



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTABILIZACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS  
MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Autora

María Isabel Toasa Cordero

Año  
2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ESTABILIZACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en  
Prevención y Remediación.

Profesor guía

MSc. Viviana Pavlova Sigcha Terán

Autora

María Isabel Toasa Cordero

Año

2018

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro Haber Dirigido El Trabajo, Estabilización de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Mediante Digestión Anaerobia, a través de reuniones periódicas con la estudiante, María Isabel Toasa Cordero, en el semestre 2018 – 2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Viviana Pavlova Sigcha Terán  
Máster en Gestión Integral del Agua  
C.C. 172221616 - 3

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber dirigido el trabajo, Estabilización de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Mediante Digestión Anaerobia, a través de reuniones periódicas con la estudiante, María Isabel Toasa Cordero, en el semestre 2018 – 2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Miguel Ángel Gualoto Oñate  
Máster en Ciencias Biológicas  
C.C. 170742935 – 1

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

---

María Isabel Toasa Cordero  
C.C. 1804683348

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a toda mi familia: Martha, Mario, Lucía, Carolina, Germania y David por ser mi apoyo incondicional. Al personal del laboratorio Giovanna y Carmita que estuvieron presentes cada día de mi esfuerzo realizando la tesis. Y en especial al Doctor Gualoto, que a lo largo de este tiempo le he considerado como parte mi familia. A David y Mathews, por apoyarme físico y psicológicamente.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a las personas que entregaron su tiempo y conocimientos para que el presente trabajo de investigación se culminara con éxito.

## RESUMEN

Las plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico presentan subproductos de operación conocidos como lodos residuales que son de carácter orgánico. Estos lodos al ser estabilizados pueden ser aprovechados como un potencial de enmienda orgánica para el suelo debido a que están compuestos de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio y carbono. Como se dio en el caso de los lodos residuales recolectados de una PTAR de Gamboa, ubicada en el cantón Patate, de la provincia de Tungurahua.

La estabilización de estos lodos residuales se realizó mediante la implementación de biorreactores que realizaron el proceso de digestión anaerobia por 21 días. Cada biorreactor se comprendió en función del DCAC, donde se implementaron tres tratamientos y un testigo, teniendo como combinación base en los tratamientos la adición de EMAs + inóculo (lodo +zeolita) y como tratamientos complementarios se tiene la adición de humatos como dosis nutritiva y la pausterización como un pretratamiento del lodo residual.

Se evaluó la eficiencia de los tratamientos implementados en el diseño experimental mediante análisis de:

- La caracterización inicial, durante y final de los componentes físicos, químicos y biológicos del lodo residual cada tratamiento.
- Componentes del biosólido como abono orgánico.
- Reducción de coliformes fecales expresados en NMP/gr.

En conclusión: una vez ejecutada la fase de experimentación se demostró que el uso de microorganismos eficientes autóctonos (EMAs) en la digestión anaerobia como un tratamiento de estabilización; apuntó los mejores estándares de estabilización, en base los resultados generados en el laboratorio y análisis de componentes como abono orgánico, que definieron al biosólido un lodo de Clase A. Lo que significa que estos biosólidos pueden ser usados como enmienda orgánica a cualquier tipo de suelo.

## ABSTRACT

The wastewater treatment plant of domestic origin produces several sub-products of operation known as sewage sludge that contains organic compositions. These sludges when are stabilized, they can be used as a potential of organic amendment to the soil because they are composed of nutrients such as nitrogen, phosphorus, potassium and carbon. As in the case of the sludge collected from the wastewater treatment plant of Gamboa, located in Patate city, in the Tungurahua's province.

The stabilization of these sludge is carried out through the implementation of bioreactors that started out the process of anaerobic digestion for 21 days. Each bioreactor understood on function of the DCAC design, where they were applied three treatments and a zero, taking as a combination based on the treatments the addition of EMAs + inoculum (sludge + zeolite) and as complementary treatments it has the addition of humates as a nutrients dose and pasteurization as a pretreatment of the residual sludge.

Assessed the efficiency of the treatments implemented in the experimental design through analysis of:

- The characterization of the sludges at the beginning, during and at the end of the physical, chemical and biological components of the residual sludge each treatment.
- Components of the stabilized sludge as organic fertilizer.
- Reduction of fecal coliforms expressed in MPN/gr.

In conclusion: once the experimentation phase is established, the use of indigenous micro-organisms efficient (EMAS) in anaerobic digestion as a stabilizing treatment; it is pointed out the best standards of stabilization, on the basis of the results generated in the laboratory and analysis of components such as organic fertilizer, which defined the sludges of Class A. This means that these biosolids can be used as an organic soil amendment to any type of soil.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	3
1.3. Alcance .....	3
1.4. Justificación .....	3
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Definición de Lodos Residuales .....	5
2.2. Características de los lodos residuales .....	6
2.2.1. Características Físicas de lodos residuales.....	7
2.2.2. Características Químicas.....	7
2.2.3. Características Biológicas .....	8
2.3. Clasificación de los lodos residuales .....	9
2.4. Métodos de estabilización de lodos residuales .....	11
2.4.1. Principales métodos de estabilización .....	11
2.4.2. Estabilización por digestión anaerobia.....	14
2.5. Materiales estructurantes y espesamiento .....	17
2.6. Eficiencias y parámetros de control .....	18
2.7. Aprovechamiento de lodos estabilizados.....	19
3. METODOLOGÍA .....	20
3.1. Diseño experimental .....	21
3.1.1. Balance de masas del inóculo.....	23
3.1.2. Porcentaje masa/masa de EMAs .....	24
3.2. Recolección de Muestras .....	25
3.2.1. Recolección del lodo residual.....	25
3.2. 2. Cultivo de EMAs.....	26

3.3. Bioactivadores (Aceleradores Biológicos)	
y Espesamiento.....	28
3.4. Pretratamiento mediante Pausterización .....	29
3.5. Digestión anaerobia .....	29
3.6. Análisis fisicoquímico.....	30
3.6.1. Parámetros Iniciales y finales.....	30
3.6.1.1. Determinación de la Humedad en el lodo .....	30
3.6.1.2. Determinación del porcentaje de sólidos totales y volátiles ..	30
3.6.1.3. Demanda Química del Oxígeno (DQO) .....	32
3.6.1.4. Método respirométrico ( <i>DBO5</i> ).....	32
3.6.2. Control de parámetros fisicoquímico en el proceso.....	33
3.6.2.1. Temperatura.....	33
3.6.2.2. pH .....	33
3.6.2.3. Conductividad eléctrica .....	33
3.6.3. Determinación de componentes de abono orgánico .....	34
3.7. Análisis microbiológico.....	34
3.7.1. Método de Número Más Probable (NMP) .....	35
3.7.2. Huevos de helminto en presencia y ausencia .....	36
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
4.1. Balance de masa del inóculo.....	36
4.2. Porcentaje de masa/ masa de EMAs.....	37
4.3. Reporte de parámetros de control.....	37
4.3.1 Resultados del control de pH .....	38
4.3.2 Resultados del control de conductividad eléctrica.....	44
4.3.3 Resultados del control de temperatura.....	51
4.4. Reporte de caracterización inicial y final del lodo .....	58
4.4.1. Porcentaje de Sólidos totales, fijos y volátiles.....	58
4.4.2. Resultados de DQO y <i>DBO5</i> .....	61
4.4.3. Resultados de componentes del abono orgánico.....	65
4.5. Resultados del análisis microbiológico.....	69

4.5.1. Resultados de coliformes fecales en NMP/gr .....	69
5. CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS .....	75
ANEXOS .....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los lodos residuales .....	6
Tabla 2. Parámetros químicos del Lodo residual .....	8
Tabla 3. Composición de los lodos según su clasificación .....	11
Tabla 4. Principales Métodos de estabilización .....	12
Tabla 5. Principales microorganismos de la Digestión Anaerobia .....	16
Tabla 6. Parámetros de control de estabilización del biosólido .....	19
Tabla 7. Factores del DCAC.....	22
Tabla 8. DCAC .....	22
Tabla 9. Metodología de los parámetros del abono orgánico.....	34
Tabla 10. Análisis de varianza del pH en los tratamientos .....	40
Tabla 11. Análisis de medias del pH .....	40
Tabla 12. Comparación en parejas de Tukey del pH .....	41
Tabla 13. Análisis de varianza de la conductividad eléctrica.....	47
Tabla 14. Análisis de medias de la conductividad eléctrica.....	47
Tabla 15. Comparación en parejas de Tukey de la conductividad eléctrica .....	48
Tabla 16. Análisis de varianza de la temperatura.....	54
Tabla 17. Análisis de medias de la temperatura.....	54
Tabla 18. Comparación en parejas de Tukey de la temperatura.....	55
Tabla 19. Determinación de Sólidos.....	58
Tabla 20. Determinación de DQO y <i>DBO5</i> .....	62
Tabla 21. Contenidos de los tratamientos como abono orgánico.....	65
Tabla 22. NMP/gr de coliformes fecales.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de procesos de las fases experimentales .....	21
Figura 2. Balance de masa del lodo residual.....	23
Figura 3. Mapa de Ubicación de la PTAR de Gamboa.....	25
Figura 4. Metodología de cultivo de EMAs .....	27
Figura 5. Cultivo de EMAs.....	27
Figura 6. Cosecha de EMAs.....	28
Figura 7. Unidad experimental de los Biodigestores .....	29
Figura 8. Metodología de coliformes fecales .....	35
Figura 9. Resultados del balance de masa del inóculo inicial .....	37
Figura 10. Mediciones diarias del pH durante 21 días .....	38
Figura 11. Gráfica de caja del pH vs. Tratamientos A, B, C y D.....	39
Figura 12. Análisis multivariante entre los tratamientos con respecto al pH.....	42
Figura 13. Mediciones diarias de conductividad eléctrica durante 21 días.....	45
Figura 14. Gráfica de cajas entre conductividad eléctrica y Tratamientos A, B, C y D.....	46
Figura 15. Análisis multivariante entre los tratamientos con respecto a la conductividad eléctrica .....	49
Figura 16. Análisis comparativo entre conductividad eléctrica y pH.....	50
Figura 17. Mediciones diarias de la temperatura durante 21 días.....	52
Figura 18. Gráfica de cajas entre la temperatura y Tratamientos A, B, C y D.....	53
Figura 19. Análisis multivariante entre los tratamientos con respecto a la temperatura .....	56
Figura 20. Porcentaje de sólidos totales, volátiles y fijos .....	59
Figura 21. Gráfico de correlación en el contenido de sólidos con respecto a los tratamientos .....	60
Figura 22. Concentración de DQO y <i>DBO5</i> en los tratamientos.....	62
Figura 23. Gráfico de correlación en el contenido de sólidos con respecto a los tratamientos .....	64
Figura 24. Porcentaje de componentes del biosólido como abono orgánico ...	66
Figura 25. Gráfico de correlación entre los componentes del abono orgánico.	67
Figura 26. NMP de coliformes fecales.....	70

Figura 27. Gráfico de correlación del NMP de coliformes fecales en los tratamientos.....	71
---	----

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) depuran aguas de origen doméstico o industrial; las aguas residuales urbanas se tratan principalmente por métodos de tipo biológico o secundario, ya que el agua residual urbana es fundamentalmente de carácter orgánico (Méndez, 2008). Al residuo generado por el tratamiento de aguas residuales, se lo conoce como lodo o fango residual (Svanstrom et al., 2004). Los lodos son un riesgo potencial para la salud, porque confieren de: patógenos, metales pesados y elementos tóxicos que son productos residuales de los contaminantes depurados (Bolobajev et al., 2014). El tratamiento de lodos es considerado como el problema más significativo en los tratamientos de aguas residuales debido a las grandes demandas de energía y costos de tratamiento (Huang et al., 2014; Ya et al., 2015).

Los lodos, para su disposición final, deben ser estabilizados, esto significa que se debe reducir la presencia patógenos, eliminar los olores desagradables y reducir su potencial putrefacción (Metcalf & Eddy, 2013); así es como lo demanda la Agencia de Protección Ambiental (EPA), señalando esta, que los lodos residuales pueden ser usados como enmiendas orgánicas, una vez que hayan sido estabilizados (Chang et al., 2011).

La metodología de disposición final de lodos residuales es generalmente la incineración, por lo que se ha convertido en una opción alternativa significativa (Eurostat, 2015). La incineración convierte efectivamente 1 tonelada de lodo de aguas residuales deshidratadas que contiene patógenos y metales pesados en alrededor de 100 kg de ceniza de lodo residual (SSA) estéril (Donatello & Cheeseman, 2013).

En América del Sur, existe un alto porcentaje de desechos urbanos que no se encuentran bien administrados, uno de ellos son los lodos residuales que implican riesgos sanitarios y ambientales asociados (Sáez, 2014). Por otro lado, en Ecuador la disposición final de los lodos residuales no se centra en la incineración, pero sí es tratado como un residuo sólido que se dispone en los rellenos sanitarios (REPAMAR, 1999). En la actualidad, se generan anualmente alrededor de 2,9 millones de toneladas al año de desechos sólidos municipales (INEC, 2010), el 80 por ciento ubicados en áreas urbanas (MAE-PNGIDS, 2011). En relación a los lodos producidos por PTARs de industrias, se conoce que se disponen en rellenos sanitarios, lo que significa reducir la capacidad y tiempo de vida útil del relleno sanitario y la proliferación de microorganismos patógenos a la salud pública (MAE,2013).

En Ecuador, en la provincia de Tungurahua, el tratamiento de aguas residuales es parte de la infraestructura sanitaria que ejecuta el Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua. Se ha considerado la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, con el objetivo de disminuir el grado de contaminación hacia los cuerpos receptores como quebradas, lechos de ríos, entre otros (HGPT, 2018); y, asegurar la correcta disposición de los lodos residuales. En Tungurahua, las Plantas de Tratamiento de Agua Domésticas Rurales están compuestas de un tanque séptico, un filtro biológico y un lecho de secado de lodos (HGPT, 2018). Para la estabilización de los lodos producidos como subproductos del tratamiento del agua residual y puedan ser dispuestos como un desecho común en los rellenos o como enmienda orgánica al suelo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Establecer las condiciones de estabilización anaerobia de lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar la composición de los lodos residuales de la PTAR mediante el análisis de parámetros biológicos, físicos y químicos, antes y después de los tratamientos
- Acondicionar el lodo residual mediante espesamiento y balance de masa
- Desarrollar un proceso de digestión anaerobia mediante el diseño de experimentos

### **1.3. Alcance**

La presente investigación se enfoca en la estabilización de lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de Patate mediante digestión anaerobia. La Planta está ubicada en el cantón Patate de la provincia de Tungurahua. Este estudio se ha realizado con la finalidad de aprovechar los lodos estabilizados como enmiendas orgánicas, libres de patógenos. La experimentación comprende el espesamiento de la matriz de lodos residuales y la bioestabilización mediante la adición de EMAs (microorganismos eficientes autóctonos) que cuando entran en contacto con la materia orgánica, producen sustancias beneficiosas como: ácidos orgánicos, minerales quelatados, antioxidantes y vitaminas que aceleran la degradación de la materia orgánica y aumentan el contenido de humus (Wenzl, 2006). Se trabajará con digestores anaerobios a escala de laboratorio de capacidad de 4 litros, donde se definirá el mejor tratamiento del diseño experimental

### **1.4. Justificación**

En Tungurahua, las Plantas de Tratamiento de Agua Domésticas Rurales están compuestas de un tanque séptico, un filtro biológico y un lecho de secado de lodos (HGPT, 2018). La disposición final de los lodos producidos por la PTAR se realiza directamente en rellenos sanitarios o en la superficie; esto genera una problemática ambiental por el alto contenido de patógenos, metales

pesados y tóxicos que se bioacumulan en las plantas, y son perjudiciales para la salud de los seres vivos (Sidhu & Toze, 2009).

El análisis de las metodologías de gestión de lodos residuales existentes permitió generar la propuesta de investigación, que se enfoca en: reducir el contenido tóxico de los lodos, minimizar los costes económicos y energéticos dentro del proceso en la obtención de lodos clase A o B, mediante la digestión anaerobia del lodo espesado con EMAs (bioestabilización) (Fioravanti et al., 2005, pp. 69).

La bioestabilización surge de la necesidad de resolver los problemas de contaminación mediante la utilización de microorganismos capaces de degradar compuestos que provocan alteraciones al medio ambiente; es decir, es una tecnología emergente que utiliza organismos vivos (plantas, hongos y/o bacterias, entre otros) para absorber, degradar o transformar los contaminantes, inactivarlos o atenuar su efecto en el lodo de la PTAR (Rittmann, 2001). La investigación se justifica por las siguientes razones:

- **Tecnológica**

Las metodologías existentes/ aplicadas en otros países, no son aplicables al sector rural nacional debido a sus altos costos, en tal virtud, la investigación ha planteado una alternativa.

- **Ambiental**

El problema de los malos olores, alto contenido de materia orgánica patógena y sustancias tóxicas como metales; que, con las metodologías acostumbradas, terminan en rellenos sanitarios que son fuente permanente de contaminación.

- **Económica**

La gestión ineficiente de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas genera erogaciones económicas importantes para controlar los efectos negativos sobre el ambiente y la salud de la población. La metodología sugerida, permite eliminar estas erogaciones mediante su control efectivo de los contaminantes del lodo residual.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Definición de Lodos Residuales**

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), un “lodo residual” se define como un subproducto de las diferentes operaciones generadas por una planta de tratamiento de aguas residuales; que presentan las siguientes consistencias: sólida, semisólida o líquida y un peso total entre 0.25 y 12 % de fracción de sólidos (EPA, 2003).

Mientras que, para la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, los lodos residuales se definen como: “sólidos de contenido de humedad variable provenientes del arrastre de los sistemas de alcantarillado municipal o de plantas de tratamiento de aguas residuales que no hayan sido sometidos a procesos de estabilización” (SEMARNAT, 2002).

La estabilización o tratamiento y la adecuada eliminación de los lodos residuales generados son uno de los problemas ambientales más importantes de controlar (Zhang, 2013) debido al alto contenido sustancias tóxicas y patógenos. Los lodos residuales tienen restricción para ser dispuestos sobre la superficie del suelo como enmienda orgánica, sin haber sido antes estabilizados en la mayoría de las partes del mundo. (Domínguez, 2006).

## 2.2. Características de los lodos residuales

Las características de los lodos residuales varían mucho dependiendo de su origen, su edad, del tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos (Rojas, 2004). El volumen de los lodos generados depende principalmente de las características del agua residual, del grado de tratamiento previo, del tiempo de sedimentación, de la densidad de sólidos, del contenido de humedad, del tipo de equipo o método de remoción de lodos y de la frecuencia de remoción de los mismos (Gutiérrez, 1996). Sin embargo, en los procesos de tratamiento biológico es de notar que; no todos los sólidos que entran a la planta de tratamiento son necesariamente orgánicos y biodegradables. Por lo que más del 50% de los sólidos del agua bruta pueden ser de naturaleza inorgánica (Winkler, 2015).

Tomando en cuenta estas consideraciones, los lodos se clasifican según su origen y composición del subproducto de degradación contenido en las aguas residuales, como se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.

### *Características de los lodos residuales*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Mínimo</b>
<b>pH</b>	-	7.22	6.61	6.04
<b>Densidad aparente</b>	gr/cc	1.11	1.07	1.04
<b>Sólidos totales</b>	%	18	13.5	9.7
<b>Sólidos volátiles</b>	%	4.8	2.9	1.1
<b>Coliformes Totales</b>	NMP	$2.96 \times 10^8$	$2.01 \times 10^5$	$1.30 \times 10^3$
<b>Coliformes Fecales</b>	NMP	$2.96 \times 10^8$	$2.01 \times 10^5$	$1.30 \times 10^3$
<b>Huevos de helminto</b>	NMP	179	90	10.1

Adaptado de: (Vintimilla, 2010)

### **2.2.1. Características Físicas de lodos residuales**

En los lodos residuales se deben considerar distintas características físicas como: olor, color, apariencia, temperatura; sólidos totales, volátiles, suspendidos y sedimentable (Bonilla, 2008); dónde la característica principal a tomar de importancia es el contenido de humedad del lodo, debido a la dificultad en el manejo, almacenamiento y definición del tratamiento adecuado que permite su aprovechamiento o disposición final segura (Martínez, 2013).

### **2.2.2. Características Químicas**

Las características químicas de los lodos residuales dependen de la calidad y cantidad de agua residual doméstica, la cual está formada por un 99% de agua y el 0.01% de sólidos (Avilés, 2011). La composición química de los lodos residuales está definida por los siguientes parámetros:

- **Compuestos orgánicos e inorgánicos**

Los compuestos orgánicos corresponden al 70 % de sólidos, de los cuales, el 40 a 60 % son proteínas, el 25 a 50 % son carbohidratos y el 10 % son grasas y aceites (Alarcón, 2009). Mientras que, los compuestos inorgánicos representan el 30 % de sólidos, estos corresponden a los micronutrientes (Fe, Co, Mn, Mo, Cu, B, Mg), cloruros, metales pesados, sales, azufre y silicatos (Szymański, 2011).

- **Nutrientes y contenido de materia orgánica**

Los lodos residuales contienen una cantidad significativa de nutrientes como: nitrógeno (N), carbono (C), fósforo (P) y potasio (K); que al ser estabilizados se potencia su aprovechamiento como enmienda orgánica al suelo (Salazar, 2013).

