LR	: Lodo Residual
LRS	: Lodo Residual Secundario
MINAN	: Ministerio Nacional del Ambiente
MO	: Materia orgánica
NMP	: Número más probable
NPK	: Nitrógeno, fósforo y potasio
OEFA	: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OMS	: Organización Mundial de la Salud
pH	: Potencial de Hidrogeniones
PTAP	: Planta de Tratamiento de Agua Potable
PTAR	: Planta de Tratamiento de Agua Residual
SEMANART	: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ST	: Sólidos Totales
STD	: Sólidos Totales Disueltos
SUNASS	: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento
UNAP	: Universidad Nacional del Altiplano Puno
UTM	: Universal Transverse Mercator (Universal Transversal de Mercator)
WEF	: Water Environmet Federation (Federación Ambiental del Agua)

RESUMEN

La presente investigación de “Tratamiento de lodos por el método de digestión anaerobia termofílica para la obtención de biosólidos estabilizados provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno”, tuvo por objetivos determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los biosólidos estabilizados obtenidos, determinar el efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días y determinar el comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión anaerobia termofílica; en la metodología se trabajó con un digester de biosólidos con cuatro muestras experimentales MP1, MP2, MP3 y MP4, con un volumen efectivo de tratamiento de 1 litro, con 50% de volumen útil, bajo condiciones termofílicas entre (41°C a 65°C), a condiciones ambientales con una presión barométrica de 488,1mmHg, a una altitud de 3811 m.s.n.m y en las estaciones de Otoño- Invierno, se realizó 16 mediciones de los parámetros de pH y temperatura, este fue operado por un periodo de 33 días. Los resultados obtenidos de las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de las muestras de biosólidos estabilizados se caracterizó por tener valores de pH entre 7,69 a 8,43, conductividad entre 1378 mmhos/cm a 2009 mmhos/cm, materia orgánica entre 21,44 % a 22,53 %, NPK se encuentran entre 5,1 % a 6,7 % de N, 2443 mg/kg a 10194 mg/kg de P y 893 mg/kg a 1511 mg/kg de K y que equivalen a 1,37 % a 3,17 % y 2,71 % a 3,11 % respectivamente para P y K, coliformes fecales <3/100 NMP/g, salmonella spp. y huevos de helmintos presentaron ausencia de estos y contenido de metales pesados de As, Cd, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Se y Zn presentaron valores relativamente muy bajos, el efecto de la temperatura fue indirectamente proporcional en relación al tiempo y el comportamiento del pH del lodo fue directamente proporcional en relación al tiempo; se concluyeron que todos los resultados obtenidos se encontraron por debajo de lo establecido de las normas presentes alcanzando la clase de biosólido de clase A, la temperatura y el pH fueron dos parámetros imprescindibles y predominantes en la eliminación total y parcial de patógenos y microorganismos para la obtención final de biosólidos estabilizados.

Palabras clave:

Biosólido, digestión anaerobia, lodos, pH, temperatura, termofílica.

ABSTRACT

The present research of " Sludge treatment by thermophilic anaerobic digestion method to obtain stabilized biosolids from secondary sewage stabilization lagoon-Puno", had as objectives first determine the physicochemical, microbiological and parasitological characteristics the biosolids stabilized, second determine the temperature effect on thermophilic anaerobic digestion in days and finally determine the pH behavior over time in thermophilic anaerobic digestion; in the methodology it was worked in a biosolids digester with four experimental samples MP1, MP2, MP3 and MP4, with an effective volume of 1 liter treatment, with 50% of useful volume, under thermophilic conditions between (41°C to 65°C), at environmental conditions with a barometric pressure of 488,1 mmHg, at an altitude of 3811 meters above sea level and in the Autumn-Winter seasons, 16 measurements of pH and temperature parameters are made, this was operated for a period 33 days. The results of physicochemical, microbiological and parasitological characteristics of biosolids stabilized samples are characterized by having pH values between 7,69 to 8,43, conductivity between 1378 mmhos/cm to 2009 mmhos/cm, organic matter between 21,44% to 22,53%, NPK is between 5,1% to 6,7% of N, 2443 mg/kg to 10194 mg/kg of P and 893 mg/kg to 1511 mg/kg of K and which are equivalent to 1,37% to 3,17% and 2,71% to 3,11% respectively for P and K, fecal coliforms <3/100 NMP/g, salmonella spp. and helminth eggs showed absence of these and heavy metal content of As, Cd, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Se and Zn presented relatively low values The temperature effects were indirectly proportionally in the relation to time and the pH behavior of mud was directly proportional in relation to time; it was concluded that all the results obtained were below the established of the present norms achieving class A biosolids, temperature and pH were two essential parameters and predominant in the total and partial elimination of pathogens and microorganisms for the final obtaining biosolids stabilized.

Keywords:

Anaerobic digestión, biosolids, pH, sludge, temperature, thermophilic.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la necesidad de minimizar residuos, así como su disposición adecuada y segura, son aspectos de suma importancia mundialmente, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas tecnológicas y cambios en las políticas de manejo que permitan generar residuos no peligrosos y estables para su correcta disposición o reaprovechamiento (Oropeza, 2006). Sólo en el Perú el año 2012 se generó 2 217 946 m³/ día de aguas residuales y para el año 2024 está proyectada el doble con 4 842 579 74 m³/día (OEFA, 2014), en el inventario del año 2008 de las PTAR (Planta de Tratamiento de Agua Residual) en las EPS (Empresa Prestadora de Servicio) muestra que de las 143 PTAR, 92% se compone de lagunas de estabilización en sus diferentes variedades de comportamiento biológico (anaerobias, facultativas o aireadas), siendo el 78% lagunas facultativas las más empleadas en 112 PTAR. (SUNASS, 2008) y en la Región de Puno, existen 20 lagunas de estabilización, los mismos presentan problemas: unas colapsadas otras con serias deficiencias de funcionamiento por recibir cargas por encima de los caudales de diseño y falta de programas de mantenimiento (Florez, 2014), por lo que habrá una mayor generación de lodos residuales ya que las plantas de tratamiento de aguas residuales, no solo contemplan cómo tratar el agua sino también deben explicar qué hacer con lodos residuales generados (Dágner, 2003), que son dispuestos sin previo tratamiento y sin un manejo adecuado.

Los lodos son constituidos por materia orgánica, metales pesados y otros representan un problema ambiental por las cantidades, volúmenes y contaminación que generan e implican un costo extra en su manejo y disposición final, representando un riesgo a la salud pública y al medio ambiente (Rojas y Mendoza, 2012), estos pueden ser sometidos a procesos de estabilización como la digestión anaerobia termofílica siendo un medio de tratamiento (Shammas & Wang, 2010), y la tecnología más utilizada para estabilizar LRS (Lodos residuales secundarios), principalmente por la posibilidad de recuperar energía y por qué los LRS estabilizados pueden ser reutilizados como fertilizantes (Cacho y Suidan, 2006) por sus propiedades y caracterización que pueden ser clasificados como biosólidos de tipo A (Vigueras et al., 2013) según el Reglamento del Código Federal en el capítulo 40 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y la normativa peruana de Decreto Supremo

N°015-2017 del Ministerio de Vivienda; por lo que el propósito principal de esta investigación es utilizar los lodos residuales (actualmente un recurso sin utilizar y un material peligroso) de la Laguna de Estabilización Secundaria Puno como material experimental, que se someterá a un análisis fisicoquímico y bacteriológico, se tratará y se estabilizará mediante el proceso de digestión anaerobia termofílica, lo que permitirá después de los análisis, mediciones y resultados del laboratorio precisar si el lodo es considerado como un residuo peligroso o un residuo no peligroso, en base a esto se evaluará la calidad del biosólido con fines agrícolas y en beneficio a la población general de la ciudad de Puno.

Siendo el objetivo general del proyecto de realizar el tratamiento de lodos por el método de digestión anaerobia termofílica, provenientes de las aguas servidas de la laguna de estabilización secundaria de Puno para la obtención de biosólidos estabilizados

Sus objetivos específicos son:

- a) Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los biosólidos estabilizados obtenidos por el método de digestión anaerobia termofílica de los lodos provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno.
- b) Determinar el efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado.
- c) Determinar el comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión de anaerobia termofílica.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Lodos residuales

El tratamiento de aguas residuales, tiene como objetivos remover los contaminantes presentes con el fin de hacerlas aptas para otros usos o bien para evitar daños al ambiente. Sin embargo el tratamiento de aguas servidas trae como consecuencia la formación de lodos residuales (Oropeza, 2006).

Los lodos residuales son subproductos sólidos, semisólidos o líquidos. Por lo general, contiene de 93 a 99,5 por ciento de agua, así como sólidos y sustancias disueltas que están presentes en las aguas residuales. (EPA 625/10-84-003, 1984). Esto incluye, pero no se limita, a las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o terciario y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración (EPA/832-B-93-005, 1995).

Son generados en las siguientes instalaciones:

1. Lodos generados en las PTAP y PTAR:
 - a) Lodos generados en los estanques reguladores de agua cruda, decantadores y del lavado de filtros de las PTAP. Incluye el rechazo de las unidades de membranas.
 - b) Lodos generados en el tratamiento primario, secundario y terciario de las PTAR.
2. Lodos provenientes del servicio de disposición sanitaria de excretas
 - c) Lodos fecales que son admitidos en una PTAR para su tratamiento conjunto con las aguas residuales o lodos en una PTAR. (RM N° 128-2017-VIVIENDA, 2017).

2.1.2. Características de los lodos residuales

Las características físico-químicas de los lodos residuales dependen de la composición inicial de las aguas residuales y de la secuencia de los procesos usados en

el tratamiento. Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y cantidades de lodos, pueden variar anualmente, estacionalmente o incluso diariamente (EPA 625/10-84-003, 1984). Los lodos tienden a acumular una serie de compuestos orgánicos y metales según la Tabla 01, esto hace que la calidad del lodo dependa fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales:

Tabla 1: Caracterización y composición de lodos

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios (mezcla)	Lodos digeridos
pH	5,5-6,5	6,5-7,5	6,8-7,6
Contenido de agua (%)	92-96	97,5-98	94-97
SSV (%ss)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%ss)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%ss)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%ss)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%ss)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%ss)	0,5-1,5	1,5-2,5	0,5-1,5
Bacterias patógenas (NMP/100mL)	10 ³ -10 ⁵	100-100	10-100
Metales pesados (%ss) (Zn, Cu, Pb)	0,2-2	0,2-2	0,2-2

FUENTE:(Hernandez, 1992)

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles, NMP: Número Más Probable.

ss: Sólidos Suspendidos

2.1.2.1. Metales

Muchos de los metales no son especialmente tóxicos y algunos son elementos esenciales en el ser humano, independientemente de que a determinadas concentraciones puedan ser tóxicos. Sin embargo, existe una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y se les conoce con el término genérico de “metales pesados” (Pérez, 2011), se refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas (Lucho *et al.*, 2005), tienen una acción dinámica y consecuencias ambientales muy diferentes unos de otros. Estos son: cobre, zinc, mercurio, cadmio, cromo, níquel y plomo. Representan un grupo de contaminantes que no son biodegradados biológicamente o químicamente de forma natural,

principalmente en ambientes terrestres y en sedimentos acuáticos. Al contrario, son acumulados y pueden volverse aún más nocivos cuando reaccionan con algunos de los componentes de los suelos y sedimentos (PROSAB, 1999).

En los lodos residuales encontramos metales pesados presentados en la Tabla 02, siendo potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación en las cadenas alimenticias suscitan preocupaciones medioambientales y sanitarias. Los metales están siempre presentes, a concentraciones bajas, en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones más significantes son las que se encuentran en las aguas residuales industriales (Morales, 2005).

Tabla 2: Valores típicos para metales en lodos residuales

Parámetro	Lodos de Aguas residuales domésticas (mg/kg)	Lodos de Aguas residuales domésticas +industriales (mg/kg)
As	10 – 50	-
Cd	10 – 400	90 – 240
Cr	50 – 200	260 – 2650
Cu	95 - 700	960 – 2300
Pb	200 - 500	760 – 2790
Hg	1 - 11,2	2,6 – 5
Ni	110 - 400	200 – 900
Se	10 - 180	-
Zn	1000 - 1800	800 – 460

FUENTE:(Morales, 2005)

2.1.2.2. Nutrientes

La composición de agronómica de lodos residuales tienen características similares a cualquier fertilizante comercial, siendo destacables los nutrientes y los oligoelementos necesarios para el correcto desarrollo y crecimiento de las plantas (González, 2015). Siendo el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y carbono orgánico (C) y entre otros los elementos más importantes que confieren estas propiedades. La composición química de los lodos residuales no es igual, encontrando concentraciones de 0,1% a 17,6%, 0,1 a 14,3% y 0,02% a 2,6% para N, P y K, respectivamente. No obstante, sólo una parte de estos nutrientes en forma inorgánica puede ser asimilada por las plantas (Gálvez, 2014).

Aproximadamente el 80% de todo el nitrógeno contenido en los lodos estará disponible para las plantas, y el fósforo está en un rango de 40-80%. La peligrosidad de estos nutrientes radica en su potencial de eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales. Sin, embargo se puede considerar como fertilizantes valiosos (Morales, 2005).

Las distintas normativas restringen el uso de los lodos de depuradora tomando como referencia valores asignados a distintos contaminantes, tanto microbiológicos como orgánicos y metálicos; pero son las características agronómicas las que nos van a permitir establecer aquellas buenas prácticas agrícolas que determinen la cantidad, periodicidad y forma en que los lodos se puedan incorporar al terreno (González, 2015).

2.1.2.3. Contaminantes orgánicos

Los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos y entre otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con menor solubilidad en agua y alta capacidad de adsorción son motivo de preocupación por sus efectos perjudiciales sobre el medio ambiente y la salud humana. Una de las características más importantes es su variado potencial de biodegradación. Muchos de estos compuestos se biodegradan lentamente, por lo tanto los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales tienden a tener mayor tiempo de residencia y una mayor capacidad para biodegradar estos compuestos indeseables (Morales, 2005). No obstante, el grupo de trabajo de la OMS (Organización Mundial de la Salud) sobre riesgos para la salud de los productos químicos presentes en los lodos residuales utilizados en las tierras, se llegó a la conclusión de que la absorción total por el hombre, de contaminantes orgánicos procedentes del uso de lodos a las tierras de cultivo, es poco importante y probablemente no causará efectos adversos para la salud (Mosquera & Martínez, 2012).

2.1.2.4. Patógenos

Los microorganismos patógenos son las bacterias, protozoarios, hongos, virus, huevos de helmintos en lodos y/o biosólidos capaces de provocar enfermedades y epidemias en el ser humano (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017), la concentración de estos en los lodos residuales guarda relación con factores como las condiciones socio-

económicas, sanitarias y de salud de la población, la región, la presencia de animales y el tipo de tratamiento al que el lodo fue sometido (Andreoli *et al.*, 1999, citado por Torres, *et al.*, 2009), en la Tabla 03 se muestra la temperatura y el tiempo de exposición para eliminación de algunos microorganismos patógenos.

Tabla 3: Temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de patógenos

Organismo	Observaciones
<i>Salmonella typhosa</i>	Sin crecimiento por encima de 46 °C, eliminación en 30 minutos a 55-60 °C y en 20 minutos a 60 °C
<i>Salmonella sp.</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C y en 15-20 minutos a 60°C
<i>Shigella sp.</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C
<i>Escherichia coli</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C y 15-20 minutos a 60 °C
<i>Entamoeba histolytica</i>	Eliminación en pocos minutos a 45 °C y en pocos segundos a 55 °C
<i>Taenia saginata</i>	Eliminación en pocos minutos a 55°C
<i>Trichinella spiralis</i>	Eliminación rápida 55 °C e instantánea 60 °C
<i>Brucella abortus o Br. suis.</i>	Eliminación en 1 hora a 55 °C y en 3 minutos a 62-63 °C
<i>Mycrococcus pyogenes var. Aureus</i>	Eliminación en 10 minutos a 50 °C
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Eliminación en 10 minutos a 54 °C
<i>Mycobacterium tuberculosis var. Homini</i>	Eliminación en 15-20 minutos a 66 °C
<i>Corynebacterium diphtheria</i>	Eliminación en 45 minutos a 55 °c
<i>Necator americanus</i>	Eliminación en 50 minutos a 45 °C
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Eliminación en menos de 1 hora a temperaturas mayores de 50 °C

FUENTE: (Tchobanoglous, *et al.*, 1994 citado por Torres, *et al.*, 2009).

2.1.3. Estabilización de lodos residuales

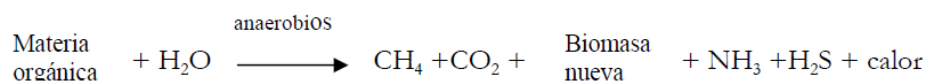
Los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, poseen características que los hacen nocivos para el medio ambiente (Morales, 2005), los tres objetivos principales del tratamiento están dirigidos a lograr su estabilización para garantizar una degradación controlada de las sustancias orgánicas que contienen las cuales son, eliminar los olores desagradables e inhibir, disminuir el volumen e inactivar organismos patogénicos y reducir o eliminar su potencial de putrefacción para su

posible utilización posterior o disposición final (Amador, *et al.*, 2015), estos objetivos se consiguen en mayor o menor grado en función del sistema de estabilización.

El término estabilización puede considerarse como el proceso o el conjunto de procesos que dan como producto final un lodo con características tales que después del proceso puede ser usado sin que comprometa la salud pública o al medio ambiente. (Yoshida, *et al.*, 2013 citada en González, 2015) , esto puede lograrse química, biológica (aerobia o anaerobia), o física. Las prácticas de estabilización más comunes son la estabilización con cal, compostaje, digestión anaerobia y digestión aerobia (Morales, 2005).

2.1.4. Digestión anaerobia

Es un proceso biológico en el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), y en digestión, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (Rodríguez, 2010 citado por Mosquera y Martínez, 2012), siendo los principales productos del proceso de digestión anaerobia, el biogás y un efluente estabilizado (Campos, 2001).



La digestión anaerobia de lodos se aplica con el propósito de producir un compuesto final más estable y eliminar cualquier microorganismo patógeno presente en el lodo crudo. El resultado de la digestión es reducir el contenido volátil a cerca del 50% y los sólidos a aproximadamente un 70% de los valores originales (Weber, 1979 citado por Galvis y Rivera, 2013).

Se aplica el tratamiento necesario a aquellos lodos con alta concentración de materia orgánica como procesos de tratamiento de aguas residuales que permita demostrar un tiempo prolongado de permanencia de lodo por varios años como lagunas de estabilización, lagunas anaerobias, facultativas, aireadas, lagunas con macrofitas, entre otros (RM N° 128-2017-VIVIENDA, 2017). En la Tabla 04 se puede observar las ventajas del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 4: Ventajas del proceso de digestión anaerobia

FACTOR	VENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA
Variabilidad en la composición	Homogeneización de la composición, más intensa cuanto mayor es el tiempo de retención.
Malos olores y compuestos orgánicos volátiles	Eliminación de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros compuestos fácilmente degradables. La materia orgánica resultante es lentamente o difícilmente degradable; los purines digeridos no presentan olor desagradable y son un producto más estable. En procesos térmicos posteriores se evitan problemas por volatilización de compuestos orgánicos. La reducción o eliminación de AGV disminuye la fitotoxicidad a los cultivos por estos compuestos.
Reducción de la materia orgánica total y mineralización	Reducción de sólidos totales y volátiles. Reducción de materia orgánica desagradable y mantenimiento de las concentraciones de nutrientes. Transformación de nitrógeno orgánico a amoniacal. En caso de separar la fase acuosa, el producto resultante presentará menor volumen, manteniendo la misma riqueza fertilizante.
Distribución de partículas y de fracción soluble	Homogenización en la distribución de partículas, lo cual favorece al diseño y aplicación de procesos posteriores de secado. Hidrólisis de partículas pequeñas y coloidales, reducción de orgánicos solubles, con la cual facilita la separación entre fases solubles y en suspensión.
Consistencia	Consistencia pastosa de la fracción sólida de los lodos digeridos, lo cual favorece a su manipulación y peletización.
Alcalinidad	Disminución muy significativa de la relación de alcalinidad. Aporte de alcalinidad para favorecer un proceso posterior de nitrificación total o parcial. A su vez, y debido a la reducción de materia orgánica, el consumo energético en este proceso será inferior al de la nitrificación de la fracción líquida de purines frescos.
Balance energético	Balance energético positivo y proceso productor neto de energía renovable. Contribuye a disminuir las necesidades externas de energía para procesos térmicos posteriores. Permite el tratamiento de mezclas con otros residuos para optimizar la producción energética (codigestión), y facilitar la gestión integral de residuos orgánicos en la zona de aplicación del plan (cogestión).
Emisiones de gas de efecto invernadero	El proceso contribuye a la disminución en la generación de gases de efecto invernadero, si el metano producido sustituye una fuente no renovable de energía.

FUENTE: (Flotats, *et al* ., 2000 citado por Campos, 2001).

2.1.5. Bioquímica de digestión anaerobia

Durante la digestión, las moléculas complejas (polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina) se descomponen en moléculas más pequeñas para dar como productos finales metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso consta de 4 etapas, en cada etapa un conjunto de reacciones son llevadas a cabo por una compleja población de microorganismos presentes en el digestor, cada una de las cuales cataliza solo un cierto número de estas reacciones. La mayoría de los microorganismos oxidan determinados compuestos orgánicos a fin de obtener energía para su crecimiento y utilizan compuestos carbonados específicos para sintetizar sus componentes celulares. Los productos finales de un grupo de microorganismos suelen ser el alimento del grupo siguiente, de forma que a lo largo del proceso existe un delicado balance que es necesario mantener para que la reacción se desarrolle correctamente (Morales, 2005), las cuatro etapas son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Pilli, *et al.*, 2011 citado por González, 2015), en la Figura 01 se recoge en forma simplificada las etapas de digestión anaerobia y la Figura 02 el esquema de las reacciones de la digestión anaerobia.

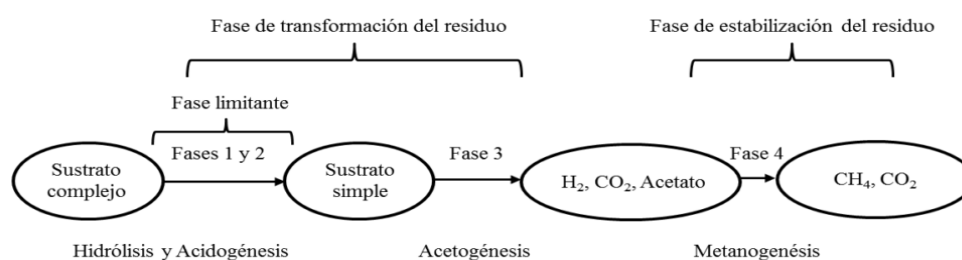
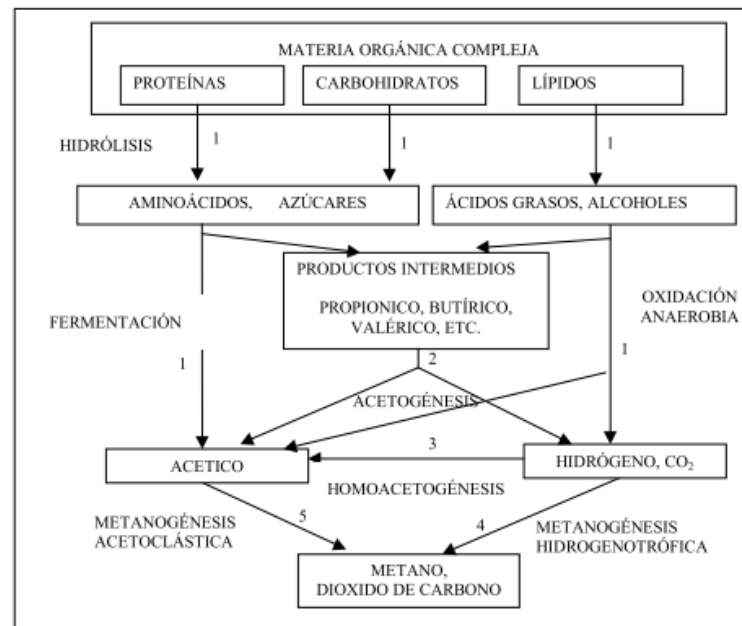


Figura 1: Etapas del proceso de digestión anaerobia.

FUENTE: (Pilli, *et al.*, 2011 citado por (González, 2015).



Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: *bacterias fermentativas*

2: *bacterias acetogénicas que producen hidrógeno*

3: *bacterias homoacetogénicas*

4: *bacterias metanogénicas hidrogenotróficas*

5: *bacterias metanogénicas acetoclásticas.*

Figura 2: Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos.

FUENTE: (Pavlostathis y Giraldo, 1991 citado por Campos, 2001).

a) Etapa hidrolítica

Consiste en la degradación de moléculas orgánicas complejas como hidratos de carbono complejos, lípidos, proteínas, carbohidratos constituyentes de la biomasa, originando moléculas más simples. Las bacterias fermentativas hidrolizan estas moléculas orgánicas complejas hasta la formación de ácidos grasos, hidrógeno y dióxido de carbono (Peña, 2012). En esta etapa, la materia orgánica se encuentra normalmente en estado sólido. además, las bacterias que producen la hidrólisis pueden ser anaerobias estrictas o facultativas, son muy numerosas, se desarrollan espontáneamente en el medio cuando las condiciones son favorables, o bien pertenecen a la flora de la sustancia orgánica a digerir, realizando un amplio espectro de actividades

enzimáticas sobre los polímeros orgánicos, desdoblándolos en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. (Mosquera y Martínez, 2012).

La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no solo radica en el hecho que producen el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además, eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Tsagarakis, 2006 citado por Mosquera y Martínez, 2012).

b) Etapa acidogénica

Los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior por medio de bacterias acidogénicas (que forman ácidos), como la Clostridium se transforman los azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles) a ácidos orgánicos como ácido acético, propiónico, butírico y valérico, principalmente (ver Tabla 05) y en menor proporción, en alcoholes, anhídrido carbónico e hidrógeno (Peña, 2012). Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5-6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae (Montes, 2008 citado por Mosquera y Martínez, 2012).

Tabla 5: Principales ácidos grasos durante la digestión.

Ácidos orgánicos importantes	
Ácidos volátiles	Ácido acético
	Ácido propiónico
	Ácido n-butírico
	Ácido isobutírico
Ácidos no volátiles	Ácido láctico
	Ácido pirúvico
	Ácido succínico

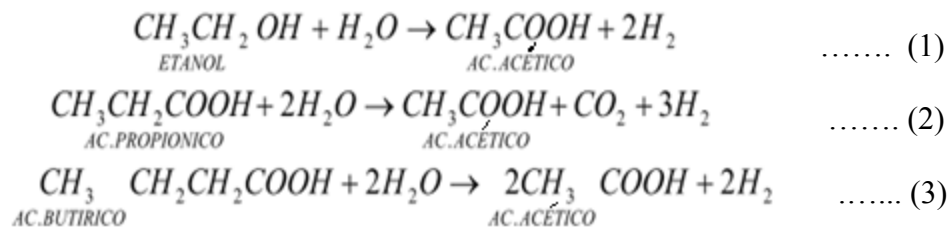
FUENTE : (Morales, 2005)

c) Etapa acetogénica

Durante esta etapa actúan las bacterias productoras de hidrógeno y los ácidos grasos como el ácido propiónico, butírico y cadenas más largas o que contengan más de

dos átomos de carbono serán oxidados parcialmente produciendo ácido acético junto con CO₂ y H₂. También se generan alcoholes y algunos compuestos aromáticos están presentes, los cuales se formaron en la etapa anterior. A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, han de eliminar sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Rodríguez, 2010 citado por Mosquera y Martínez, 2012).

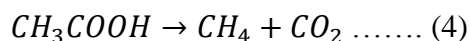
Como bacterias acetogénicas se tiene por ejemplo la *Syntrobacter wolinii* y *Syntrophomonas wolfei*. Según las siguientes reacciones del (1) al (3) las bacterias acetogénicas obtienen ácido acético (Peña, 2012):



d) Etapa metanogénica

Constituye la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono son transformados a CH₄ y CO₂. Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que consumen hidrogeno (metanogénicas hidrogenófilas). La principal vía de formación del metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido, a partir de lodos proviene del grupo metilo del acetato (Hilbert1999 citado por Mosquera y Martínez, 2012).

Acetoclásticas



Hidrogenofilas



Según las reacciones (4) y (5) existen dos vías para la producción de metano:

- La conversión de acetato en metano y dióxido de carbono.
- La conversión de hidrógeno y dióxido de carbono en metano y agua. (Peña, 2012).

La siguiente Tabla 06 muestra las diferentes bacterias involucradas en las cuatro etapas de la digestión anaerobia.

Tabla 6: Bacterias involucradas en la digestión anaerobia

Etapas	Género/Especie	Población mesofílica en lodos residuales
Hidrolíticas Acidogénicas	<i>Butyvirbio, Clostridium Ruminococcus, Acetovibrio, Eubacterium, Peptococcus, Lactobacillus, Streptococcus, etc.</i>	10^8 - 10^9 por ml
Acetogénicas Homoacetogénicas	<i>Acetobacterium, Acetogenium Eubacterium, Pelobacter, Clostridium, etc.</i>	$=10^5$ por ml
Reductores de protones estrictos	<i>Metanobacillus omelionskii, Syntrophobacter wolinii, Syntrophomonas wolfei, Syntrophus buswellii, etc.</i>	$=10^5$ por ml
Metanogénicos	<i>Methanobacterium (muchas especies), Methanobrevibacter (muchas especies), Methanococcus (muchas especies), Methanomicrobium (muchas especies), Methanogenium (muchas especies), Methanospirillum bungalowense, etc.</i>	$=10^8$ ml

FUENTE: (Morales, 2005)

2.1.6. Proceso de digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los lodos se introducen en el reactor continuo, intermitente o discontinuo y son retenidos en el mismo durante periodos de tiempos variables. El lodo estabilizado, que se extrae continuo o intermitentemente del proceso, no es putrescible y su contenido de patógenos es bajo (Rodríguez, 2010 citado por Mosquera y Martínez, 2012), se realiza normalmente en procesos de una etapa en condiciones mesófilas (20-40°C) o condiciones termófilas (41-65°C) pero tienen eficacia limitada. Es un procedimiento

lento y requiere ciertas condiciones de temperatura, concentración, tiempo de retención, pH, alcalinidad, etc. (Gómez, 2009 citado por González, 2015).

La causa más frecuente de desequilibrio en el proceso de digestión anaerobia es causada porque las bacterias formadoras de metano son organismos anaerobios muy sensibles y de crecimiento más lento, por ello, a veces no siguen el ritmo de las formadoras de ácidos y el digestor se acidifica porque la velocidad de transformación de los ácidos es demasiado baja (González, 2015).

Los beneficios asociados con la tecnología de digestión anaerobia incluyen la reducción de la masa, la eliminación de olores, reducción de patógenos, menos consumo de energía, y más significativamente, la recuperación de energía en forma de metano (Pilli, *et al.*, 2011 citado por González, 2015).

El uso de esta tecnología, desde un punto ambiental, resulta en un mejor balance energético como consecuencia de la obtención de un gas combustible rico en metano (biogás) cuyo uso implica una reducción del consumo de combustibles fósiles y de las emisiones de gases de efecto invernadero (Esteban, *et al.*, 2010 citado por González, 2015).

2.1.7. Productos de la digestión anaerobia

Al final del proceso de digestión obtenemos biogás y lodos digeridos en el caso de que se trate de un proceso de digestión anaerobia de alta carga, que se caracteriza por llevar un régimen de mezclado completo, sin embargo, si se trata de un proceso de digestión convencional también obtendremos una capa de nata y una de sobrenadante.

2.1.7.1. Gas

El biogás es la mezcla de gas producido por bacterias metanogénicas que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias. Está compuesto de 60 a 80% de metano, 30 a 40% de dióxido de carbono y trazas de otros gases, como nitrógeno, ácido sulfhídrico, amoníaco, monóxido de carbono e hidrógeno. En la Tabla 07 se muestran valores medios de composición del biogás en función al substrato utilizado (Campos, 2001) . Un metro cúbico de metano a temperatura y presión

normales tiene un poder calorífico neto de 35800 kJ/m³, el biogás tiene un poder calorífico de aproximadamente 22400 kJ/m³ (Morales, 2005).

Tabla 7: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de hidrógeno	100-700ppm	0-1%	0-8%	0,5-100ppm
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5ppm(terpenos, ésteres,...)

FUENTE: (Coombs, 1990 citado por Campos, 2001).

2.1.7.2. Efluente (Lodo digerido)

Las características del efluente, dependen mucho del tipo de sistema, pero tratando con sistemas de mezcla completa y con residuos orgánicos, se puede decir que el efluente es la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida. Se trata, además, de un producto más mineralizado que el influente, con lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico (Campos, 2001).

Además, los lodos digeridos se componen de aquellos sólidos inorgánicos y volátiles que son de difícil degradación. Y por sus características fisicoquímicas y microbiológicas presentes se someten a un proceso de secado convirtiéndose en biosólidos estables y están listos para su aplicabilidad en tierras (Morales, 2005).

2.1.8. Biofertilizante (Biosólidos estable)

Los biosólidos son principalmente materiales orgánicos, siendo un subproducto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, con características físicas, químicas y microbiológicas

que permiten su reaprovechamiento (RM N° 128-2017-VIVIENDA, 2017) y pueden ser utilizados en diversos usos beneficiosos, como por ejemplo la incorporación al suelo para abastecerlo de nutrientes y para reponer la materia orgánica mineralizada. Se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación (EPA/832-F-00-064, 2000). No son biosólidos las cenizas producto de la incineración de lodos.

2.1.9. Clasificación de los biosólidos

De acuerdo a sus características los biosólidos se clasifican en:

a) Biosólido de Clase A

Lodo sin restricciones sanitarias para la aplicación al suelo (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017). En este punto, la EPA es más específica, al denominarlos Biosólidos de Calidad Excepcional, que son aquellos que son poco contaminantes y tienen reducción de patógenos Clase A y que han reducido el nivel de componentes degradables que atraen vectores (organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos tales como roedores, moscas y mosquitos) (EPA 40 CRF Part 503, 2003).

b) Biosólido de Clase B

Lodo apto para la aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017). La EPA los denomina como Biosólidos con concentración de contaminantes y los define como aquellos Biosólidos que también logran los mismos bajos límites de concentración de contaminantes de los de Clase A, pero solo logran una reducción de patógenos clase B y/o están sujetos a la administración en el sitio mismo, más que como una alternativa de tratamiento para reducir vectores (EPA 40 CRF Part 503, 2003).

La comparación de criterios de calidad microbiológica y en contenido de metales pesados para la caracterización de biosólidos (biofertilizantes) entre la norma de los Estados Unidos de Norteamérica 40 CFR parte 503 de la EPA y con seis países de Latinoamérica, observándose que los países de México, Brasil, Argentina, Colombia y Perú se adecuan estrictamente a la norma de la EPA en cambio Chile es más exigente

que las Norma 40 CFR parte 503 de la EPA. En las Tablas 08 y 09 se resume estos criterios de calidad.

Tabla 8: Contenido de parámetros parasitológicos y microbiológicos en los biosólidos de acuerdo a USEPA 503 y comparación de valores con países de América Latina

Parámetro	EE.UU.(1)	México (2)	Brasil (3)	Chile (4)	Argentina (5)	Colombia (6)	Perú (7)
<u>Coliformes fecales (NMP/g)</u>	Clase A: 1×10^3 B: 2×10^6	Clase A: 1×10^3 Clase B: 1×10^6 Clase C: 2×10^6	Clase A: 1×10^3 B: 1×10^6	Clase A: 1×10^3	Clase A: 1×10^3* Clase B: 2×10^6*	Clase A: 1×10^3 Clase B: 2×10^6	Clase A: 1×10^3* Clase B: 1×10^3*
<u>Salmonella.sp (NMP/g)</u>	Clase A: $3/4$	Clase A: 3 Clase B: 3 Clase C: 300	Ausencia en 10g	Clase A: $3/4$	Clase A: $3/4$	Clase A: A: Ausente Clase B: 1×10^3	Clase A: $1/10$ Clase B: $1/10$
<u>Huevos de helmintos (HH/g)</u>	Clase A: $1/4$	Clase A: 1 Clase B: 10 Clase C: 35	Clase A: $1/4$ Clase B: 10	Clase A: $1/4$	-----	Clase A: $1/4$	Clase A: $1/4$ Clase B: $1/4$

FUENTE: (1)(EPA 40 CRF Part 503, 2003), (2)(SEMARNAT, 2005), (3)(CONAMA, 2006), (4) (Decreto N°4/2009 - CONAMA, 2009),(5)(Resolución N° 97/01, 2001), (6)(Decreto N° 1287/14, 2014), (7)(DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017).

*Valores para *Escherichia coli*

Tabla 9: Contenido de metales máximos permisibles en mg/ kg (base seca) en los biosólidos de acuerdo a USEPA 503 y comparación de valores con países de América Latina

Parámetro	EE.UU.(1)		México (2)		Brasil (3)		Chile (4)		Argentina (5)		Colombia (6)		Perú (7)	
	Clase A	Clase B	Excelente	Bueno	Clase A y B	Clase A	Clase B	Clase A	Clase B	Clase A	Clase B	Clase A	Clase B	Clase A y B
As	41	75	41	75	41	20	40	75	75	20	40	40	40	40
Ba	-	-	-	-	1300	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	39	85	39	85	39	8	40	20	40	8	40	40	40	40
Cu	1500	4300	1500	4300	1500	1000	1200	1000	1750	1000	1750	1500	1500	1500
Cr	1200	3000	1200	3000	1000	-	-	1000	1500	1000	1500	1200	1200	1200
Pb	300	840	300	840	300	300	400	750	1200	300	400	400	400	400
Hg	17	57	17	57	17	10	20	16	25	10	20	17	17	17
Mo	NL	75	-	-	50	-	-	-	-	18	75	-	-	-
Ni	420	420	420	420	420	80	420	300	400	80	420	400	400	400
Se	36	100	-	-	300	50	100	-	-	36	100	-	-	-
Zn	2800	7500	2800	7500	2800	2000	2800	2500	4000	2000	2800	2400	2400	2400

Fuente: (1)(EPA 40 CRF Part 503, 2003), (2)(SEMARNAT, 2005), (3)(CONAMA, 2006), (4) (Decreto N°4/2009 - CONAMA, 2009),(5)(Resolución N° 97/01, 2001), (6)(Decreto N° 1287/14, 2014), (7) (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017).

FUENTE: (1)(EPA 40 CRF Part 503, 2003), (2)(SEMARNAT, 2005), (3)(CONAMA, 2006), (4) (Decreto N°4/2009 - CONAMA, 2009),(5)(Resolución N° 97/01, 2001), (6)(Decreto N° 1287/14, 2014), (7) (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017)

2.1.10. Factores que afectan la digestión anaerobia

2.1.10.1. Microorganismos y sustrato

De todas las bacterias señaladas anteriormente presentes en el proceso, las bacterias metanogénicas son las más importantes e incluso constituyen el paso cinético-limitante en el proceso. Son afectadas por la presencia de oxígeno, poseen un tiempo de crecimiento mucho más lento que otras bacterias, son muy sensitivas al pH y su trabajo se encuentra en desventaja por la población reducida desarrollada. El sustrato inicial es la materia orgánica, ésta puede variar por la concentración de sólidos en el lodo de alimentación y la frecuencia de carga (Peña, 2012). Por lo que es necesario que durante la operación se mantenga el mayor número posible dentro del proceso para realizar el trabajo de biodegradación, evitando remover más lodo digerido del necesario y lograr la estabilización (López, 2009).

2.1.10.2. Carga de alimentación

Dentro de los parámetros del lodo crudo que deben medirse a la entrada del reactor están: la concentración (que es la concentración de sólidos en un determinado volumen de agua) y la cantidad de sólidos volátiles (que indica la cantidad de material que puede ser usado como alimento por las bacterias e indirectamente la cantidad de arena). El factor de carga orgánica y el tiempo de retención que se relaciona con el crecimiento bacteriano y su descarga (Morales, 2005) .

2.1.10.3. Mezclado

La estabilización de los lodos sólo puede llevarse a cabo si los 2 factores previamente descritos, bacterias y alimento, interaccionan. El mezclado permite mantener la mayor cantidad de alimento en contacto con las bacterias, reducir el volumen ocupado por materiales orgánicos e inorgánicos sedimentables y homogeneizar la temperatura y la concentración. Todo esto con el fin de acelerar el proceso de ruptura de sólidos volátiles y producción de metano. La agitación en la digestión anaerobia es menor que en los procesos aerobios, ya que la tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas es menor y su contacto con el sustrato debe ser mayor (López, 2009).

2.1.10.4. Condiciones anaerobias

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, por lo que incluso pequeñas cantidades de oxígeno resultan tóxicas para su metabolismo, las condiciones de anaerobiosis son mantenidas por medio de digestores cubiertos capaces de recolectar el biogás que se genera sin permitir el paso de aire. La cubierta de los digestores sirve para varios propósitos además de evitar el paso de oxígeno al reactor que además de afectar a la biomasa podría formar mezclas explosivas, también sirve de estructura para el equipo de mezclado, acceso al tanque, soporte de equipo de seguridad y sirve para la acumulación y la recolección del gas (Montes, 2008).

a) El tiempo y la temperatura

Puesto que la digestión es un proceso tan lento el tiempo de digestión de la materia orgánica es función de la temperatura de digestión, con frecuencia es necesario aplicar calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas. La temperatura tiene un efecto importante en cuatro variables de proceso: la velocidad específica máxima de crecimiento microbiano, la constante cinética, el tiempo mínimo de retención y la velocidad de generación de biogás. El tiempo crítico o el tiempo mínimo se da en la retención de los sólidos es el periodo por debajo del cual se inhibe la digestión como consecuencia del arrastre de los gérmenes metánicos indispensables, los cuales como se sabe, tienen un crecimiento muy lento. El porcentaje de regeneración de las bacterias metánicas es aproximadamente 10 días a 35°C, para aquellas que crecen más lentamente. Por debajo del tiempo crítico de retención de aproximadamente 10 días, la producción de metano cae rápidamente, cesando completamente el proceso para un tiempo de retención crítica de 3 a 4 días. A este valor se llama "tiempo mínimo de retención de sólidos" (Chen *et al.*, 2000).

La digestión "en frío" o la digestión psicrófila que opera a temperaturas debajo de 20°C son empleadas en ocasiones. La mayoría de los digestores convencionales funcionan en la gama mesófila, es decir entre 20°C y 40 °C, optimizándose el proceso entre los 29°C y 33°C. Ambas poblaciones anaeróbicas psicrófilas y mesófilas son encontradas en la naturaleza, en los sedimentos inferiores de los lagos y zonas pantanosas o en el estómago de animales herbívoros. Las poblaciones termófilas no son tan comunes en el ambiente natural, aunque la digestión anaerobia puede ocurrir en

la gama termofílica de entre 41°C a 65°C, con un óptimo en las proximidades de los 55°C (Llamas, 2015) a continuación se presentan un resumen de los rangos de temperatura usuales en la generación de biogás:

Rango de temperatura psicrófila: 5 °C a 20 °C

Rango de temperatura mesofílica: 21°C a 40 °C

Rango de temperatura termofílica: 41 °C a 65 °C

La operación de los sistemas de calentamiento dependerá en gran manera de la localización geográfica, el tamaño del digesor, carga y en algunos casos el tipo de desechos industriales que vengan mezclados con el lodo. Existen diversos métodos para mantener los lodos a temperaturas adecuadas, y se clasifican en sistemas de calefacción internos y externos (Rincón *et al.*, 2010).

En la Tabla 10 se muestra la relación que existe entre la temperatura y el tiempo de una digestión anaerobia; en el rango de (48-60 °C) se aprecia la digestión anaerobia termofílica el cual permite tiempos de retención mínimos, pero exige un gran control.

Tabla 10: Efecto de la temperatura en el tiempo de digestión anaerobia

Temperatura °C	Tiempo días
15	67,8
20	46,6
25	37,5
30	33,3
35	23,7
40	22,7
45	14,4
50	8,9
60	12,6

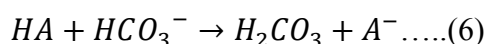
FUENTE: (Morales, 2005).

b) pH

Así como existen rangos óptimos de temperatura para que se dé un gran crecimiento microbiano, también existen rangos de pH a los que los organismos se desarrollan con mayor facilidad (Morales, 2005) siendo un indicador si la digestión anaerobia se está llevando en condiciones adecuadas, ya que, si los organismos

productores de metano son inhibidos o destruidos, no se degradan los ácidos producidos y el pH dentro del digestor disminuirá progresivamente hasta quedarse interrumpida (Hernandez, 1992). Los organismos que crecen a pH altos son los alcalófilos, y los que crecen en pH bajo son los acidófilos, son pocos los microorganismos que sobreviven a estos pH, pero la mayoría de microorganismos presentan pH óptimos a los que se encuentran en los valores de 5,9-7,8 como es el caso de los microorganismos que llevarán a cabo la etapa acidogénica tienen un rango de pH óptimo de 6,6-7,6 y suelen soportar rangos de 6,4-7,8 (Zoetemeyer *et al.*, 1982), los organismos que intervienen en cada fase son diferentes, y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión, para que ambos tipos de organismos puedan coexistir dentro del digestor y encuentren las posibilidades ambientales para su desarrollo. Concretamente, los organismos productores de ácidos y, por consiguiente, el proceso de digestión suele interrumpirse por el decaimiento de los organismos productores de metano debido a algún cambio ambiental que les hace menos viables. Esta es la razón de que el pH del sustrato sea un indicador de la digestión se está realizando en condiciones adecuadas, ya que, si los organismos productores de metano son inhibidos o destruidos, no se degradan los ácidos producidos y el pH dentro del digestor disminuirá progresivamente. Por debajo de 6,2 se inhibirá la actividad de esta cepa y la supervivencia de los microorganismos productores de metano es imposible y, por consiguiente, cuando en un digestor se alcanza este pH, la digestión puede considerarse como interrumpida (Hernandez, 1992). Así mismo la degradación de la materia orgánica tiende a disminuir el pH, sin embargo es contrarrestado por la degradación de ácidos volátiles y la generación de un buffer de bicarbonato durante la formación de metano.

De acuerdo a las reacciones de neutralización el bicarbonato y los ácidos grasos (HA) siguen esta ruta:



Es así que en condiciones estables la cantidad de ácidos generados será utilizada como alimento casi a la misma tasa a la que son producidos (Morales, 2005). Por lo tanto el incremento o decremento del pH depende de la relación entre las concentraciones de ácidos volátiles, alcalinidad bicarbonatada y el porcentaje de dióxido de carbono en el gas, por lo que monitorear y evitar el descenso del pH se convierte en un paso crucial (Peña, 2012).

En la Tabla 11 se presentan los rangos de pH recomendable para la digestión anaerobia:

Tabla 11: Rangos de pH en el proceso de digestión anaerobia

pH	Consecuencias
< 6,5	Inhibición de la metanogénesis.
6,8 a 8	Rango recomendable para la digestión anaerobia.
>8	Formación de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S).

FUENTE: (Hernandez, 1992)

c) Alcalinidad

La alcalinidad del sustrato de digestión está formada por bicarbonato amónico, consecuencia de la combinación de NH₃ con el CO₂ producida en la fermentación ácida. Las respectivas concentraciones de alcalinidad y ácidos volátiles dan como consecuencia la capacidad tampón del sistema. Por ello, el verdadero parámetro de control de proceso, que engloba los parámetros anteriores, (pH y ácidos volátiles), es la llamada relación ácidos volátiles/alcalinidad. Es deseable que la capacidad tampón del sistema sea alta, lo cual se traduce en que la relación anterior sea baja (entre 0 y 0,1). Cuando la relación ácidos volátiles/alcalinidad comienza a aumentar es que algo no funciona bien. Al alcanzar valores de 0,5, debido a serios descensos de alcalinidad y al llegar a 0,8 o más el pH del contenido del digestor comienza a descender. Por lo tanto, este parámetro parece ser un indicador más rápido que el pH, puesto que esta cambiará cuando ya se haya roto la capacidad tampón del sistema, mientras que la relación ácidos volátiles-alcalinidad es un indicador de dicha capacidad tampón. (González *et al.*, 2002).

d) Materiales tóxicos o inhibidores

La digestión anaerobia como todos los procesos biológicos es susceptible a la acción de materiales y sustancias que en cantidades o concentraciones altas resultaran tóxicas o inhibidoras para la actividad microbiana. Usualmente los problemas de toxicidad se denotan cuando alguno de los siguientes compuestos se introduce al proceso.

- Hidrocarburos, derrames accidentales de algún derivado del petróleo como gasolina, diésel aceite para motores, etc.
- Metales pesados, provienen de la descarga de las industrias de la platería, joyería, curtidoras, mineras, etc.
- Sulfuros, provenientes de la metalurgia, minas de carbón, etc.
- Fenoles y resinas plásticas, residuos orgánicos en general, provenientes de la industria química, producción de pinturas, manufactura de muebles y producción de carbón y gas.
- Insecticidas y fungicidas.
- Amoníaco, en este caso el amoníaco se forma dentro del digestor cuando desechos con alto contenido de proteínas son alimentados.

Es importante señalar que la toxicidad está en función de la concentración, esto es muy importante ya que muchos de estos compuestos sirven como estimuladores del proceso a bajas concentraciones por lo que una sustancia puede ser considerada como sustrato o como toxico dependiendo del rango en el que se encuentre su concentración (Acosta *et al.*, 2012).

2.2. ANTECEDENTES

Según el estudio la digestión anaerobia de biosólidos es un proceso que mejora sus características como fertilizante que permite un incremento en las cargas orgánicas, una disminución de los tiempos de retención y evita la formación de espumas e incrementa la eficacia de la destrucción o reducción de microorganismos patógenos (Camacho *et al.*, 2017) y a la no reactivación de estos, de tal forma que el biosólido obtenido podría ser clasificado como de tipo A, al contener menos de 1000 NMP/g ST, (log 3 NMP/gST) (Vigueras *et al.*, 2013).

La digestión anaerobia ha sido reconocida como el método más apropiado para estabilización de lodos y la reutilización de lodos en la obtención de fertilizante y se aseguró el beneficio económico sostenible de explotación de pequeños digestores anaeróbicos para obtener mayor rendimiento de este proceso. (Braguglia *et al.*, 2015)

Se encontraron presentes en los lodos frescos los niveles de microorganismos de patógenos, protozoos, parásitos y otros contenidos, en concentraciones de 10^6 a 10^8 coliformes totales, 10^5 - 10^7 coliformes fecales y 10^4 a 10^6 streptococos fecales (Atlas, 1984).

En Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Ciudad de Cuenca, Ecuador se trabajó con un digestor de biosólidos, con un volumen efectivo de tratamiento de 50 litros, con 37,5 de volumen útil bajo condiciones de termofílica (53°C) y mesófilas (23°C); el cual se alimentó con biosólidos biológicos, este fue operado a tiempos de 39 días y el biosólido alimentado se caracteriza por tener un promedio de coliformes fecales de $2,06 \cdot 10^6$, sólidos totales volátiles del 2,8 % y huevos de helmintos de 21 HH/4g ST. Se obtuvo una reducción de coliformes fecales (97,2 NMP /g ST) por debajo de lo establecido en la normativa mexicana (1000 NMP/ g ST) con referente a la cuenta de huevos de helmintos, alcanzando valores de 2,4 HH/4g ST (Arévalo y Lituma, 2010).

El proceso termofílico resultó ser eficiente en la digestión de lodos de depuradora para la eliminación de agentes patógenos, reduciéndose significativamente después del proceso termofílico, sin detección de *E. Coli* y *Salmonella spp* obteniéndose un producto de biosólido de clase A (Lloret *et al.*, 2013).

La digestión anaerobia termofílica (55-70°C) tiene una ventaja sobre la digestión mesofílica (37°C) resultando en una velocidad de reacción más rápida y mayor productividad comparada con la digestión anaerobia mesofílica. Las condiciones óptimas para digestión anaerobia podría ser hidrólisis/acidogénesis termofílica y metanogénesis mesofílica (Parra, 2015)

Un estudio sobre el comportamiento de la digestión anaerobia mesofílica y termofílica en la estabilización de lodos residuales municipales informan que los resultados obtenidos demostraron que el proceso en condiciones termofílicas (55 °C) es capaz de estabilizar la carga orgánica e inactivando el total de coliformes fecales, *Salmonella* spp. y huevos de helmintos cumpliendo con los límites máximos permisibles para biosólidos de clase A (Méndez *et al.*, 2009).

La temperatura tiene una gran influencia en el proceso de digestión anaerobia. El estudio analiza la capacidad de la biomasa anaerobia para resistir los cambios de temperatura a diferentes condiciones de funcionamiento. Se realizaron pruebas de biodegradabilidad anaerobia para evaluar la capacidad de biomasa anaerobia mesofílica y termofílica para adaptarse a los diferentes cambios de temperatura y su impacto en la biomasa. Las respuestas de pruebas de biodegradabilidad anaerobia termofílica indicó que la biomasa presente en el inóculo mesofílico se desarrolló cuando fue sometido a 55°C, entre tanto que la biomasa termofílica fue sometido a 37°C sólo algunas bacterias termófilas se mantuvieron activos (Peces *et al.*, 2013).

El pH más frecuente estudiado en lodos residuales se encuentran en un rango de 7,0-8,5 (Amador *et al.*, 2015), para una aceptable estabilización de estos oscila entre 6,88-7,89 (Atenodoro *et al.*, 2015). Para el proceso de digestión anaerobia sea óptimo se espera un pH neutro; mientras en un pH que oscila entre 7,0 y 8,0 garantizan una estabilidad en el proceso y el pH determinado en la digestión termófila alcanza el valor de 7,87(Arévalo y Lituma, 2010).

El pH del reactor afecta el proceso de la digestión anaerobia y eficiencia del proceso de digestión. Los metanógenos trabajan efectivamente entre rango de pH de 6,5-8,2, con un pH óptimo de 7,0. Aunque se ha demostrado que el rango de pH óptimo para la máxima obtención de rendimiento de gas en la digestión anaerobia es 6,5- 7,5. (Parra *et al.*, 2014)

Los biosólidos generados en una planta de tratamiento con tecnología de digestión anaerobia de material residual de origen pecuario, habiéndose tomado ocho muestras de biosólidos estabilizados y deshidratados y se realizaron pruebas de laboratorio para determinar el contenido de metales pesados, composición microbiológica y fisicoquímica, llegando a la conclusión que los biosólidos estudiados, tienen potencialidades para ser aplicativos en la agricultura, pues contienen altos niveles de materia orgánica (53%) y nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (2,5% de nitrógeno, 1,2% fósforo y 0,8% de potasio), el contenido de metales pesados y 6 microorganismos patógenos estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos para este tipo de residuo (Negrín y Jiménez, 2012).

En Dinamarca la gran parte de los lodos estabilizados se usan como fertilizante en tierras laborales. El porcentaje de reutilización de los lodos de aguas residuales es de 72% y el 20% se destina a la incineración (Oropeza, 2006).

Se demostró que es posible realizar una digestión termofílica a 3800 metro sobre el nivel del mar, lo cual abre la posibilidad de depurar los lodos de las aguas residuales del saneamiento de La Paz - Bolivia. Las reducciones de los niveles de contaminación de los lodos tanto del altiplano como a nivel del mar, son del mismo orden (Fontana, 1999).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Recursos necesarios

3.1.1. Materiales, reactivos y equipo

3.1.1.1. Material de origen orgánico-inorgánico:

Lodos provenientes de la laguna de estabilización de aguas servidas de la ciudad de Puno.

3.1.1.2. Infraestructura

La experimentación se realizó en un principio en el Megalaboratorio de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, fue concluida en el laboratorio de Ecología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la misma universidad.

3.1.1.3. Materiales

- 05 Recipientes de muestreo para material experimental de 1kg.
 - a) Material: Polipropileno
 - b) Marca: Pasis
 - c) Origen: Chino
- 02 Baldes de 16L.
 - a) Material: Polipropileno
 - b) Marca: Rey
 - c) Origen: Chino
- 01 Pala muestreadora.
 - a) Material: Acero fundido
 - b) Marca: Truper
 - c) Origen: México
- 01 Caja Guantes de nitrilo.
 - a) Material: Nitrilo
 - b) Marca: Klenet
 - c) Origen: Tailandia
- 01 Cinta de embalaje.