El contenido de materia orgánica que representa al 70%, desempeña un importante rol en la adsorción y movilización de diferentes elementos en el suelo (Schnitzer, 1991). Dónde, las fracciones orgánicas están compuestas por minerales y formaciones de humus (Genevini et al., 1986) que aportan de la nutrición necesaria para el suelo con micro y macroelementos (A. Singh et al., 2011).

En la siguiente Tabla 2, se detallan los valores de los parámetros químicos que constituyen principalmente a un lodo residual.

Tabla 2.

*Parámetros químicos del Lodo residual*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Ph</b>	--	5.0 – 8.5
<b>Materia orgánica</b>	%	≥ 25
<b>Carbono orgánico</b>	%	> 0.8
<b>Nitrógeno total</b>	%	≤ 0.03
<b>Relación C/N</b>	--	5.0 – 11 (Lodo)
	--	≤ 25 (Clase A)
	--	≤ 30 (Clase B)
<b>Fósforo</b>	%	≥ 0.1
<b>Potasio</b>	%	0.025
<b>Relación NPK</b>	%	≥ 4

Adaptado de: NAREA, 2004

### **2.2.3. Características Biológicas**

El lodo residual de acuerdo a su origen tiene una gran cantidad de vectores biológicos, conformados por microorganismos patógenos comunes como: bacterias, virus y parásitos; que son definidos por el tamaño poblacional y salud de la zona que el agua residual es tratada (Ortiz, 1994).

El factor biológico es de extrema necesidad de ser tratado debido al alto contenido de patógeno para que dicho biosólido o subproducto de lodo, no sea un riesgo para la salud (Metcalf & Eddy, 2013).

Entre los microorganismos que comúnmente se encuentran en los lodos residuales son: *Salmonella sp.* Coliformes Fecales, Huevos de Helmintos, y en casos de los virus, se encuentra la hepatitis A y Calcivirus (Campos, 2004).

- **Coliformes Fecales**

Los coliformes fecales son una subdivisión de los coliformes totales de las bacterias patógenas que se encuentran en el suelo. Las bacterias coliformes, en su mayoría, se encuentran en la capa superficial del agua o de los sedimentos considerados fangos o sedimentos del fondo de los cauces (RAS, 2000). La temperatura óptima de crecimiento de estos microorganismo es de 37°C, con un intervalo de crecimiento de 10 a 40°C. Su pH óptimo de crecimiento es de 7.0 a 7.5 con un pH mínimo de crecimiento de valor de 4.0 y un pH máximo de crecimiento de valor de 8.5 (Ramírez, 2007).

- **Huevos de Helminto**

Los huevos del helminto son considerados como uno de los parámetros de mayor riesgo biológico para la salud. Se definen en el conteo del número de huevos de nemátodos, larvas y huevos de cestodos por gramo (Rojas, 2004). Dónde, el límite de huevos del helminto permisible en lodos residuales según Estados Unidos es de 1 a 8 HH/L (Bedoya et al., 2013)

### **2.3. Clasificación de los lodos residuales**

Los lodos al ser generados por diferentes procesos realizados al interior de las plantas de tratamiento de aguas residuales se clasifican en distintos subproductos de acuerdo a su origen:

- **Lodo Crudo**

Los lodos crudos son producidos por el tratamiento de aguas servidas. Este tipo de lodos, no pueden ser dispuestos libremente al ambiente sin haber sido tratados o estabilizados (Burchard,2010), dónde sus características más significativas son: alto contenido de patógenos, su potencial de putrefacción y mal olor (Lenntech, 2018).

- **Lodo de tratamiento primario**

Este lodo se caracteriza por ser generado en el tratamiento primario de las aguas residuales. En las composiciones del lodo primario, se tiene: materia orgánica, vegetales, frutas, papel, entre otros (EPA, 2003). Generalmente tiene una consistencia limosa y de color marrón a gris; y por ser provenientes de una sub-operación séptica, estos generan mal olor y alto contenido de patógenos (MAHAMUD, 1996).

- **Lodo de tratamiento secundario**

En los lodos originados por un tratamiento secundario, se caracterizan por el uso de microorganismos que se encargan de consumir la materia orgánica del agua residual, permitiendo que la biomasa que se sedimenta en el fondo del tratamiento como lodo residual (Energy, 2014). Las características importantes de estos lodos son: la ligereza en cuestión de densidad y tienen un color marrón debida a la continua aireación a la que son sometidos los lodos que no permiten generar olores desagradables con tanta rapidez como los lodos de origen primario (Lenntech, 2018). Sin embargo, si estos lodos no permanecen suficientemente aireados, su color oscurece y tienden a producir el mismo olor que un lodo de origen primario (Vintimilla, 2010).

- **Lodos digeridos o provenientes de la digestión anaerobia**

Son lodos que tienen un color negro y de olor desagradable totalmente reducido. Es subproducto de la digestión anaerobia donde generalmente, la composición del lodo residual comprende entre el 45 a 60% de materia orgánica (Oropeza, 2006).

En la siguiente Tabla 3, se presenta la composición de los lodos residuales provenientes del subproducto de operaciones de una PTAR.

Tabla 3.

*Composición de los lodos según su clasificación.*

Parámetros	Lodo Primario	Lodo Secundario	Lodo Digerido
pH	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	6.8 – 7.6
Humedad (%)	92 – 96	97.5 – 98	94 – 97
SSV (%)	70 – 80	80 – 90	55 – 65
Grasas (%)	12 – 14	3 – 5	4 – 12
Proteínas (%)	4 – 14	20 – 30	10 – 20
Carbohidratos (%)	8 – 10	6 – 8	5 – 8
Nitrógeno (%)	2 – 5	1 – 6	3 – 7
Fósforo (%)	0.5 – 1.5	1.5 – 2.5	0.5 – 1.5
Coliformes Fecales	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>	100 – 1000	10 – 100

Adaptado de: (García, 2006)

## 2.4. Métodos de estabilización de lodos residuales

La estabilización de los lodos residuales da paso a la producción de biosólidos que, son considerados como lodos que han sido sometidos a un tratamiento para reducir o eliminar: la presencia de patógenos, putrefacción y malos olores que los convierte en alternativas más usadas por Estados Unidos y Europa como aprovechamiento o enmienda orgánica para el suelo (EPA, 2018).

### 2.4.1. Principales métodos de estabilización

Existen distintos métodos de estabilización que permiten la reducción o eliminación de patógenos, mal olor y putrefacción de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo la digestión anaerobia el método más empleado (Pérez-Elvira et al., 2006); por lo que la mayoría de los estudios de investigación se centran en mejorar de este tipo de tratamiento.

A parte de esto, se encuentran algunos métodos de estabilización que incluyen: compostaje, secado al calor, incineración, destrucción mecánica y térmica, digestión termófila mejorada y tratamiento químico (Metcalf & Eddy, 2013). Las

tecnologías de tratamiento que involucran sistemas de alta temperatura o presión generalmente son más extensas y costosas para operar, donde el mantenimiento de los equipos representa altos costos de económicos en comparación de las tecnologías que involucran procesos biológicos, químicos y de pasteurización (Cano et al., 2015). En la actualidad, se han usado procesos de estabilización biológicos, químicos y secado por calor que producen un líquido orgánico rico en nutrientes libre de patógenos o un producto orgánico similar al suelo seco para el enriquecimiento del suelo, la mezcla de tierra vegetal y como enmiendas de fertilizantes orgánicos (Singh *et al.*, 2011).

En la Tabla 4, se presentan los principales métodos de estabilización de lodos residuales con más uso a nivel mundial.

Tabla 4.

*Principales Métodos de estabilización.*

Método de Estabilización	Características	Clase de Lodo Resultante	Fuente
Hidrólisis térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altas temperaturas de 160 a 180 °C.</li> <li>- Reducción de la viscosidad.</li> <li>- Incremento de la deshidratación.</li> <li>- Mayor producción de biogás.</li> <li>- Remoción de patógenos.</li> <li>-Efectos positivos en procesos biológicos.</li> </ul>	Tipo A	(Carrere et al., 2010: Souza et al., 2013) (Cano et al., 2015).
Irradiación de Ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método de pretratamiento rápido.</li> <li>- Fragmentación de la biomasa del lodo.</li> <li>- Tratamiento suplementario de la digestión anaerobia.</li> <li>- Los compuestos orgánicos se liberan hidrolizándose fácilmente en cadenas cortas.</li> </ul>	Tipo A	(Jinfeng et al., 2007). (Khanal et al., 2007).

Pasterización	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos costos de inversión.</li> <li>- Desinfección al someter al lodo al calor de 50 a 70 °C.</li> <li>- Deshidratación del lodo.</li> <li>-Reducción instantánea de patógenos.</li> </ul>	Tipo A	(Bernard, 1999)
Alcalinidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversión menos costosa y de fácil operación.</li> <li>- Inestabilidad de Biosólidos en el pH que provocan la supervivencia de patógenos.</li> <li>- No puede ser dispuesto como enmienda orgánica.</li> <li>-Reducción logarítmica de microorganismos patógenos.</li> <li>- Uso elevado de cal para mantener el pH superior a 13.</li> </ul>	Tipo A	(García, 2006) (Xu et al. 2014)
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejores acondicionadores del suelo.</li> <li>- Requiere mano de obra intensiva.</li> <li>- Genera malos olores.</li> <li>- Transmisión de patógenos por medio de material particulado.</li> </ul>	Tipo A	(Rodríguez, 2010)
Digestión Aerobia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menores costos de inversión inicial.</li> <li>- No emite olores.</li> <li>- Oxidación de materia orgánica.</li> <li>- Reducción de la masa del lodo.</li> </ul>	Tipo B	Federación Ambiental del Agua (WEF, 2010)
Digestión Anaerobia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente en la destrucción de SSV en un 40 a 60 %.</li> <li>- Los biosólidos son óptimos para el uso de la agricultura.</li> <li>- Lodo rico en nutrientes.</li> <li>- Buena inactivación de los patógenos.</li> <li>- Bajo requerimientos de energía.</li> <li>- Reducción de malos olores.</li> </ul>	Tipo B	(Metcalf & Eddy, 2013)

### 2.4.2. Estabilización por digestión anaerobia

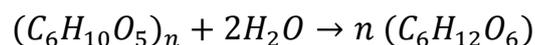
La digestión anaerobia es uno de los métodos más utilizados para el tratamiento de lodos residuales, que se lleva a cabo en un reactor que se caracteriza por desarrollarse en un reactor sin oxígeno que limita la existencia un suministro de alimento para los microorganismos (Rodríguez, 2010). Los microorganismos contenidos cuando entran en la fase endógena generan productos finales como: metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, entre otros gases (Tenney & Stumm, 1965). Para realizar la digestión anaerobia, los lodos residuales deben experimentar la acción de un consorcio de bacterias, clasificadas como: hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas (Pavlostathis & Gómez, 1991).

A continuación, se detallan las etapas en la que se desarrolla la digestión anaerobia con sus ecuaciones correspondientes.

- **Hidrólisis**

La etapa de hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica (Brock et al., 1994). En esta fase se produce alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, mediante moléculas complejas que llevan a cabo la acción de enzimas extracelulares (Tsagarakis, 2006). La ecuación que se representa a esta etapa se ilustra a continuación (Eikelboom, 2000).

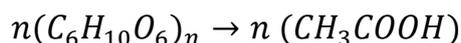
(Ecuación 1)



- **Acidogénesis**

En la etapa de la acidogénesis, se realiza la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (Parkin & Miller, 1982). La importancia de esta etapa no está sujeta solo a la producción de alimento, si no a la eliminación de cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. (Zinder & Mah, 1979). Por otro lado, este grupo de microorganismos formadoras de ácidos son bacterias de carácter facultativo y anaeróbicas obligadas, que se desarrollan óptimamente en un pH de 5 - 6. (Montes, 2008). La acidogenesis se representa con la siguiente ecuación (Comeau, Hall, Hancock & Oldham, 1986)

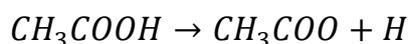
(Ecuación 2)



- **Acetogénesis**

En esta etapa mediante bacterias acetogénicas, se metabolizan algunos productos de la fermentación en compuestos más sencillos como acetato e hidrógeno (Appels et al., 2011). Por otro lado, como características de las bacterias acetogénicas se tiene que: sólo pueden sobrevivir en simbiosis con el género de bacterias que consuma hidrógeno, tienen un período de regeneración de hasta 84 horas; son reductoras de sulfato con la capacidad de degradar lactato y etanol; pero no son capaces de degradar ácidos grasos y compuestos aromáticos no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato (Zinder, 1988). La etapa acetogénica se representa con la siguiente ecuación (McCarty, 1975)

(Ecuación 3)

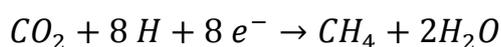


- **Metanogénesis**

La etapa metanogénica es la última fase de la descomposición anaeróbica que se encuentra dominada por un grupo especial de microorganismos, las Arqueas metanogénicas (Jang et al., 2013). Este tipo de bacterias aparecen activas desde la segunda fase de la fermentación, pero es en esta etapa que se encuentra mayor número de Arqueas metanogénicas (Archer & Harris, 1986).

Las bacterias metanogénicas son estrictamente anaerobias y se desarrollan en un rango de pH de 6.5 – 7.5 que influye al crecimiento bacteriano (Lay, Li & Noike, 1997). La siguiente ecuación representa la etapa metanogénica que se produce en la digestión anaerobia (Ritmann, 2011).

(Ecuación 4)



A continuación, en la Tabla 5. se detallan los principales microorganismos responsables de la de digestión anaerobia según la etapa de estabilización.

Tabla 5.

*Principales microorganismos de la Digestión Anaerobia*

<b>Fase de Digestión Anaerobia</b>	<b>Tipo de Bacterias</b>
<b>Hidrólisis</b>	- <i>Bacteroides</i> , <i>Lactobacillus</i> , - <i>Propioni- bacterium</i> , - <i>Sphingomonas</i> , - <i>Sporobacterium</i> , - <i>Megasphaera</i> - <i>Bifidobacterium</i>
<b>Acidogénesis</b>	- <i>Clostridium</i> - <i>Paenibacillus</i>

	- <i>Ruminococcus</i>
	- <i>Cytophaga-Flavobacterium</i>
	<i>Bacteroides</i>
<b>Acetogénesis</b>	- <i>Lactobacillus spp</i>
	- <i>Bifidobacterium bifidum</i>
<b>Metanogénesis</b>	- <i>Methanobacterium</i>
	- <i>Methanospirillum hungatii</i>
	- <i>Methanosarcina</i>

Adaptado de: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. – (FAO, 2011)

## 2.5. Materiales estructurantes y espesamiento

El espesado y material estructurante es un procedimiento a emplear para aumentar la fracción sólida de los lodos, disminuyendo la humedad y dándole una textura más maleable (Yang, 2009).

- **Zeolita – Material estructurante**

Como material estructurante se puede encontrar diversas alternativas a escoger, dependiendo de las características que presenta el lodo residual, costo de implementación y normativa de la localidad (Metcalf & Eddy, 1995). Como materiales estructurantes o de soporte pueden emplearse: tierra de bosque, cascarilla de arroz, residuos de poda, zeolita, hojarasca, etc (EPA, 2018).

Uno de los materiales estructurantes más completos se considera a la zeolita, porque a más de ser un material estructurante (Kuter et al., 1995), es utilizado como intercambiador de cationes para el ablandamiento del agua mediante la eliminación de los iones de calcio y como catalizadores y adsorbentes de humedad especializados (Xu, Pang, Yu, Huo, & Chen, 2007).

- **Microorganismos Autóctonos Eficientes (EMA's)- Espesante**

El uso de EMA's como espesante de lodos residuales surge de la necesidad de

resolver problemas de contaminación biológica, mediante la utilización de microorganismos capaces de degradar compuestos que provocan alteraciones al medio ambiente (Bettioli & Camargo, 2000). Es decir, es una tecnología emergente que utiliza organismos vivos como: plantas, hongos y/o bacterias, etc. Para absorber, degradar o transformar los contaminantes, inactivarlos o atenuar su efecto en el lodo proveniente de una PTAR (Rittmann, 2001). Las EMA's aportan microorganismos que facilitan la fermentación de materiales orgánicos en forma líquida y sólida. Además, tiene efectos antagonistas ante patógenos que amenazan la salud y que generalmente están presentes en los lodos sépticos (Kabongo, 2002).

## 2.6. Eficiencias y parámetros de control

Es de importancia conocer la eficiencia y parámetros de control en que será evaluado el biosólido, cuando este sea sometido a método de estabilización. Es aquí donde nace el tipo de Lodo que será considerado como enmienda para el suelo (Metcalf & Eddy, 2013).

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos que son (EPA, 2018) ha determinado dos tipos de calidad de biosólidos con las siguientes características:

**Lodo Clase A:** Pueden ser utilizados en la agricultura sin restricciones donde, la densidad de coliformes fecales debe ser menos de 1000 UFC/g total en sólidos secos. Mientras que la densidad de *Salmonella sp* debe ser menor que 3 UFC/4g de sólidos totales secos.

**Lodo Clase B:** Pueden ser usados en la agricultura con restricciones, sin embargo, estos pueden ser dispuestos en la superficie. La densidad de coliformes fecales en esta clase de lodos, deben tener una densidad de coliformes fecales menores de  $2 \times 10^6$  UFC/g.

La Tabla 6 resume los parámetros necesarios de estabilización, que el biosólido debe alcanzar para ser usado como enmienda orgánica en el suelo.

Tabla 6.

*Parámetros de control de estabilización del biosólido*

Parámetros	Unidades	Calidad Recomendada
pH	--	5.0 – 7.5 (1)
Humedad	%	20 < 40 (2)
Carbono Orgánico	%	> 26.1 Tipo A > 14.5 Tipo B (1)
Nitrógeno Total	%	> 0.8 (1) > 2.0 (2)
Relación C/N	--	10 – 25 Tipo A 10 – 40 Tipo B (3)
Fósforo Total	%	0.15 – 1.5 (1)
Potasio	%	0.0215 – 0.025 (4)
Coliformes Totales	UFC/gr	< 1000 Clase A
Coliformes Fecales	UFC/gr	Clase B < 2X10 <sup>6</sup> (5)
Huevos de Helminto	HH/gr	Clase A < 1/4 (5)

Adaptado de:

(1) CONAMA, 2004; (2) Soto, 2003; (3) Metcalf & Eddy, 2013; (4) Serapio & Bruzon, 1996; (5) EPA, 2018.

## 2.7. Aprovechamiento de lodos estabilizados

- **Aplicación en suelos agrícolas.**

El uso de los biosólidos en la agricultura, son un gran aporte en la recuperación de canteras, reforestación y producción de materiales de construcción, entre otros (Franco et al. 2000). Actualmente, es común la incorporación de lodos residuales en suelos agrícolas, ya que reduce la incorporación de fertilizantes comerciales, mejora su fertilidad, aumenta la capacidad de retención de agua y reduce la erosión del suelo (Ruda et al., 2013).

Sin embargo, en Estados Unidos existen restricciones establecidas por el Código Electrónico de Regulaciones Federales (e-CFR), sobre el uso de los biosólidos estabilizados como enmienda orgánica al suelo (e-CFR, 1993) como:

- Los cultivos de alimentos con las partes en contacto con los lodos de depuradora / mezcla de suelo ubicados totalmente por encima de la superficie de la tierra no se recogerá durante 14 meses después de la aplicación de los biosólidos.
  
- Los cultivos de alimentos recolectados por debajo de la superficie de la tierra no se recogerán durante 38 meses después de la aplicación de los biosólido.
  
- Los cultivos de forrajes y cultivos de fibras no se recogerán durante 30 días después de la aplicación de biosólidos.
  
- Los animales no deberán ser pastoreados en la tierra durante 30 días después de la aplicación de los Biosólidos al suelo.

### **3. METODOLOGÍA**

En la presente investigación, se empleó una digestión anaerobia para estabilizar lodos residuales provenientes de una PTAR que trata efluentes de origen doméstico.

Para la estabilización de los lodos residuales se emplearon EMAs (Microorganismos Eficientes Autóctonos) que se componen de: actinomicetos, levaduras, bacterias ácido lácticas, hongos de fermentación y bacterias fotosintéticas que, reducen exponencialmente la población de patógenos por competencia y generación de condiciones ácidas con bioactivadores organominerales y orgánicas (Fioravanti et al., 2005, pp. 69-76) como humatos

y agua peptona que incrementaron su cantidad y con ello la eficiencia para competir con los patógenos por el consumo de los nutrientes contenidos en los lodos (Kabongo, 2002). Las EMAs al entrar en contacto con la materia orgánica, producen sustancias beneficiarias como: antioxidantes, ácidos orgánicos, vitaminas y minerales quelatados, que aceleran la degradación de la materia orgánica y aumentando el contenido de humus (Wenzl, 2006, pp. 38-43).

El diseño experimental de la presente investigación se estableció según las fases que conllevan a la estabilización de los lodos residuales, detallándose los procesos realizados en la Figura 1, estos comprenden las actividades desde la etapa de recolección de muestras hasta la fase de análisis final del biosólido.