- a) Material: Polietileno
- 01 Cinta de masking tape.
- 01 Buzo desechable.
 - a) Material: Polipropileno
 - b) Marca: Deltaplus
 - c) Origen: Francia
- 01 Lentes de seguridad transparente S/L.
 - a) Material: Policarbonato
 - b) Marca: Truper
 - c) Origen: México
- 01 Mascarilla siliconado para gases orgánicos-inorgánicos.
 - a) Material: Siliconado
 - b) Marca: 3M
 - c) Origen: U.S.A
- 01 Plástico film.
 - a) Material: Polietileno
- 04 Llaves de paso 1/2”
 - a) Material: Bronce
- 04 Manguerillas transparente de 1/2”
 - a) Material: Polietileno
- 04 Tapón
 - a) Material: Jebe
- 01 Cinta
 - a) Material: Teflón
- 02 Cinta
 - a) Material: Jebe
- 01 Caja tecnopor
 - a) Material: Poliestireno
- 01 Cuchara
 - a) Material: Acero INOX
 - b) Marca: Truper
 - c) Origen: México

- 01 Piceta
 - a) Material: Polipropileno
 - b) Marca: Premier
- 01 Espátula de 2”
 - a) Material: Acero INOX
 - b) Marca: Truper
 - c) Origen: México
- 01 Cuaderno de apuntes
- 01 Lápiz grafito

3.1.1.4. Instrumentos

- 03 Termómetro de mercurio de escala -10°C a $+100^{\circ}\text{C}$.
 - a) Material: Vidrio
 - b) Marca: Boeco
 - c) Origen: Alemania
- 03 Termómetro digital JR-1 (-50°C a $+300^{\circ}\text{C}$).
 - a) Marca: MOSEKO
 - b) Material: Metal
 - c) Origen: China
- 01 Termómetro infrarrojo GM550 (-50°C a $+550^{\circ}\text{C}$).
 - a) Marca: BENETECH
 - b) Origen: U.S.
- 01 Conductímetro TRACER 1749.
 - a) Marca: LaMotte
 - b) Origen: U.S.
- 04 Matrices kitazato de 1L.
 - a) Material: Pyrex
 - b) Marca: Kyntel
 - c) Origen: China

3.1.1.5. Equipos

- Multiparámetro digital Sparck Science.
 - a) Marca: PASCO scientific

- b) Origen: U.S.
- Multiparámetro digital ORION VERSASTAR PRO (Advanced Electrochemistry Meter).
 - a) Marca: Thermo Scientific
 - b) Origen: U.S.
- Incubadora.
 - a) Material: Madera y poliestireno
 - b) Origen: Perú
- GPS (Global Positioning System).
 - a) Marca: Garmin
 - b) Origen: U.S.
- Cámara fotográfica.
 - a) Marca: SONY
 - b) Origen: Japón

3.1.1.6. Reactivos

- Solución calibradora de pH 4, pH 7 y pH 10.
- Solución buffer pH 7.
- Agua destilada.
- Agua mineral.
- Alcohol de 96° de pureza.

3.2. Localización del proyecto:

El área de estudio está ubicada en la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas de la ciudad de Puno.

Ubicación:

Provincia : Puno
Departamento : Puno
Distrito : Puno
Latitud : 15°50'00''S
Longitud : 70°02'00''W.

Los análisis se realizaron en los laboratorios Envirotest-Enviromental Testing Laboratory S.A.C. acreditado por INACAL, laboratorio de Servicio de Análisis de Suelos del INIA, laboratorio de Microbiología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia y laboratorio de Ecología Acuática de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UNAP; la parte experimental de digestión anaerobia termofílica se realizó en el Megalaboratorio de Investigación y en el laboratorio de Ecología de la Facultad de Ciencias Biológicas ambas pertenecientes a la UNAP.

3.2.1. Extensión y características

Las lagunas de estabilización primaria y secundaria fueron construidas en el año 1972, la laguna de estabilización Secundaria tiene una distancia total de 1,18 km y una superficie total de 82419,65 km², se ubica en el extremo sur de la ciudad de Puno, entre la Isla Espinar y los Barrios de Chanu-Chanu frente al cuartel Manco Cápac, geológicamente denominada como Altiplano a una altura de 3810 m.s.n.m. y se halla interrumpida por la fosa tectónica que ocupa el Lago Titicaca y estructuralmente las lagunas cuentan con fondos de material de tierra compactada, los cuales alojan los lodos residuales (Cáceres, 2016).

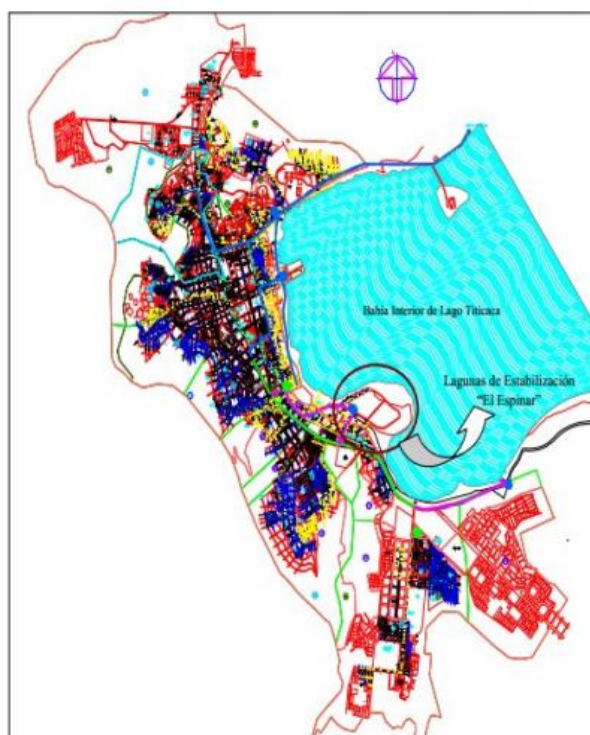


Figura 3: Plano de la ubicación de la Laguna de Estabilización "El Espinar"

FUENTE: (Cáceres, 2016)



Figura 4: Mapa satelital de la laguna de estabilización primaria y secundaria "El Espinar"

FUENTE: (Google Maps, 2018)

3.3. Tipo diseño de investigación

El diseño de investigación a desarrollarse en el presente estudio es descriptivo, analítico y experimental, debido a que son lodos residuales de la Laguna de Estabilización Secundaria de la ciudad de Puno.

3.4. Metodología

La siguiente metodología va en función de cada objetivo específico planteado en este proyecto de investigación.

3.4.1. **Determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los biosólidos estabilizados obtenidos en el tratamiento por el método de digestión anaerobia termofílica de los lodos provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno.**

Para alcanzar el primer objetivo específico y medir la calidad de biosólido estabilizado obtenido se determinó las siguientes características.

- a) **Muestreo y determinación de las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los lodos residuales frescos proveniente de la Laguna de Estabilización Secundaria de aguas servidas de las ciudad de Puno.**

Se tomó las 4 muestras simples de lodos residuales provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas de la ciudad de Puno, para el efecto se siguieron 2 pasos:

- **Paso 1. Muestreo de lodos residuales de la Laguna de Estabilización de la ciudad Puno.**

El muestreo se basó en la guía de muestreo de suelos en el marco del D.S 002-2013-MINAN y en comparación de guía de muestreo del EPA, en la Figura 06 se presenta el protocolo de muestreo para lodos residuales.

El muestreo se realizó en 4 puntos Figura 05, primer punto fue en el afluente, el segundo punto fue en el lado lateral izquierdo, el tercer punto fue en lado lateral derecho y el ultimo y cuarto punto fue en el efluente de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas de Puno y la Tabla 12 muestra los puntos de muestreo y su respectivas coordenadas UTM, se usó 4 muestras simples para los 4 experimentos, estos fueron comparados entre sí según a los resultados obtenidos.

Las ubicaciones de los puntos de muestreo son:



Figura 5: Mapa satelital de los puntos de muestreo

FUENTE: (Google Maps, 2018)

Tabla 12: Puntos de muestreo de la laguna secundaria de Estabilización de aguas servidas de la ciudad de Puno

Puntos de muestreo	Afluente	Lado lateral Izquierdo	Lado lateral Derecho	Efluente
Código	MP1	MP2	MP3	MP4
Altitud m.s.n.m			3811	
Presión barométrica (mmHg)			488,1	
Mes de muestreo			Septiembre	
Estación			Otoño-Invierno	
Latitud sur	-15,852604	-15,85339	-15,85289	-15,854370
Longitud oeste	-70,002355	-70,002793	-69,999237	-70,001328
Coordenadas UTM	E 19L0392673 N 8246702	E 19L0392637 N 8247038	E 19L0392592 N 8246953	E 19L0392786 N 8246916
Profundidad (m)	1,21	0,91	0,93	1,20
Hora de muestreo (hrs)	05:53	06:20	06:39	07:14

FUENTE: Elaboración propia según a datos registrados en el muestreo.

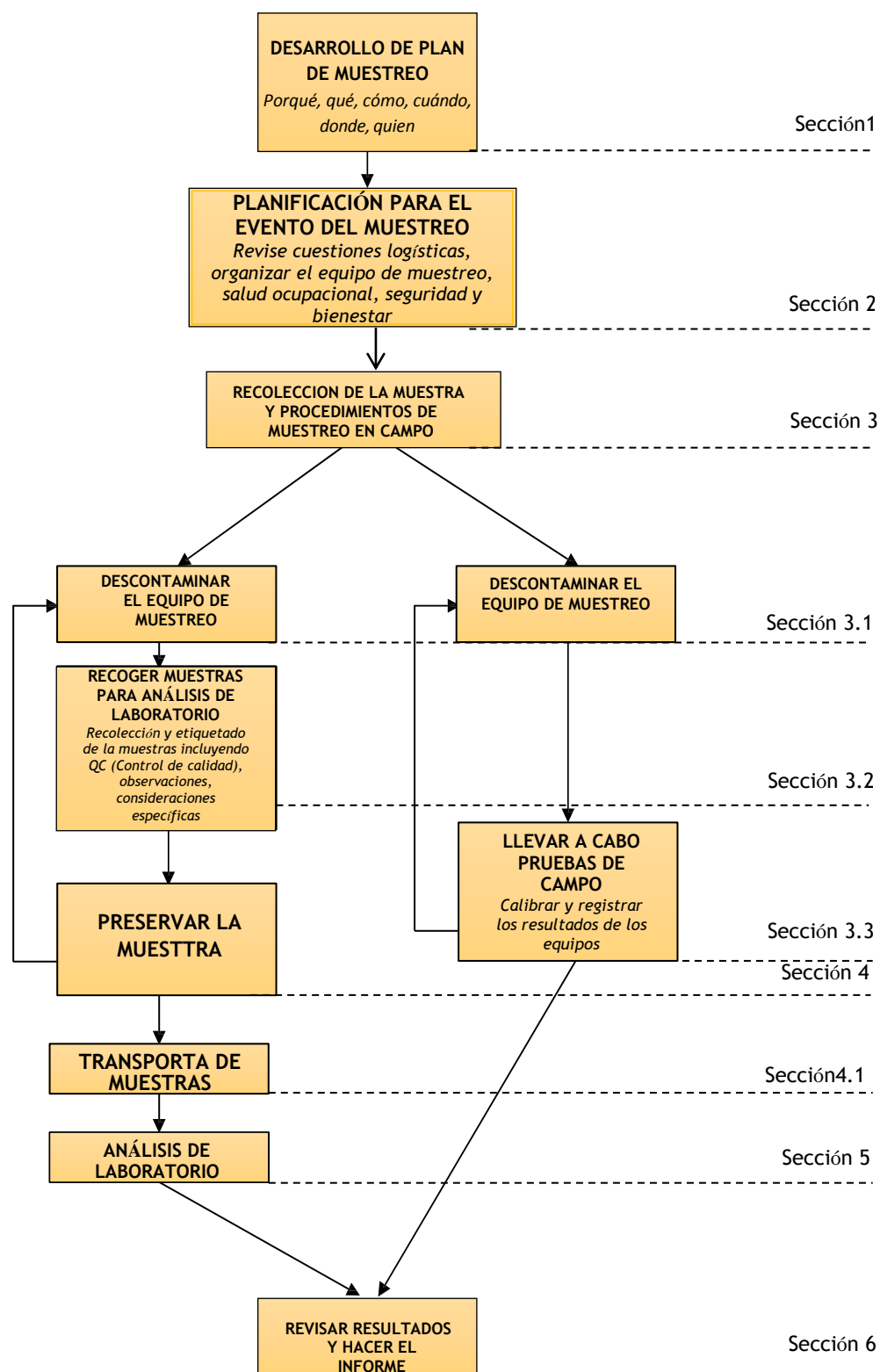


Figura 6: Protocolo para la toma de muestras para lodos de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno

FUENTE: (Ministerio del Ambiente, 2014), (Duncan *et al.*, 2007), (EPA, 1989b), (EPA, 1989a), (Bowling y Griffin, 2014).

- **Paso 2. Llevar las muestras experimentales a ser analizadas en laboratorios analíticos**

Para la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica inicial del material experimental se registró los parámetros in-situ en los puntos de muestreo tales como: temperatura (°C) y pH; cabe indicar que se tomaron 4 réplicas de 1L de muestra experimental por cada punto de muestreo, posteriormente 2 de ellas se llevaron a diferentes laboratorios analíticos y las otras 2 restantes se usaron para la experimentación correspondiente, a continuación se presenta los diferentes laboratorios analíticos a donde se llevó las muestras experimentales:

Para análisis de nutrientes

- Laboratorio de análisis Estación experimental Illpa-Puno. (Anexo F.1)

Para análisis microbiológico y parasitológico

- Laboratorio de Ecología Acuática de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno. (Anexo F.2)

Para análisis de metales

- Envirotest- Enviromental Testing Laboratory S.A.C-Lima Acreditado por el INACAL. (Anexo F.3)

En la Tabla N°15 se resume los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y parasitológicos a determinar y los métodos analíticos a utilizar para la muestra de lodos residuales frescos.

Los resultados relativos a esta etapa experimental se exponen en el apartado 4.1.1 de resultados y discusión.

- b) **Ensayos de biodegradabilidad y estabilización por el método de digestión anaerobia termofílica del material experimental**

En las muestras de lodos se midieron y se registraron los parámetros iniciales del día 0 como pH, temperatura (°C) y conductividad (mmhos/cm) antes de la experimentación.

Los ensayos se realizaron en 4 digestores de vidrio de 1000ml de capacidad (usado el 60% del volumen total) los cuales disponían de una única salida para el desfogue del biogás producido, la boquilla de entrada del digestor se selló herméticamente con un tapón de material sintético con teflón para evitar el ingreso de oxígeno durante el ensayo. Los lodos residuales frescos se sometieron a un proceso de digestión anaerobia termofílica (41°C a 65°C), los digestores fueron colocados en la incubadora por el lapso de 33 días para obtener el biosólido estabilizado y a condiciones ambientales presentes en la Tabla 13.

Tabla 13: Condiciones ambientales trabajadas en el laboratorio para el proceso de digestión anaerobia termofílica

Condiciones ambientales en la experimentación	
Altitud m.s.n.m	3811
Presión barométrica (mmHg)	488,1
Meses de experimentación	Septiembre- Octubre
Estación	Otoño-Invierno

FUENTE: Elaboración propia según a datos registrados en el muestreo.

A medida del proceso de experimentación a fin de evitar la inhibición de los microorganismos metanogénicos y el proceso de degradación de microorganismos actúen y se obtenga un biosólido estabilizado, se midieron y registraron el pH, la temperatura de lodo (°C), temperatura de la incubadora (°C) y la temperatura ambiental (°C), por el tiempo que duró el proceso, estas mediciones fueron realizadas por sensores, un termómetro infrarrojo y un multiparámetro. Según el proceso de digestión anaerobio termofílico el rango de pH se debe mantener entre 6,5 - 8,5 y para mantener la temperatura en los digestores entre 41°C a 65°C, en la incubadora se instaló un timer para regular el incremento o subida de este parámetro.

A continuación los elementos de que consta la incubadora para el proceso de digestión anaerobia termofílica se presenta en la Figura 07 y dado a continuación:

- Incubadora en forma cúbica de (1m x 1m x 1m) recubierta de tecnopor internamente, que dispone de un timer para el control de temperatura y focos por adentro que emiten y distribuyen el calor internamente.

- 03 termómetros de mercurio ubicados en la parte superior y dos colocados dentro de la incubadora cada uno en cada lado.
- 04 matraz kitazato de 1L, con llave de paso para el cierre y desfogue del metano.

Figura 7: Incubadora para los ensayos de biodegradabilidad



Los resultados relativos a esta etapa experimental se exponen en el apartado 4.1.1. de resultados y discusión.

- c) **Determinación de las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas del biosólido estabilizado obtenido del proceso de digestión anaerobia termofílica y comparación respectiva con la norma 40 CRF Part. 503 EPA y Decreto Supremo Peruano del Ministerio de Vivienda y Construcción N° 015-2017.**

Trascurrido el tiempo de 33 días, se desmontaron los digestores y se analizó los biosólidos estabilizado obtenidos; para la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica final se llevó las muestras de biosólido a diferentes laboratorios analíticos:

Para análisis de nutrientes

- Laboratorio de análisis Estación experimental Illpa-Puno. (Anexo F.4)

Para análisis microbiológico y parasitológico

- Laboratorio de Ecología Acuática de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno. (Anexo F.5)

Para análisis de metales

- Envirotest- Environmental Testing Laboratory S.A.C-Lima Acreditado por el INACAL. (Anexo F.6)

Posteriormente, los resultados relativos a esta etapa experimental, en la Tabla N°15 se resume los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y parasitológicos a determinar y los métodos analíticos a utilizar para la muestra de biosólidos obtenidos, fueron comparados con la Norma 40CFR parte 503 del EPA y el Decreto Supremo del Ministerio de Vivienda y Construcción del Perú No 015-2017 presentados en la Tabla 14 y Tabla 15.

Los resultados se exponen en el apartado 4.1.2 de resultados y discusión. A fin de determinar la clase de biosólido estabilizado obtenido.

Tabla 14: Comparación del contenido microbiológico y parasitológico del biosólido estabilizado obtenido con los valores de la Norma 40CFR parte 503 de EPA.

NOMBRES DE PATÓGENOS (microbiológico y parasitológico)	Norma 40 CFR parte 503 (1)		D.S.-N°015-2017- VIVIENDA (2)	
	Clase A	Clase B	Clase A	Clase B
Coliformes fecales (NMP/g)	<10 ³	<2x 10 ⁶	<10 ³ *	<10 ³ *
Salmonella spp. (NMP/g)	<3/4	-	<1/10	<1/10
Huevos de helminthos(HH/g)	<1/4	-	<1/4	<1/4

FUENTE: (1)(EPA 40 CRF Part 503, 2003), (2) (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017).

*Valores para *Escherichia coli*

Tabla 15. Comparación del contenido de metales del biosólido estabilizado obtenido con los valores de la Norma 40CFR parte 503 de EPA

NOMBRE DEL COMPONENTE	UNIDAD	Norma 40 CFR parte 503 (1)		D.S-N°015-2017-VIVIENDA (2)
		Clase A	Clase B	Clase A y B
Arsénico total	mg/kg	41	75	40
Cadmio total	mg/kg	39	85	40
Cobre total	mg/kg	1500	4300	1500
Cromo total*	mg/kg	1200	3000	1200
Plomo total	mg/kg	300	840	400
Mercurio total	mg/kg	17	57	17
Molibdeno total	mg/kg	NL	75	NL
Níquel total	mg/kg	420	420	400
Selenio total	mg/kg	36	100	NL
Zinc total	mg/kg	2800	7500	2400

NL: no tiene límite establecido

*Eliminado por la EPA, con base a evaluaciones de toxicidad y acumulación de suelos.

FUENTE: (1)(EPA 40 CRF Part 503, 2003), (2) (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017).

3.4.2. Determinar el efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado.

Para alcanzar el segundo objetivo, se aplicó el método de análisis estadístico de comparación de las muestras sometidas a la digestión anaerobia termofílica a una temperatura progresiva de 41°C a 65°C frente a un periodo de 33 días, registrándose 16 datos de mediciones de temperatura, se usó el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04 y EXCEL 2013 para procesamiento de datos, los resultados se exponen en el apartado 4.1.2. de resultados y discusión.

3.4.3. Determinar el comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión de anaerobia termofílica.

Para alcanzar el tercer objetivo se aplicó el método de análisis estadístico de comparación de los resultados de pH tomadas en la experimentación frente al tiempo de 33 días que duró el proceso de digestión anaerobia termofílica, registrándose 16 datos de mediciones de pH, se usó el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04 y EXCEL 2013 para procesamiento de datos, los resultados se exponen en el apartado 4.1.3. de resultados y discusión.

3.4.4. Técnicas analíticas empleadas

En la Tabla 16 se resume los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y parasitológicos a determinar y los métodos analíticos a utilizar para la muestra de lodos residuales frescos y biosólidos estabilizados obtenidos.

Tabla 16: Caracterización analítica de la muestra de lodos residuales de la Laguna de Estabilización Secundaria de aguas servidas de la ciudad de Puno y biosólido estabilizado obtenido del tratamiento de digestión anaerobia termofílica.

Variable	Unidad	Resultado
Características fisicoquímicas		
pH		Potenciométrico
Conductividad	mmhos/cm	Conductimétrico
Materia orgánica	%	Digestión titulación
Nitrógeno total	%	Digestión titulación
Fósforo total	mg/kg	Digestión titulación
Potasio total	mg/kg	Espectrofotometría
Microbiológico y parasitológico		
Coliformes fecales	NMP/g	Filtración en membrana
Salmonella <i>sp</i>	NMP/g	Siembra en medio selectivo
Huevos de helmintos	HH/g	Bailinger modificado
Contenido de metales		
Arsénico(As)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Cadmio (Cd)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Cobre (Cu)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Cromo(Cr)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Mercurio(Hg)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Molibdeno(Mo)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Níquel(Ni)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Plomo(Pb)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Selenio(Se)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF
Zinc (Zn)	mg/kg	APHA, AWWA y WEF

APHA, AWWA y WEF: Métodos de análisis de laboratorio estandarizados.

FUENTE: Elaborado según (EPA 40 CRF Part 503, 2003)

3.5. Pruebas estadísticas que se utilizarán

Determinación de indicadores estadísticos: mínimo, máximo, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación, mediante el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04 y hoja electrónica Excel 2013.

Diseño factorial de Kafarov, es una técnica de análisis estadístico que nos permitirá planificar y estimar adecuadamente los factores investigados, se utilizara mediante en el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

El diseño factorial de experimentos constituye un caso especial de regresión múltiple, en el que la obtención de la inversa de la matriz de regresión es sencilla, siempre y cuando los experimentos cumplan la condición de ortogonalidad. El diseño factorial se basa en generar datos ortogonales.

$$N = 2^k$$

Donde:

N = Número total de experimentos

k = Número de variables

En nuestro caso, como hemos mencionado, se realiza un experimento que depende de dos variables dependientes de pH y temperatura y cuatro variables independientes que son el tiempo, el contenido parasitológico, el contenido microbiológico y el contenido de metales pesados y se plantea dos niveles, por lo que se requerirán:

Número de experimentos = $N^k = 2^2 = 4$ experimentos

Número de mediciones = $N^k = 2^4 = 16$ mediciones.

3.5.1. Variables a ser analizadas:

Para el primer objetivo específico se evaluará las variables en base al Tabla 17.

Tabla 17: Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADOR	ÍNDICE
Variable dependiente			
Y: Digestión anaerobia de lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria de Puno	Parámetros del lodo residual para la digestión	Temperatura pH	41 a 65 °C 6 a 8,5
Variables independientes			
X1: Tiempo		Días	33 días
X2: Contenido parasitológico	Contenido parasitológico: Valor máximo en mg/kg, según EPA	Helmintos Coliformes fecales	Clase A: < 3/4 HH/g ST Clase A: < 1x10 ³ NMP/g ST Clase B: < 2x10 ⁶ NMP/g ST
X3: Contenido microbiológico	Contenido microbiológico: Valor máximo según EPA	<i>Salmonella sp</i>	Clase A: < 3/4 NMP/g ST
X4: Contenido de metales pesados	Contenido de metales: Valor máximo según EPA	Arsénico(As) Cadmio (Cd) Cromo (Cr) Mercurio (Hg) Níquel (Ni) Plomo (Pb) Selenio (Se) Zinc (Zn) Cobre (Cu)	Clase A Clase B 41 75 39 85 1200 3000 17 57 420 420 300 840 36 100 2800 7500 1500 4300

FUENTE: Elaboración propia según (EPA 40 CRF Part 503, 2003)

3.5.2. Transformada de variables

De acuerdo a los objetivos y la operacionalización de variables del estudio, se realizarán los siguientes análisis:

- 1) Para las tablas y figuras estadísticas, se hará uso de la hoja electrónica EXCEL 2013 y uso el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.
- 2) Para determinar indicadores (promedio aritmético, desviación estándar, coeficiente de variación, etc.), se hará uso el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Determinación de las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los biosólidos estabilizados obtenidos en el tratamiento por el método de digestión anaerobia termofílica de los lodos provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno.

Tal como se mencionó en el epígrafe 3.4.1 del capítulo de materiales y métodos, antes de comenzar con los ensayos de biodegradabilidad se realizó la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica al material experimental que son los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno y después la misma caracterización del biosólido estabilizado obtenido a partir del proceso y la estabilización por el método de digestión anaerobia termofílica.

El día de muestreo se realizó el día martes 19 de septiembre del 2017 entre las horas (6:00-8:00a.m); el inicio de las pruebas de biodegradabilidad por el método de digestión anaerobia termofílica empezó el jueves 28 de septiembre a las 9:00a.m y finalizó el martes 31 de Octubre del 2017 a las 9:00a.m con una duración del proceso de digestión de 33 días, para mantener las muestras fueron envueltas con material refrigerante.

El análisis y la medición de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y pH consecutivamente se realizó los días jueves, lunes y martes a la semana hasta culminar la experimentación.

Es importante saber que los parámetros de temperatura y pH de la muestra experimental son muy sensibles porque tienden a variar conforme pase el tiempo, fue necesario medir in- situ y en el laboratorio antes de la digestión.

Otro punto importante fue que el mismo día de la toma de muestra se realizó el envío y el análisis de las características microbiológicas y parasitológicas de la muestra experimental ya que estas son muy sensibles con la temperatura y el tiempo.

La conductividad, el contenido de metales y otros parámetros no son parámetros sensibles por lo que el análisis y el envío de muestras se realizaron después de 1 semana.

A continuación se presentan los resultados y mediciones de los parámetros obtenidos para la caracterización de los lodos y los biosólidos estabilizados obtenidos.

4.1.1.1. Parámetros medidos in-situ del lugar de muestreo.

La Tabla 18 muestra los diferentes parámetros de los lodos residuales medidos In situ de la Laguna de Estabilización Secundaria de Puno al momento de muestreo.

Tabla 18: Parámetros medidos in-situ día 0

	Afluente	Lado lateral Izquierdo	Lado lateral Derecho	Efluente
Puntos de muestreo	MP1 UTM (E 19L0392673 N 8246702)	MP2 UTM (E 19L0392637 N 8247038)	MP3 UTM (E 19L0392592 N 8246953)	MP4 UTM (E 19L0392786 N 8246916)
Temperatura ambiental (°C)			16,4	
Temperatura de lodos (°C)	15,95	14,33	14,80	13,90
pH (UpH)	6,95	7,12	7,24	6,90

FUENTE: Elaboración propia.

Las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 presentan valores de temperatura in-situ en un rango de 13,9°C-15,95°C que se encuentra dentro de la temperatura ambiental de 16,4°C, la temperatura varía según a la estación, mes, presión barométrica, la altitud, profundidad de muestreo y la hora de muestreo que se registró en la Tabla 12.

Los valores de pH de las muestras se encuentran en un rango de 6,9-7,24 cual demuestra que se encuentran en un medio neutro.

Estos valores fueron considerados como parámetros iniciales para el proceso de digestión anaerobia termofílica presentes en la Tabla 20, así también considerados en la Tabla 22 y Tabla 28 como datos del día 0.

4.1.1.2. Parámetros medidos en el laboratorio.

La Tabla 19 se muestra los diferentes parámetros de los lodos residuales medidos en el Megalaboratorio antes de proceder con los ensayos de biodegradabilidad por el método de digestión anaerobia termofílica.

Tabla 19. Parámetros medidos en el Megalaboratorio del día 1

Puntos de muestreo	Afluyente	Lado lateral Izquierdo	Lado lateral Derecho	Efluyente
		MP1 UTM (E 19L0392673 N 8246702)	MP2 UTM (E 19L0392637 N 8247038)	MP3 UTM (E 19L0392592 N 8246953)
Temperatura ambiental (°C)	15,00			
Temperatura de lodos (°C)	14,00	14,50	14,00	14,25
pH (UpH)	7,22	7,40	7,37	7,30

FUENTE: Elaboración propia.

Las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 presentan valores de temperatura registrados en el laboratorio antes del proceso de experimentación que se encuentra dentro del rango de 14,0°C-14,25°C, estos se encuentran dentro de la temperatura ambiental de 15,0°C.

Los valores de pH de las muestras se encuentran en un rango de 7,22-7,40, lo cual demuestra que se encuentran en un medio neutro con tendencia a alcalino.

Estos valores fueron considerados como parámetros del día 1 para el proceso de digestión anaerobia termofílica presentes en la Tabla 22 y Tabla 28.

4.1.1.3. Caracterización de los lodos residuales de los diferentes puntos de muestreo de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno.

En este apartado se presentan en la Tabla 20, los valores iniciales obtenidos de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y parasitológicos de los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria.

Tabla 20: Resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica de los lodos residuales de la laguna de estabilización de Puno antes de la experimentación del día 0

Variable	Unidad	Resultados			
		MP1 _I UTM (E 19L0392673 N 8246702)	MP2 _I UTM (E 19L0392637 N 8247038)	MP3 _I UTM (E 19L0392592 N 8246953)	MP4 _I UTM (E 19L0392786 N 8246916)
Características fisicoquímicas					
pH		6,98	7,12	7,24	6,90
Conductividad	mmhos/cm	3033	2098	3023	3060
Materia orgánica (MO)	%	22,13	23,06	21,44	23,5
Nitrógeno total (N)	%	6,22	6,00	5,30	6,30
Fósforo total (P)	mg/kg	4200	7321	4755	1777
Potasio total (K)	mg/kg	1678	1894	1439	1206
Microbiológico y parasitológico					
Coliformes fecales	NMP/g	1800	1700	1300	1500
Salmonella <i>sp</i>	NMP/g	400	600	500	600
Huevos de helmintos	HH/g	8	5	0	0
Contenido de metales					
Arsénico(As)	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Cadmio (Cd)	mg/kg	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016
Cobre (Cu)	mg/kg	48,89	102	65,29	38,94
Cromo(Cr)	mg/kg	11,72	14,28	20,56	18,04
Mercurio(Hg)	mg/kg	1,65	1,18	<1,00	<1,00
Molibdeno(Mo)	mg/kg	<0,18	<0,18	<0,18	<0,18
Níquel(Ni)	mg/kg	9,06	11,33	12,48	12,48
Plomo(Pb)	mg/kg	35,36	45,04	24,8	12,84
Selenio(Se)	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Zinc (Zn)	mg/kg	223,5	481,8	268,6	143,3

FUENTE: Recopilación de los resultados obtenidos.

Según la Tabla 20, las características fisicoquímicas de las muestras iniciales presentan valores similares de conductividad en las muestras MP1_I y MP3_I, con un margen de error de 0,1 %, más un valor mínimo en la muestra de MP2_I y un valor máximo en MP4_I respectivamente en el rango de (2098-3060) mmhos/cm, este parámetro nos ayuda a determinar la concentración de STD en las muestras, las cuales indican que tanto en el afluente y en el efluente no existe un tratamiento secundario ni una disminución de STD ya que la carga de lodos residuales se sigue incrementando y acumulando dentro de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno.

El contenido de NPK de las muestras iniciales presentan valores de N en un rango de (5,30-6,30) %, de P en el rango de (1777-7321) mg/kg y de K en el rango de (1206-1894) mg/kg, siendo el valor máximo el afluente MP1_I y los valores mínimos las muestras MP3_I y el efluente MP4_I para P y K, lo que significa que existe una variación en la concentración de NPK con la entrada y salida de los lodos.

El contenido de MO se encuentra en el rango de (21,44-23,05) % existiendo una variación en la muestra de MP3_I con las demás muestras, esto se debe que la acumulación de los lodos no es uniforme en la laguna de estabilización.

Los valores de pH de las muestras se encuentran en el rango de 6,90-7,24 siendo un pH neutro.

Las características microbiológicas y parasitológicas en las muestras iniciales presentan en coliformes fecales un rango entre (1300-1800) NMP/g existiendo una variación entre MP1_I y las demás muestras.

El contenido de salmonella *sp.* están en un rango de (400-600) NMP/g, no habiendo una variación significativa entre las cuatro muestras iniciales.

El contenido de huevos de helmintos en las muestras MP3_I y MP4_I no presentan contenido de ellos mientras las muestras de MP1_I y MP2_I están en un rango de (5-8) HH/g, esto se debe a la reactividad de los huevos de helmintos en los lodos, ya que estos son más reactivos y contaminantes en suelos secos.

En relación al contenido de metales pesados, As, Cd, Mo, Zn y Se en todas las muestras iniciales muestran valores iguales, en el contenido de Cu se presenta la muestra MP2_I con una variación significativa con referente a las demás, en el contenido de Cr se presentan una variación significativa entre las muestras MP1_I y MP3_I, en el contenido de Hg existe una leve diferencia de la muestras MP1_I y MP2_I con las demás muestras por lo que es una variación no muy significativa, en el contenido de Ni sólo MP1_I presenta una variación mínima con referente a las demás y el contenido de Pb solo la muestra MP4_I es menor la concentración de Pb con referente a las demás.

4.1.1.4. Caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica del biosólido estabilizado obtenido de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno.

En este apartado se presentan en la Tabla 21, los valores finales obtenidos de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y parasitológicos de los biosólidos estabilizados con el proceso de digestión anaerobia termofílica.

Tabla 21: Resultados de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y parasitológica de los biosólidos estabilizado obtenido de la laguna de estabilización de Puno después de la experimentación del día 33

Variable	Unidad	Resultados				40 CFR Part 503 EPA		Norma Peruana
		MP1 _F UTM (E) 19L0392673 N 8246702)	MP2 _F UTM (E) 19L0392637 N 8247038)	MP3 _F UTM (E) 19L0392592 N 8246953)	MP4 _F UTM (E) 19L0392786 N 8246916)	CLASE A	CLASE B	DS-N° 015-2017-VIVENDA CLASE A Y B
Características fisicoquímicas								
pH		7,69	8,40	8,43	8,35	-	-	-
Conductividad	mmhos/cm	1992	1378	1985	2009	-	-	-
Materia orgánica (MO)	%	32,87	32,65	31,95	32,95	-	-	-
Nitrógeno total (N)	%	6,5	6,3	6,1	6,7	-	-	-
Fósforo total (P)	mg/kg	6452	10194	3211	2443	-	-	-
Potasio total (K)	mg/kg	1308	1511	1191	893	-	-	-
Microbiológico y parasitológico								
Coliformes fecales	NMP/g	<3/100	<3/100	<3/100	<3/100	<10 ³	<2x 10 ⁶	<10 ³ *
Salmonella sp	NMP/g	0	0	0	0	<3/4	-	<1/10
Huevos de helmintos	HH/g	0	0	0	0	<1/4	-	<1/4
Contenido de metales								
Arsénico(As)	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	41	75	40
Cadmio (Cd)	mg/kg	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	39	85	40
Cobre (Cu)	mg/kg	52,69	110,51	63,87	36,66	1500	4300	1500
Cromo(Cr)	mg/kg	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	1200	3000	1200
Mercurio(Hg)	mg/kg	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	300	840	400
Molibdeno(Mo)	mg/kg	<0,18	<0,18	<0,18	<0,18	17	57	17
Níquel(Ni)	mg/kg	0,76	0,88	1,38	0,85	NL	75	NL
Plomo(Pb)	mg/kg	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13	420	420	400
Selenio(Se)	mg/kg	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	36	100	NL
Zinc (Zn)	mg/kg	261	535,5	207,8	135,1	2800	7500	2400

FUENTE: Recopilación de los resultados obtenidos.

Según la Tabla 21, las características fisicoquímicas de las muestras finales presentan valores similares de conductividad en las muestras MP1_F, MP3_F, y MP4_F, más que en MP2_F existe una diferencia significativa con las demás muestras, este parámetro indica que la concentración de STD en las muestras finales se ha reducido después del tratamiento.

El contenido de NPK de las muestras presenta valores de N en un rango de (6,1-6,7) %, donde MP3_F tiene el valor mínimo y MP4_F tiene el valor máximo, los valores de P se encuentran en el rango de (2443-10194) mg/kg y los valores de K están en el rango de (893-1511) mg/kg, donde MP4_F tiene el valor mínimo y MP2_F tiene el valor máximo tanto para P y K respectivamente.

El contenido de MO se encuentra en el rango de (31,95-32,95) % existiendo una leve variación en la muestra de MP3_F con las demás muestras.

Los valores de pH de las muestras se encuentran en el rango de 7,69-8,43 siendo un pH neutro- alcalino.

Las características microbiológicas y parasitológicas en las muestras finales presentan en coliformes fecales un valor de <1/100 NMP/g.

Tanto el contenido de salmonella *spp.* y el contenido de huevos de helmintos presentan en las muestras finales la ausencia de estos, todos estos valores fueron comprados con la norma EPA part 503 y la norma peruana D.S. N°015-2017-VIVIENDA según los resultados obtenidos del laboratorio las muestras finales se encuentran en la clase de biosólido tipo A.

En relación al contenido de metales pesados, As, Cd, Cr, Mo, Hg, Pb, Se y Zn en todas las muestras finales muestran valores iguales, en el contenido de Cu se presenta la muestra MP2_I con una variación significativa con referente a las demás y en el contenido de Ni sólo MP3_F presenta una variación mínima con referente a las demás, y según la norma EPA y norma peruana se encuentran clasificados las muestras finales dentro la clase de biosólido de clase A.

4.1.1.5. Discusiones

La comparación de los parámetros iniciales y finales con respecto al tiempo de digestión anaerobia termofílica de los valores de las Tablas 20 y 21 comparados con otros autores.

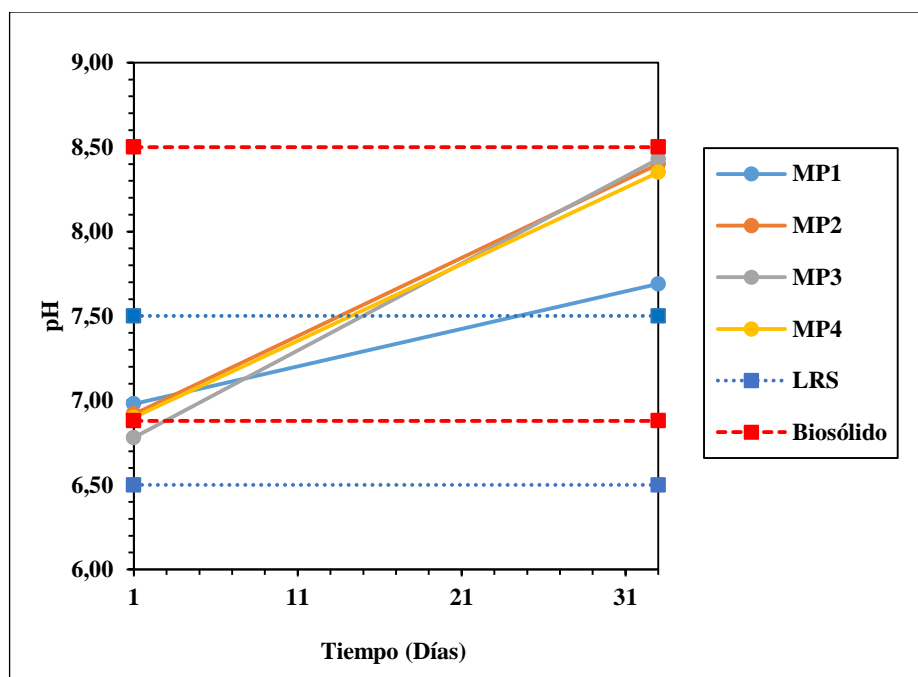


Figura 8: pH Vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Para la comparación de las características fisicoquímicas se observa en la Fig. 8 la relación del pH vs Tiempo de las muestras iniciales y finales, el pH de LRS de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 oscila entre 6,78-6,98 encontrándose dentro de los rangos de 6,5-7,5 (Hernandez, 1992) para LRS(mezcla), de 7,0-8,5 (Amador *et al.*, 2015) y de 5,0-8,0 (Melo *et al.*, 2017) para LR; el pH del biosólido obtenido de las muestras después de la digestión se encuentra en el rango de 7,69-8,43 siendo aceptable para la estabilización que oscila entre 6,88-7,89 (Atenodoro *et al.*, 2015) y entre 7.5 y 8.6, con niveles altos de alcalinidad (alrededor de 0.8) donde garantiza un proceso estable y óptimo (Cervantes *et al.*, 2011). Por lo que ambos pH iniciales y finales medidos se encuentran dentro de las referencias de otros autores con similar proceso.

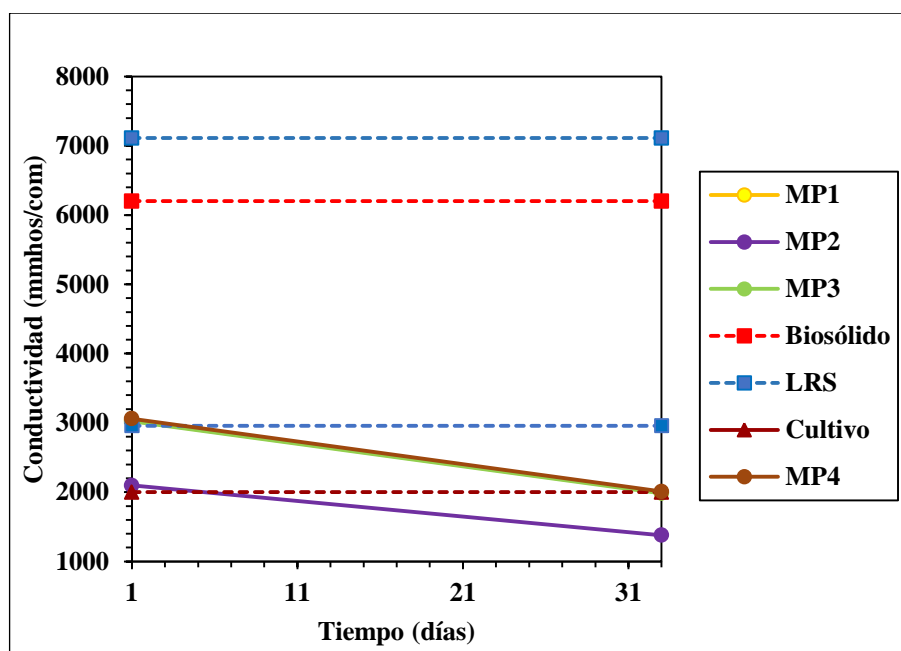


Figura 9: Conductividad Vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Según la Fig. 09, la conductividad registrada inicial en MP1, MP2, MP3 y MP4 se encuentra entre 2098 mmhos/cm a 3060 mmhos/cm encontrándose dentro del límite de 2960 mmhos/cm a 7110 mmhos/cm para LRS (Cardoso et al., 2000), mientras para el biosólido estable obtenido después de 33 días entre 1378 mmhos/cm a 2009mmhos/cm se encuentra dentro del promedio de 6200 mmhos/cm para un lodo digerido anaeróbicamente (Gudmundur, 1999) y todas las muestras excepto la muestra MP4 tiene una conductividad ligeramente superior dentro del límite comúnmente usado para cultivos que es de (0-2000 mmhos/cm) (Paz et al., 2007) frente a las demás muestras que están dentro del rango, por lo que se necesitará mezclar las otras muestras de biosólido obtenido con otras mezclas de tierra para no tener ningún grado de limitación y pueden sustentar cualquier tipo de vegetación.

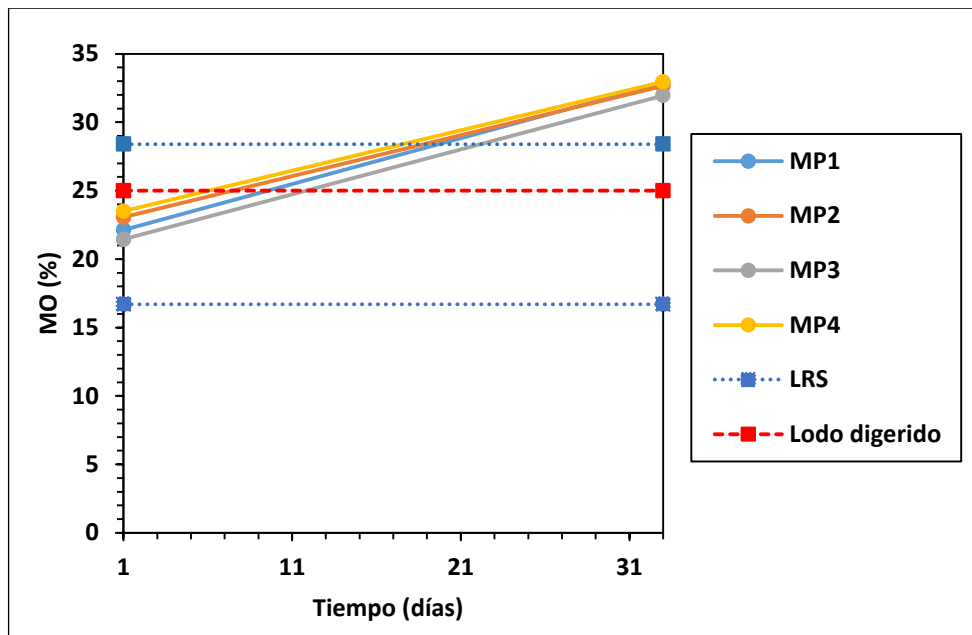


Figura 10: Materia Orgánica Vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Para los valores de materia orgánica encontrada en las muestras iniciales de MP1, MP2, MP3 y MP4 tal como se muestra en la Fig. 10 se encuentran en el rango de 21,44 % a 23,5 % lo cual indica que están dentro de 28,4 a 16,7 % (MO) en LRS (Torres *et al.*, 2007), mientras que el biosólido obtenido se observa un incremento que se encuentra entre 31,95 % a 32,95 % (MO) indicando que sobrepasan levemente el valor máximo recomendado para lodos digeridos en ≥ 25 % (AS 4454, 2003), por lo que se necesitará mezclar el biosólido obtenido con otras mezclas de tierra para no tener ningún grado de limitación y pueden sustentar cualquier tipo de vegetación (Castro *et al.*, 2007).

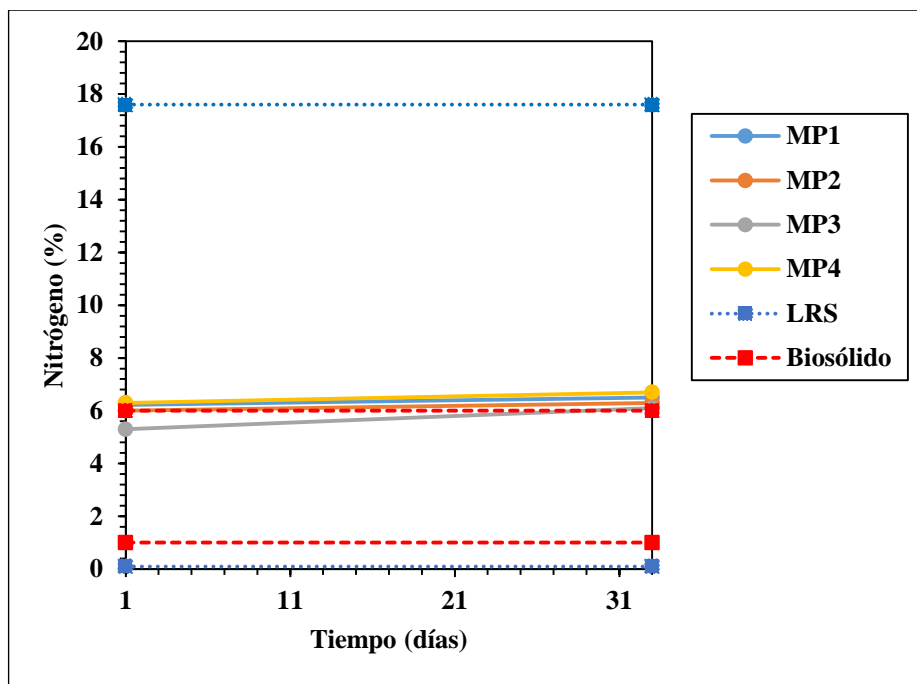


Figura 11: Nitrógeno Vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

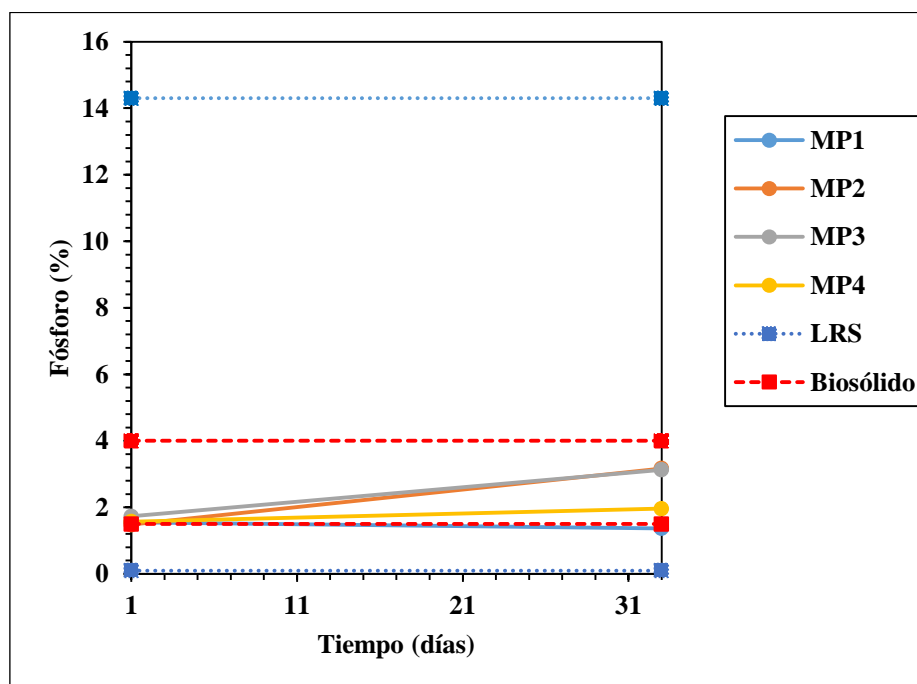


Figura 12: Fósforo Vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

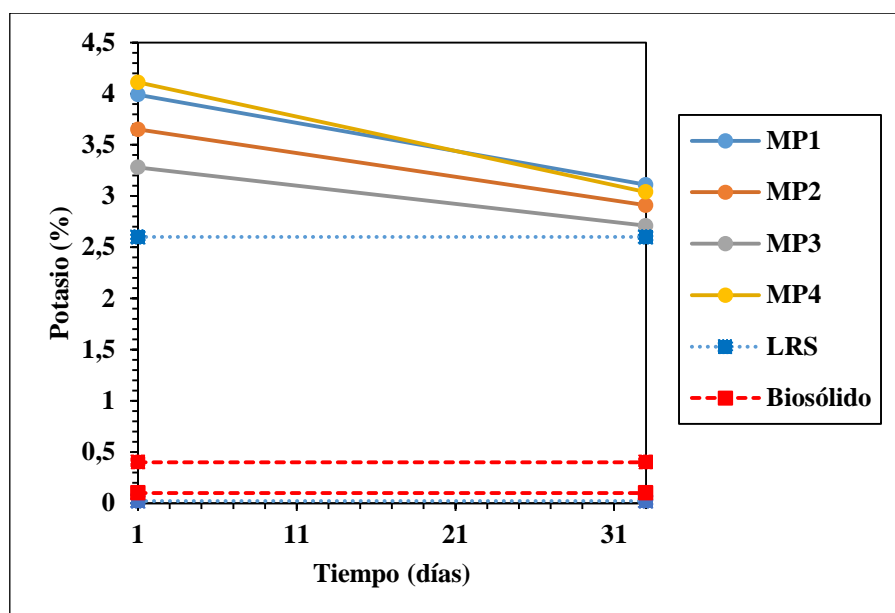


Figura 13: Potasio Vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

El contenido de nutrientes NPK varían según al tipo de LR y su procedencia, en las Figuras 11, 12 y 13 las muestras iniciales de MP1, MP2, MP3 y MP4 se encuentran entre 5,3% a 6,3% de N, 1777 mg/kg a 7321 mg/kg de P y 1206 mg/kg a 1894 mg/kg de K y que equivalen a 1,48% a 1,73 % y 3,28% a 4,11% respectivamente para P y K; para lo cual en N y P se encuentran dentro del límite normal de LRS según autores que esta entre 0,1% a 17,6%, 0,1 a 14,3% respectivamente, más en K se encuentra en el límite superior de 0,02% a 2,6% (Torres et al., 2007); el biosólido obtenido tiene valores 6,1% a 6,7% de N, 2443mg/kg a 10194 mg/kg de P y 893 mg/kg a 1511 mg/kg de K y que equivalen a 1,37% a 3,17 % y 2,71% a 3,11% respectivamente para P y K, el contenido de N sobrepasa levemente el límite superior se encuentra para lodos digeridos según autores esta entre 1,0% a 6,0% (González, 2015), el contenido de P se encuentra dentro el límite de 1,5% a 4,0% (Zhang *et al.*, 2014; Tchobanoglous *et al.*, 2003). y los valores de K sobrepasan el límite superior 0,1% a 0,4 % (González, 2015).

La composición de los fertilizantes más comunes son los nitrogenados como la urea (46% de nitrógeno), sulfato amónico (21% N), nitrato amónico (33,5% N), nitrato de calcio (27% N), etc.; los fosfatos como superfosfato simple (18% P_2O_5) o superfosfato triple (46% P_2O_5), etc. y las potasas como cloruro de potasio (60% K_2O), sulfato de potasio (50% K_2O) (Rodríguez *et al.*, 2014).

Como puede observarse, el contenido en nutrientes de un lodo digerido no es tan alto como el que presenta un fertilizante comercial. Esto es debido, entre otros factores, a que mucho del nitrógeno que contiene el lodo se pierde en forma amoniacal en el sobrenadante y una gran parte del fósforo se solubiliza en el digestor. Además, los lodos tienen bajas concentraciones de potasio. Sin embargo, a pesar de su no tan alto contenido en nutrientes, el lodo presenta una gran cantidad de materia orgánica, lo que hace que sí sean interesantes en su aplicación al suelo como enmienda orgánica. Esta presencia de materia orgánica, además de la humedad, en su caso, que presenta el lodo, hacen que los nutrientes sean más fácilmente asimilados y que se produzca un enriquecimiento del propio suelo, haciéndolo más fértil (De las Heras, 2009 citado por González, 2015).

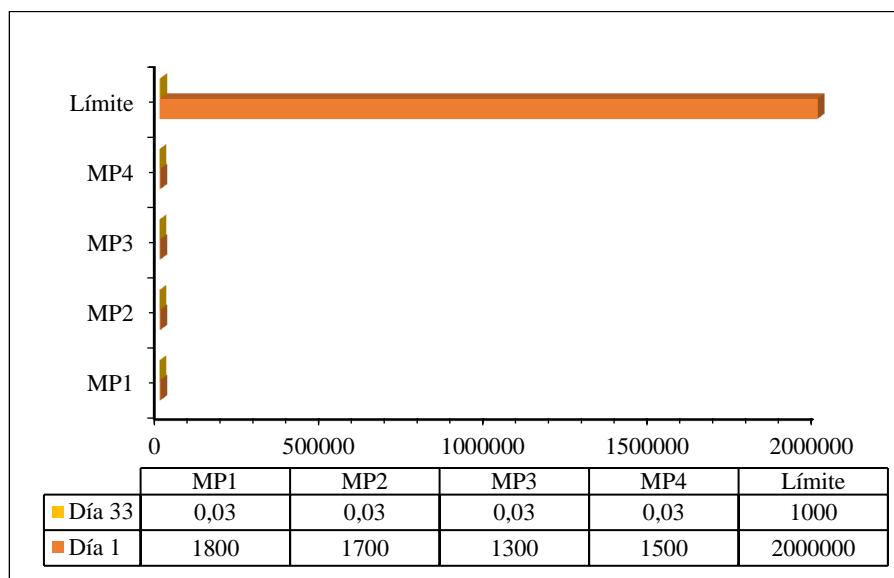


Figura 14: Coliformes fecales (NMP/g)

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Para el contenido microbiológico, parasitológico, se observa en la Fig. 14 el contenido de coliformes fecales iniciales de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 se encuentran entre 1300 a 1800 NMP/g dentro de los valores para LR entre 10^6 a 10^8 coliformes totales, 10^5 a 10^7 coliformes fecales y 10^4 a 10^6 streptococos fecales (Feachem *et al.*, 1984) y el biosólido obtenido después de 33 días en el proceso de digestión anaerobia termofílica los valores obtenidos se encuentra dentro los límites máximos permisibles de la Norma EPA de 10^3 a $2 \cdot 10^6$ (EPA 40 CRF Part 503, 2003) y 10^3 en la

Norma Peruana (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017), encontrándose en la Clase A de biosólido obtenido.