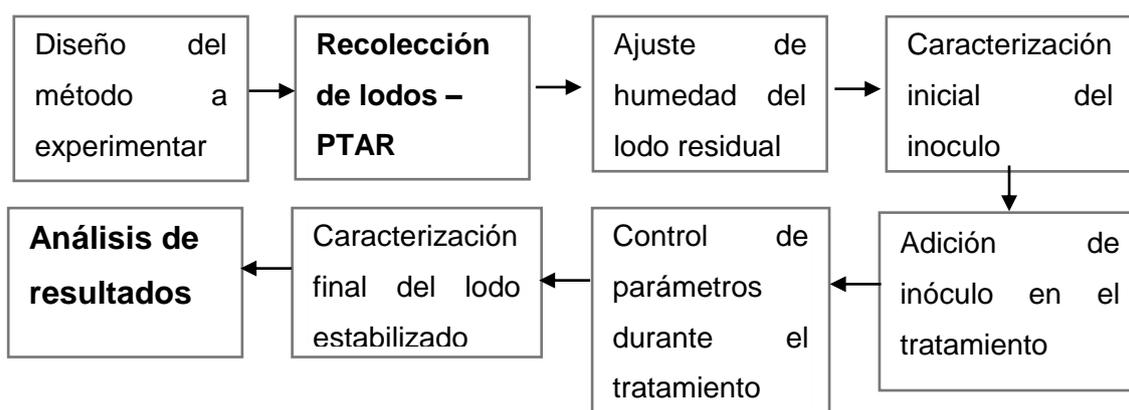


Figura 1. Diagrama de procesos de las fases experimentales

### 3.1. Diseño experimental

En esta propuesta de investigación, se aplicó un diseño completamente aleatorio comparativo (DCAC). El DCAC contiene cuatro tratamientos: un testigo y tres tratamientos, de cada tratamiento se generó dos réplicas. Se designaron tres factores constantes en el diseño experimental: Peso del lodo " $W_{Lodo_1}$ ", Peso de zeolita " $W_{Zeolita}$ " y peso de EMAs " $W_{EMAS_1}$ ", con unidades expresadas en gramos; y una variable independiente que se identifica como tratamiento complementario, como se observa en Tabla 7.

Tabla 7.

*Factores del DCAC*

<b>Tratamiento Complementario</b> <b>“Variable independiente”</b>	<b>Factores constantes</b>
<b>[Dosificación Mineral<sup>1</sup>] Bioactivador</b>	$W_{Lodo_1}$ (gr)
	$W_{zeolita}$ (gr)
<b>Pasteurización (70°C) (Metcalf, 2013)</b>	$W_{EMAs}$ (gr)

<sup>1</sup> Dosificación mineral: Adición de Humatos 7 plus que contiene microelementos (minerales)

Una vez denominadas las variables, se desarrolla el diseño experimental en la Tabla 8.

Tabla 8.

*DCAC*

<b>Tratamiento</b>	<b>Reactores</b>		<b>Lodo</b>	<b>Zeolita</b>	<b>EMAs</b>	<b>Tratamiento complementario</b>
	R1	R2				
<b>Testigo</b>	A		$W_{Lodo_1}$	$W_{Zeolita}$	----	----
<b>Tratamiento 1</b>	B	B1	$W_{Lodo_1}$	$W_{Zeolita}$	$W_{EMAs_1}$	----
<b>Tratamiento 2</b>	C	C1	$W_{Lodo_1}$	$W_{Zeolita}$	$W_{EMAs_1}$	Dosificación Mineral
<b>Tratamiento 3</b>	D	D1	$W_{Lodo_1}$	$W_{Zeolita}$	$W_{EMAs_1}$	Pasteurización

Se realizaron controles continuos de parámetros como: pH, temperatura y conductividad eléctrica; y así como la medición inicial y final de:  $DBO_5$ , DQO, sólidos totales y volátiles, humedad, materia orgánica, macronutrientes, coliformes fecales y huevos de helminto. Parte de estos análisis se efectuaron en un laboratorio ambiental acreditado para confirmar los resultados obtenidos de: Materia orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Carbono y Relación C/N, adicionalmente conocer su potencial de uso como enmienda orgánica.

### 3.1.1. Balance de masas del inóculo

Se generó un balance de masa como parte del espesamiento del lodo con zeolita, como se observa en la Figura 2, donde el lodo debe ajustarse a la humedad de 60 al 70 % que ayuda al proceso de digestión anaerobia mesófila (Martínez, 2011 p. 69-74).

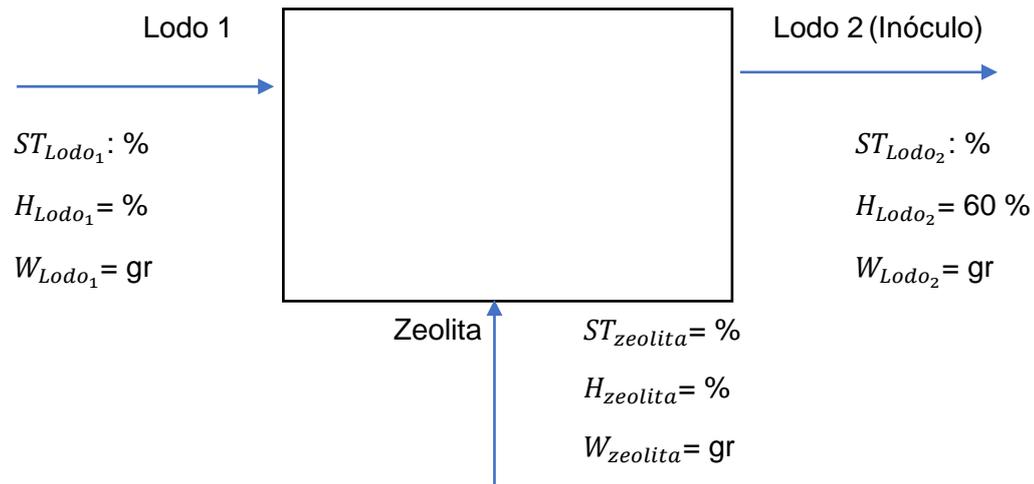


Figura 2. Balance de masa del lodo residual

Cada factor corresponde a:

$ST_x$ : Sólidos Totales (%)

$H_x$ : Humedad (%)

$W_x$ : Peso (gr)

El sistema de ecuaciones generado por el balance de masa se encuentra a continuación:

Solución del Balance General por un Sistema de Ecuaciones (5) en (6)

Valores de la caracterización del lodo				Factor a determinar
$H_{Lodo_1}$	$W_{Lodo_1}$	$H_{zeolita}$	$H_{Lodo_2}$	$W_{zeolita}$

(Ecuación 5)

$$W_{Lodo_2} = W_{Lodo_1} + W_{zeolita}$$

(Ecuación 6)

$$(H_{Lodo_2} * W_{Lodo_2}) = (H_{Lodo_1} * W_{Lodo_1}) + (H_{zeolita} * W_{zeolita})$$

$$W_{zeolita} - W_{zeolita} = \frac{(H_{Lodo_1} * W_{Lodo_1}) - (H_{Lodo_2} * W_{Lodo_2})}{H_{Lodo_2} - H_{zeolita}} \quad (5) \text{ en } (6)$$

### 3.1.2. Porcentaje masa/masa de EMAs

Según Fioravanti, el porcentaje masa/masa que asegura la eficiencia de las EMAs en como bioestabilizadores de lodos residuales es del 10% (m/m) (Fioravanti et al., 2005, pp. 69), donde se tiene la siguiente ecuación:

Solución del porcentaje masa/masa del bioestabilizador:

Peso del inóculo	Factor a determinar
$W_{Lodo_2}$	$W_{EMAs}$

(Ecuación 7)

$$\% \text{ m/m} = \frac{W_{EMAs}}{W_{EMAs} + W_{Lodo_2}}$$

$$10 \% = \frac{W_{EMAs}}{W_{EMAs} + W_{Lodo_2}}$$

$$0.1 \times (W_{EMAs} + W_{Lodo_2}) = W_{EMAs}$$

$$W_{EMAs} - (0.1 \times W_{EMAs}) = 0.1 \times W_{Lodo_2}$$

$$W_{EMAs} = \frac{0.1 \times W_{Lodo_2}}{0.9}$$

## 3.2. Recolección de Muestras

### 3.2.1. Recolección del lodo residual

La extracción del lodo residual se realizó en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la parroquia Gamboa, ubicada en el cantón Patate de la provincia de Tungurahua, ubicación que se observa en la Figura 3. Según el Jefe de Junta Parroquial de Gamboa, la PTAR abastece a 150 familias, de las parroquias de Gamboa e Inapi. Con la ayuda de dos operadores de la PTAR, se extrajo 4 canecas de lodo residual digeridos por 28 días, de un tanque séptico de origen primario.

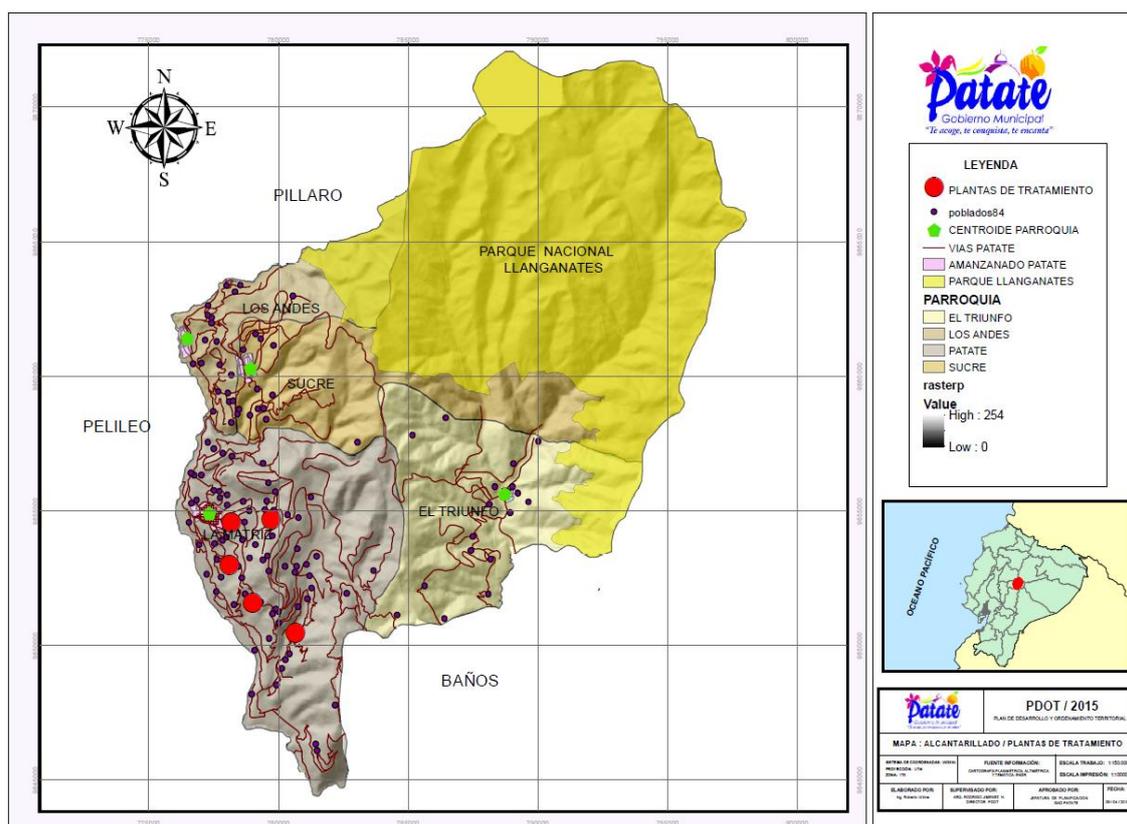


Figura 3. Mapa de Ubicación de la PTAR de Gamboa

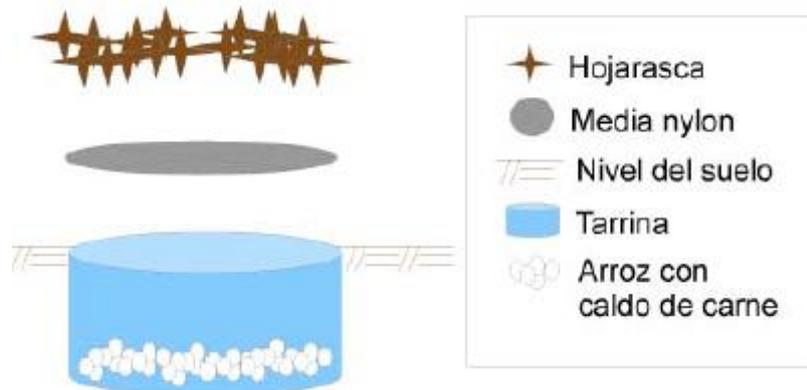
### 3.2. 2. Cultivo de EMAs

Para la obtención de EMAs, fue necesario el aislamiento de estos microorganismos benéficos mediante el cultivo en un medio sólido a base de almidón y proteínas. El cultivo se realizó en un terreno de árboles frutales que no mostraba presencia de contaminación ambiental, situado en el cantón Ambato de la provincia de Tungurahua.

Se empleó el método de (BIOSCA, 2011) para el cultivo de EMAs se detalla en la Figura 4. Dónde se usaron los siguientes materiales:

- 13 tarrinas de plástico
- 13 ligas plásticas
- Tela Nylon
- 2 libras de arroz (almidón)
- Caldo de res (proteína)

Para la preparación del medio, se procedió a la cocción del caldo de res y luego a la cocción del arroz; en los dos casos, se cocinan los ingredientes con agua, no se añade sal. Luego, se añade el arroz en las tarrinas, sellando la parte superior con tela nylon y la liga plástica. Finalmente, se colocan las tarrinas dentro del suelo del terreno, como se indica en la figura 5, procurando que la tarrina esté al ras del nivel del suelo y cubierto con hojarasca. Se debe tener en cuenta la ubicación de las tarrinas, debido a que, si existe precipitación, estas no deben llegar a mojarse.



*Figura 4.* Metodología de cultivo de EMAs

Adaptado de: Lareátegui, 2013



*Figura 5.* Cultivo de EMAs

Las EMAs pertenecieron dos semanas dentro del suelo, tiempo en el que se controló de: animales invasores y posibles inundaciones de las tarrinas por las precipitaciones. Al terminar el tiempo de cultivo de EMAs, las tarrinas se desenterraron, obteniendo diferentes tipos de microorganismos como: actinomicetos, levaduras, bacterias productoras de ácido láctico, hongos de fermentación y bacterias fotosintéticas (Kabongo, 2002) que residían

impregnados en el arroz. La recolección de las EMAs que se observan en la figura 6, constó en retirar una o varias capas de arroz, donde se observe mayor cantidad de microorganismos impregnados en el arroz a distintas profundidades.



*Figura 6. Cosecha de EMAs*

### **3.3. Bioactivadores (Aceleradores Biológicos) y Espesamiento**

En calidad de bioactivadores los humatos son sales de Sodio, Potasio y de ácidos fúlvicos; que llevan quelados microelementos tales como: Fe, Cu, Mg, Mo, Co, Mn y B y macronutrientes (Ca, Fe, Mg, K, P, C, N) (A. Singh et al., 2011).

Mientras que el espesamiento se realizó por la adición al lodo residual de zeolitas cálcicas (Laumontita) al lodo residual, que actuó como agente emulsificante con el lodo; proporcionándolo de propiedades como: la capacidad de intercambio catiónico, capacidad Buffer, pH, capacidad quelante (A. Singh et al., 2011).

### 3.4. Pretratamiento mediante Pausterización

La pausterización se consideró como un tratamiento complementario del diseño experimental. Este tratamiento consiste en someter al inóculo a 70°C durante 30 minutos con la finalidad de eliminar la carga de patógenos contenidos en los lodos residuales (Metcalf & Eddy, 2013).

### 3.5. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia se realizó en función del DCAC, donde constó de siete biorreactores en condiciones mesófilas, ubicados en el laboratorio de aguas en la Universidad de las Américas. Se instalaron siete envases con tapa de material plástico de 4 litros de capacidad a manera de biorreactores, adaptados a una manguera de desfogue para el biogás que produce el lodo según la etapa de digestión anaerobia, como se observa en la Figura 7. Durante 21 días se realizó mediciones de: pH, conductividad eléctrica y temperatura mediante un termómetro digital.



Figura 7. Unidad experimental de los Biodigestores

### 3.6. Análisis fisicoquímico

El análisis fisicoquímico se evaluó en tres distintas fases durante la experimentación, sin embargo, cabe recalcar que los parámetros de control se realizaron de forma inicial, durante y final de la experimentación.

#### 3.6.1. Parámetros Iniciales y finales

##### 3.6.1.1. Determinación de la Humedad en el lodo

Para conocer el contenido de humedad del lodo residual, se procedió a extraer 100gr del lodo residual o biosólido y se sometió a 105°C por 24 horas (Standard Methods, 2013). La humedad del lodo residual se determinó en condiciones iniciales y del biosólido al término de la estabilización.

La ecuación que se utilizó para determinar la humedad contenida del lodo residual o estabilizado es encuentra en la Ecuación 8.

(Ecuación 8)

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_{Lodo} - W_{lodo\ seco} - W_{vaso}}{W_{Lodo}} * 100\%$$

Dónde:

$W_{vaso}$  = peso del vaso de 250 ml vacío

$W_{lodo}$  = peso del lodo

$W_{lodo\ seco}$  = peso del lodo después de 24h a 105°C

##### 3.6.1.2. Determinación del porcentaje de sólidos totales y volátiles

La determinación del porcentaje de sólidos se realizó según la metodología de la ISO 11465:1993. tanto para sólidos totales como volátiles.

- **Determinación de sólidos totales**

En la determinación de sólidos totales del lodo, se utilizó un crisol, en el que se adicionó 25gr de lodo, para luego ser sometido a 105°C por 24 horas en la estufa (Wiseven Wof 165). El porcentaje de sólidos totales se interpreta en función de la ecuación 9.

(Ecuación 9)

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{W_{Lodo\ 2} - W_{crisol}}{W_{Lodo}} * 100\%$$

Dónde:

$W_{crisol}$  = peso del crisol vacío

$W_{lodo}$  = peso del lodo residual

$W_{lodo\ 2}$  = peso del lodo después de 24h a 105°C

- **Sólidos volátiles**

La determinación de los sólidos volátiles es considerada como parte de los sólidos totales, ya que luego de pesar el lodo 2 en una balanza analítica, se sometió al mismo a 550°C por 2 horas en la mufla (Snol E5CN). En este proceso se logró la calcinación del lodo residual que ayuda al cálculo del porcentaje de sólidos volátiles, los cuales, están vinculados con el porcentaje de sólidos fijos. Es de aquí, que se tiene la ecuación 10 que determina los sólidos volátiles y la ecuación 11 que determina los sólidos fijos contenidos en el lodo.

(Ecuación 10)

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{(W_{Lodo\ 2} - W_{crisol}) - (W_{Lodo\ 3} - W_{crisol})}{W_{Lodo}} * 100\%$$

(Ecuación 11)

$$\% \text{ Sólidos Fijos} = \% \text{ Sólidos Totales} - \% \text{ Sólidos Volátiles}$$

Dónde:

$W_{crisol}$  = peso del crisol vacío

$W_{lodo}$  = peso del lodo residual

$W_{lodo_2}$  = peso del lodo después de 24h a 105°C

$W_{lodo_3}$  = peso del lodo después de 2h a 550°C

### 3.6.1.3. Demanda Química del Oxígeno (DQO)

En la determinación de DQO, se utilizó el kit para DQO de rango 0 a 1500 ppm de la industria Lovibond® que comprendió en: Diluir la concentración del lodo residual a 1:100, dónde para asegurar homogeneidad se realizó la agitación magnética de 600 rpm por 10 minutos. Posterior a la homogenización de dilución, se aforó 2 ml de lodo diluido, colocándolo en el kit de DQO. Se siguió las instrucciones recomendadas del kit como: la temperatura de 160°C en el bloque digestor por una hora, dejar enfriar por diez minutos en una gradilla y, por último, medir la concentración de DQO en el espectrofotómetro NANOCOLOR® en el test 0-28.

### 3.6.1.4. Método respirométrico ( $DBO_5$ )

La determinación de  $DBO_5$ , depende del resultado de DQO para conocer la cantidad de volumen de dilución a ser agregada en las botellas OxiTop que permite conocer la cantidad de oxígeno consumido que permite la degradación de la materia orgánica.

Basándose en la guía de uso de OxiTop, se añade la cantidad adecuada de lodo residual adecuada, cautelando que no supere los 4000 ppm de DQO. En este caso, el volumen a añadir de cada tratamiento varió entre 97 a 164 ml con un factor de conversión de 20 y 10 respectivamente. Este procedimiento se

realizó durante cinco días, siendo el último día el valor principal en que se multiplicó por el factor de conversión.

### **3.6.2. Control de parámetros fisicoquímico en el proceso**

El análisis de los parámetros de control como el pH, temperatura del lodo digerido y conductividad eléctrica; permitió determinar la etapa precisa que la digestión anaerobia cursaba en la estabilización.

#### **3.6.2.1. Temperatura**

La medición de temperatura interna del lodo en los biodigestores permitió identificar que la digestión se realizaba en condiciones mesófilas, pero con tendencia a incrementar según con el paso de los días de la experimentación. Para realizar este procedimiento, se utilizó un termómetro digital para alimentos debido a su alta sensibilidad que genera una medición exacta.

#### **3.6.2.2. pH**

Para la determinación del pH, se usó el equipo BOECO Germany, que ayudó a medir pH del lodo residual y sus tratamientos. El procedimiento constó en introducir dos electrodos que corresponden al medidor de pH y temperatura en un vaso de precipitado con la dilución de 5 ml del inóculo y sus tratamientos en 30 ml de agua destilada. Fue necesario la agitación de la dilución por unos 5 minutos para garantizar la homogenización en el sobrenadante.