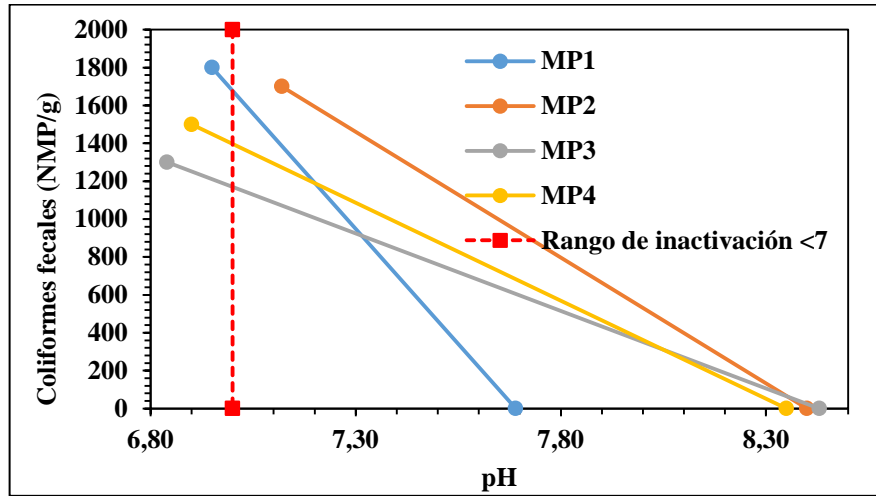


Figura 15: Coliformes fecales Vs. pH

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

En la Fig. 15 se observa la comparación del contenido inicial y final de coliformes totales con los pH iniciales y finales del proceso de digestión anaerobio termofílico donde las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 están entre 6,95 a 7,69, 7,12 a 8,4, 6,84 a 8,84 y 6,90 a 8,35 respectivamente, cabe señalar la tendencia alcalina y con curva descendente y el pH máximo para producir la inactivación y eliminación de coliformes fecales es superior o mayor a 7,0 (Elika, 2013a); el pH junto con el tiempo contribuyo en gran medida a la eliminación y reducción de estos patógenos.

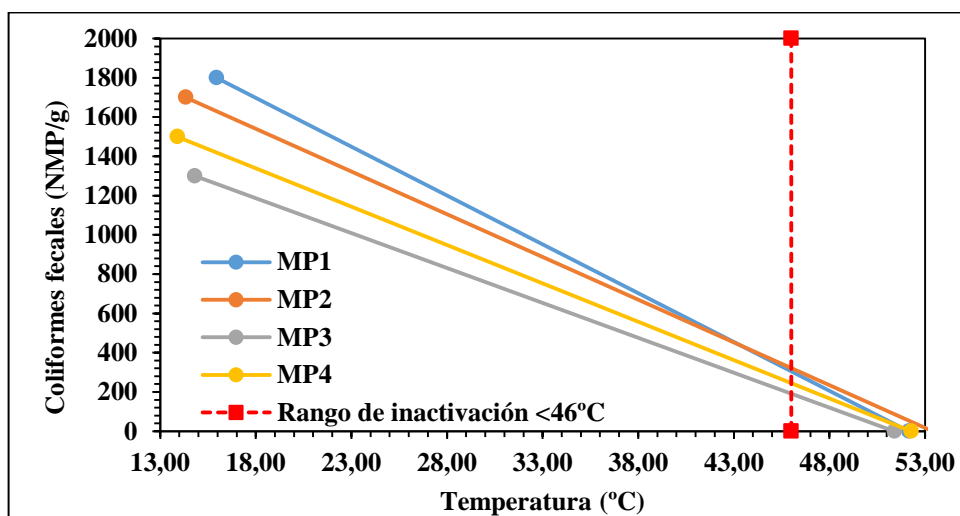


Figura 16: Coliformes fecales Vs. Temperatura

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

En la Fig. 16 se observa la comparación del contenido inicial y final de coliformes totales con las temperaturas iniciales y finales del proceso de digestión anaerobio termofílico donde las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 están entre 15,95°C a 53,15°C, 14,33°C a 53,40°C, 14,80°C a 51,40°C y 13,90°C a 54,28°C respectivamente, cabe señalar la curva descendente y la temperatura máxima para producir la inactivación y eliminación de coliformes fecales es superior o mayor a 46°C (Elika, 2013a); la temperatura junto con el tiempo contribuyo en gran medida a la eliminación y reducción de estos patógenos.

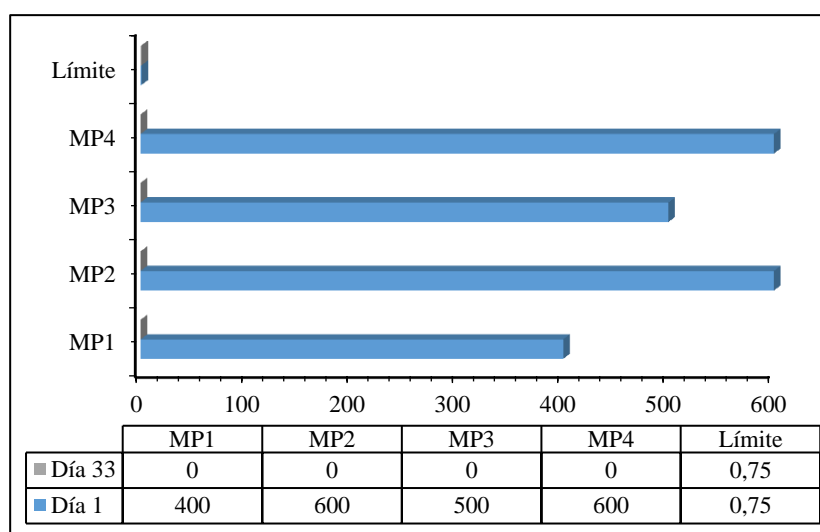


Figura 17: Salmonella ssp. (NMP/g)

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Para el contenido de salmonella *ssp.* se observa en la Fig. 17 las muestras iniciales MP1, MP2, MP3 y MP4 se encuentran entre 400 a 600 NMP/g y los valores del biosólido obtenido en las muestras presenta la ausencia de esta bacteria por lo que está por debajo del límite máximo permisible de 0,47 a 0,84 NMP/g (Castrejón *et al.*, 2000) para una digestión anaerobia, la Norma EPA de < 3/4 NMP/g (EPA 40 CRF Part 503, 2003) y en la Norma Peruana <1/10 NMP/g (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017), encontrándose en la Clase A de biosólido obtenido.

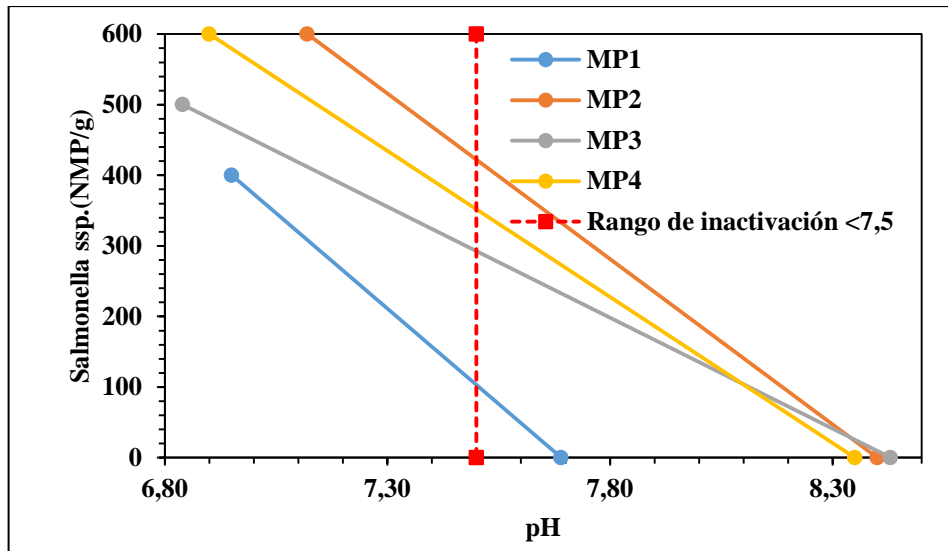


Figura 18: Salmonella ssp. Vs. pH

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

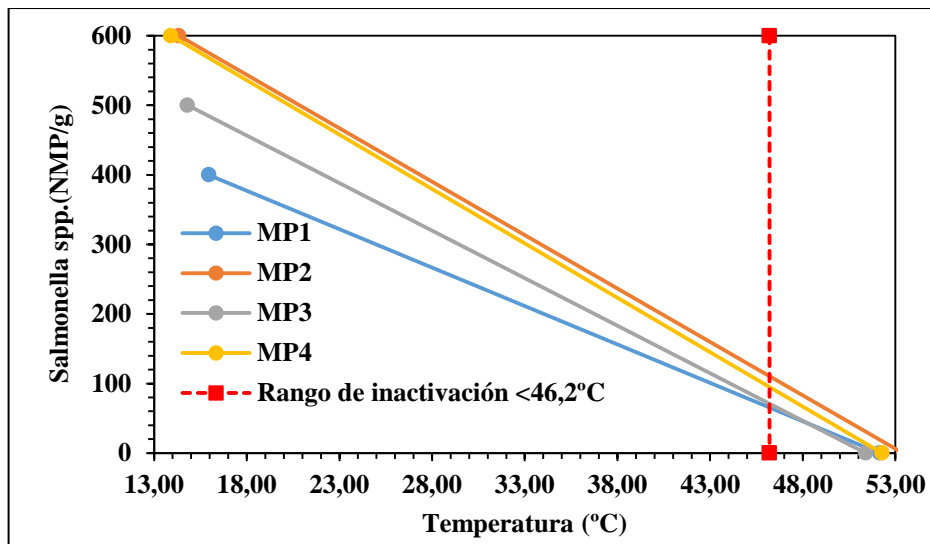


Figura 19: Salmonella ssp. Vs. Temperatura

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Tanto la Fig. 18 y 19 muestran la comparación del contenido de salmonella *ssp.* de los valores iniciales y finales de MP1, MP2, MP3 y MP4 con el pH y la temperatura, cabe señalar que ambas figuras muestran curvas descendentes, un pH máximo de inactivación y eliminación de salmonella superior a 7,5 y una temperatura máxima superior a 46,2°C (Elika, 2013b), esto quiere decir que tanto el pH, la temperatura y el tiempo de duración del proceso de digestión anaerobia termofílica ayudaron a la reducción y a la eliminación total de este microorganismo.

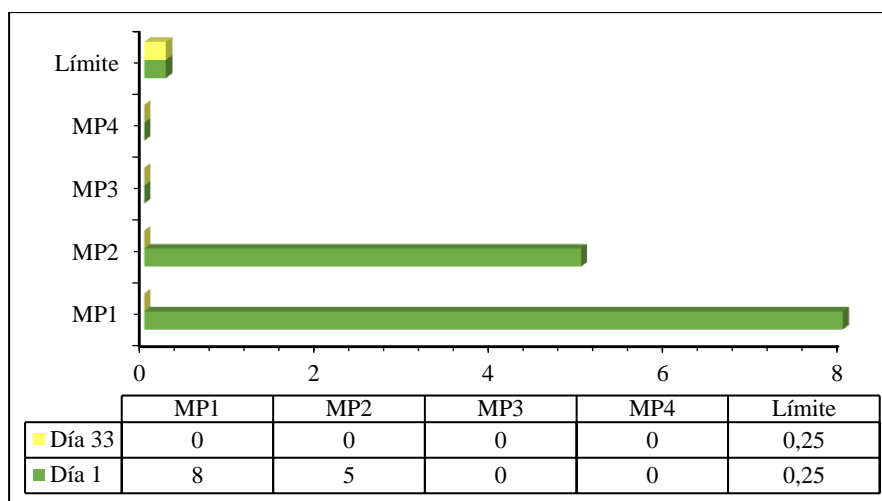


Figura 20: Huevos de Helmintos (HH/g)

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Para el contenido de huevos de helmintos se observa en la Fig. 20 las muestras iniciales de MP1, MP2, MP3 y MP4 se presenta entre 0 a 8 HH/g comparando con otros LR que están entre 21 HH/4g ST (Arévalo y Lituma, 2010), en cuanto a los valores del biosólido obtenido que presenta ausencia de huevos de helminto lo cual indica que cumple y está por debajo del límite máximo permisible de la Norma EPA de <math>< 1/4 \text{ HH/g}</math> (EPA 40 CRF Part 503, 2003) y la Norma Peruana <math>< 1/4 \text{ HH/g}</math> (DS N° 015-2017-VIVIENDA, 2017), encontrándose en la Clase A de biosólido obtenido.

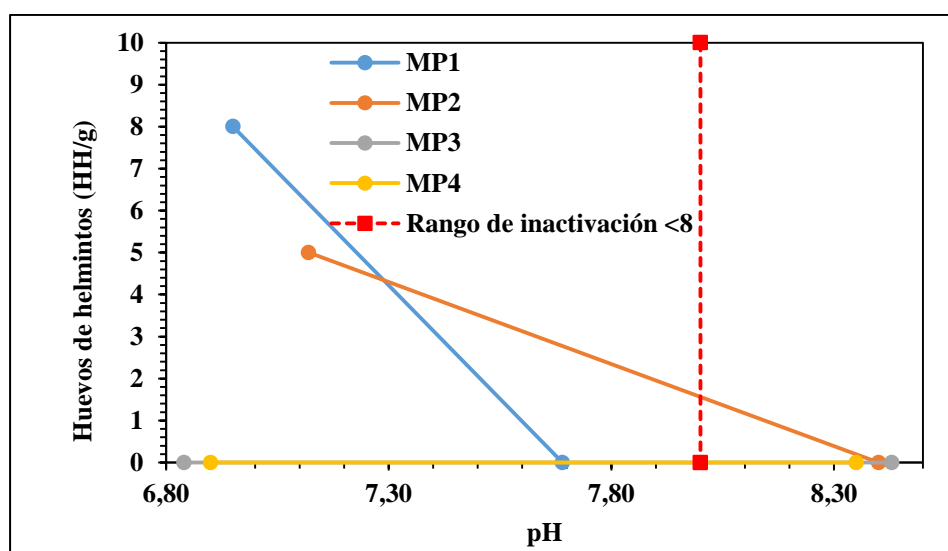


Figura 21: Huevos de Helmintos Vs. pH

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

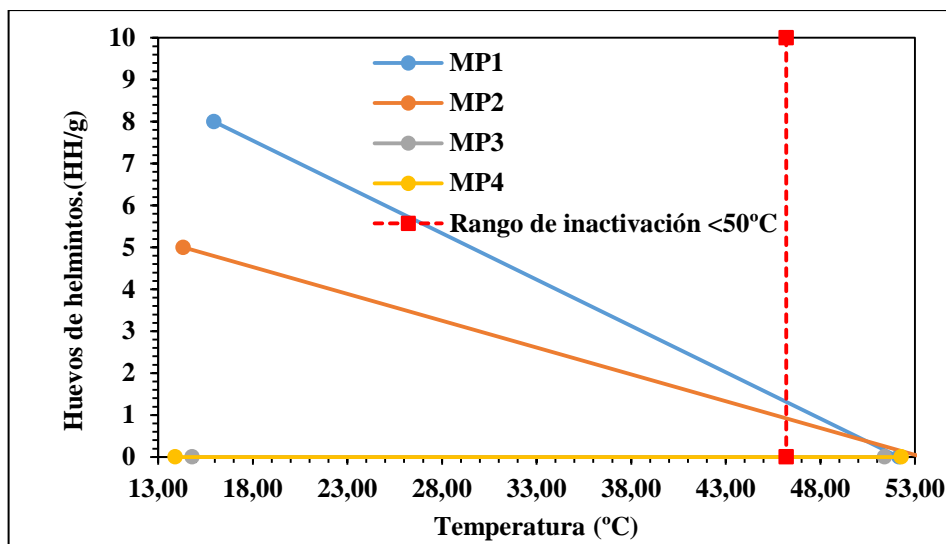


Figura 22: Huevos de Helmintos Vs. Temperatura

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Las Fig. 21 y 22 muestran la comparación del contenido de huevos de helmintos de los valores iniciales y finales de MP1, MP2, MP3 y MP4 con el pH y la temperatura, cabe señalar que ambas figuras muestran curvas descendentes, un alto pH crea un ambiente que mata o retarda sustancialmente las reacciones microbianas que generan olores y atracción a vectores, y un medio alcalino hace inaccesible la sobrevivencia de huevos de helmintos, el pH recomendado para la inactivación y eliminación de huevos de helmintos es superior a 8 (Araque, 2006) y para obtener una reducción significativa de huevos de helmintos, la temperatura debe ascender mayor a 50 °C, con un tiempo de exposición cercano a 28 días (Escobar *et al.*, 2014), esto quiere decir que tanto el pH, la temperatura y el tiempo de duración del proceso de digestión anaerobia termofílica ayudaron a la reducción y a la eliminación total de este microorganismo.

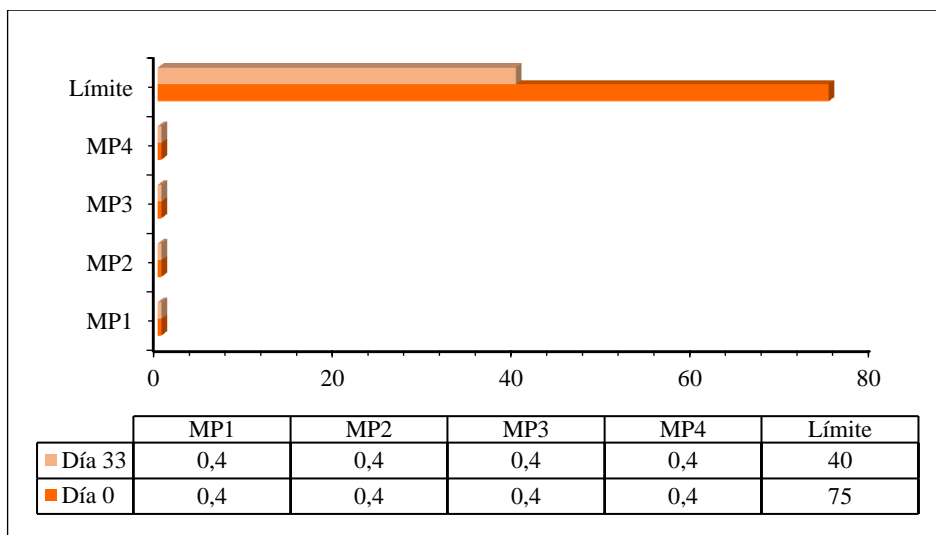


Figura 23: Arsénico (As) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

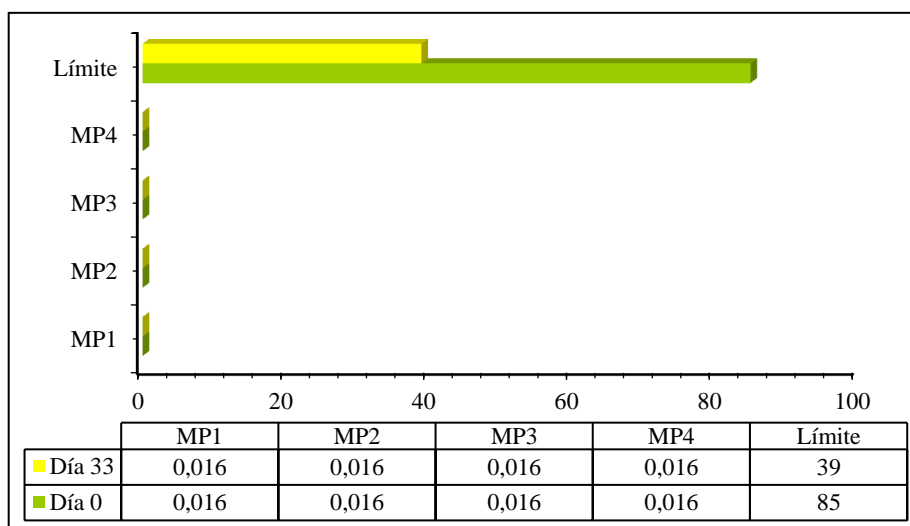


Figura 24: Cadmio (Cd) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

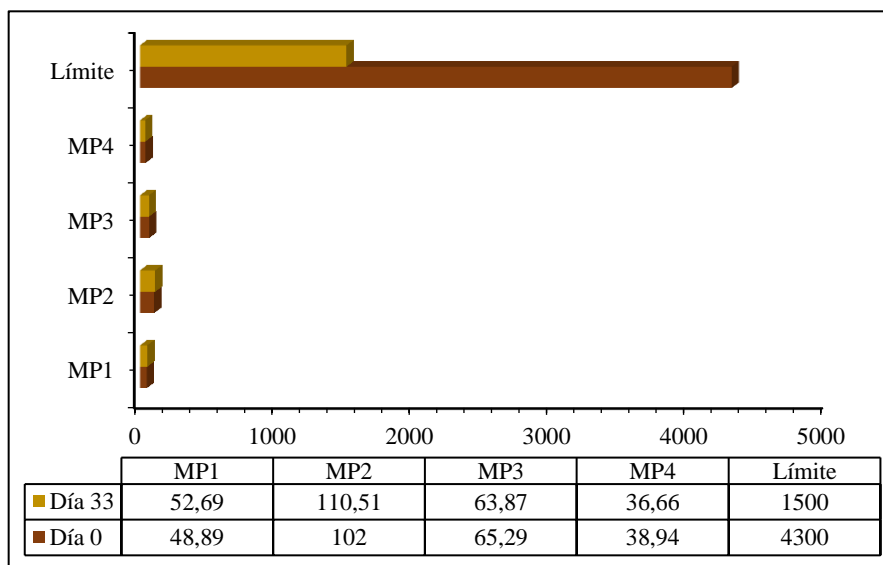


Figura 25: Cobre (Cu) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

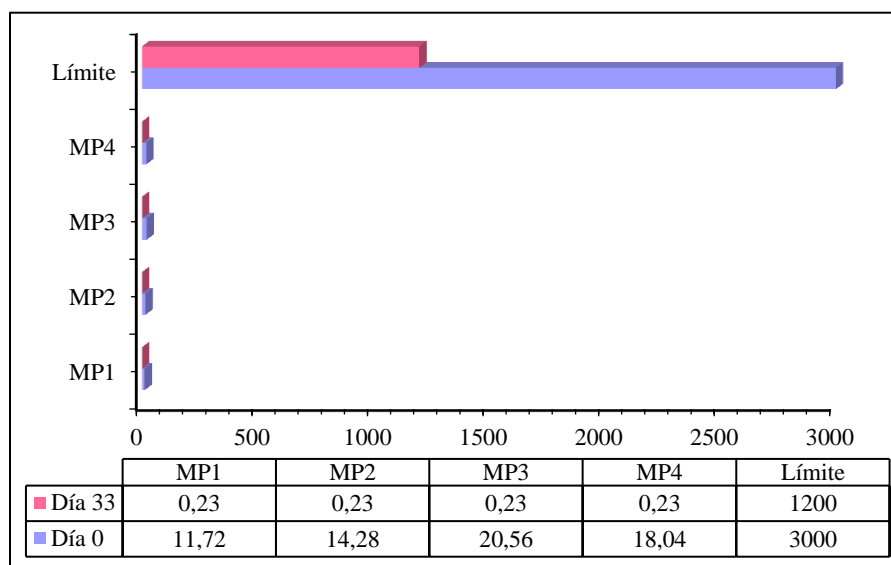


Figura 26: Cromo (Cr) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

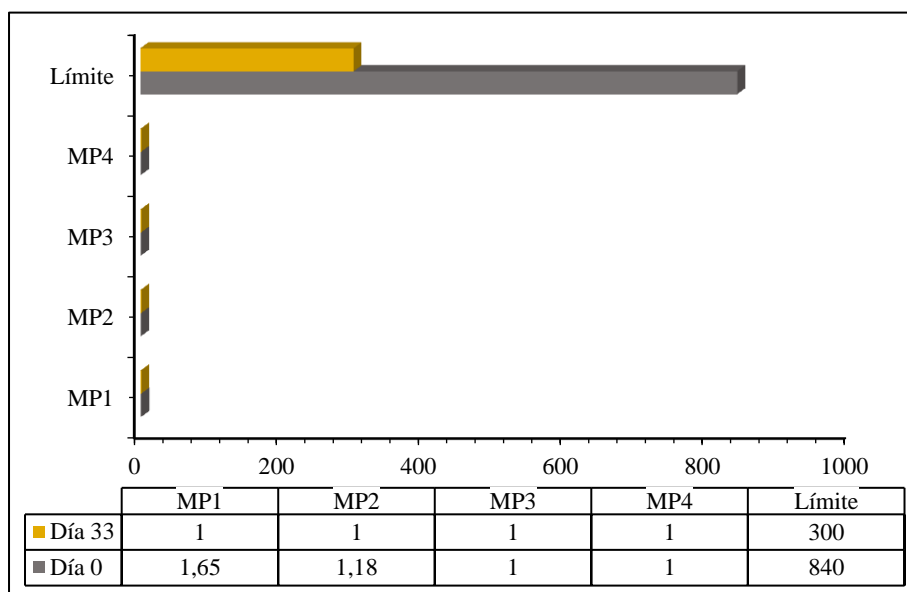


Figura 27: Mercurio (Hg) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

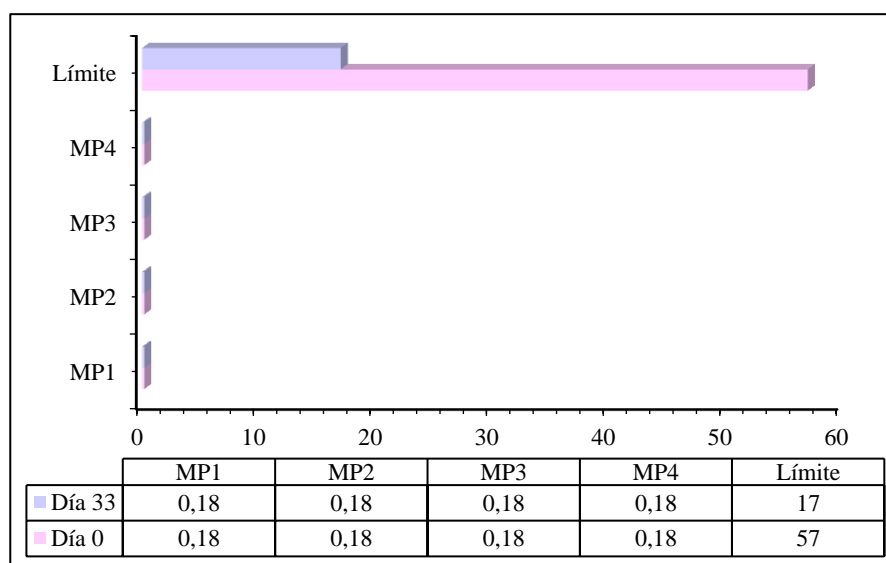


Figura 28: Molibdeno (Mo) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

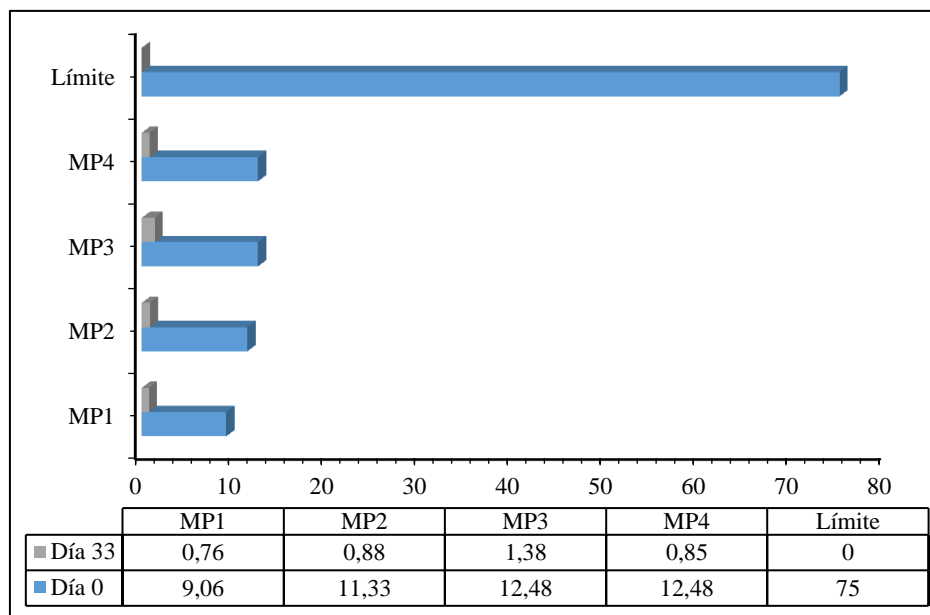


Figura 29: Níquel (Ni) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

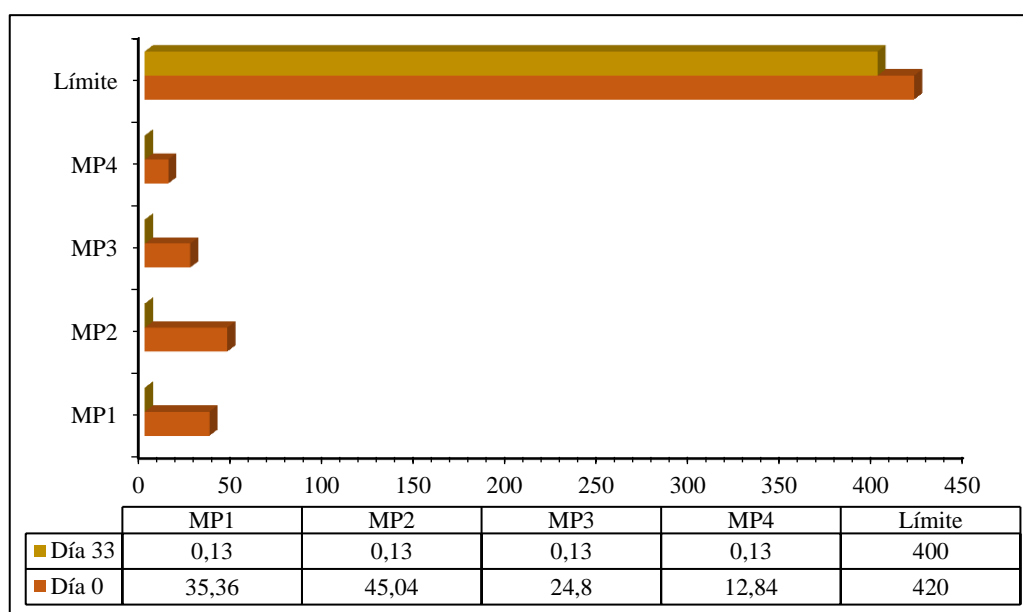


Figura 30: Plomo (Pb) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

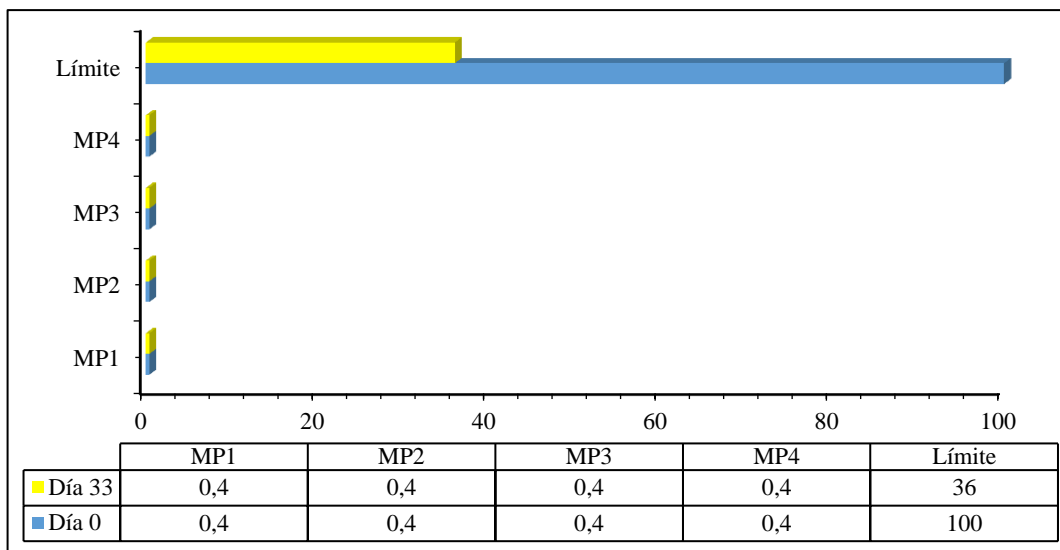


Figura 31: Selenio (Se) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

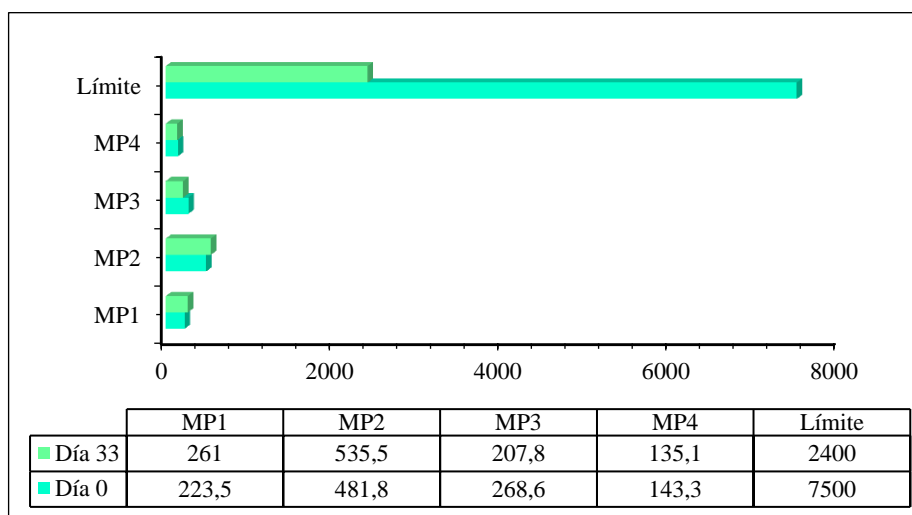


Figura 32: Zinc (Zn) mg/kg

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

Para el contenido de metales en las presentes Figuras del 23 al 32 de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 comparadas con los límites dados por la norma EPA 40 Parte 503 y la Norma peruana DS N°015-2017-VIVENDA se observa que todas las muestras iniciales y el biosólidos obtenidos se encuentran debajo del límite máximo permisible de las dos normas, encontrándose en la clasificación de la clase de biosólido A.

4.1.2. Determinación del efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado.

La Tabla 22 presenta los resultados obtenidos de la temperatura respecto al tiempo que se realizó el proceso de digestión anaerobia termofílica.

Tabla 22: Resultados de la temperatura con respecto al tiempo

FECHA	PARAMETROS					
	TIEMPO		TEMPERATURA (°C)			
	SEMANA	DIAS	MP1	MP2	MP3	MP4
19/09/2017	INSITU	0	15,95	14,33	14,80	13,90
28/09/2017	JUEVES	1	14,00	14,50	14,00	14,25
02/10/2017	LUNES	4	59,50	65,40	59,63	64,43
03/10/2017	MARTES	5	53,85	53,37	59,10	57,03
05/10/2017	JUEVES	7	50,53	53,20	52,27	55,00
09/10/2017	LUNES	11	50,40	52,48	50,77	50,73
10/10/2017	MARTES	12	59,27	59,03	55,83	54,00
12/10/2017	JUEVES	14	50,93	52,03	49,20	49,53
16/10/2017	LUNES	18	57,85	54,07	51,40	55,15
17/10/2017	MARTES	19	56,03	56,80	55,48	54,80
19/10/2017	JUEVES	21	51,50	52,37	50,48	49,88
23/10/2017	LUNES	25	57,13	57,63	55,95	55,68
24/10/2017	MARTES	26	50,58	50,70	49,85	50,23
26/10/2017	JUEVES	28	51,17	50,45	49,98	49,17
30/10/2017	LUNES	32	51,10	52,90	49,40	51,40
31/10/2017	MARTES	33	52,15	53,40	51,24	52,28

FUENTE: Recopilación de los resultados obtenidos

Para la determinación del efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado, de la Tabla 22 se presenta la Fig. 33 la cual muestra los diferentes valores de temperatura registrados en el proceso de digestión anaerobia termofílica por el lapso de 33 días, la temperatura promedio son 48,87°C, 49,54°C, 48,09°C y 48,59°C de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 respectivamente, siendo los valores mínimos registrados de 14,0°C, 14,33°C, 14,0°C y 13,9°C como valores iniciales antes del proceso de digestión y los valores máximos de 59,5°C, 65,4°C, 59,63°C y 64,43°C, encontrándose todos los valores del proceso de digestión dentro del rango termofílico (41-65°C), siendo uno de los procesos más utilizados para el tratamiento de residuos de alta carga orgánica (Borja *et*

al., 1992), la curva muestra una subida súbita y un medio mantenido entre el rango de 49,20°C a 65,40°C, lo que indica que no hay una variación fuera del rango termofílico.

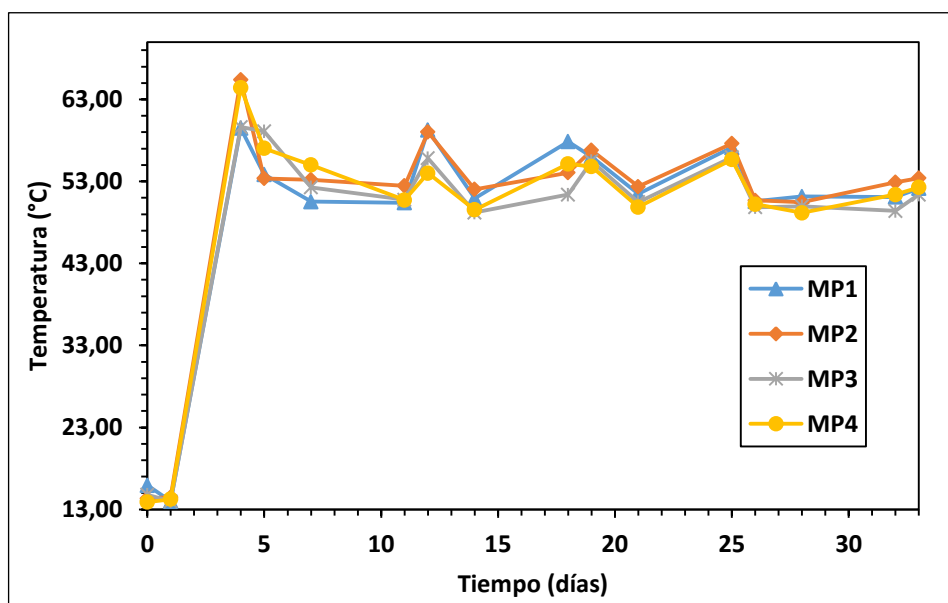


Figura 33: Temperatura vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

4.1.2.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el uso de la hoja electrónica EXCEL2013 y uso el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

Tabla 23: Resumen estadístico

Resumen estadístico	MP1	MP2	MP3	MP4
Recuento	16	16	16	16
Promedio	48,8713	49,5413	48,0863	48,5912
Mediana	51,335	53,05	51,005	51,84
Varianza	185,729	201,807	184,127	195,911
Desviación Estándar	13,6282	14,2059	13,5693	13,9968
Coefficiente de Variación	27,89%	28,67%	28,22%	28,81%
Error Estándar	3,40706	3,55147	3,39234	3,4992
Mínimo	14,0	14,33	14,0	13,9
Máximo	59,5	65,4	59,63	64,43

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

En la Tabla 23, se presenta el resumen estadístico de la temperatura de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 registrados en el proceso de digestión anaerobia termofílica, donde el valor de promedio de las muestras es similar entre sí con una temperatura promedio entre 48,09°C y 49,54°C, la mediana está dentro del rango de 51,01°C-53,05°C y presenta una varianza <201,81, los valores de desviación estándar es <14,2 con un coeficiente de variación entre 27,89 % a 28,81 % y con un error de estándar <3,55 La explicación por la que existe una desviación >1 son que los valores iniciales son menores con respecto a los demás haciendo una diferencia significativa en los resultados obtenidos. Más estos valores iniciales son importantes ya que nos ayudará a conocer el estado inicial de las muestras antes del proceso de digestión anaerobia termofílica.

Tabla 24: Efectos estimados para el tiempo (días) del proceso de digestión anaerobia termofílica

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	14,1728	4,39346	
A:MP1	-46,9026	31,7709	552,698
B:MP2	-31,1588	27,2596	151,316
C:MP3	-1,44244	50,2284	992,93
D:MP4	62,5281	55,8563	572,318
AB	-166,373	73,533	101831
AC	148,831	71,4098	168895
AD	-108,258	80,0233	107429
BC	-9,01809	93,5002	118879
BD	209,103	128,035	112337
CD	-66,2323	55,4272	37098,6

Errores estándar basados en el error total con 5 g.l

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

En la Tabla 24, se observa las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo y el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 168895 Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1.

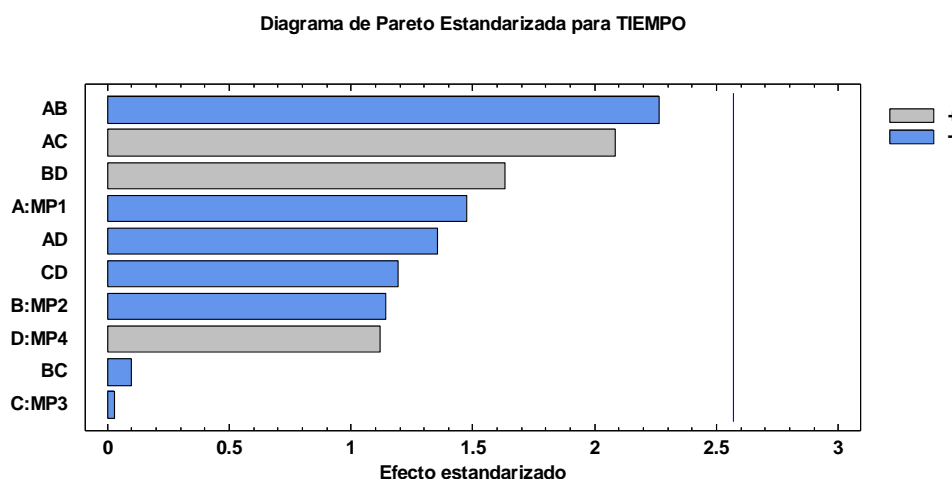


Figura 34: Diagrama de Pareto Estandarizado (DPE)

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

El diagrama de Pareto de la Figura 34, muestra los efectos más significativos de las muestras de pH con respecto al tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica. El factor C (MP3) tiene mayor efecto significativo en el tiempo del proceso, seguido del factor D (MP4), es el centro de la región experimental del trabajo donde los variables son independientes lo que corresponde a la superficie respuesta.

Tabla 25: Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:MP1	149,927	1	149,927	2,18	0,1999
B:MP2	89,8814	1	89,8814	1,31	0,3048
C:MP3	0,0567338	1	0,0567338	0,00	0,9782
D:MP4	86,2092	1	86,2092	1,25	0,3138
AB	352,167	1	352,167	5,12	0,0731
AC	298,827	1	298,827	4,34	0,0916
AD	125,903	1	125,903	1,83	0,2341
BC	0,639957	1	0,639957	0,01	0,9269
BD	183,487	1	183,487	2,67	0,1634
CD	98,229	1	98,229	1,43	0,2857
Error total	343,967	5	68,7934		
Total (corr.)	1780,0	15			

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

En la Tabla 25, se observa el análisis de varianza, donde:

R-cuadrada = 80,676 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 42,028 por ciento

Error estándar del est. = 8,29418

Error absoluto medio = 3,10035

Estadístico Durbin-Watson = 1,2737 (P=0,0258)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,147263

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de TIEMPO en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 80,676 % de la variabilidad en TIEMPO. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 42,028 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 8,29418.

El error medio absoluto (MAE) de 3,10035 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido a que el valor-P es menor que 5,0 %, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5,0 %.

Tabla 26: Coeficiente de regresión para tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica- Diseño Factorial 2⁴

Coeficiente	Estimado
Constante	-13,975
A:MP1	55,823
B:MP2	42,528
C:MP3	-131,726
D:MP4	32,5736
AB	-2,63207
AC	3,42692
AD	-1,64983
BC	-0,12148
BD	1,86431
CD	-0,859457

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04

De la Tabla 26, se interpreta la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos, siendo la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{TIEMPO (Y)} = -13,975 + 55,823*\text{MP1} + 42,528*\text{MP2} - 131,726*\text{MP3} + 32,5736*\text{MP4} - 2,63207*\text{MP1}*\text{MP2} + 3,42692*\text{MP1}*\text{MP3} - 1,64983*\text{MP1}*\text{MP4} - 0,12148*\text{MP2}*\text{MP3} + 1,86431*\text{MP2}*\text{MP4} - 0,859457*\text{MP3}*\text{MP4}$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales.

Tabla 27: Resultados estimados para el tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica

Fila	Observados Valores	Ajustados Valores	Inferior 95.0% para Media	Superior 95.0% para Media
1	0	1,90554	-10,0385	13,8496
2	1	4,38635	-7,08203	15,8547
3	4	4,18659	-6,78005	15,1532
4	5	7,0164	-3,37014	17,4029
5	7	6,52019	-4,84438	17,8848
6	11	9,17315	-0,531568	18,8779
7	12	5,70651	-1,29091	12,7039
8	14	14,9541	3,28035	26,6279
9	18	20,5755	9,82179	31,3293
10	19	21,5797	10,4025	32,7569
11	21	19,6133	10,7326	28,494
12	25	25,3602	14,2048	36,5156
13	26	28,367	20,0316	36,7023
14	28	22,8006	14,9173	30,684
15	32	30,0022	19,7687	40,2358
16	33	33,8526	24,1101	43,5951

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04

En la Tabla 27 contiene información acerca de los valores de TIEMPO generados usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- (1) los valores observados de TIEMPO
- (2) el valor predicho de TIEMPO usando el modelo ajustado
- (3) intervalos de confianza del 95,0 % para la respuesta media

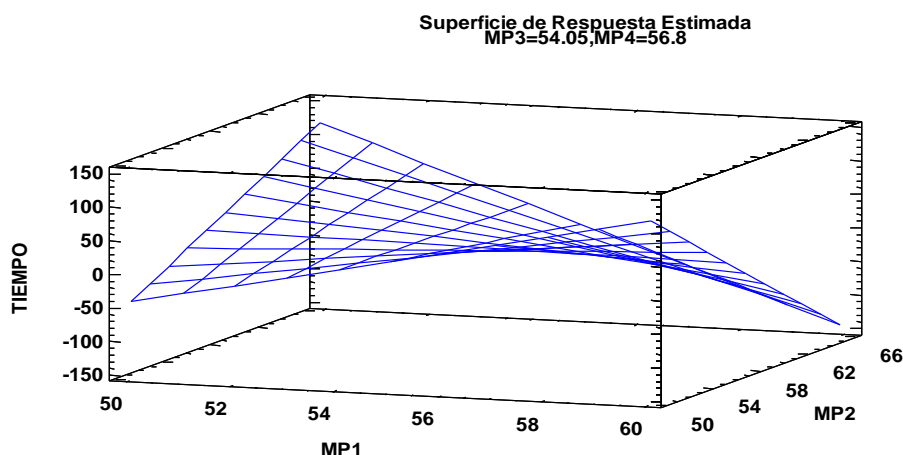


Figura 35: Superficie de respuesta estimada

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04

En la Figura 35, se observa la superficie de respuesta estimada de la temperatura de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 en equilibrio con respecto al tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica.

4.1.3. Determinación del comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión de anaerobia termofílica.

La Tabla 28 presenta los resultados obtenidos del pH con respecto al tiempo que se realizó el proceso de digestión anaerobia termofílica.

Tabla 28: Resultados del pH con respecto al tiempo

FECHA	PARAMETROS					
	TIEMPO		pH (UpH)			
	SEMANA	DIAS	MP1	MP2	MP3	MP4
19/09/2017	INSITU	0	6,95	7,12	7,24	6,90
28/09/2017	JUEVES	1	7,22	7,40	7,37	7,30
02/10/2017	LUNES	4	7,10	7,29	7,46	7,64
03/10/2017	MARTES	5	7,10	7,39	7,64	7,75
05/10/2017	JUEVES	7	7,28	6,84	7,54	7,64
09/10/2017	LUNES	11	7,21	7,11	7,44	7,21
10/10/2017	MARTES	12	7,13	7,43	7,43	7,33
12/10/2017	JUEVES	14	7,67	7,41	7,80	7,96
16/10/2017	LUNES	18	7,32	7,80	7,93	7,73
17/10/2017	MARTES	19	7,60	7,48	7,88	7,55
19/10/2017	JUEVES	21	7,40	7,56	7,77	7,51
23/10/2017	LUNES	25	7,62	8,03	8,10	8,23
24/10/2017	MARTES	26	7,60	8,05	8,26	8,05
26/10/2017	JUEVES	28	7,57	7,75	8,05	7,90
30/10/2017	LUNES	32	7,63	8,33	8,41	8,30
31/10/2017	MARTES	33	7,69	8,40	8,43	8,35

FUENTE: Recopilación de los resultados obtenidos.

Determinación del comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión de anaerobia termofílica, de la Tabla 28 se presenta la Fig. 36 la cual muestra los diferentes valores de pH registrados en el proceso de digestión anaerobia termofílica por el lapso de 33 días, la cual el pH promedio registrado son 7,38, 7,59, 7,80 y 7,71 de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 respectivamente, siendo los valores mínimos registrados de 6,95, 6,84, 7,24 y 6,90 y los valores máximos de 7,69, 8,40, 8,43 y 8,35, iniciando con un pH neutro y finalizando a un pH alcalino, los valores registrados de pH conforme al tiempo se encuentran dentro de 6,88-7,89 (Atenodoro *et al.*, 2015) y 7,0 y 8,5 donde garantiza un proceso estable y óptimo (Arévalo y Lituma, 2010). Por lo que los valores registrados se encuentran dentro de las referencias de otros autores con similar proceso, la curva presenta es una curva ascendente con tendencia alcalina.

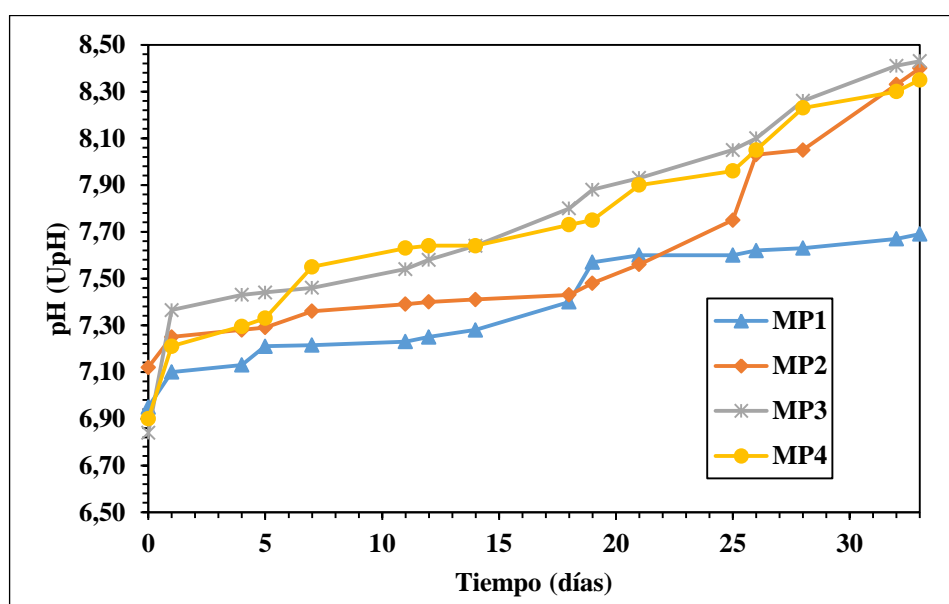


Figura 36: pH vs. Tiempo

FUENTE: Graficado con Microsoft Excel 2013.

4.1.3.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el uso de la hoja electrónica EXCEL2013 y uso el programa STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

Tabla 29: Resumen estadístico

Resumen estadístico	MP1	MP2	MP3	MP4
Recuento	16	16	16	16
Promedio	7,38063	7,58688	7,79687	7,70937
Mediana	7,36	7,455	7,785	7,685
Varianza	0,0603929	0,19529	0,142063	0,16922
Desviación Estándar	0,24575	0,441916	0,376912	0,411363
Coefficiente de Variación	3,33%	5,82%	4,83%	5,34%
Error Estándar	0,0614374	0,110479	0,0942281	0,102841
Mínimo	6,95	6,84	7,24	6,90
Máximo	7,69	8,40	8,43	8,35

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

En la Tabla 29, se presenta el resumen estadístico del pH de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 registrados en el proceso de digestión anaerobia termofílica, donde el valor de promedio de las muestras es similar entre sí con un pH neutro con tendencia a alcalino, la mediana está dentro del rango de 7,36-7,785 y presenta una varianza $<0,19$, los valores de desviación estándar es $<0,44$ con un coeficiente de variación entre 3,33 % a 5,82 % y con un error de estándar $<0,1$. Lo cual se encuentran dentro de los parámetros dados.

Tabla 30: Efectos estimados para el tiempo (días) del proceso de digestión anaerobia termofílica

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	20,1427	4,38348	
A:MP1	16,2504	24,6876	43,4667
B:MP2	12,1242	22,2269	38,0798
C:MP3	31,977	20,8533	28,2107
D:MP4	-28,4045	32,8736	56,2454
AB	23,0141	52,7918	78,3818
AC	-17,3889	41,0084	32,0136
AD	17,7648	33,3308	25,6977
BC	7,85386	37,4058	29,8595
BD	9,59893	49,8003	61,7311
CD	-45,3701	76,0894	129,449

Errores estándar basados en el error total con 5 g.l

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

En la Tabla 30, se observa las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo y el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 129,449. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1.

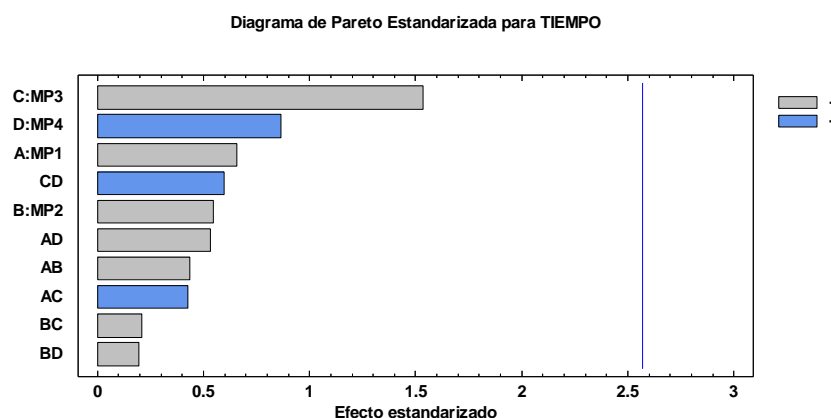


Figura 37: Diagrama de Pareto Estandarizado (DPE)

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

El diagrama de Pareto de la Figura 37, muestra los efectos más significativos de las muestras de pH con respecto al tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica. El factor C (MP3) tiene mayor efecto significativo en el tiempo del proceso, seguido del factor D (MP4), es el centro de la región experimental del trabajo donde los variables son independientes lo que corresponde a la superficie respuesta.

Tabla 31: Análisis de varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:MP1	10,0504	1	10,0504	0,43	0,5395
B:MP2	6,90181	1	6,90181	0,3	0,6089
C:MP3	54,5429	1	54,5429	2,35	0,1858
D:MP4	17,3179	1	17,3179	0,75	0,4271
AB	4,40828	1	4,40828	0,19	0,6811
AC	4,17075	1	4,17075	0,18	0,6892
AD	6,58941	1	6,58941	0,28	0,6169
BC	1,02259	1	1,02259	0,04	0,842
BD	0,861779	1	0,861779	0,04	0,8547
CD	8,24716	1	8,24716	0,36	0,577
Error total	115,98	5	23,1961		
Total (corr.)	1780	15			

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04.

En la Tabla 31, se observa el análisis de varianza, donde:

R-cuadrada = 93,4843 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 80,4528 porciento

Error estándar del est. = 4,81623

Error absoluto medio = 2,148

Estadístico Durbin-Watson = 1,70174 (P=0,0983)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,130341

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de TIEMPO en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 93,4843 % de la variabilidad en TIEMPO. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 80,4528 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 4,81623.

El error medio absoluto (MAE) de 2,148 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

Tabla 32: Coeficiente de regresión para tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica- Diseño Factorial 2⁴

Coefficiente	Estimado
Constante	165,488
A:MP1	-298,181
B:MP2	-505,903
C:MP3	636,921
D:MP4	69,7853
AB	48,594
AC	-39,4934
AD	33,1125
BC	10,3123
BD	10,3437
CD	-52,5877

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04

De la Tabla 32, se interpreta la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos, siendo la ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{TIEMPO (Y)} = 165,488 - 298,181*MP1 - 505,903*MP2 + 636,921*MP3 + 69,7853*MP4 + 48,594*MP1*MP2 - 39,4934*MP1*MP3 + 33,1125*MP1*MP4 + 10,3123*MP2*MP3 + 10,3437*MP2*MP4 - 52,5877*MP3*MP4$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales.