#### **3.6.2.3. Conductividad eléctrica**

La determinación de la conductividad eléctrica permite determinar se realizó en el equipo HANNA HI 2550, donde se utilizó un frasco vacío de solución buffer para calibrar este equipo para añadir la dilución utilizada en la determinación de pH en el 3.7.2.2., introduciendo dos electrodos que miden conductividad eléctrica y temperatura.

### 3.6.3. Determinación de componentes de abono orgánico

Se determinan los componentes del lodo como abono orgánico cuando este logró su estabilización. Para conocer estos componentes del abono orgánico, se realizaron distintas determinaciones como: materia orgánica, relación NPK y relación C/N; que se observan en la Tabla 9. El análisis se realizó en un laboratorio acreditado conocido como AGRARPROJECT, laboratorio especialista en calidad de suelos.

Tabla 9.

*Metodología de los parámetros del abono orgánico*

<b>Parámetro</b>	<b>Metodología</b>
<b>Materia Orgánica</b>	LOI (DIN-EN 13039)
<b>Nitrógeno Total (N)</b>	Nitrógeno Total Kjeldahl: Método "Semi-Micro-Kjeldahl" (US Standard Methods 4500-NorgC)
<b>Fósforo (P)</b>	"Vanadomolybdophosphoric Acid" (ISO 6878-1, EN 1189)
<b>Potasio (K)</b>	Fotómetro de Llama (ISO 9964-3)
<b>Carbono Orgánico Total (C)</b>	PE-25 (APHA 5310 B)

### 3.7. Análisis microbiológico

Según la Agencia de Protección Medio Ambiental por sus siglas en inglés (EPA) los análisis microbiológicos más importantes que se deben determinar son: coliformes fecales y los huevos de helminto, ya que de aquí se parte en determinar la clase de lodo que servirá como enmienda orgánica para el suelo, cuando este llegue a su estabilización.

### 3.7.1. Método de Número Más Probable (NMP)

El método del número más probable según Estándar Methods, es una técnica cuantitativa más representativa por el grado de repeticiones que esta comprende. Sin embargo, los resultados siguen siendo un número aproximado de unidades formadoras de colonias presentes en un gramo de lodo residual o biosólido.

Este método se detalla en la siguiente Figura 8:

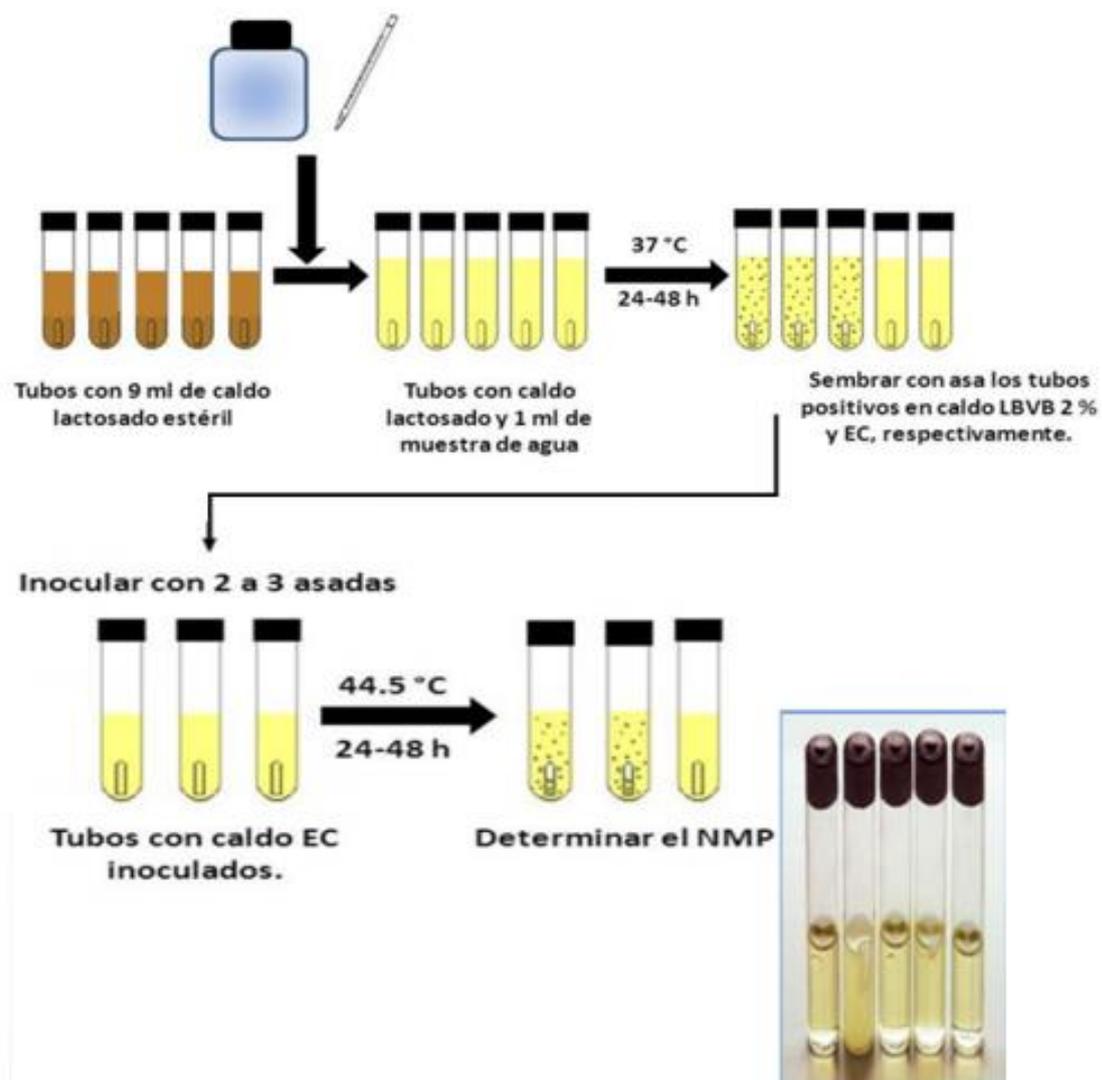


Figura 8. Metodología de coliformes fecales

Adaptado de: Vega, 2015

### **3.7.2. Huevos de helminto en presencia y ausencia**

La metodología de este parámetro se determinó según presencia o ausencia. Este parámetro se realizó una sola vez en el laboratorio de análisis microbiológico LASA, que cuenta con la certificación y acreditación del Gobierno Ecuatoriano; debido a que se reportó la ausencia de huevos de helminto contenidos en el lodo residual, resultado que se puede encontrar en el Anexo 6. Al conocer que el lodo residual presenta ausencia de huevos de helminto en su composición, este parámetro se convierte en insignificante a controlar durante la fase de experimentación.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1. Balance de masa del inóculo**

Partiendo de la Figura 2. se encontró la cantidad de zeolita necesaria para espesar el lodo residual a una humedad del 60% (Martínez, 2013). Para ello, se ejecutaron las ecuaciones 5 y 6 del balance de masa, para encontrar las características ideales del Lodo 2. El reporte de resultados de la cantidad de zeolita necesaria para el espesamiento y la característica final del Lodo 2, se observa en la siguiente Figura 9.

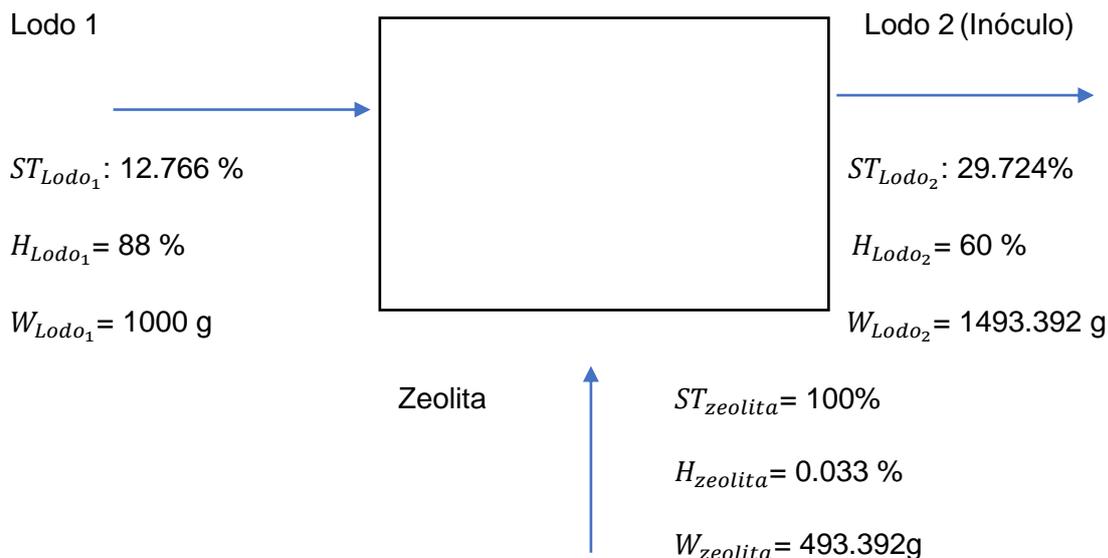


Figura 9. Resultados del balance de masa del inóculo inicial.

Por lo que, la cantidad de zeolita necesaria para el espesamiento del inóculo fue de 493.392g, cantidad necesaria para alcanzar el 60 % de humedad ideal para los procesos de digestión anaerobia (Martínez, 2013).

#### 4.2. Porcentaje de masa/ masa de EMAs

El peso de EMAs necesario para alcanzar la relación 10% m/m según Fioravanti en la ecuación 7, es de 111.11g en relación a el peso del inóculo de 1000g. Los cálculos pueden ser apreciados en el apartado de anexos.

#### 4.3. Reporte de parámetros de control.

El registro de las mediciones realizadas de: pH, conductividad eléctrica y temperatura del lodo, se encuentran en el apartado de anexos los registros de todo el DCAC, mientras que los promedios de estos datos se detallan en las tablas 10, 11 y 12 respectivamente. Las mediciones se reportaron diariamente por un tiempo de 21 días, tiempo que se efectuó el proceso de digestión anaerobia en los biorreactores.

### 4.3.1 Resultados del control de pH

Durante el proceso de la digestión anaerobia, se registró la variación de pH mediante mediciones diarias durante 21 días del tratamiento, reporte datos que pueden ser encontrados en el apartado de anexos. Mientras que, en los siguientes análisis estadísticos, se interpretan las mediciones diarias del pH mediante gráficos de correlación, dispersión y tablas de análisis de ANOVA, que permiten identificar la significancia existente entre el pH y los tratamientos.

#### 4.3.1.1. Dispersión de datos

El reporte de las mediciones de pH realizadas diariamente durante 21 días se representa en la siguiente figura 10, Donde el tratamiento A, presentó un pH entre 8 a 8.5 superior a los tratamientos B, C y D que muestran un pH más agrupado y justado entre ellos con un rango de pH de 5.5 a 6.

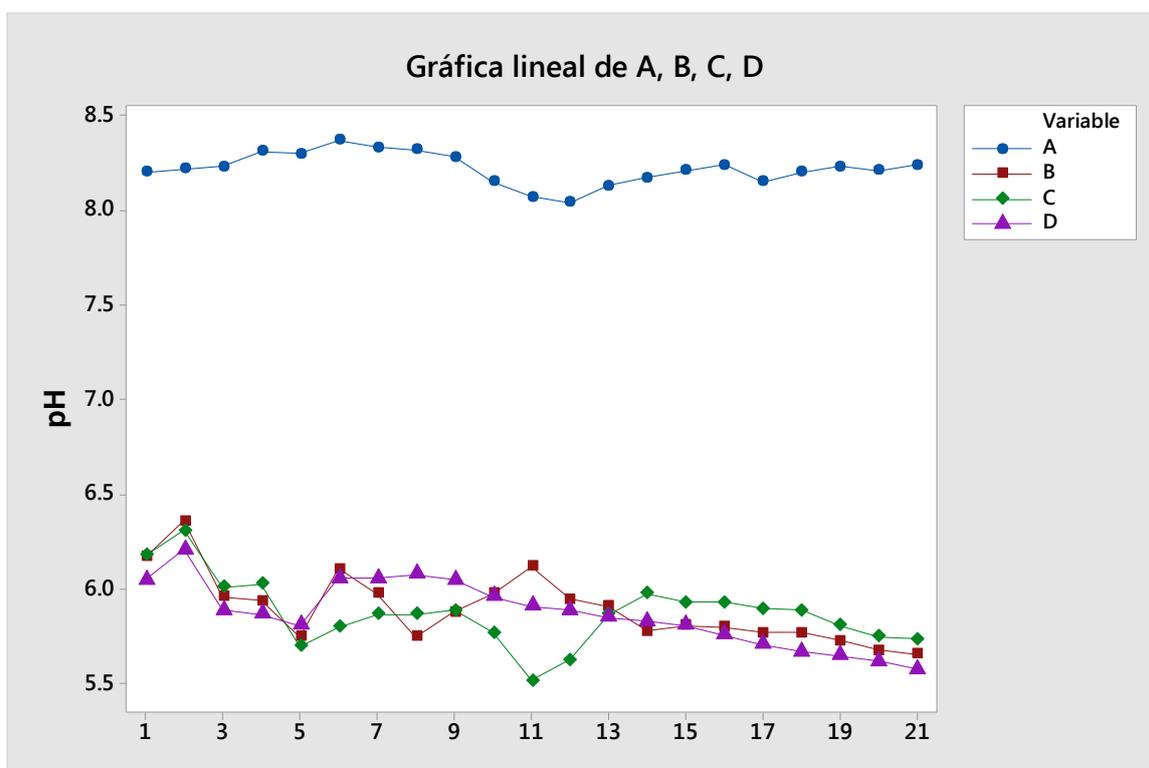


Figura 10. Mediciones diarias del pH durante 21 días

### 4.3.1.2. Diagrama de cajas

En la gráfica de cajas que se detalla en la figura 11, dónde se identificó la tendencia de agrupación del pH con respecto a los tratamientos A, B, C y D mediante el análisis de la mediana y la media que denominó si los tratamientos tienden a tener una variación significativa.

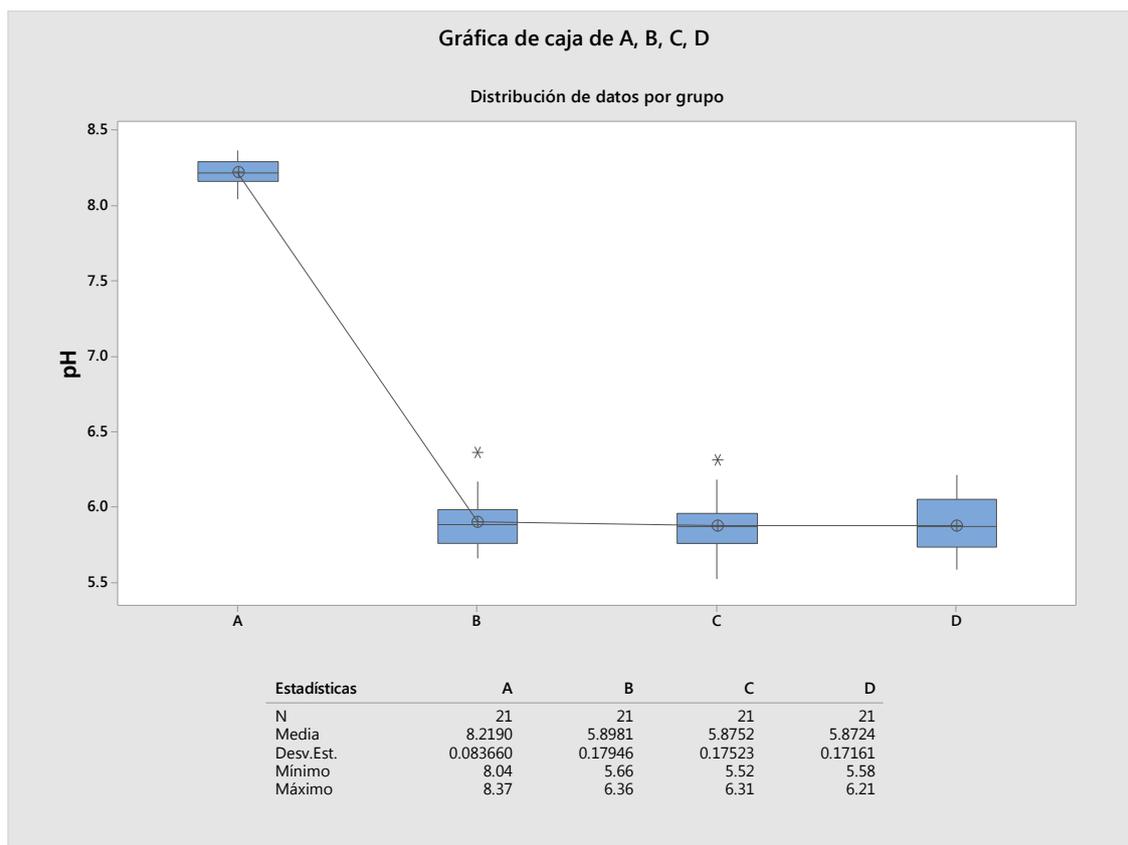


Figura 11. Gráfica de caja del pH vs. Tratamientos A, B, C y D

En la figura 11 se observó que, las medias de los tratamientos C y D con los valores de 5.8752 y 5.8724 respectivamente, se solapan. Esto significa que los datos no presentan variación significativa y que, durante el proceso de digestión anaerobia, estos tratamientos presentan una igualdad de efecto.

Por otro lado, el tratamiento A no se solapa con los demás tratamientos, esto significa que presenta una variación significativa, debido a que el efecto del pH en este tratamiento es diferente entre los tratamientos B, C y D.

### 4.3.1.3. Análisis de ANOVA

El análisis de ANOVA ejecutado por el software Minitab 18, determinó si los tratamientos experimentaron variaciones en el pH o no durante el proceso de digestión anaerobia. A partir de esto, se evaluaron los tratamientos A, B, C y D en función del análisis de varianza, coeficiente de Pearson (R-cuadrado) y evaluación de medias, los cuales se detallan en las siguientes tablas 10 y 11.

Tabla 10.

*Análisis de varianza del pH en los tratamientos*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>R-cuadrado</b>
<b>Factor</b>	3	86.039	28.6795	1154.56	0.000	97.74%
<b>Error</b>	80	1.987	0.0248			
<b>Total</b>	83	88.026				

Tabla 11.

*Análisis de medias del pH*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>IC de 95%</b>
<b>A</b>	21	8.2190	0.0837	(8.1506, 8.2875)
<b>B</b>	21	5.8981	0.1795	(5.8297, 5.9665)
<b>C</b>	21	5.8752	0.1752	(5.8068, 5.9437)
<b>D</b>	21	5.8724	0.1716	(5.8039, 5.9408)

*Nota: Desv.Est. agrupada = 0.157607*

El análisis de la varianza se partió desde el análisis del Valor  $p \leq \alpha$ , donde  $\alpha = 0.05$  y  $p = 0$ . Esto significa que existe significancia., entonces la hipótesis nula se rechaza, por no presentar una distribución normal. Esto quiere decir, que los tratamientos son significativamente diferentes. Mientras que el valor R-cuadrado presentó una correlación superior al 95%, con un valor de 97.74%, esto puede deberse a que se ejecutó una prueba no paramétrica, debido a los valores no normales presentados en el tratamiento A, que no tienen relación con los demás tratamientos B, C y D.

#### 4.3.1.4. Método de Tukey

Para conocer si los tratamientos A, B, C y D tienen relación en ellos, se ejecutó el análisis de parejas del método de Tukey que se detalla en la tabla 12. Este método comprende en identificar el tratamiento que tienda a compartir más agrupaciones posibles cuando interactúan en forma de pares entre tratamientos.

Tabla 12.

*Comparación en parejas de Tukey del pH*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
<b>A</b>	21	8.2190	A
<b>B</b>	21	5.8981	B
<b>C</b>	21	5.8752	B
<b>D</b>	21	5.8724	B

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

Según el reporte de la tabla 12, el tratamiento que presentó mayor agrupación entre factores fue el tratamiento B con respecto a los tratamientos C y D; esto significa que entre estos tratamientos no existe una diferencia significativa en la variación de pH entre ellos. Sin embargo, en el tratamiento A no existió un tratamiento que se empareje; esto significa que el tratamiento A es significativamente diferente a los demás tratamientos B, C y D.

Por otro lado, según los reportes diarios de medición de pH, el tratamiento A que corresponde al testigo presentó un pH no inferior a 8, mientras que los demás tratamientos, tendieron a bajar de manera pareja hasta no presentar significancia.

#### 4.3.1.5. Análisis Multivariante

El análisis multivariante entre los tratamientos A, B, C y D muestra a fondo la relación que existen entre los tratamientos según el análisis del coeficiente de correlación que se observa en la figura 12.

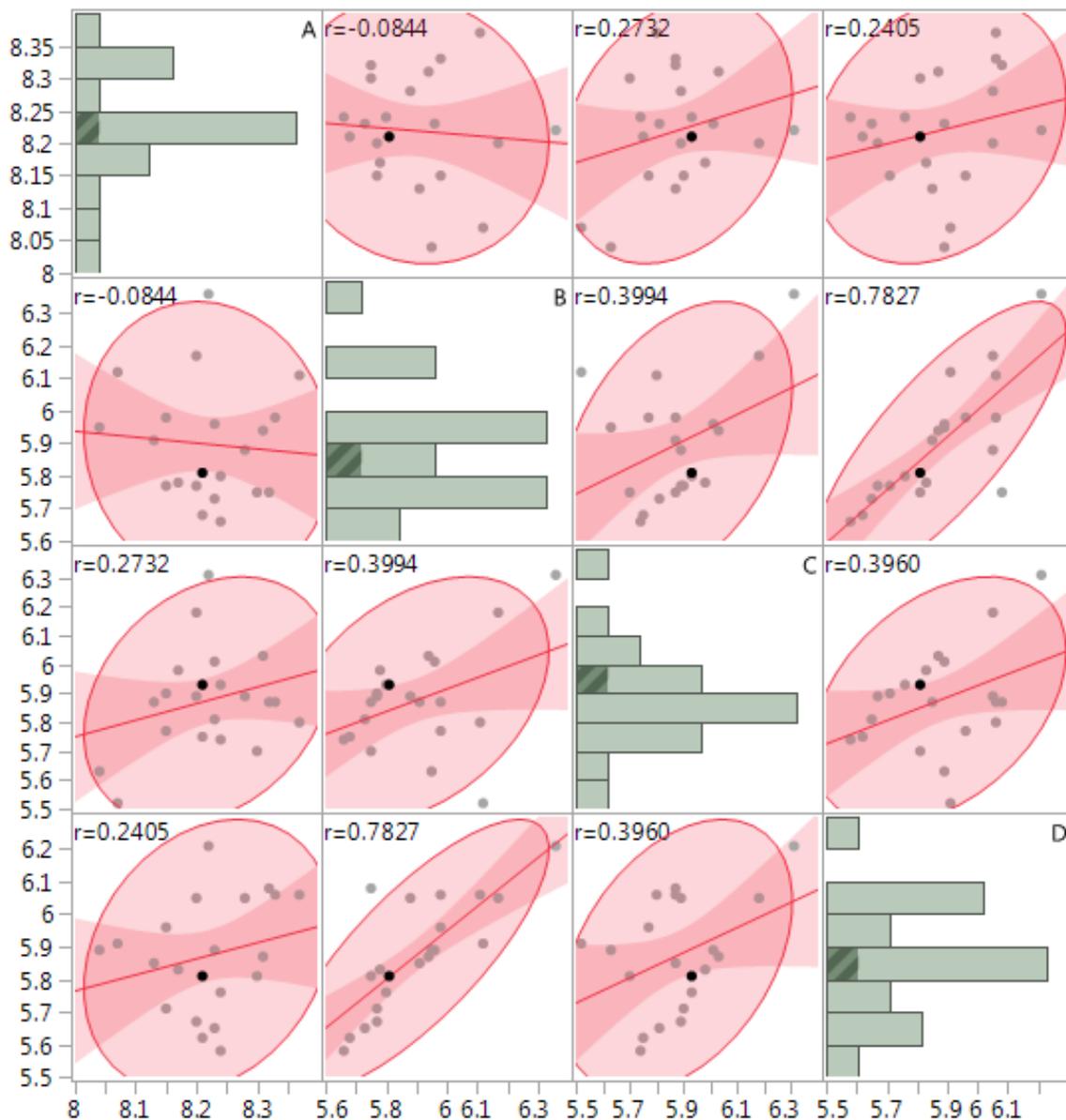


Figura 12. Análisis multivariante entre los tratamientos con respecto al pH.

Justificando el literal 4.3.1.4., el tratamiento B presentó más agrupaciones frente a los tratamientos C y D según el método de Tukey, esto también se confirmó con los coeficientes de correlación expresados en el análisis multivariante de la figura 12. Donde el tratamiento B presentó coeficientes de correlación de: 0.3994 con respecto al tratamiento C y de 0.7827 con respecto al tratamiento D. Partiendo de este punto, los tratamientos B y D son los que presentan la mayor correlación con un  $r = 0.7827$ ; sin embargo, esta correlación se rechaza debido a que el coeficiente resultante es menor al coeficiente de correlación con respecto al nivel de confianza de  $r = 0.95$ , valor mínimo para que la correlación sea significativa. Evaluando estos resultados, se puede atribuir que existe una variación del pH en todos los tratamientos.

#### **4.3.1.6. Análisis general de resultados con respecto al pH**

Partiendo del rechazo de la hipótesis nula en por el Valor  $p \leq \alpha$  del análisis de varianzas y de los análisis multivariantes y sus gráficos se concluye, que existe una variación del pH en todos los tratamientos.

En cuestión del cambio de pH durante el proceso de digestión anaerobia es positivo, debido a que los resultados comparando el tratamiento A (inóculo) como el testigo frente a los demás tratamientos B, C y D. El tratamiento A se mantiene en rangos de pH 8 a 8.5, mientras que los demás tratamientos B, C, y D bajan a rangos de pH de 5.5 a 6.5. Esta reducción del pH se debe a la presencia de las EMAs que; aparte de aportar con hongos, levaduras y bacterias productoras de ácido láctico, que estimulan la fermentación y degradación de la materia orgánica que ocurre a pH ácido (Kabongo, 2002).

Al tomar en consideración las etapas de digestión anaerobia detalladas en el apartado 2.3.2., se estableció que el testigo, se encontró en la etapa metanogénica cuyo pH característico está en el rango de pH de 6.5 a 8.5 (Lay, Li & Noike, 1997). Mientras que los demás tratamientos B, C y D se hallaron en la etapa acidogénica por comprenderse en el rango de pH de 5 a 6 (Montes,

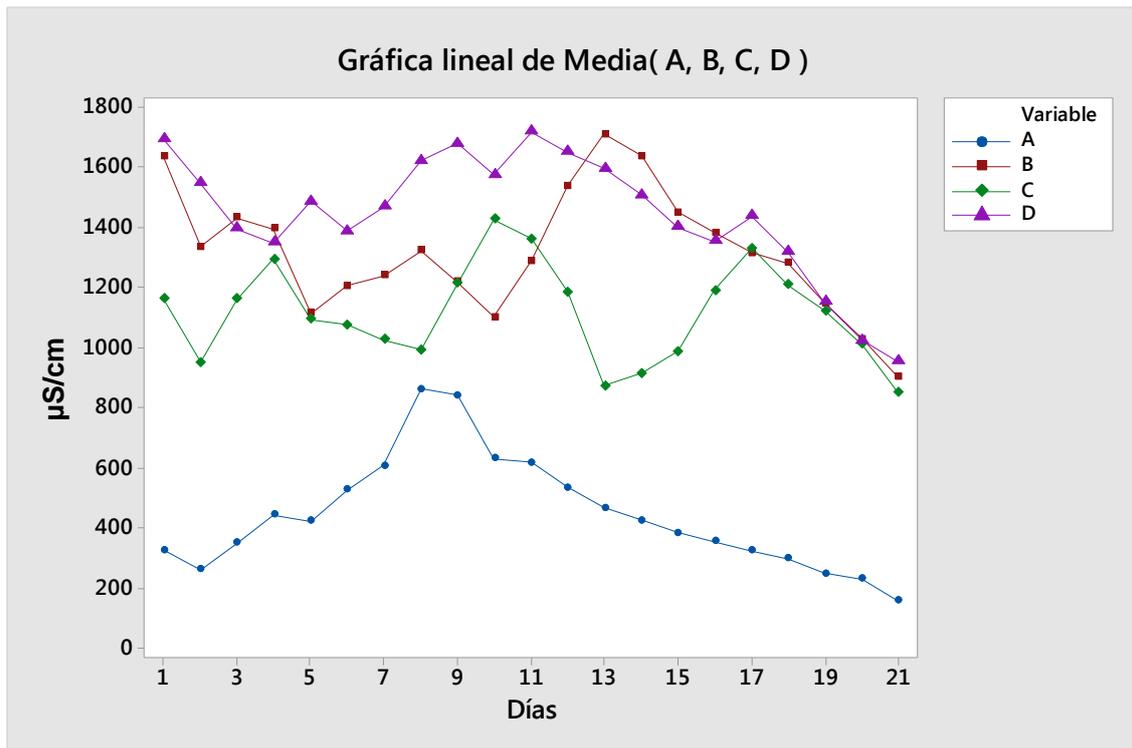
2008). El análisis confirma que el pH de los tratamientos B, C y D está dentro del rango de 5 a 7.5, que según el Congreso Nacional del Medio Ambiente es característico de residuos que pueden ser utilizados como enmienda orgánica para el suelo (CONAMA, 2004).

### **4.3.2 Resultados del control de conductividad eléctrica**

Durante el proceso de la digestión anaerobia, se registró la variación de conductividad eléctrica mediante mediciones diarias durante 21 días del tratamiento, donde el reporte de estas mediciones se encuentra en el apartado de anexos. Mientras que, en los siguientes análisis estadísticos, se interpretan las mediciones diarias de conductividad eléctrica mediante gráficos de correlación, dispersión y tablas de análisis de ANOVA, que permiten identificar la significancia existente entre el parámetro de control y los tratamientos.

#### **4.3.2.1. Dispersión de datos**

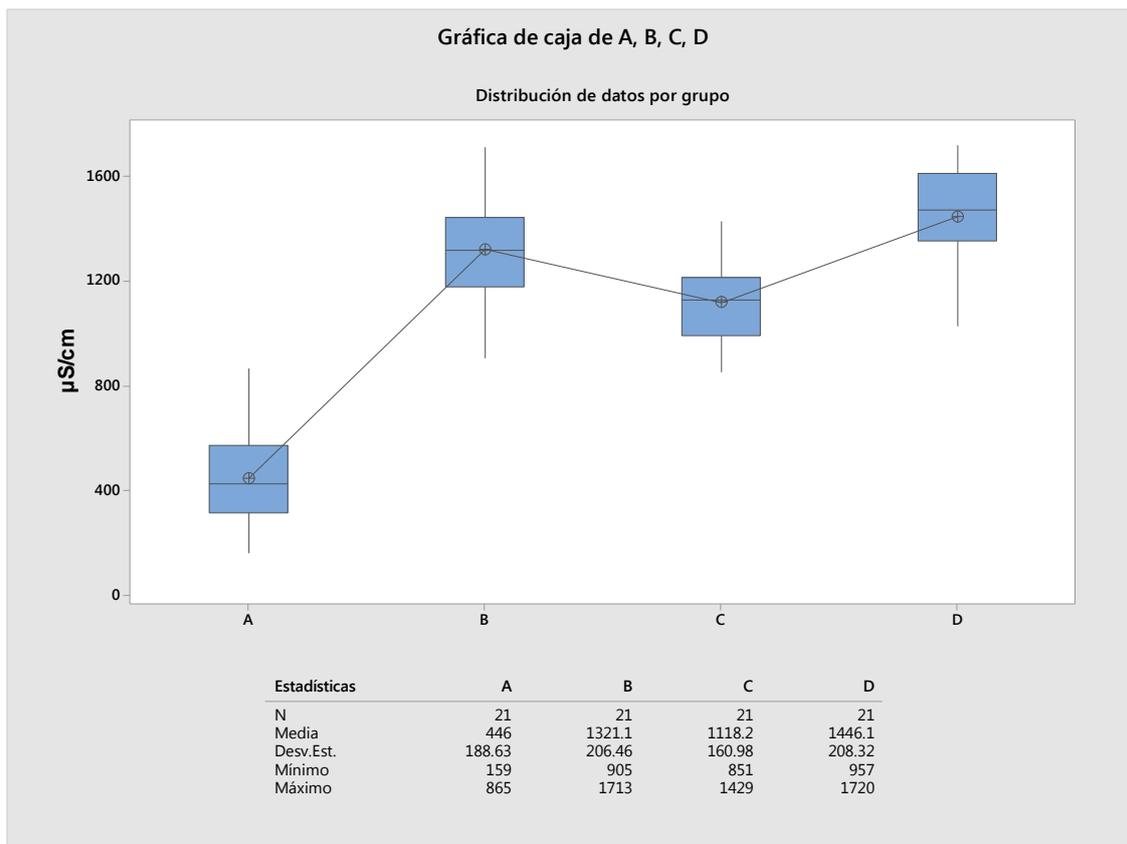
El reporte de las mediciones de conductividad eléctrica realizadas diariamente durante 21 días se representa en la siguiente figura 13, Donde el tratamiento A, presentó una conductividad eléctrica menor a la de los demás tratamientos con un rango de 200 a 800  $\mu S/ cm$ . Mientras que los tratamientos B, C y D muestran tener mayor conductividad eléctrica entre rangos que comprende de 800 a 1700  $\mu S/ cm$ .



*Figura 13.* Mediciones diarias de conductividad eléctrica durante 21 días

#### 4.3.2.2. Diagrama de cajas

En la gráfica de cajas que se detalla en la figura 14, dónde se identificó la tendencia de agrupación de la conductividad eléctrica con respecto a los tratamientos A, B, C y D mediante el análisis de la mediana y la media que denominó si los tratamientos tienden a tener una variación significativa.



*Figura 14.* Gráfica de cajas entre conductividad eléctrica y Tratamientos A, B, C y D

En la figura 14 se observó que las medias de todos los tratamientos no se solapan. Esto significa que los datos presentan una variación significativa entre tratamientos y durante el proceso de digestión anaerobia, estos tratamientos no presentan una igualdad en el efecto de la conductividad eléctrica.

#### 4.3.2.3. Análisis de ANOVA

El análisis de ANOVA se ejecutó en el software Minitab 18, dónde se determinó si los tratamientos experimentaron variaciones en la conductividad eléctrica o no durante el proceso de digestión anaerobia. Se evaluaron los tratamientos A, B, C y D en función del análisis de varianza, coeficiente de Pearson (R-cuadrado) y evaluación de medias, análisis que se detallan en las siguientes tablas 13 y 14.

Tabla 13.

*Análisis de varianza de la conductividad eléctrica*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R-cuadrado
<b>Factor</b>	3	12507027	4169009	113.04	0.000	80.91%
<b>Error</b>	80	2950344	36879			
<b>Total</b>	83	15457372				

Tabla 14.

*Análisis de medias*

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
<b>A</b>	21	446.0	188.6	(362.6, 529.4)
<b>B</b>	21	1321.1	206.5	(1237.7, 1404.5)
<b>C</b>	21	1118.2	161.0	(1034.8, 1201.6)
<b>D</b>	21	1446.1	208.3	(1362.7, 1529.5)

Nota: Desv.Est. agrupada = 192.040

El análisis de la varianza partió desde el análisis del Valor  $p \leq \alpha$ , dónde  $\alpha = 0.05$  y  $p = 0$ . Los resultados muestran que existe significancia, entonces la hipótesis nula se rechaza, por no presentar una distribución normal. Esto quiere decir, que los tratamientos son significativamente diferentes. Por otro lado, el valor de R-cuadrado presentó una correlación inferior al 95%, con un valor de 80.91%. Esto significa que la hipótesis nula vuelve a ser rechazada y que los tratamientos A, B, C y D son significativamente diferentes entre ellos.

**4.3.2.4. Método de Tukey**

Se ejecutó el análisis de parejas del método de Tukey que se detalla en la tabla 15, para conocer si los tratamientos A, B, C y D tienen relación en ellos frente a la conductividad eléctrica. Este método comprende en identificar el tratamiento que tienda a compartir más agrupaciones posibles cuando interactúan en forma de pares entre tratamientos.

Tabla 15.

*Comparación en parejas de Tukey de a conductividad eléctrica*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
<b>D</b>	21	1446.1	A
<b>B</b>	21	1321.1	A
<b>C</b>	21	1118.2	B
<b>A</b>	21	446.0	C

Según el reporte de la tabla 15, el tratamiento que presentó mayor agrupación entre factores fue el tratamiento A con respecto a los tratamientos D y B; esto significa que entre estos tratamientos no existe una diferencia significativa en la variación de conductividad eléctrica entre ellos. Sin embargo, en los tratamientos C y A, se compartió agrupaciones con B y C respectivamente.

#### **4.3.2.5. Análisis Multivariante**

El análisis multivariante entre los tratamientos A, B, C y D muestran que existen relación entre los tratamientos según el análisis del coeficiente de correlación que se observa en la figura 15 con respecto a la conductividad eléctrica.

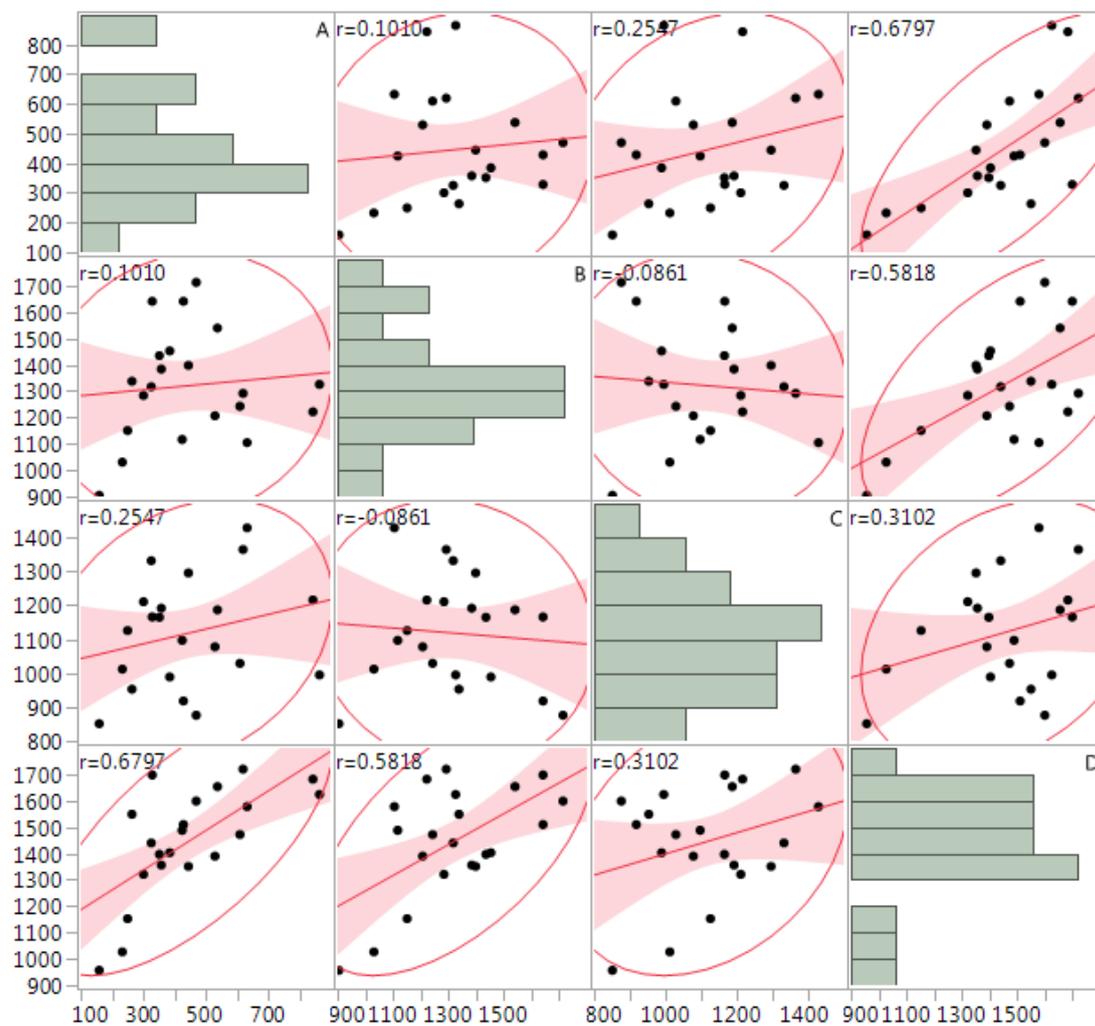


Figura 15. Análisis multivariante entre los tratamientos con respecto a la conductividad eléctrica.

Justificando el literal 4.3.2.4., el tratamiento A presentó más agrupaciones frente a los tratamientos D y B según el método de Tukey, esto también se confirmó con los coeficientes de correlación expresados en el análisis multivariante de la figura 15. Dónde el tratamiento A presentó coeficientes de correlación de: 0.6797 con respecto al tratamiento D y de 0.1010 con respecto al tratamiento B. Partiendo de este punto, los tratamientos A y D son los que presentan la mayor correlación con un  $r = 0.6797$  de entre todas las correlaciones; sin embargo, esta correlación se rechaza debido a que el coeficiente resultante es menor al coeficiente de correlación con respecto al

nivel de confianza de  $r = 0.95$ , valor mínimo para que la correlación sea significativa. Evaluando estos resultados, se puede atribuir que existe una variación de la conductividad eléctrica entre todos los tratamientos.

Para evaluar la importancia de la medición de la conductividad eléctrica y la influencia al proceso de estabilización se realiza un análisis comparativo de su variación frente al pH, como se puede apreciar en la siguiente figura 16.