Tabla 33: Resultados estimados para el tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica

Fila	Observados Valores	Ajustados Valores	Inferior 95.0% para Media	Superior 95.0% para Media
1	0	1,90554	-10,0385	13,8496
2	1	4,38635	-7,08203	15,8547
3	4	4,18659	-6,78005	15,1532
4	5	7,0164	-3,37014	17,4029
5	7	6,52019	-4,84438	17,8848
6	11	9,17315	-0,531568	18,8779
7	12	5,70651	-1,29091	12,7039
8	14	14,9541	3,28035	26,6279
9	18	20,5755	9,82179	31,3293
10	19	21,5797	10,4025	32,7569
11	21	19,6133	10,7326	28,494
12	25	25,3602	14,2048	36,5156
13	26	28,367	20,0316	36,7023
14	28	22,8006	14,9173	30,684
15	32	30,0022	19,7687	40,2358
16	33	33,8526	24,1101	43,5951

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04

En la Tabla 33 contiene información acerca de los valores de TIEMPO generados usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- (1) los valores observados de TIEMPO (si alguno)
- (2) el valor predicho de TIEMPO usando el modelo ajustado
- (3) intervalos de confianza del 95,0 % para la respuesta media

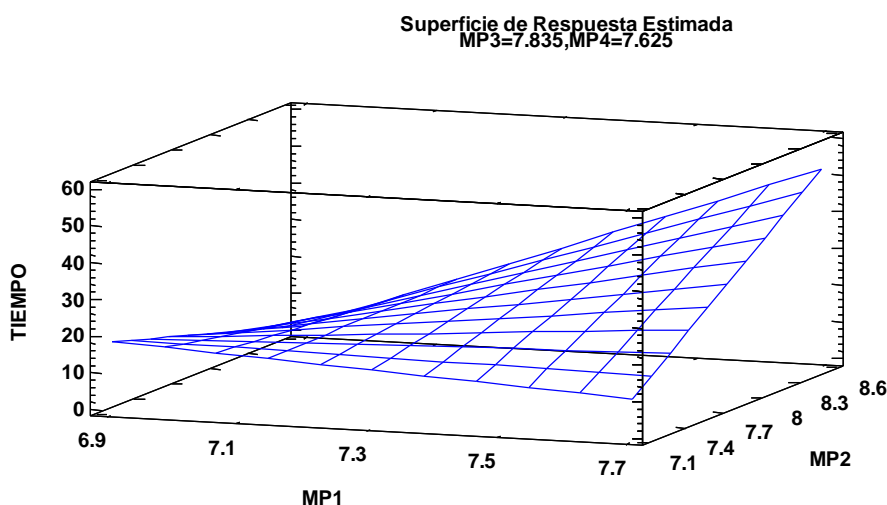


Figura 38: Superficie de respuesta estimada

FUENTE: Software STATGRAPHICS Centurion XVI Versión 16.2.04

En la Figura 38, se observa la superficie de respuesta estimada del pH de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 en equilibrio con respecto al Tiempo del proceso de digestión anaerobia termofílica.

V. CONCLUSIONES

- Las características fisicoquímicas de los biosólidos estabilizados obtenidos por el proceso de digestión anaerobia termofílica de los lodos provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas de la ciudad de Puno, presentó en las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 de biosólidos estabilizados obtenidos una conductividad entre 1378 mmhos/cm a 2009 mmhos/cm encontrándose dentro de los límites para ser usado en cultivos, un contenido de MO rico entre 31,95 % a 32,95 % que lo hace interesante en su aplicación al suelo como enmienda orgánica y poder sustentar cualquier tipo de vegetación y un contenido de nutrientes NPK entre 6,1 % a 6,7% de N, 2443 mg/kg a 10194 mg/kg o 1,37 % a 3,17 % de P y 893 mg/kg a 1511 mg/kg o 2,71 % a 3,11 % de K , que si bien no es alto su contenido como un fertilizante comercial se podrá mezclar con otras mezclas de tierras para no tener ningún grado de limitación y pueda ser sustentable para su aplicación en la agricultura; y por el lado del contenido parasitológico y microbiológico en el contenido de coliformes totales presento valores $<3/100$ NMP/g, en el contenido de salmonella *spp.* y huevos de helmintos presento ausencia de estos, por lo que se redujo de manera parcial y total la cantidad de estos y en el contenido de metales pesados tales como As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Mo, Ni, Se y Zn presentaron una reducción de estos después del proceso anaerobio termofílico registrándose valores por debajo de los límites máximos permisibles de las normas, por lo que estos valores obtenidos cumplen la Norma EPA 40 CRF part 503 y la Norma Peruana con D.S.015-2017-VIVIENDA clasificándolo como biosólidos de Clase A que es un lodo sin restricciones sanitarias para la aplicación del suelo y no presentan un riesgo para la salud pública, dejando de ser un material peligroso por sus características fisicoquímicas, parasitológicas y microbiológicas; se podrá usar para restaurar ecosistemas contaminados por lodos residuales, y ser usado como abono natural, uso en la actividad pecuaria, agrícola y en el uso de áreas verdes; los biosólidos estabilizados obtenidos el cual se obtuvieron con las condiciones ambientales de: altitud de 3811 m.s.n.m, presión barométrica de 488,1 mmHg y en las estaciones de Otoño-Invierno, usando una incubadora y biodigestores como reactores para

la biodegradación de patógenos y microorganismos, además se usó controladores de temperatura y pH para determinar la evolución del proceso.

- El efecto de la temperatura en la digestión anaerobia termofílica en días para la obtención de biosólido estabilizado fue un parámetro muy importante en la variación y disminución de patógenos y microorganismos en donde por el tiempo de 33 días de exposición y a una temperatura termofílica entre 41°C a 65°C, siendo el promedio de temperatura de las muestras MP1, MP2, MP3 y MP4 de 48,87°C, 49,54°C, 48,09°C y 48,59°C, los valores mínimos de 14,0°C, 14,33°C, 14,0°C y 13,9°C (valores in situ) y los valores máximos de 59,5°C, 65,4°C, 59,63°C y 64,43°C respectivamente, se obtuvo una eliminación parcial y total de estos, por lo que la temperatura fue indirectamente proporcional con el tiempo y la temperatura también fue indirectamente proporcional en la eliminación e inactivación de patógenos y microorganismos como los coliformes fecales, la salmonella spp. y los huevos de helmintos.
- El comportamiento del pH del lodo en relación al tiempo de la digestión anaerobia termofílica, fue un parámetro importante en la determinación de la acidez y la alcalinidad del proceso para la obtención del biosólido estabilizado, el pH fue un factor para desarrollar el crecimiento microbiano y transformar la materia orgánica en otros productos como gases, a medida que se prolongó el tiempo por 33 días se observó la variación del pH en las muestras de MP1, MP2, MP3 y MP4 desde 6,95, 7,12, 6,84, 6,90 hasta 7,69, 8,40, 8,43, 8,35 respectivamente con tendencia alcalina y curva ascendente, y el segundo determinó el medio de acción y ataque para la inactivación y eliminación parcial y total de los patógenos y microorganismos con respecto al tiempo de prolongación, el pH fue directamente proporcional con el tiempo e indirectamente proporcional con el contenido parasitológico y microbiológico del biosólido estabilizado obtenido.

VI. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo estudios de estabilización anaerobia termofílica a nivel planta piloto con reactores anaerobios y diferentes sistemas.
- Aplicar los biosólidos estabilizados obtenidos en suelos con problemas de acidificación, alcalinidad, salinidad y bajas concentraciones de nutrientes, y realizar estudios de aplicabilidad de diferentes especies de cultivo.
- Comparar los resultados de las características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas del biosólidos estabilizados obtenidos a partir del proceso anaerobio termofílico con otras alternativas de tratamiento de lodos para determinar la mejor opción de tratamiento.
- Realizar pruebas de estabilización con el proceso anaerobio termofílico con diferentes concentraciones de sólidos totales y determinar el efecto que tiene la humedad en el proceso.
- Realizar pruebas de medición de biogás generado con sensores adecuados para la proceso anaerobio termofílico y determinar el porcentaje de biogás generado en el proceso.
- Fomentar más proyectos ambientales de remediación y control de subproductos tóxicos obtenidos del tratamiento de aguas residuales de la laguna de estabilización secundaria de la ciudad de Puno.

VII. REFERENCIAS

- Acosta, Y., Zárraga, A., Rodríguez, L., & El Zauahre, M. (2012). Cambios en las propiedades fisicoquímicas en el proceso de compostaje de lodos residuales. *Multiciencias*, 12, 18–24.
- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). Tratamiento de lodos , generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46(15202), 1–10.
- Araque, M. (2006). *Evaluación de los tratamientos térmicos y alcalino en la desinfección del lodo Generado en la PTAR El Salitre*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Arévalo, P., & Lituma, P. (2010). Digestión de lodos residuales de las lagunas de oxidación de Ucubamba, Cuenca. *La Granja*, 11(1), 31. <https://doi.org/10.17163/lgr.n11.2010.04>
- AS 4454. Australian standard: composts, soil conditioners and mulches (2003). Australia.
- Atenodoro, J., Ruíz, J., Alvarado, A., Martínez, A., Martínez, S., & Méndez, J. (2015). The enhanced anaerobic degradability and kinetic parameters of pathogenic inactivation of wastewater sludge using pre-and post-thermal treatments part 2. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2), 311–319.
- Atlas, R. (1984). Sanitation and disease and health aspects of excreta and wastewater management. *Journal of the American Water Resources Association*, 20(5), 803–803. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1984.tb04765.x>
- Borja, R., Martín, A., Durán, M., & Maestro, R. (1992). Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del alpechín en los intervalos mesofílico y termofílico de temperatura. *Grasas y Aceites*, 43(6), 341–346. <https://doi.org/10.3989/gya.1992.v43.i6.1130>
- Bowling, C., & Griffin, D. (2014). *USEPA / USGS Sample Collection Protocol for Bacterial Pathogens in Surface Soil*. EPA-USGS.

- Braguglia, C., Gianico, A., Gallipoli, A., & Mininni, G. (2015). The impact of sludge pre-treatments on mesophilic and thermophilic anaerobic digestion efficiency: Role of the organic load. *Chemical Engineering Journal*, 362–371.
- Caceres, W. (2016). Laguna de oxidación Puno. Puno: Scribb.
- Cacho, J., & Suidan, M. T. (2006). Effect of H₂O₂ dose on the thermo-oxidative co-treatment with anaerobic digestion of excess municipal sludge. *Water Science and Technology*, 54(2), 253–259. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.513>
- Camacho, R., Villada, H., & Hoyos, J. (2017). Evaluación del estiércol de vaca como inóculo en la digestión anaerobia termófila de residuos sólidos urbanos. *Información Tecnológica*, 28(3), 29–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300004>
- Campos, A. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Monografías de actualidad*. Universitat de Lleida.
- Cardoso, L., Ramírez, E., Escalante, V., & Moeller, G. (2000). Manejo De Lodos Residuales En México. *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental I-163*, (1), 1–7.
- Castrejón, A., Barrios, J. A., Jiménez, B., Maya, A., Rodríguez, A., & González, A. (2000). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. *Instituto de Ingeniería.*, 1–14.
- Castro, C., Henríquez, O., & Freres, R. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Revista de Geografía Norte Grande*, 37(37), 35–45. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022007000100003>
- Cervantes, A., Cruz, M., Aguilar, R., Castilla, P., & Meraz, M. (2011). Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua tratada en un reactor UASB escala piloto. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 67–77. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim>

- Chen, B., Christie, P., & Li, X. (2000). A modified glass bead compartment cultivation system for studies on nutrient and trace metal uptake by arbuscular mycorrhiza. *Chemosphere*, 42(2), 185–192. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00124-7)
- CONAMA. Resolução CONAMA 375/2006, Diário Oficial da União § (2006). Brasil. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Dáguer, G. (2003). Gestión de biosólidos en Colombia. *46° Congreso Internacional de ACODAL Sociedad, Ambiente y Futuro*. Bogotá, Colombia.
- Decreto N° 1287/14. Decreto N° 1287/14, 10-Julio-2014 § (2014). Colombia.
- Decreto N°4/2009 - CONAMA. Reglamento para el manejo de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile § (2009). Santiago, Chile.
- DS N° 015-2017-VIVIENDA. Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Diario El Peruano § (2017). Perú.
- Duncan, D., Harvey, F., & Walker, M. (2007). *EPA Guidelines: Regulatory monitoring and testing. Water and wastewater sampling. Environment Protection Authority Journal* (Vol. 3).
- Elika. (2013a). *Escherichia coli*. Retrieved from http://www.elika.eus/datos/pdfs_agrupados/Documento84/3.Ecoli.pdf
- Elika. (2013b). *Salmonella*. Retrieved from http://www.elika.eus/datos/pdfs_agrupados/Documento82/1.Salmonella.pdf
- EPA/832-B-93-005. (1995). *A guide to the biosolids Risk Assessments for the EPA part 503 Rule*. Washington, DC, U.S.: Office of Wastewater Management.
- EPA. (1989a). *POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document*. Washington, DC, U.S.: Office Of Water.
- EPA. (1989b). *Sampling Procedures and Protocols for the National Sewage Sludge Survey-EPA*. Washington D.C, U.S.

- EPA 40 CRF Part 503. Standars for the use or disposal of sewage sludge (2003). United States. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040271-0.50006-X>
- EPA 625/10-84-003. (1984). *Use and disposal of municipal wastewater sludge*. Wasington DC, U.S.: Intra-Agency Sludge Task Force.
- Escobar, S., Sánchez, L., Nájera, H., Gutiérrez, J., & Rojas, N. (2014). Destrucción de huevos de helminto mediante procesos no convencionales. *Ciencia y Desarrollo, 1*, 35–68.
- Florez, R. (2014). Analisis del problema del agua potable y saneamiento: Ciudad de Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas, 16*(01), 5–8.
- Fontana, F. (1999). Fermentación anaeróbica de desechos orgánicos en el altiplano. *UNESCO*.
- Gálvez, S. (2014). *Efectos de de la aplicación d elos lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales sobre el suelo*. Universidad Nacional Agraria de la Molina.
- Galvis, J., & Rivera, X. (2013). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planata de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos Hit de la ciudad de PereirA*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- González. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de Edar*. Universidad de Córdoba.
- González, A., Rodríguez, A., Barrios, J., Maya, C., & Jiménez, B. (2002). Evaluación el tratamiento de lodo fisicoquímico con ácido acético y peracético para producir biosólidos. *Tratamiento y Reúso, 1*(1), 70–77.
- Gudmundur, J. (1999). *Sewage sludge characterization and evaluation of P availability under greenhouse conditions*. The University of Guelph.
- Hernandez, A. (1992). *Depuración de aguas residuales*. (Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Ed.) (1° Edición). Madrid, España: Garceta.

- LLamas, M. (2015). *Estudio del efecto del rango de temperatura sobre la producción de bio- hidrógeno por digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos*. Universidad de Cádiz.
- Lloret, E., Pastor, L., Pradas, P., & Pascual, J. (2013). Semi full-scale thermophilic anaerobic digestion (TAnD) for advanced treatment of sewage sludge: Stabilization process and pathogen reduction. *Chemical Engineering Journal*, 232, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.062>
- López, L. (2009). *Tratamiento ácido y alcalino para la inactivación de huevos de helmintos presentes en lodos fisicoquímicos de origen agriondustrial*. Universidad Veracruzana.
- Lucho, C., Álvarez, M., Beltrán, R., Prieto, F., & Poggi, H. (2005). A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environment International*, 31(3), 313–323.
- Melo, A., Rodríguez, A., & González, J. (2017). Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo , caso Colombia y Uruguay. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 217–226.
- Méndez, J. M., Rendón, J. A., Ruiz, J. E., Alvarado, A., & Martinez, S. A. (2009). Behaviour of the mesophilic and thermophilic anaerobic digestion in the stabilization of municipal wastewater sludge. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(3), 283–290.
- Ministerio del Ambiente. (2014). Guía para el muestreo de suelos D.S N° 002-2013-MINAM.
- Montes, M. (2008). *Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás*.
- Morales, P. (2005). *Digestión Anaerobia de Lodos de pLantas de Tratamiento de Aguas su Aprovechamiento*. Universidad de las Américas Puebla.

- Mosquera, J., & Martínez, B. (2012). Evaluación de la digestión anaerobia como alternativa de estabilización de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Trabajo de Grado Tecnología Química, 104.
- Negrín, A., & Jiménez, Y. (2012). Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L). *Cultivos Tropicales*, 33(2), 13–19.
- OEFA. (2014, August). Fiscalización ambiental en aguas residuales. *Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental*, 42.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales : estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1, 51–58.
- Parra, B., Marmolejo, L., Cárdenas, L., & Torres, W. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista U.D.C.A*, 17(2), 553–562.
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica : mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159.
- Peces, M., Astals, S., & Mata, J. (2013). Response of a sewage sludge mesophilic anaerobic digester to short and long-term thermophilic temperature fluctuations. *Chemical Engineering Journal*, 233, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.088>
- Peña, P. (2012). *Alternativas de revalorización de lodos residuales provenientes de planta de lodos activados Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Constitución*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Pérez, R. (2011). *Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana*. Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca,” Pinar del Río, Cuba.

- PROSAB. (1999). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. (PROSAB, Ed.) (1º). Rio de Janeiro, Brasil: ABES-RJ.
- Resolución N° 97/01. (2001). Reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos. *Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente*, pp. 1–2.
- Rincón, N., Araujo, I., Díaz, A., & Mata, J. (2010). Estabilización anaerobia mesofílica y termofílica de lodos activados provenientes de la cerveza. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(201), 5–21.
- RM N° 128-2017-VIVIENDA. Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final, Diario El Peruano § (2017). Perú.
- Rodríguez, J., Alcalá, J., Hernández, A., Rodríguez, H., Ruíz, F., García, J., & Díaz, P. (2014). Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional * Trace elements in fertilizers and manure used in organic and conventional agriculture Resumen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 695–701.
- Rojas, R., & Mendoza, L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Produccion + Limpia*, 7(2), 74–94.
- SEMARNAT. NOM-004-SEMARNAT-2002 (2005). Mexico.
- Shammas, N., & Wang, L. (2010). Land application and composting of biosolids. In *Biosolids Treatment Processes* (pp. 705–745). Totowa, NJ: Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59259-996-7_23
- SUNASS. (2008). *Diagnóstico Situacional de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en las EPS del Perú y Propuestas de Solucion*. Lima, Perú: RyF Publicaciones y Servicios S.A.C. Retrieved from www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro_ptar_gtz_sunass.pdf
- Torres, P., Madera, C., & Silva, J. (2009). Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista EIA*, 11, 21–37.

- Torres, P., Pérez, A., Escobar, J., Uribe, I., & Imery, R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*, 27(1), 267–275. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100021>
- Vigueras, S., Zafra, G., García, M., Martínez, M., & Pérez, J. (2013). Efecto del pretratamiento sobre la biodegradabilidad anaerobia y calidad microbiológica de lodos residuales secundarios. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 293–301. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim>
- Zoetemeyer, R., Matthijsen, A., Cohen, A., & Boelhouwer, C. (1982). Product inhibition in the acid forming stage of the anaerobic digestion process. *Water Research*, 16(5), 633–639. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90084-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90084-7)

ANEXOS

- ANEXO A : Equipos y materiales
- ANEXO B : Muestreo de las muestras experimentales en la Laguna de Estabilización Secundaria de la ciudad de Puno.
- ANEXO C : Preparación de la muestra para la experimentación.
- ANEXO D : Proceso de digestión anaerobia termofílica
- ANEXO E : Envío de muestras
- ANEXO F : Certificado de los resultados de análisis
- ANEXO G : Bases legales

ANEXO A
Equipos y materiales



A.1. Materiales para el muestreo.



A.2. Materiales de seguridad.



A.3. Materiales para el digestor.



A.4. Materiales para la experimentación.



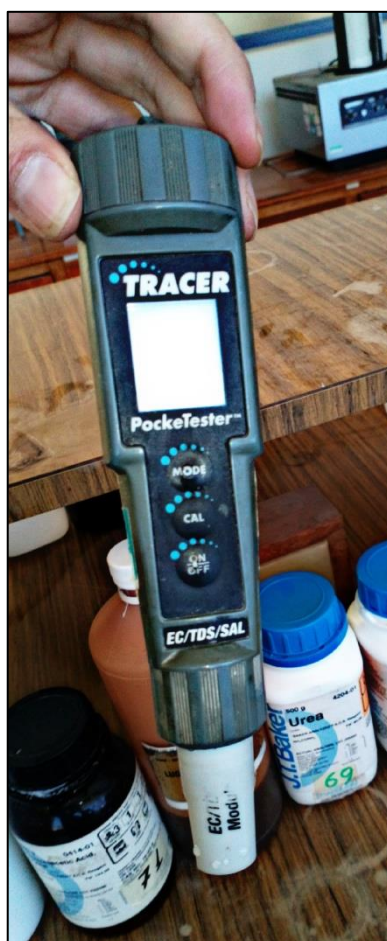
A.5. Termómetro de mercurio de escala -10°C a $+100^{\circ}\text{C}$



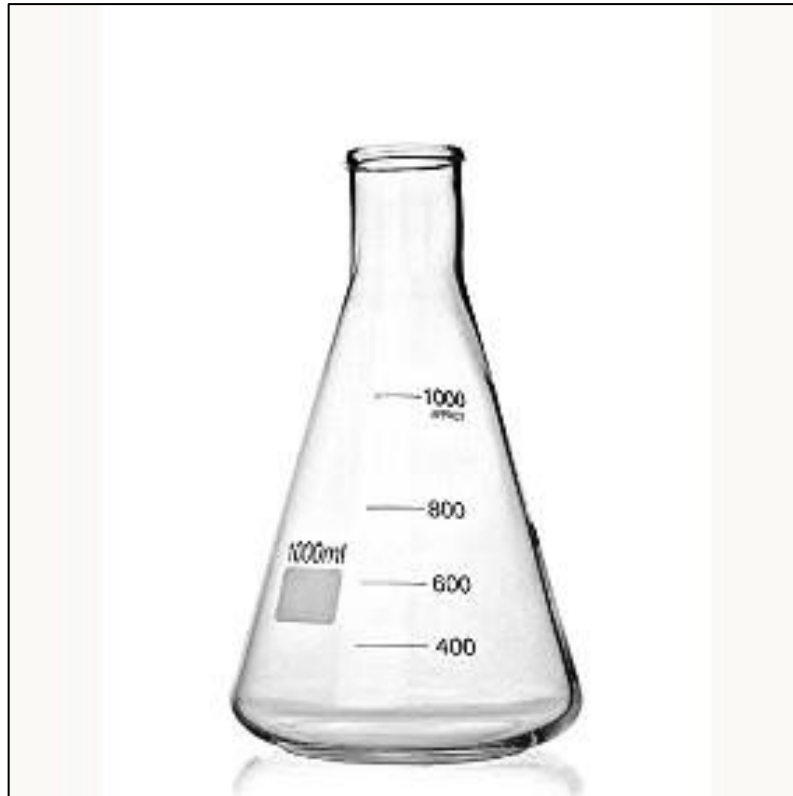
A.6. Termómetro digital JR-1



A.7. Termómetro infrarrojo GM550



A.8. Conductímetro TRACER 1749



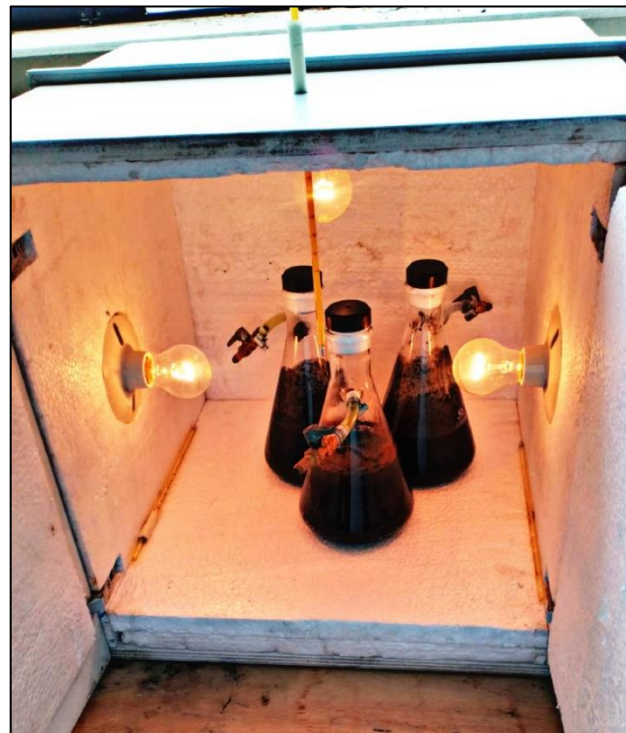
A.9. Matraz kitazato



A.10. Multiparámetro digital Sparck Science



A.11. Multiparámetro digital ORION VERSTAR PRO



A.12. Incubadora



A.13. GPS GARMIN



A.14. Cámara fotográfica SONY



A.15. Reactivos

ANEXO B**Muestreo de las muestras experimentales (lodos residuales) de la Laguna de Estabilización Secundaria de la ciudad de Puno**

B.1. Equipo de muestreo con implemento de seguridad y materiales de muestreo



B2. Desinfección de todos los materiales de la etapa de muestreo.



B.3. Muestreo correspondiente de las muestras experimentales y medición de profundidad.



B.4. Homogenización de la muestra experimental obtenida del punto de muestreo.



B.5. Muestras experimentales colocada en los envases de preservación.



B.6. Registro y mediciones de parámetros in-situ de las muestras experimentales.

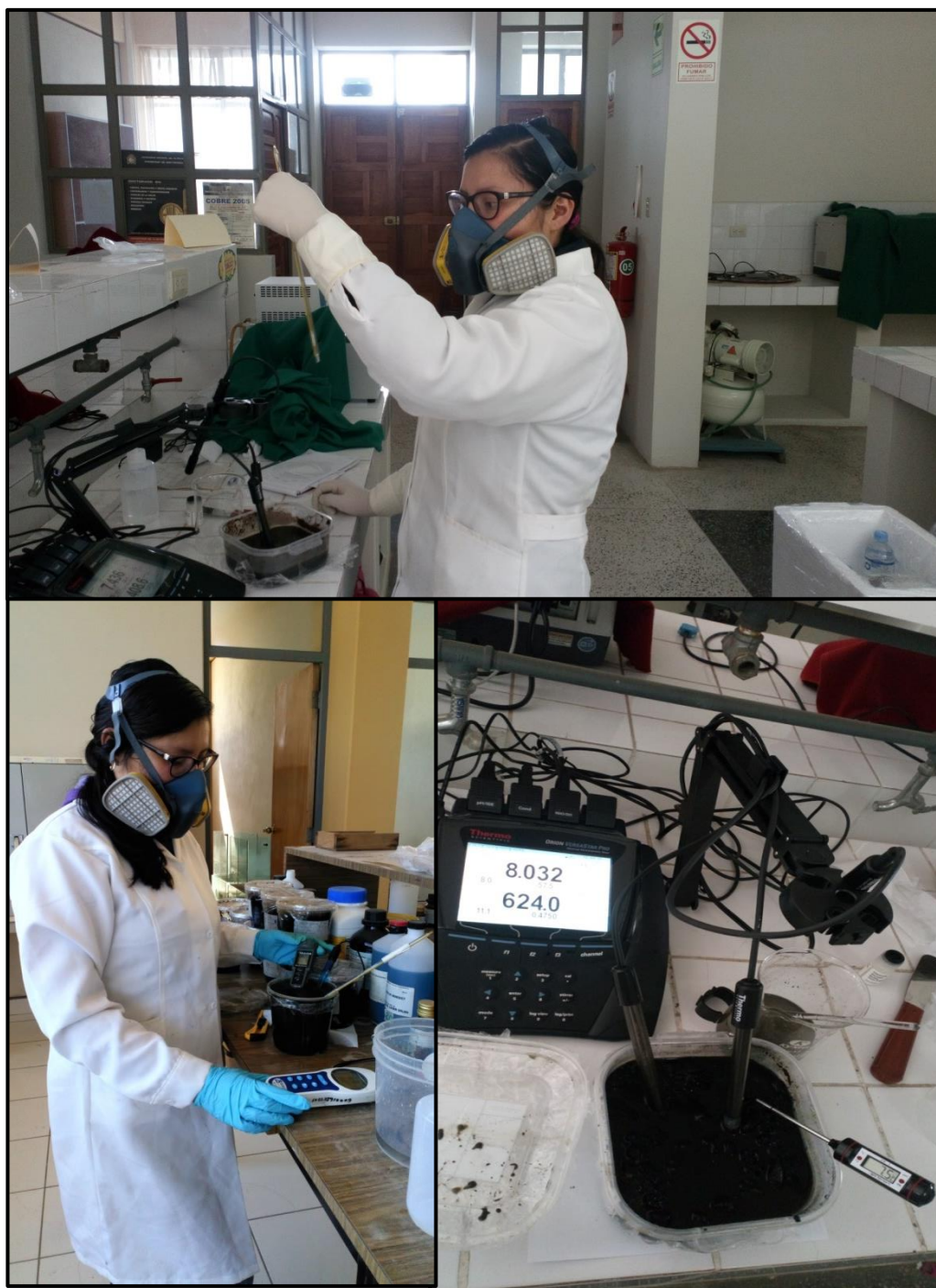


B.7. Cierre, embale y disposición final de las muestras experimentales en el cooler de preservación.