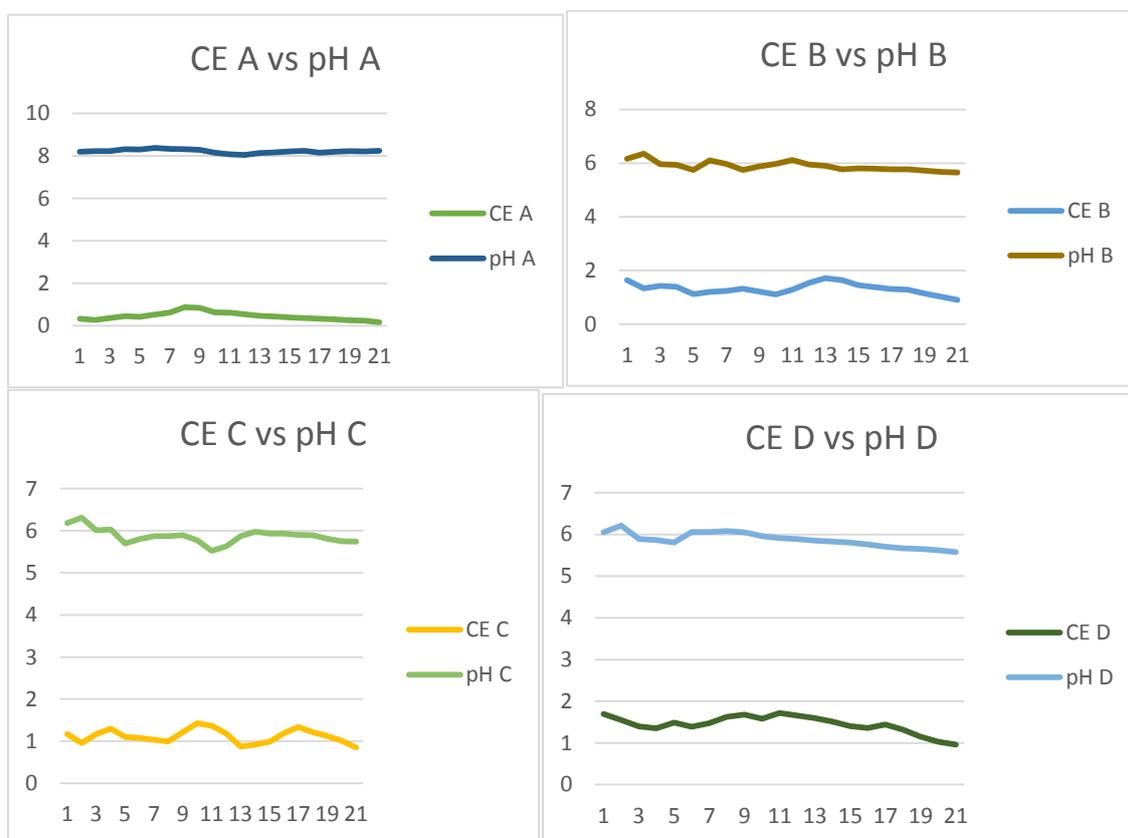


Figura 16. Análisis comparativo entre conductividad eléctrica y pH

Las mediciones de conductividad realizadas durante la experimentación guardan una relación inversamente proporcional, con el pH; aspecto necesario de considerar por cuanto un incremento en la conductividad llevaría a una acidificación excesiva en las unidades de tratamiento que incidiría negativamente en el proceso de estabilización del lodo. Ésta es la razón por la cual, fue necesario el control de la conductividad eléctrica durante la fase de experimentación.

#### **4.3.2.6. Análisis general de resultados con respecto a la conductividad eléctrica.**

Partiendo del rechazo de la hipótesis nula en por el Valor  $p \leq \alpha$  del análisis de varianzas y del análisis multivariante y graficas de detalle, se evidenció que existe una variación de la conductividad eléctrica en todos los tratamientos.

En cuestión del cambio de la conductividad eléctrica durante el proceso de digestión anaerobia es positivo, debido a que el tratamiento A (inóculo) o también conocido como testigo, presentó valores inferiores de 159 a 865  $\mu S/cm$ , a comparación de los tratamientos B, C y D que presenta una conductividad eléctrica de 851 a 1720  $\mu S/cm$ . De aquí parte la importancia de la conductividad eléctrica en los suelos, ya que el contenido de sales disueltas en el suelo aporta al crecimiento de las plantas (Melgratti, 2005). El valor límite de contenido de sales que puede existir en un suelo es de 2dS/m o 2000  $\mu S/cm$  (Quiroga & Bono, 2012) y para que este empiece a ser un tóxico la concentración de salinidad límite es de 4dS/m o 4000  $\mu S/cm$  (USDA, 1999). Partiendo de estos valores máximos de concentración de sales en los suelos, se define que la conductividad presentada por todos los tratamientos está dentro del límite permisible para que estos biosólidos sean dispuestos como enmienda orgánica en el suelo.

#### **4.3.3 Resultados del control de temperatura**

Durante el proceso de la digestión anaerobia, se registró la variación de temperatura dentro de los biodigestores mediante mediciones diarias con un termómetro digital durante 21 días del tratamiento, estas mediciones se encuentran detalladas en el apartado de anexos. Mientras que, en los siguientes análisis estadísticos, se interpretan las mediciones diarias de conductividad eléctrica mediante gráficos de correlación, dispersión y tablas de análisis de ANOVA, que permiten identificar la significancia existente entre el parámetro de control y los tratamientos.

#### 4.3.3.1. Dispersión de datos

El reporte de las mediciones de temperatura realizadas diariamente durante 21 días se representa en la siguiente figura 17. Donde el tratamiento A, presentó una disminución de temperatura muy notable desde el día 13, con una temperatura promedio de 20 °C, hasta reducir a  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  de 19°C hasta acabar los 21 días de la fase de digestión anaerobia. Mientras que los demás tratamientos B, C y D; mostraron un crecimiento rápido de la temperatura de 17°C hasta 23 °C durante el período de estabilización de los lodos residuales.

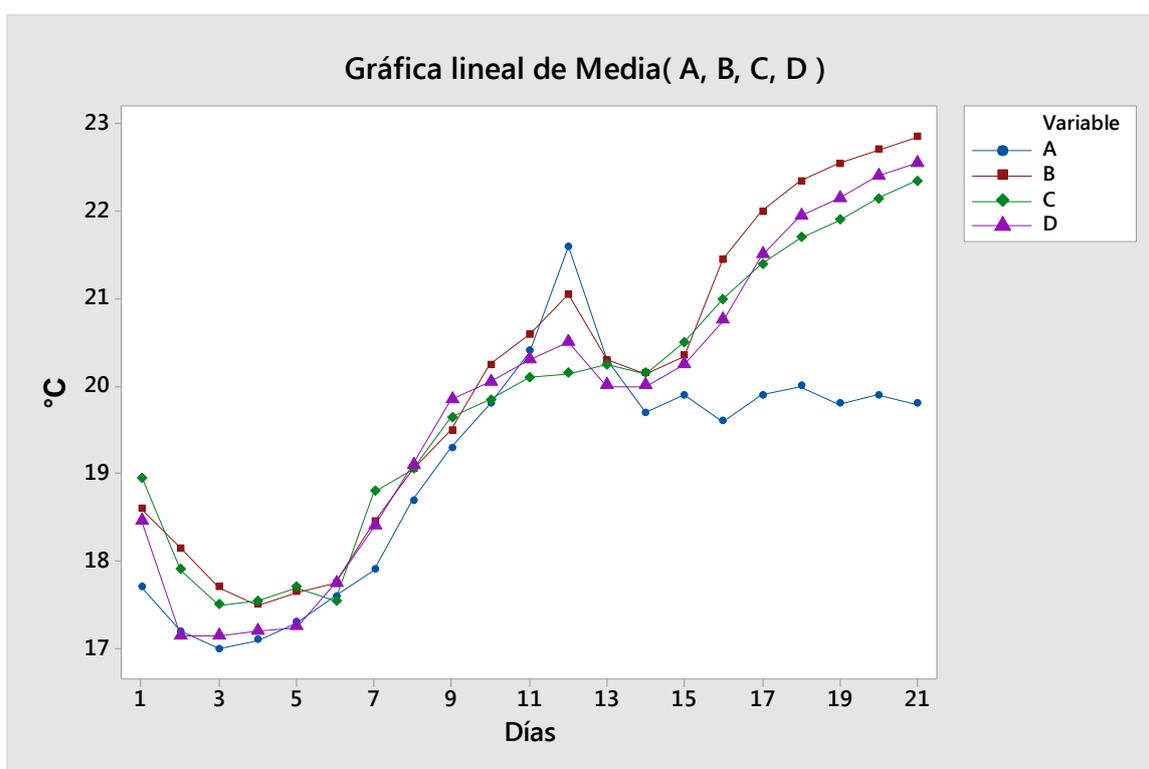
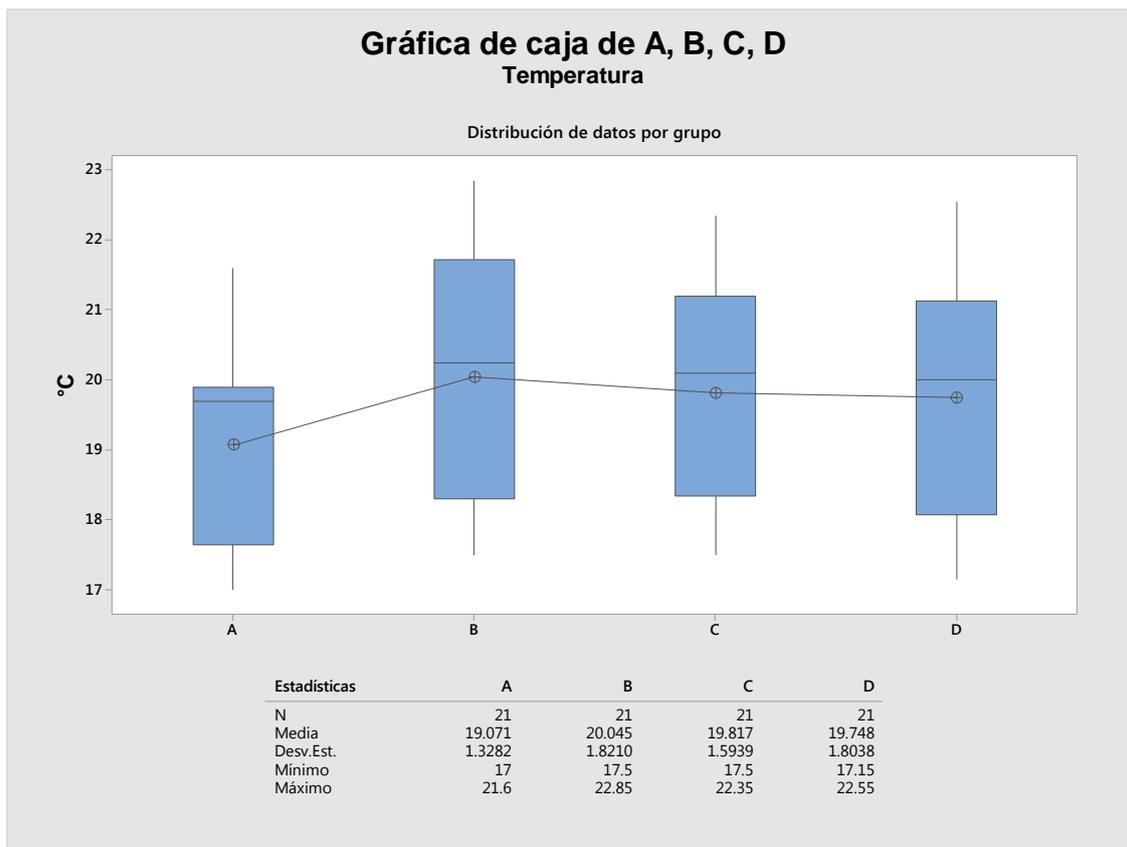


Figura 17. Mediciones diarias de la temperatura durante 21 días

#### 4.3.3.2. Diagrama de cajas

En la gráfica de cajas que se detalla en la figura 18, dónde se identificó la tendencia de agrupación de la temperatura con respecto a los tratamientos A, B, C y D mediante el análisis de la mediana y la media que denominó si los tratamientos presentan una variación significativa.



*Figura 18.* Gráfica de cajas entre la temperatura y Tratamientos A, B, C y D

En la figura 18 se observó que las medias los tratamientos C y D con los valores de 19.817 y 19.748 °C respectivamente, se solapan. Esto significa que los datos no presentan variación significativa y durante el proceso de digestión anaerobia, estos tratamientos presentan una igualdad de efecto de la temperatura.

Por otro lado, el tratamiento A no se solapa con los demás tratamientos, esto significa que presenta una variación significativa, debido a que el efecto de la temperatura en este tratamiento es diferente entre los tratamientos B, C y D.

#### 4.3.3.3. Análisis de ANOVA

El análisis de ANOVA se ejecutó en el software Minitab 18, dónde se determinó si los tratamientos experimentaron variaciones en la temperatura o no durante

el proceso de digestión anaerobia. Se evaluaron los tratamientos A, B, C y D en función del análisis de varianza, coeficiente de Pearson (R-cuadrado) y evaluación de medias, análisis que se detallan en las siguientes tablas 16 y 17.

Tabla 16.

*Análisis de varianza de la temperatura*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>R-cuadrado</b>
<b>Factor</b>	3	11.06	3.686	1.36	0.262	5.84%
<b>Error</b>	80	217.49	2.719			
<b>Total</b>	83	228.55				

Tabla 17.

*Análisis de medias de la temperatura*

<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>IC de 95%</b>
<b>A</b>	21	19.071	1.328	(18.355, 19.787)
<b>B</b>	21	20.045	1.821	(19.329, 20.761)
<b>C</b>	21	19.817	1.594	(19.101, 20.533)
<b>D</b>	21	19.748	1.804	(19.032, 20.464)

*Nota. Desv.Est. agrupada = 1.64881*

El análisis de la varianza se partió desde el análisis del Valor  $p > \alpha$ , donde  $\alpha = 0.05$  y  $p = 0.262$ . Esto significa que se acepta la hipótesis nula pero que no existe evidencia suficiente para concluir que los datos no siguen una distribución normal. Esto quiere decir, que los tratamientos son significativamente iguales. Por otro lado, el valor de R-cuadrado presentó una correlación inferior al 95%, con un valor de 5.54%. Esto significa que los tratamientos no precisan tener un comportamiento lineal.

#### 4.3.3.4. Método de Tukey

Se ejecutó el análisis de parejas del método de Tukey que se detalla en la tabla 18, para conocer si los tratamientos A, B, C y D tienen relación en ellos frente a la temperatura. Este método comprende en identificar el tratamiento que tienda a compartir más agrupaciones posibles cuando interactúan en forma de pares entre tratamientos.

Tabla 18.

*Comparación en parejas de Tukey de la temperatura*

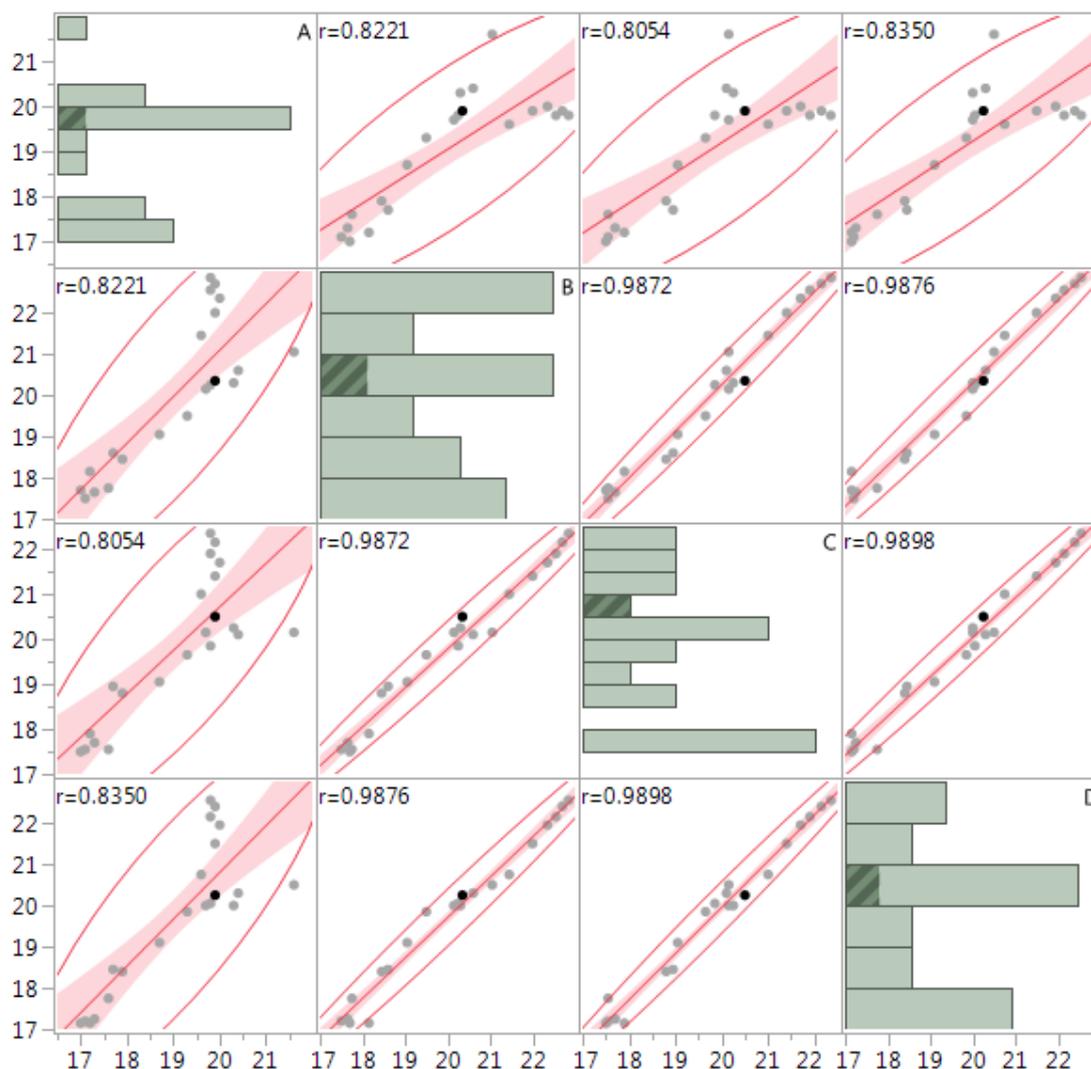
<b>Factor</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
<b>B</b>	21	20.045	A
<b>C</b>	21	19.817	A
<b>D</b>	21	19.748	A
<b>A</b>	21	19.071	A

*Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

Según el reporte de la tabla 18, el tratamiento que presentó mayor agrupación entre factores fue el tratamiento A con respecto a todos los tratamientos B, C y D; esto significa que entre todos estos tratamientos no existe una diferencia significativa en la variación de temperatura dentro de los biodigestores.

#### 4.3.2.5. Análisis Multivariante

Mientras que, mediante un análisis multivariante entre los tratamientos A, B, C y D se conoció más a fondo la relación que existen entre los tratamientos según el análisis del coeficiente de correlación que se observa en la figura 19 con respecto a la temperatura.



*Figura 19.* Análisis multivariante entre los tratamientos con respecto a la temperatura.

Justificando el literal 4.3.3.4., el tratamiento A presentó más agrupaciones frente a todos los tratamientos B, C y D según el método de Tukey, esto también se confirmó con los coeficientes de correlación expresados en el análisis multivariante de la figura 19. Dónde el tratamiento A presentó coeficientes de correlación de: 0.8221 con respecto al tratamiento B; 0.8054 con respecto al tratamiento C y de 0.8350 con respecto al tratamiento D. Sin embargo, al analizar profundamente toda la matriz de correlaciones, se encontró que el tratamiento B frente a los tratamientos C y D son los que presentan mayor correlación frente a todos los pares. Las correlaciones que el

tratamiento B tiene con los tratamientos C y D son de 0.9872 y 0.9876 respectivamente. Estas correlaciones se aceptan, debido a que el coeficiente resultante es mayor al coeficiente de correlación con respecto al nivel de confianza de  $r = 0.95$ , valor mínimo para que la correlación sea significativa. Evaluando estos resultados, se puede atribuir que no existen variaciones de la temperatura en los tratamientos B, C y D; mientras que en el tratamiento A si existe variación de temperatura en interacción con los demás tratamientos.

#### **4.3.2.6. Análisis general de resultados con respecto a la temperatura.**

Partiendo de la aceptación de la hipótesis nula por el Valor  $p > \alpha$  del análisis de varianzas que a su vez se justifica con los demás análisis multivariantes y graficas de detalle; se identificó que no existe una variación de la temperatura en todos los tratamientos. Este análisis expone que, el comportamiento de la digestión anaerobia es de carácter mesófila y de reacción exergónica, esto significa que la velocidad de reacción en los procesos fisicoquímicos y biológicos es espontánea; dado que, la reacción permite liberar energía que es empleada por los microorganismos para su metabolismo y reproducción (Webb, 1965, pp.388-389). Durante la experimentación se observaron temperaturas con valores de 17°C en los primeros días de experimentación y valores entre 23 °C al final de la experimentación. Por otro lado, es importante que la temperatura haya aumentado durante el proceso de digestión anaerobia, ya que, si hubiera presentado temperaturas inferiores a 15°C, estas hubieran generado una ineficiente descomposición de materia orgánica, por parte de los microorganismos en cualquiera de las etapas de digestión anaerobia que se encontrara el lodo (Surroop, 2012).

#### 4.4. Reporte de caracterización inicial y final del lodo

##### 4.4.1. Porcentaje de Sólidos totales, fijos y volátiles

La determinación del porcentaje de humedad y sólidos se realizó función de las ecuaciones 4, 5, 6 y 7 que se les encuentra resueltas en el apartado de anexos. Por otro lado, en la tabla 19 se detallan los resultados en porcentajes de la humedad, sólidos totales, fijos y volátiles de los tratamientos A, B, C y D.

Tabla 19.

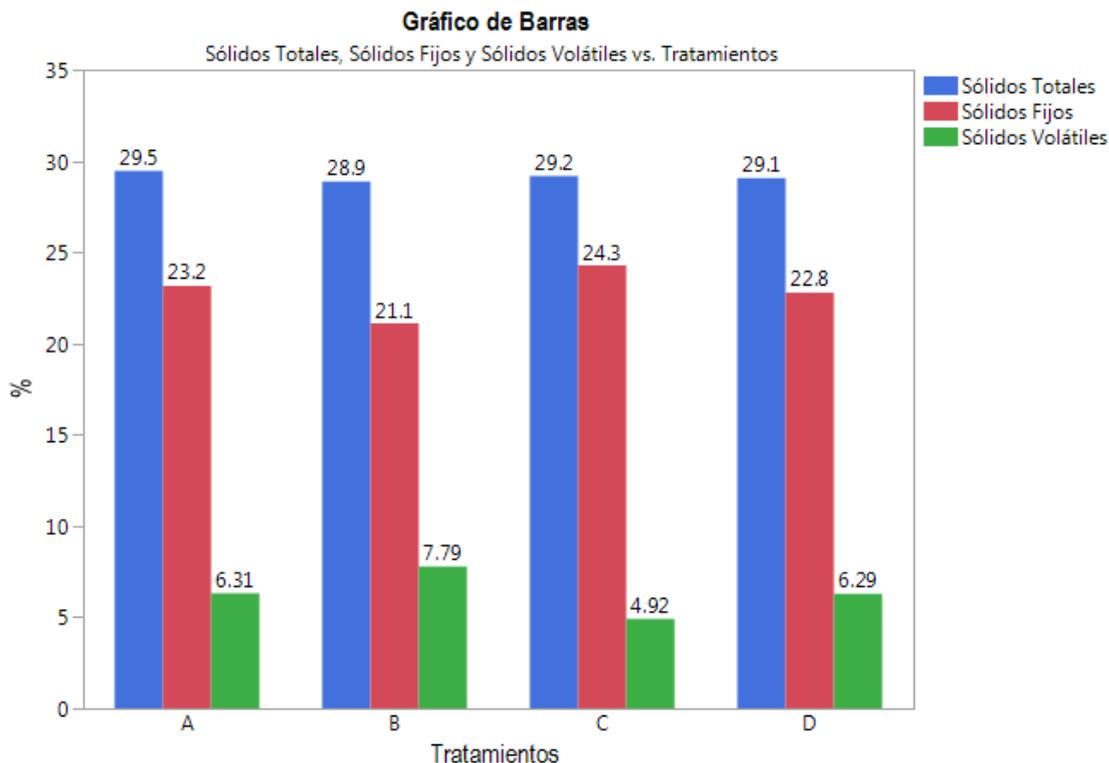
##### *Determinación de Sólidos*

<b>%</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Humedad</b>	70.539	71.114	70.814	70.927
<b>Sólidos Totales</b>	29.460	28.886	29.186	29.073
<b>Sólidos Fijos</b>	23.154	21.099	24.269	22.785
<b>Sólidos Volátiles</b>	6.306	7.786	4.917	6.287

*Nota: A: Testigo; B: Tratamiento 1; C: Tratamiento 2; D: Tratamiento 3*

##### 4.4.1.1. Gráfico de Barras

Para la interpretación del porcentaje de los sólidos fijos y volátiles que están contenidos dentro de los sólidos totales, se generó un gráfico de barras que representa la determinación de sólidos con respecto a los tratamientos A, B, C que se detallan en la siguiente figura 20.

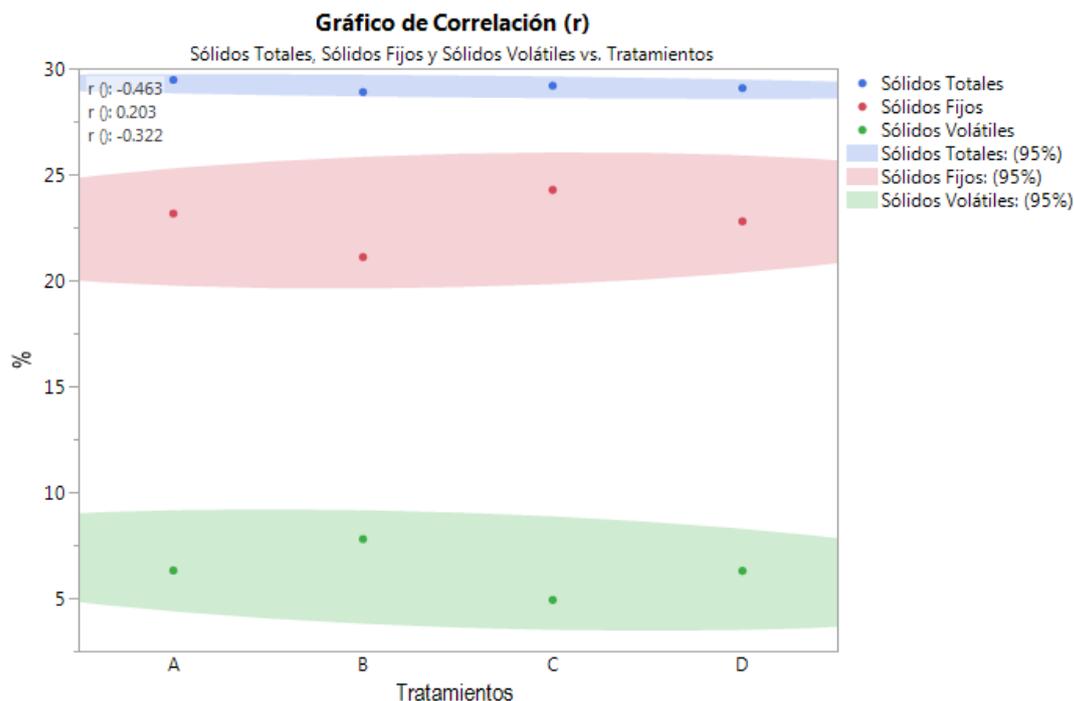


*Figura 20.* Porcentaje de sólidos totales, volátiles y fijos

En la figura 20, se detalla el contenido de sólidos totales en los tratamientos el mismo que está comprendido en un rango de 28.9 a 29.5 %. Mientras que el porcentaje de sólidos volátiles durante el proceso de la digestión anaerobia representa ser uno de los datos más variantes, como en el caso del tratamiento C que presenta ser el que más sólidos volátiles redujo con un 4.92% y el tratamiento B que aumentó en sólidos volátiles en un 7.79% con respecto al testigo que es el tratamiento A, contiene un porcentaje de 6.31%.

#### 4.4.1.2. Gráfico de correlaciones

Para poder interpretar de mejor manera el comportamiento que tiene la determinación de sólidos en los tratamientos, se ejecutó un gráfico de correlaciones que es representado por la figura 21, dónde se analizó la significancia de los datos presenten igualad o diferencia con respecto a un  $r=0.95$  de nivel de confianza.



*Figura 21.* Gráfico de correlación en el contenido de sólidos con respecto a los tratamientos.

En la figura 21, se detalló la correlación que tiene cada determinación de sólidos con un nivel de confianza del 95%, resultando que la relación entre los mismos parámetros como: sólidos totales, fijos y volátiles muestran correlaciones de -0.463, 0.203 y -0.322 respectivamente, donde detallan que su agrupación de datos es menor con respecto a un  $r = -0.95$  de correlación. Lo que significa que, los datos son significativamente diferentes entre tratamientos.

#### 4.4.1.3. Análisis general de resultados con respecto a la determinación de sólidos.

El aporte de sólidos totales, fijos y volátiles de los biosólidos son totalmente diferentes entre los tratamientos. Sin embargo, el aporte de los sólidos volátiles es el más importante para ser definido como enmienda orgánica, donde este componente debe presentar una reducción de al menos el del 25 al 45% de sólidos volátiles (Noyola, 1998). Entre el lodo residual sin tratar y los

tratamientos implementados para lograr la estabilización del biosólido, se identificó al tratamiento C que corresponde a la combinación de EMAs + Humatos + Inóculo, este presentó un porcentaje de 4.917% de Sólidos volátiles con respecto al testigo de 6.306%; dónde el porcentaje de reducción entre los dos parámetros fue de 22.03%. Esta reducción se le atribuye a la capacidad de retención, descomposición y oxidación de la materia orgánica de los humatos, que actúan como activadores microbianos, por cuanto proveen los microelementos necesarios para activar sus sistemas fermentativos. De esta forma el N y el S, no son liberados en forma de compuestos volátiles,  $NH_3$  y  $H_2S$  (Murillo, 2017). Esto significa que si se llevaría a cabo una fase de digestión anaerobia más prolongada, el tratamiento C lograría alcanzar los porcentajes que Noyola recomienda.

Adicionalmente, el tratamiento C presentó el porcentaje más elevado de sólidos fijos de 24.3% con respecto a los demás tratamientos durante la etapa de experimentación, esto se debe a la capacidad de retención de nutrientes que las zeolitas naturales tales como Clinoptilolita y Chabazita poseen; razón por la cual tienen aplicaciones en diversos campos como: tratamiento de aguas, aplicación de fertilizantes para la enmienda del suelo y el crecimiento de la planta (Su, Sánchez, & Yang, 2012)

La retención de sólidos puso a disposición a las EMAs una mayor cantidad de nutrientes que permitió su reproducción masiva, el brusco descenso del pH que condujo a la eliminación de coliformes por: competencia y por valores bajos de pH. El fraccionamiento de la materia orgánica (sólidos volátiles), realizado por las EMAs, al final del proceso permite su transformación en humus (Rittmann, 2001).

#### **4.4.2. Resultados de DQO y $DBO_5$**

La determinación de la concentración de DQO y  $DBO_5$  se realizada en la caracterización inicial en el inóculo y final en todos tratamientos en el tiempo

que duró el proceso de digestión anaerobia, la cual se reportan los resultados en la siguiente tabla 20. Los cálculos realizados para poder llegar al reporte de la tabla 20, se encuentran detallados en el apartado de anexos.

Tabla 20.

*Determinación de DQO y  $DBO_5$*

mg/L	A	B	C	D
DQO	45000	40000	46000	54000
$DBO_5$	14000	24500	23000	28000

*Nota: A: Testigo; B: Tratamiento 1; C: Tratamiento 2; D: Tratamiento 3*

#### 4.4.2.1. Gráfico de Barras

Para la interpretación del contenido de DBO y  $DBO_5$ , se generó un gráfico de barras que se detalla en la figura 22. La cual representa la distribución de la concentración de DBO y  $DBO_5$  con respecto a los tratamientos A, B, C.

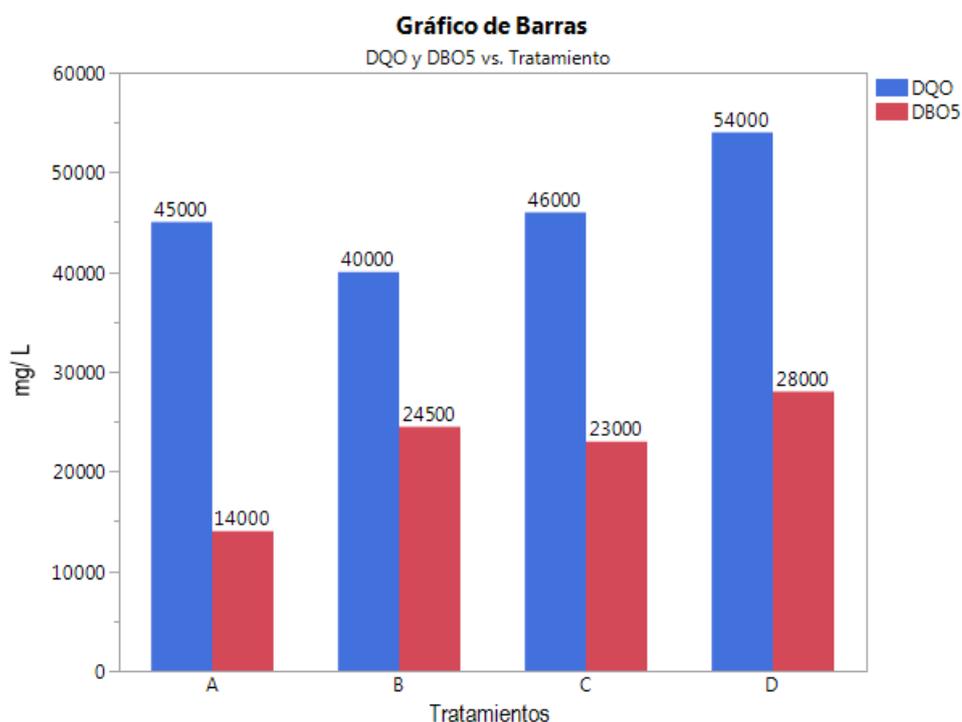


Figura 22. Concentración de DQO y  $DBO_5$  en los tratamientos.

En la Figura 22 se observó que el tratamiento D presentó la mayor concentración de DQO y  $DBO_5$  con valores de 54000 mg/L y 28000 mg/L respectivamente con respecto a los demás tratamientos, en especial frente al tratamiento A que corresponde al testigo que reporta valores de 45000 mg/L de DQO y 14000 mg/L de  $DBO_5$ . Se enfatizó esta relación entre estos dos tratamientos, debido a que el comportamiento del tratamiento D, representa a los demás tratamientos B y C en la siguiente alegación sobre un motivo en el aumento de DQO y  $DBO_5$  de estos tratamientos con respecto al testigo. Entonces, mediante la reducción de agua de al menos 20 % que presentan los lodos en la digestión anaerobia (Lorenzo & Obaya, 2005). Tomando en cuenta el concepto de diluciones de  $C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ , se puede asumir que la concentración de fracción de materia orgánica que estuvo presente en un determinado volumen de agua (inicial), ésta se encuentre más concentrada al término de la digestión anaerobia debido a la reducción del 20% de volumen de agua que le contenía.

#### **4.4.2.2. Gráfico de correlaciones**

Para poder interpretar de mejor manera el comportamiento que tienen las concentraciones de DQO y  $DBO_5$  en los tratamientos, se ejecutó un gráfico de correlaciones que es representado por la figura 23, dónde se analizó la significancia de los datos presenten igualad o diferencia con respecto a un  $r=0.95$  de nivel de confianza.

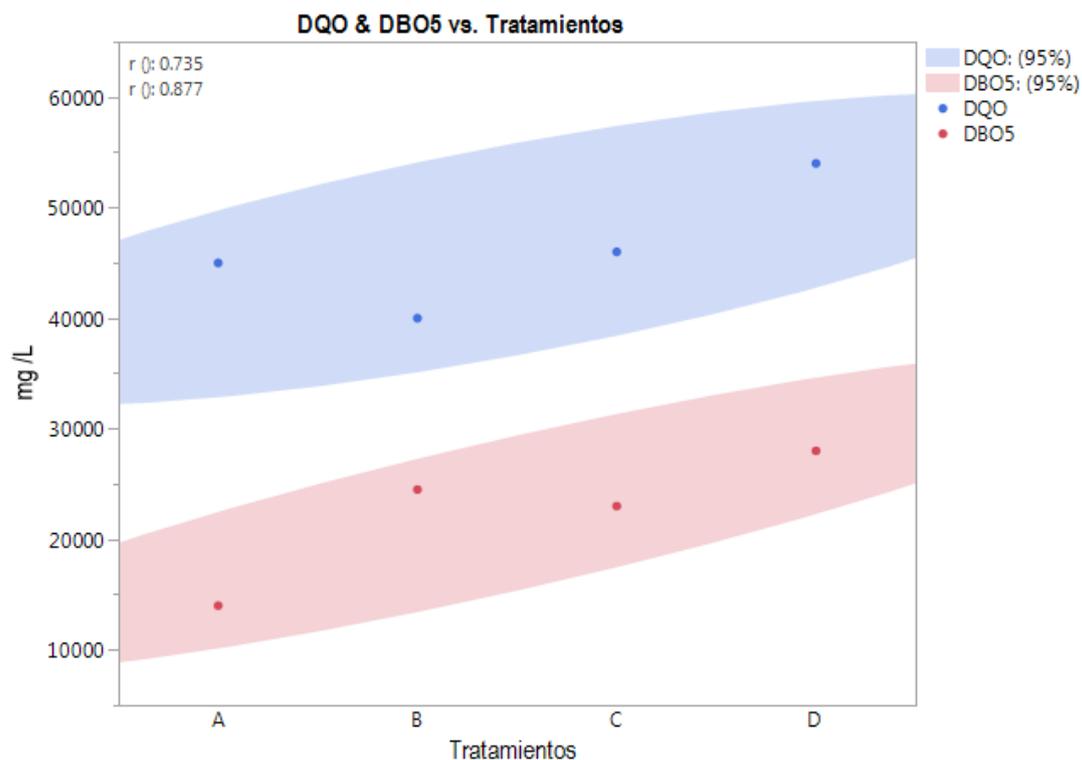


Figura 23. Gráfico de correlación en el contenido de sólidos con respecto a los tratamientos.

La dispersión de los datos que se encontraron en la figura 23, se detalló la correlación que tienen las concentraciones de DQO y  $DBO_5$  con un nivel de confianza del 95% frente a los tratamientos A, B C y D, resultando correlaciones de 0.735 en DQO y 0.877 en  $DBO_5$ . Esto significa que la agrupación de los datos correlacionados es menor con respecto a un  $r = -0.95$  de correlación mínimo para inferir que los datos tienden a ser iguales. Por lo que, en este caso, los datos son significativamente diferentes entre tratamientos.

#### 4.4.2.3. Análisis general de resultados con respecto a la concentración de DQO y $DBO_5$

Las concentraciones de DQO y  $DBO_5$  son significativamente diferentes entre los tratamientos según el análisis del gráfico de correlaciones. Esto quiere decir que existe una importante variación para el DQO y  $DBO_5$  en los tratamientos B,

C y D, con respecto al tratamiento A. Esto se debe a la reducción de agua en al menos de un 20 % (Lorenzo & Obaya, 2005) durante la digestión anaerobia. Entonces, al presentarse una reducción de agua en los tratamientos, esto genera que el contenido de materia orgánica en los biodigestores se encuentre más concentrados con respecto al lodo inicial (Llamas, 2015).

#### 4.4.3. Resultados de componentes del abono orgánico

El contenido total de elementos del abono orgánico sólido, realizado por el laboratorio certificado AGRARPROJECT en muestras de materia seca (lodo seco). Los resultados se detallan en la siguiente tabla 21, mediante porcentajes en los siguientes componentes: Materia orgánica, Carbono (C), Nitrógeno total (N), Fósforo (P), Potasio (K).

Tabla 21.

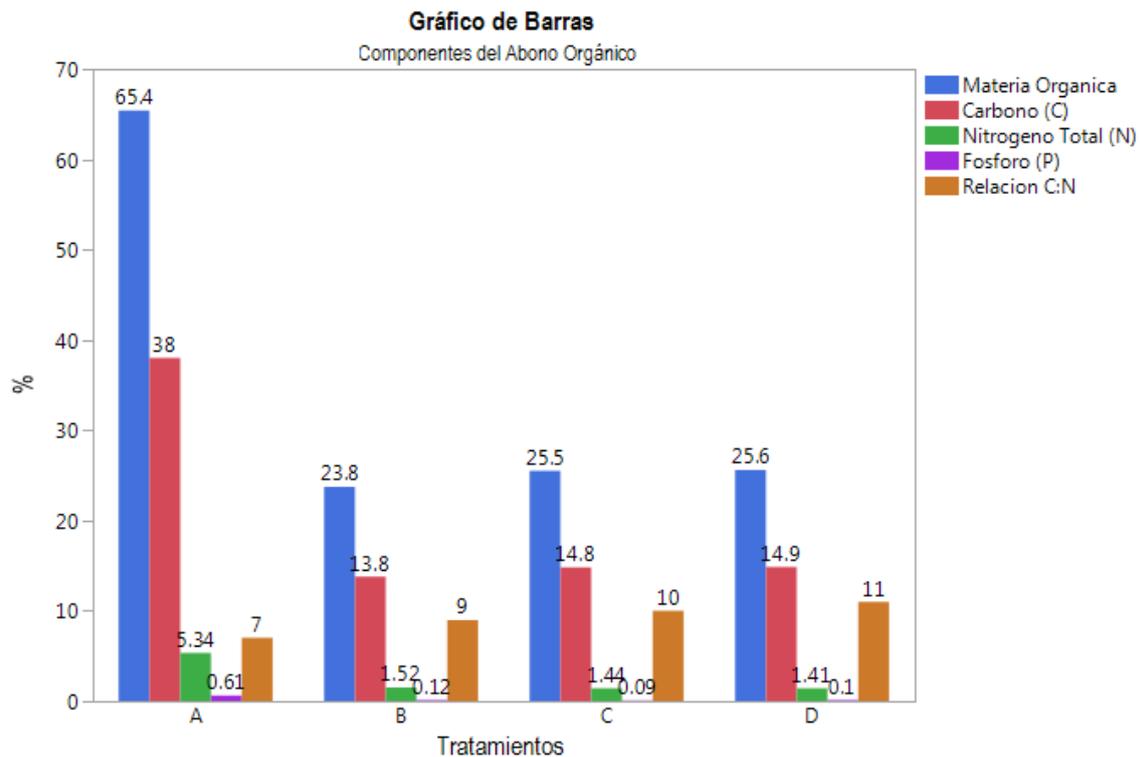
*Contenidos de los tratamientos como abono orgánico*

Parámetro	Unidad	Lodo	B	C	D	Recomendado
<b>Materia Orgánica</b>	%	65.4	23.75	25.50	25.60	≥ 25 (6)
<b>Carbono (C)</b>	%	38.0	13.8	14.80	14.85	> 26.1 Tipo A > 14.5 Tipo B (1)
<b>Relación C:N</b>	-	7:1	9:1	10:1	11:1	10 – 25 Tipo A 10 – 40 Tipo B (3)
<b>Nitrógeno Total (N)</b>	%	5.34	1.52	1.44	1.41	> 0.8 (1) > 2.0 (2)
<b>Fósforo (P)</b>	%	0.61	0.12	0.09	0.10	0.15 – 1.5 (1)
<b>Potasio (K)</b>	%	0.10	0.20	0.26	0.22	0.0215 – 0.025 (4)

Adaptado de: (1) CONAMA, 2004; (2) Soto, 2003; (3) Metcalf & Eddy, 2013; (4) Serapio & Bruzon, 1996; (5) EPA, 2018. (6); NAREA, 2004

##### 4.4.3.1. Gráfico de Barras

Para la interpretación de la dinámica de los componentes del biosólido que serán aportados como enmienda orgánica al suelo, se ejecutó un gráfico de barras en la figura 24, el cual ayuda de forma visual a identificar el cambio que tuvo el biosólido en sus componentes desde su caracterización inicial y final.