B.8. Traslado de un punto a otro de muestro de la “Laguna de Estabilización secundaria de aguas servidas de la ciudad de Puno”.

ANEXO C
Preparación de la muestra para la experimentación.



C.1. Medición de los parámetros de las muestras experimentales en el laboratorio

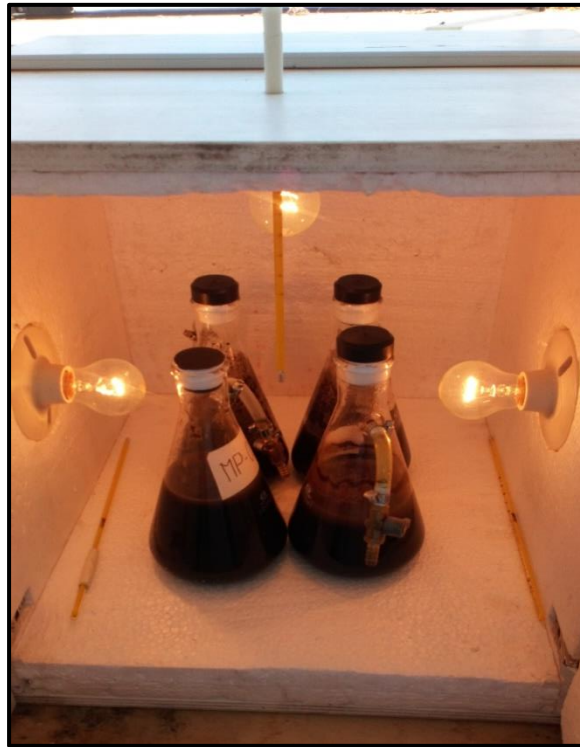


C.2. Preparación de la muestra dentro de los biodigestores.



C.3. Rotulado, etiquetado y sellado de los biodigestores listos para la experimentación.

ANEXO D
Proceso de digestión anaerobia termofílica



D.1. Proceso de digestión anaerobia termofílica en experimentación.

ANEXO E

Envío de muestras



E.1. Preparación de las muestras experimentales para análisis en diferentes laboratorios.

ANEXO F

Certificado de los resultados de análisis



MINISTERIO DE AGRICULTURA
 INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
 LABORATORIO DE ANALISIS
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
 ANEXO SALCEDO
 Ofic. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS

SOLICITANTE : Sarid Valeri Noriega Beltran.
 DIRECCIÓN :
 PROCEDENCIA : Puno.
 PRODUCTO : Lodos Residuales de Aguas Servidas.
 CANTIDAD :
 MUESTRA : Laguna de Estabilización Secundaria de Aguas Residuales de la Ciudad de Puno (Laguna de Espinar).
 TIPO DE ANÁLISIS : Análisis de NPKyMO.
 N° DE ANÁLISIS : 04.
 FECHA DE RECEPCIÓN : 19 de Septiembre del 2017
 FECHA DE CERTIFICACIÓN : 20 de Octubre del 2017

DETERMINACIONES QUÍMICAS:

Determinaciones	MP-3 Laguna de oxidación puno MP3 (2)	MP-4 Laguna de oxidación Puno MP4(3)	MP-1 Laguna de oxidación Puno MP1 (3)	MP-2 Laguna de oxidación Puno MP2 (2)
Nitrógeno %	5,30	6,30	6,22	6,00
Fósforo %	1,73	1,57	1,55	1,48
Potasio %	3,28	4,11	3,99	3,65
MO %	21,44	23,50	22,13	23,06
C.E mmhos/cm 25°C	3,023	3,060	3,033	2,098
pH	6,78	6,90	6,98	6,92

Referencias:

Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpression, Octubre 1988. 195p.
 Nitrógeno: Método semimicrokjeldahl (Digestión con ácido sulfúrico).
 Fósforo: Método del Metavanadato de amonio (Espectrofotómetro digital 21)
 Potasio: Ataque con ácido sulfúrico (Fotómetro de flama)
 pH : Potenciómetro.
 CE: Conductímetro de 02 anillos.

Conclusiones:

La muestra analizada de Lodos Residuales CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales, utilizados en el análisis.

Nota: Ninguna.

Validez del Certificado:

El presente Certificado es válido, si permanece en el papel original. El documento en su papel original tendrá validez por el periodo de noventa (90) días calendario a partir de la fecha de emisión. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).



INIA
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
 Ing° JORGE QANHUA ROJAS
 Jefe Laboratorio Análisis
 SALCEDO

Los resultados son aplicables a esta muestra.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
 Puno. Puno. Perú
 T. (051) 362-212 RPM #090829

F.1. Certificado de análisis de nutrientes de los lodos residuales



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
LABORATORIO DE ECOLOGÍA ACUÁTICA



ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO

MUESTRA : Lodos de aguas residuales
PROCEDENCIA : Laguna de estabilización secundaria Chanu Chanu Puno
INTERESADO : Sarid Valeri Noriega Beltrán
MOTIVO : Tesis: “Tratamiento de lodos por el método de digestión anaerobia termofílica para la obtención de biosólidos estabilizados provenientes de la laguna de estabilización secundaria de aguas servidas-Puno”.
MUESTREO : 19 de septiembre del 2017
ANÁLISIS : 19 de septiembre del 2017

RESULTADOS

MUESTRA	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	Coliformes fecales	Salmonella sp	Huevos de Helminos
MP 01	1800	400	8
MP 02	1700	600	5
MP 03	1300	500	0
MP 04	1500	600	0

Método: Método propuesto por la Organización Internacional de Químicos Asociados
 Coliformes fecales NMP
 Salmonella sp NMP/g
 Huevos de helmintos HH/g

Observación: La muestra se recepcionó en el Laboratorio de Microbiología.-----

Puno, 25 de septiembre del 2017

F.2. Certificado de análisis bacteriológico de los lodos residuales.

INFORME DE ENSAYO N° 173282 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
 Dirección : Av. El Ejercito N° 329
 Solicitado Por : Srta. Sarid Valeri Noriega Beltrán
 Referencia : Cotización N° 09075-17R02
 Proyecto : Determinación de la Calidad de Lodos Residuales de la Laguna de Estabilización Secundaria Puno - Ilave
 Procedencia : Laguna de Estabilización Secundaria Puno-Ilave
 Muestreo Realizado Por : El cliente
 Cantidad de Muestra : 5
 Producto : Lodo
 Fecha de Recepción : 2017/10/02
 Fecha de Ensayo : 2017/10/02 al 2017/10/16
 Fecha de Emisión : 2017/10/16

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio		173282-01	173282-02	173282-03	173282-04	173282-05		
Código de Cliente		MP-01	MP-02	MP-03	MP-04	MI-01		
Fecha de Muestreo		26/09/2017	26/09/2017	26/09/2017	26/09/2017	26/09/2017		
Hora de Muestreo (h)		06:40	06:40	06:40	06:40	06:46		
Ubicación Geográfica (WGS 84)		E 0392673 N 8246702	E 0392592 N 8246953	E 0392786 N 8246916	E 0392637 N 8247038	E 0433190 N 8222800		
Tipo de Producto		Lodos	Lodos	Lodos	Lodos	Lodos		
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados					
Metales (ICP-AES) (Peso Seco)								
Ag	Plata	mg/Kg PS	0,14	<0,14	<0,14	<0,14	<0,14	
Al	Aluminio	mg/Kg PS	0,77	10548	13329	11504	12548	10126
As	Arsénico	mg/Kg PS	0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
B	Boro	mg/Kg PS	0,12	<0,12	<0,12	<0,12	<0,12	<0,12
Ba	Bario	mg/Kg PS	0,04	235,1	311,4	174,5	112,9	129,7
Be	Berilio	mg/Kg PS	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Ca	Calcio	mg/Kg PS	0,35	94932	43038	84527	38092	40846
Cd	Cadmio	mg/Kg PS	0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016
Ce	Cerio	mg/Kg PS	0,96	<0,96	<0,96	<0,96	<0,96	<0,96
Co	Cobalto	mg/Kg PS	0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
Cr	Cromo	mg/Kg PS	0,23	11,72	14,28	20,56	18,04	13,14
Cu	Cobre	mg/Kg PS	0,05	48,89	102,0	65,29	38,94	45,78
Fe	Hierro	mg/Kg PS	0,52	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000
K	Potasio	mg/Kg PS	4,63	1678	1894	1439	1206	1614
Li	Litio	mg/Kg PS	0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Mg	Magnesio	mg/Kg PS	1,07	10915	10367	13426	19529	12906
Mn	Manganeso	mg/Kg PS	0,04	1181	1440	783,9	219,7	272,7
Mo	Molibdeno	mg/Kg PS	0,18	<0,18	<0,18	<0,18	<0,18	<0,18
Na	Sodio	mg/Kg PS	0,74	889,4	1017	1339	991,8	603,2
Ni	Niquel	mg/Kg PS	0,15	9,06	11,33	12,48	12,48	10,52
P	Fósforo	mg/Kg PS	2,37	4200	7321	4755	1777	1955
Pb	Plomo	mg/Kg PS	0,13	35,36	45,04	24,80	12,84	9,51
Sb	Antimonio	mg/Kg PS	0,42	<0,42	<0,42	<0,42	<0,42	<0,42
Se	Selenio	mg/Kg PS	0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Si	Silicio	mg/Kg PS	0,51	273,1	287,9	286,4	241,2	250,8
Sn	Estaño	mg/Kg PS	0,26	<0,26	<0,26	<0,26	<0,26	<0,26
Sr	Estroncio	mg/Kg PS	0,02	>100	>100	>100	>100	82,00
Ti	Titanio	mg/Kg PS	0,21	265,6	372,9	213,0	200,6	205,9
Tl	Talio	mg/Kg PS	0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
V	Vanadio	mg/Kg PS	0,05	34,84	54,62	34,26	46,56	28,32
Zn	Zinc	mg/Kg PS	0,09	223,5	481,8	268,6	143,3	238,9

Legenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método. L.D.M. = Límite de detección del método. "<" = Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado. ">" = Mayor al rango de trabajo. "-" = No Analizado.

**INFORME DE ENSAYO N° 173282
CON VALOR OFICIAL**

Código de Laboratorio	173282-01	173282-02	173282-03	173282-04	173282-05
Código de Cliente	MP-01	MP-02	MP-03	MP-04	MI-01
Fecha de Muestreo	26/09/2017	26/09/2017	26/09/2017	26/09/2017	26/09/2017
Hora de Muestreo (h)	06:40	06:40	06:40	06:40	06:46
Ubicación Geográfica (WGS 84)	E 0392673 N 8246702	E 0392592 N 8246953	E 0392786 N 8246916	E 0392637 N 8247038	E 0433190 N 8222800
Tipo de Producto	Lodos	Lodos	Lodos	Lodos	Lodos

Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados					
Metales (CVAA - FIMS) (Peso Seco)								
Hg Mercurio	mg/Kg PS	1,00	1,65	1,18	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00

Leyenda: L.C.M. = Limite de cuantificación del método. L.D.M. = Limite de detección del método. "<"= Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado. ">" = Mayor al rango de trabajo. "-" = No Analizado.

II - Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Metales (ICP-AES)		
Metales (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, V and Zn)	EPA Method 200.7; Rev. 4.4., 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry ICP-AES.
Metales (CVAA - FIMS)		
Mercurio	EPA Method 7471B; Rev.2, Feb. 2007	Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique)

SIGLAS: *EPA*: U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.

Alfonso Vilca M.
GCSSA
C.Q.P. N° 587

Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente.
Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto.
El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio.
El tiempo de perecibilidad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra.
Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Envirotest S.A.C.

** FIN DEL INFORME **



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA



ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO

MUESTRA : Lodos de aguas residuales
 PROCEDENCIA : Laguna de estabilización secundaria Cahnu Chanu Puno
 INTERESADO : Sarid Váleri Noriega Beltrán
 MOTIVO : Tesis “Obtención de biosólido estabilizado a partir de lodos de la laguna de estabilización secundaria Puno”
 MUESTREO : 06 de noviembre del 2017
 ANÁLISIS : 06 de noviembre del 2017

RESULTADOS

Muestra	Coliformes fecales	<i>Salmonella sp</i>	Huevos de helmintos
1	<3 NMP/100 g	Negativo	Negativo
2	<3 NMP/100 g	Negativo	Negativo
3	<3 NMP/100 g	Negativo	Negativo
4	<3 NMP/100 g	Negativo	Negativo

Método: NMP fermentación en caldo lactosado, cultivo en EMB y Mac Conkey
Salmonella sp NMP/g
 Huevos de helmintos HH/g

Observación.- Las muestras fueron recepcionadas en el laboratorio.

Puno, 10 de noviembre del 2017.



Dr. Mg. MVZ Alberto Ccama Sullca
 Jefe del laboratorio de Microbiología FMVZ



MINISTERIO DE AGRICULTURA
 INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
 LABORATORIO DE ANALISIS
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
 ANEXO SALCEDO
 Ofic. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS

SOLICITANTE : Sarid Valeri Noriega Beltran.
 DIRECCIÓN :
 PROCEDENCIA : Puno.
 PRODUCTO : Lodos secos residuales de Aguas Servidas con tratamiento de digestión anaerobia termofílica.
 CANTIDAD :
 MUESTRA : Laguna de estabilización Secundaria de Aguas Residuales de la Ciudad de Puno (Laguna de Espinar)
 TIPO DE ANÁLISIS : Análisis de NPK y MO.
 N° DE ANÁLISIS : 04.
 FECHA DE RECEPCIÓN : 30 de Octubre del 2017
 FECHA DE CERTIFICACIÓN : 31 de Octubre del 2017

DETERMINACIONES QUÍMICAS

Determinaciones	MP-01	MP-02	MP-03	MP-04
Nitrógeno %	6,5	6,3	6,1	6,7
Fósforo %	1,37	3,17	3,13	1,96
Potasio %	3,11	2,91	2,71	3,04
MO %	32,87	32,65	31,95	32,95
C.E mmhos/cm 25°C	1992	1378	1985	2009
pH	7,69	8,40	8,43	8,35

Referencias

Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, División of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, Octubre 1988.195p.
 Nitrógeno: Método semimicrokjeldahl (Digestión con ácido sulfúrico).
 Fósforo: Método de Metavanadato de amonio (Espectrofotómetro digital 21)
 Potasio: Ataque con ácido sulfúrico (Fotómetro de flama)
 pH: Potenciómetro.
 CE: Conductímetro de 02 anillos.

Conclusiones:

La muestra analizada de Lodos secos residuales de Aguas Servidas con tratamiento de digestión anaerobia termofílica CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales, utilizados en el análisis.

Nota: Ninguna.

Validez del Certificado:

El presente Certificado es válido, si permanece en el papel original. El documento en su papel original tendrá valides por el periodo de noventa (90) días calendarios a partir de la fecha de emisión. (El informe sólo afecta a la muestra de ensayo sometida).



INIA
 ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
 Ing° JORGE QANHUA ROJAS
 Jefe Laboratorio Análisis
 SALCEDO

Los resultados son aplicables a esta muestra

www.inia.gob.pe

Riconada de Salcedo s/n
 Puno.Puno. Perú
 T: (051)363-812 RPM #090829

F.5. Certificado de análisis de nutrientes de biosólidos estabilizados obtenidos.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-056



Registro N° LE-056

INFORME DE ENSAYO N° 173857 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO
 Dirección : Av. El Ejercito N° 329
 Solicitado Por : Sarid Noriega Beltrán
 Referencia : Cotización MAT N° 10154-17
 Proyecto : Determinación de la Calidad de Lodos Residuales de la Laguna de Estabilización Secundaria de Puno
 Procedencia : Puno
 Muestreo Realizado Por : El cliente
 Cantidad de Muestra : 4
 Producto : Lodo
 Fecha de Recepción : 2017/11/13
 Fecha de Ensayo : 2017/11/13 al 2017/11/24
 Fecha de Emisión : 2017/11/24

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	173857-01	173857-02	173857-03	173857-04
Código de Cliente	MP-01	MP-02	MP-03	MP-04
Fecha de Muestreo	07/11/2017	07/11/2017	07/11/2017	07/11/2017
Hora de Muestreo (h)	10:28	10:28	10:28	10:28
Ubicación Geográfica (WGS 84)	N 8246702 E 0392673	N 8246953 E 0352582	N 8246916 E 0392786	N 8247038 E 0392637
Tipo de Producto	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo

Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados			
Metales (ICP-AES) (Peso Seco)						
Ag Plata	mg/Kg PS	0,14	<0,14	<0,14	<0,14	<0,14
Al Aluminio	mg/Kg PS	0,77	10106	10987	13318	11279
As Arsénico	mg/Kg PS	0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
B Boro	mg/Kg PS	0,12	<0,12	<0,12	<0,12	<0,12
Ba Bario	mg/Kg PS	0,04	213,8	291,7	114,3	82,21
Be Berilio	mg/Kg PS	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Ca Calcio	mg/Kg PS	0,35	85009	38520	65395	36939
Cd Cadmio	mg/Kg PS	0,016	<0,016	<0,016	<0,016	<0,016
Ce Cerio	mg/Kg PS	0,96	<0,96	<0,96	<0,96	<0,96
Co Cobalto	mg/Kg PS	0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
Cr Cromo	mg/Kg PS	0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Cu Cobre	mg/Kg PS	0,05	52,69	110,51	63,87	36,66
Fe Hierro	mg/Kg PS	0,52	>10000	>10000	>10000	>10000
K Potasio	mg/Kg PS	4,63	1308	1511	1191	893
Li Litio	mg/Kg PS	0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Mg Magnesio	mg/Kg PS	1,07	11254	8876	17958	16350
Mn Manganeso	mg/Kg PS	0,04	976,5	1158	469,7	264,3
Mo Molibdeno	mg/Kg PS	0,18	<0,18	<0,18	<0,18	<0,18
Na Sodio	mg/Kg PS	0,74	853,7	1026	934,7	781,2
Ni Níquel	mg/Kg PS	0,15	0,76	0,88	1,38	0,85
P Fósforo	mg/Kg PS	2,37	6452	10194	3211	2443
Pb Plomo	mg/Kg PS	0,13	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13
Sb Antimonio	mg/Kg PS	0,42	<0,42	<0,42	<0,42	<0,42
Se Selenio	mg/Kg PS	0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Si Silicio	mg/Kg PS	0,51	234,9	271,4	135,2	210,8
Sn Estaño	mg/Kg PS	0,26	<0,26	<0,26	<0,26	<0,26
Sr Estroncio	mg/Kg PS	0,02	>100	>100	>100	>100
Ti Titanio	mg/Kg PS	0,21	251,4	313,6	280,8	162,5
Tl Talio	mg/Kg PS	0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
V Vanadio	mg/Kg PS	0,05	34,16	46,95	41,74	37,89
Zn Zinc	mg/Kg PS	0,09	261,0	535,5	207,8	135,1

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método. L.D.M. = Límite de detección del método. "<"= Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado. ">" = Mayor al rango de trabajo. "-" = No Analizado.

⁴⁰=Resolución cuantificable ⁶⁰ = Límite de Detección del Método.

FQ-LAB-54
F.E.: Oct 09
F.R.: 7/Abr 16

Calle B Mz C lote 40 Urb. Panamericana - Lima 31 - Perú, Central Telefónica (511) 522-3758 / 523-1828

info@envirotest.com.pe / www.envirotest.com.pe

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO N° 173857 CON VALOR OFICIAL

Código de Laboratorio	173857-01	173857-02	173857-03	173857-04
Código de Cliente	MP-01	MP-02	MP-03	MP-04
Fecha de Muestreo	07/11/2017	07/11/2017	07/11/2017	07/11/2017
Hora de Muestreo (h)	10:28	10:28	10:28	10:28
Ubicación Geográfica (WGS 84)	N 8246702 E 0392673	N 8246953 E 0352592	N 8246916 E 0392786	N 8247038 E 0392637
Tipo de Producto	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo

Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados			
Metales (CVAA - FIMS) (Peso Seco)						
Hg Mercurio	mg/Kg PS	1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "<" = Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango de trabajo, "-" = No Analizado.
 *Resolución cuantificable, *Límite de Detección del Método

II - Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Metales (ICP-AES)		
Metales (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, V and Zn)	EPA Method 200.7; Rev. 4.4., 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry ICP-AES.
Metales (CVAA - FIMS)		
Mercurio	EPA Method 7471B; Rev.2, Feb. 2007	Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique)

SIGLAS: *EPA*: U.S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemical Analysis.

Alfonso Vilca M.
GCSSA
C.Q.P. N° 587

Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente.
 Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto.
 El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio.
 El tiempo de perecibilidad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra.
 Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Envirotest S.A.C.

** FIN DEL INFORME **

ANEXO G
Bases legales

biosolids must also be met. In addition, there are general requirements, management practices, and frequency of monitoring, recordkeeping, and reporting requirements that must be met. Each of these land application requirements is discussed below.

Pollutant Limits, Pathogen and Vector Attraction Reduction Requirements

All biosolids applied to the land must meet *the ceiling concentrations for pollutants*, listed in the first column of Table 2-1. The ceiling concentrations are the maximum concentration limits for 10 heavy metal

TABLE 2-1
Pollutant Limits

Pollutant	Ceiling Concentration Limits for All Biosolids Applied to Land (milligrams per kilogram) ^a	Pollutant Concentration Limits for EQ and PC Biosolids (milligrams per kilogram) ^a	Cumulative Pollutant Loading Rate Limits for CPLR Biosolids (kilograms per hectare)	Annual Pollutant Loading Rate Limits for APLR Biosolids (kilograms per hectare per 365-day period)
Arsenic	75	41	41	2.0
Cadmium	85	39	39	1.9
Chromium	3,000	1,200	3,000	150
Copper	4,300	1,500	1,500	75
Lead	840	300	300	15
Mercury	57	17	17	0.85
Molybdenum ^b	75	—	—	—
Nickel	420	420	420	21
Selenium	100	36	100	5.0
Zinc	7,500	2,800	2,800	140
Applies to:	All biosolids that are land applied	Bulk biosolids and bagged biosolids ^c	Bulk biosolids	Bagged biosolids ^c
From Part 503	Table 1, Section 503.13	Table 3, Section 503.13	Table 2, Section 503.13	Table 4, Section 503.13

^a Dry-weight basis

^b As a result of the February 25, 1994, Amendment to the rule, the limits for molybdenum were deleted from the Part 503 rule pending EPA reconsideration.

^c Bagged biosolids are sold or given away in a bag or other container.

G.1. Norma 40 CFR Part 503 de la USEPA.

condiciones establecidas en el presente Reglamento para cada tipo de biosólido.

11.3. En caso que los lodos generados en las PTAR no cumplan con los parámetros de estabilización e higienización al momento de su extracción de la PTAR, dichos parámetros deben ser alcanzados como parte del proceso de producción de biosólidos conforme a las tecnologías de estabilización e higienización previstas en los Anexo I y II, respectivamente.

Artículo 12.- Parámetro de estabilización

12.1. Los lodos generados en las PTAR para ser estabilizados y calificados como biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con el siguiente parámetro:

Tabla N° 1 Estabilización de lodos	
Concentración de materia orgánica:	
Materia orgánica (SV) ≤ 60% de Materia seca (ST)	

12.2. Para llevar a cabo el proceso de estabilización del lodo deben aplicarse las tecnologías previstas en el Anexo I.

12.3. En caso de no aplicar las tecnologías indicadas en el Anexo I o no obtener el valor de estabilización indicado en la Tabla N° 1, el lodo resultante del proceso empleado no puede ser calificado como biosólido de Clase A ni de Clase B. Dicho lodo debe ser reaprovechado o dispuesto conforme a lo establecido por la norma sectorial que regula las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final.

Artículo 13.- Parámetro de toxicidad química

13.1. Los biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con los siguientes parámetros de toxicidad química.

Tabla N° 2 Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B								
Mg/kg ST Materia Seca	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio	Níquel	Zinc
Clase A y Clase B	40	40	1200	1500	400	17	400	2400

13.2 En caso la concentración exceda uno de los valores indicados en la Tabla N° 2, el lodo no puede ser calificado como biosólido de Clase A ni de Clase B.

Artículo 14.- Parámetros de higienización

14.1. Los biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con los parámetros de higienización siguientes:

Tabla N° 3 Parámetros de higienización de biosólidos		
Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	Escherichia coli < 1000 NMP/ 1g ST o Salmonella sp. < 1 NMP / 10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo N° II.
Indicador de Huevos de Helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1 / 4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

14.2. El productor de biosólidos de Clase A está obligado a cumplir como mínimo con uno de los Indicadores de Contaminación Fecal (Escherichia coli o Salmonella

sp) de acuerdo con la Tabla N° 3 y con las condiciones determinadas en la Sección A del Anexo II. La inviabilidad de huevos de helmintos puede ser probada, alternativamente a lo establecido en la Tabla N° 3, con la utilización de alguna de las tecnologías para la higienización de biosólidos establecidas en la Sección A del Anexo II.

14.3. El productor de biosólidos de Clase B está obligado a realizar la higienización de acuerdo con los procesos previstos en el Anexo I. En defecto de ello, mediante alguna de las tecnologías indicadas en la Sección B del Anexo II.

14.4. El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y el Ministerio de Agricultura y Riego, de considerarlo necesario, pueden solicitar el monitoreo de otros parámetros de higienización. Como alternativa para el Indicador de Contaminación Fecal Escherichia Coli se puede autorizar la utilización del parámetro de Bacterias Termotolerantes < 1000 NMP/ 1g ST, en caso de ser necesario.

14.5. En caso de no cumplir con una de las exigencias indicadas en la Tabla N° 3, el biosólido de Clase A o de Clase B, según corresponda, no puede ser reaprovechado para las actividades establecidas por el presente Reglamento.

Artículo 15.- Control de la concentración de nitrógeno total y otros nutrientes

15.1. A efectos de la comercialización de biosólidos, el productor debe informar a la Dirección General de Asuntos Ambientales – DGAA del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en cada oportunidad que realice dicha actividad, la concentración del parámetro nitrógeno total en los biosólidos. De no cumplirse con ello, el subproducto no puede ser reaprovechado como biosólido de Clase A ni de Clase B.

15.2. El Ministerio de Agricultura y Riego y/o el usuario final, según corresponda, puede exigir el monitoreo de las concentraciones de otros nutrientes presentes en los biosólidos de Clase A y de Clase B en función del suelo y cultivo sobre el cual sea reaprovechado. Dicho requerimiento se relaciona únicamente con el destino del biosólido y no influye en su clasificación.

Artículo 16.- Monitoreo inicial de los parámetros

16.1. A efectos de la inscripción en el Registro Nacional para la Producción y Reaprovechamiento de Biosólidos, los productores de biosólidos de Clase A realizan un monitoreo inicial que compruebe el cumplimiento de los parámetros exigidos en los artículos 12, 13, 14 y 15, de manera previa al inicio de la comercialización.

16.2. Para productores de biosólidos de Clase B no es obligatorio realizar un monitoreo inicial previo a la comercialización. Excepcionalmente, la DGAA puede solicitar dicho monitoreo a los productores que generen grandes cantidades de biosólidos o productores que obtengan lodos generados en las PTAR con gran influencia de actividad industrial.

Artículo 17.- Frecuencia del monitoreo de los parámetros

17.1. Los productores de biosólidos que operen lagunas de estabilización, lagunas anaerobias, facultativas, aireadas y lagunas con macrofitas deben realizar el monitoreo de los parámetros exigidos en los artículos 12, 13, 14 y 15 al momento de la extracción de la PTAR.

17.2. La frecuencia de monitoreo de la calidad de los biosólidos de Clase A y de Clase B obtenidos de los procesos de tratamiento indicados en los incisos 2, 3 y 4 del Anexo I se realiza de acuerdo con los valores definidos a continuación:

Tabla N° 4 Frecuencia de monitoreo para los biosólidos de Clase A y de Clase B				
ton ST/ año	< 500	500 ≤ 1 500	1 500 ≤ 15 000	> 15 000
Clase A	Anual	Semestral	Trimestral	Bimestral
Clase B	A solicitud de la DGAA			