*Figura 24.* Porcentaje de componentes del biosólido como abono orgánico

En la figura 24 se observó como los porcentajes de componentes del abono orgánico reducen en los tratamientos B, C y D frente al tratamiento Lodo inicial, que no está mezclado con zeolita. Esto puede justificarse en la adición de EMAs que son organismos vivos que al igual de los patógenos se alimentan de los nutrientes del biosólido y fraccionan la materia orgánica (Wenzl, 2006) mientras el proceso de digestión anaerobia continua.

#### 4.4.3.2. Gráfico de correlaciones

Para poder interpretar de mejor manera el comportamiento que tienen los componentes del biosólido como abono orgánico en los tratamientos A, B C y D, se ejecutó un gráfico de correlaciones que es representado por la figura 25, dónde se analizó la significancia de los datos presenten igualad o diferencia con respecto a un  $r=0.95$  de nivel de confianza.

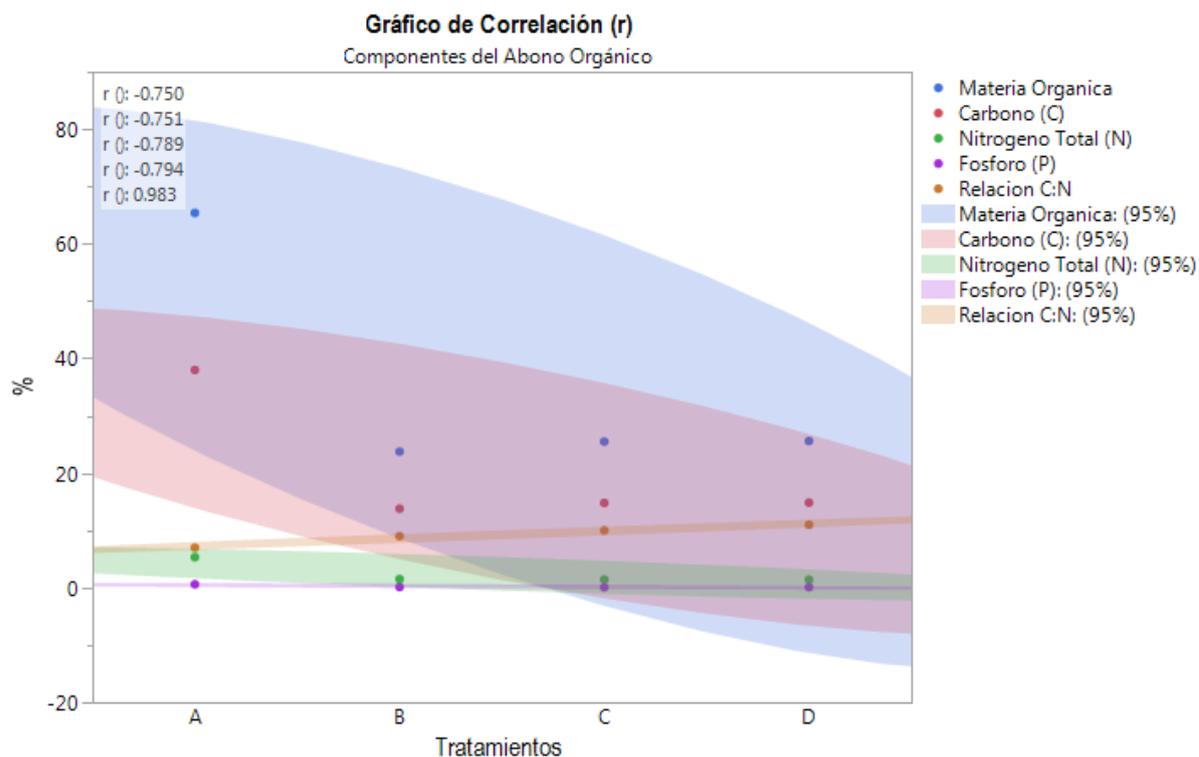


Figura 25. Gráfico de correlación entre los componentes del abono orgánico

La dispersión de los datos que se encontraron en la figura 25, se detalló la correlación que tienen los componentes de abono orgánico del biosólido con un nivel de confianza del 95% frente a los tratamientos A, B C y D, resultando correlaciones de -0.750 en materia orgánica, -0.751 en carbono, -0.789 en Nitrógeno, -0.794 en fósforo y 0.983 en relación C: N. Esto significa que la agrupación de todos los datos correlacionados de los componentes del abono orgánico, exceptuando la relación C: N, son menores con respecto a un  $r = -0.95$  de correlación mínimo para inferir que los datos responden a tener una tendencia de datos iguales. Por lo que, en este caso, la materia orgánica, carbono, nitrógeno, y fósforo son significativamente diferentes entre tratamientos. Mientras que la relación C: N es el único componente que es significativamente igual entre los tratamientos.

#### 4.4.3.3. Análisis general de resultados con respecto a la composición del abono orgánico.

Los porcentajes de los componentes de materia orgánica en todos los tratamientos, exceptuando la relación C: N, tienen a ser significativamente diferentes. Estos componentes tienden a reducir los porcentajes de en los tratamientos debido a la presencia de EMAs, humatos y zeolita, que están se encargan de fraccionar y degradar materia orgánica y consumir nutrientes (Wenzl, 2006). Sin embargo, la composición de estos abonos orgánicos de cada tratamiento puede tener una buena calidad según lo detalla la tabla 23 con la celda de valores recomendados para abonos orgánicos para el suelo. Dónde:

- El porcentaje de materia la materia orgánica en los tratamientos: A con 65,4%, C con 25.50 % y D con 25.60%; cumplen con el porcentaje de  $\geq 25\%$  (NAREA, 2004)
- El porcentaje de carbono en el testigo con 38% se lo considera de calidad clase A al biosólido. Mientras que los tratamientos C con 14.80% y D con 14.85%, se los considera como biosólidos de clase B (CONAMA, 2004)
- La relación C: N, en los tratamientos C y D presentan una relación de 10:1 y 11:1 respectivamente, el cual le permite ser considerado como un biosólido de clase A por entrar en el rango de 10 a 25: 1 (Metcalf & Eddy, 2013)
- El porcentaje de nitrógeno total en todos los tratamientos son  $> 0.8$  (CONAMA, 2004). Por lo tanto, el biosólido sirve como enmienda orgánica en el suelo.
- El porcentaje de fósforo, en los tratamientos A con 0.61% y B con 0.12%, presentan tener la fracción recomendada por contenerse en el rango de 0.15 a 1.5 %
- El porcentaje de potasio, en todos los tratamientos excede relación de los valores de recomendados de 0.0215 a 0.025 % (Serapio & Bruzon, 1996)

## 4.5. Resultados del análisis microbiológico

### 4.5.1. Resultados de coliformes fecales en NMP/gr

La cantidad de coliformes fecales encontrados en un gramo de biosólido, se detallan en la siguiente tabla 22. En la que se expresan el NMP de coliformes fecales que fue hallado en un gramo de biosólido de cada tratamiento.

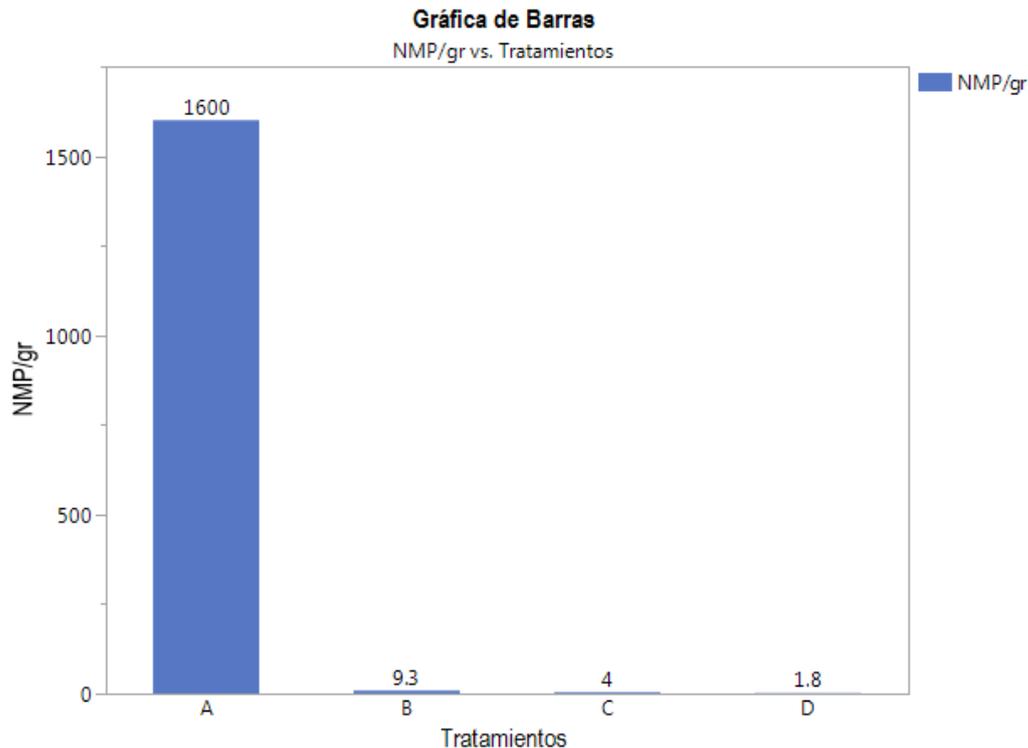
Tabla 22.

*NMP/gr de coliformes fecales*

Dilución	Unidad	A	B	C	D
$10^{-1}$	+	5	2	1	0
$10^{-2}$	+	5	2	1	0
$10^{-3}$	+	5	0	0	0
<b>Total</b>	NMP/gr	> 1600	9.3	4	< 1.8

#### 4.5.1.1 Gráfico de Barras

Para la interpretación de la dinámica de las coliformes fecales en los tratamientos, se detalló un gráfico de barras en la figura 26, el cual, mediante forma visual, indica la cantidad de coliforme que se halló en cada tratamiento de un gramo de biosólido.

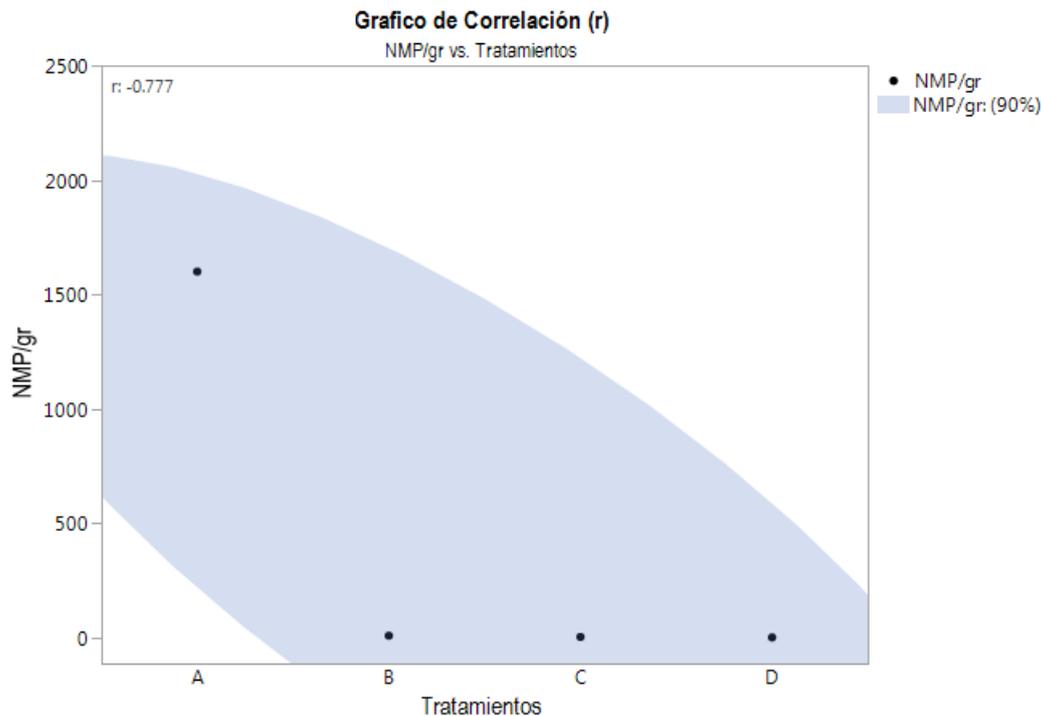


*Figura 26.* NMP de coliformes fecales.

En la figura 26, se detalla la Número Más Probable de coliformes encontradas en cada uno de los tratamientos en un gramo de biosólido. Dónde el Tratamiento A, que corresponde al testigo, presenta el mayor número de coliformes fecales con > 16000 NMP /gr respecto a los demás tratamientos B con 9.3 NMP/gr, C con 4NMP/gr y D con <1.8 NPM/gr. Los valores reportados de los tratamientos B, C y D, da a asumir la eficiencia del tratamiento con EMAs en lodos residuales, ya que la población de patógenos disminuyó de manera exponencial.

#### 4.5.1.2. Gráfico de correlación

Para poder interpretar de mejor manera el comportamiento las coliformes fecales según la implementación de los tratamientos A, B C y D, se ejecutó un gráfico de correlaciones que es representado por la figura 27, dónde se analizó la significancia de los datos presenten igualad o diferencia con respecto a un  $r=0.95$  de nivel de confianza.



*Figura 27.* Gráfico de correlación del NMP de coliformes fecales en los tratamientos

La figura 27, presenta la dispersión de los datos en función de la correlación que tienen la cantidad de coliformes fecales encontradas en un gramo de biosólido con un nivel de confianza del 95% frente a los tratamientos A, B C y D, resultando una correlación de 0.777. Esto significa que la agrupación de los datos correlacionados en el NMP/gr de coliformes fecales, es menor con respecto a un  $r = -0.95$  de correlación mínimo, en tal forma que los datos tienden a ser iguales. Entonces, se asume que los tratamientos son significativamente diferentes.

#### 4.5.1.3. Análisis general de resultados del NMP/g de coliformes fecales

Partiendo de que, los tratamientos realizados en la experimentación son significativamente diferentes entre ellos. Se puede decir que es un aporte positivo en esta investigación. Debido que uno de los objetivos principales en la estabilización de los lodos residuales provenientes de PTAR, era la reducción de carga patógena, que en este caso es el contenido de coliformes fecales

presentes en estos lodos. Así a los tratamientos B, C y D, se los consideran lodos de clase por contener coliformes fecales menores a 1000 UFC/g (Metcalf & Eddy, 2013). Además, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2018), este tipo de lodos pueden ser utilizados como enmienda orgánica en cualquier tipo de suelo, sin presentar un riesgo biológico.

La reducción del número de coliformes fecales, se puede atribuir a conjugación de dos factores. Primero, el cambio brusco de pH generado por el metabolismo de las bacterias ácido-lácticas presentes en las EMAs y segundo; por la competencia por los nutrientes presentes en el lodo residual (Wenzl, 2006). La acción benéfica de las EMAs se facilitó por la acción conjunta de los humatos y zeolitas, dónde las zeolitas inmovilizaron a los contaminantes haciéndolos más disponibles y los humatos activaron el crecimiento de las EMAs (Liou, Capitani & Frey, 2010).

## 5. CONCLUSIONES

La investigación permitió establecer las condiciones ideales de estabilización anaerobia de los lodos residuales experimentales.

El espesamiento de los lodos residuales se realizó en base al balance de masas adicionando 493.492gr de zeolita como material estructurante que permitió obtener el 60% de humedad en el inóculo.

La adición de EMAs, zeolitas y humatos permitió cumplir el segundo parámetro de estabilización recomendado por la EPA que concierne a la reducción de coliformes fecales.

El diseño experimental utilizado en la investigación, se un Diseño Completamente al Azar Complementario (DCAC), que comprendió en la implementación de tres tratamientos y un testigo. Cada tratamiento tiene como composición base: EMAs + inóculo, mientras que los tratamientos complementarios tuvieron la adición de humatos como fuente mineral y pausterización respectivamente.

Los parámetros fisicoquímicos y biológicos de los lodos residuales de los tres tratamientos cumplen con los rangos de valores recomendados para que el biosólido sea considerado como una enmienda orgánica del suelo.

Los parámetros de control: pH, conductividad eléctrica y temperatura de los lodos. Estos parámetros presentaron variabilidad entre los tratamientos B, C y D frente al tratamiento A (testigo). Los tratamientos B, C y D cumplieron con los parámetros de estabilización durante la fase de experimentación, con valores de pH entre 5,5 a 6.6; conductividad eléctrica de 851 a 1720  $\mu S/cm$ ; y temperatura de 17 a 23°C que, en comparación con el testigo que sus parámetros fueron constantes.

Los tratamientos C y D compuestos por EMAs + Humatos + Inóculo y EMAs + Pausterización + Inóculo respectivamente, presentaron mayor aporte en los componentes de abono orgánico para el suelo en los parámetros de: materia orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio y Carbono.

Los tratamientos B, C y D son biosólidos clase A, por cuanto el Número Más Probable de coliformes fecales encontradas en un gramo de lodo residual, es de 9, 4 y  $< 1.8$  NMP/gr respectivamente. Estos valores son relativamente bajos que otorga a los biosólidos de estos tratamientos son pertenecer a la categoría de Lodos de clase A.

Los tratamientos C y D son los de mayor eficiencia en la estabilización de los lodos residuales. Sin embargo, en relación a costos, el tratamiento C es recomendable, contra el D. Que requiere pausterización que incrementan innecesariamente los costos de estabilización.

El uso de zeolita permitió obtener el porcentaje de humedad recomendado para este tipo de lodo, al 60% previo a la digestión anaerobia. Adicionalmente, retuvo nutrientes (NPK) en forma de sólidos fijos. Finalmente, actuó como un regulador de pH, permitiendo el incremento paulatino a medida que transcurría el proceso de digestión.

El uso de humatos permitió retener el material volátil como  $NH_3$  y  $H_2S$ , proporcionó microelementos a los microorganismos, facilitando la activación de su metabolismo y contribuyendo a la formación del coloide edáfico que es la condición para que se produzca procesos de biodegradación.

## REFERENCIAS

- Appels, L., Assche, A.V., Willems, K., Degreve, J., Impe, J.V., Dewil. R. (2011). *Peracetic acid oxidation as an alternative pre-treatment for the anaerobic digestion of waste activated sludge. Bioresour. Technol.*, 102: 4124–4130.
- Archer, D. B., Harris, J. E. (1986). *Methanogenic bacteria and methane production in various habitats*. In: *Anaerobic Bacteria in Habitats Other Than Man*, E. M. Barnes & C. Mead (Eds) , pp. 185– 223. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- BERNARD J. NEBEL- RICHARD T. WRIGTH: “Ciencias Ambientales-Ecología y Desarrollo Sostenible” Sexta Edición. (1999)
- Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J. 1994. *Biology of Microorganisms. Prentice-Hall, New York, USA*.
- Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Ferrer, I. (2010). *Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. J. Hazard. Mater.*, pp. 183: 1-15.
- Chen G, Yue PL, Mujumdar A. (2006). *Dewatering and drying of wastewater treatment sludge*. Handbook of industrial drying.
- Comeau Y., Hall K.J., Hancock R.E.W. and Oldham W. K. (1986) *Biochemical model for biological enhanced phosphorus removal. Wat. Res.* 20, 1511-1521.
- Donatello, S., Cheeseman, C.R. (2013). *Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (SSA): A review, Waste Manage.*, 33, 2328-2340.
- Edoya-Urrego, K, Acevedo-Ruíz, J. M, Peláez- Jaramillo, C A., & del Pilar Agudelo-López, S. (2013). Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquía, Colombia). *Rev. Salud Pública*, 15(5), 778-790.
- Eikelboom D.H. (2000) *Process Control of Activated Sludge Plants by Microscopic Investigation* ISBN: 9781900222297, pg.156

- Elia Ruda, E., Mercedes Ocampo, E., Acosta, A., Mongiello, A., & Olmos, G. (2013). *Stabilization of industry sludge by composting for use as an organic fertilizer*. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 15, p. 2313).
- Eurostat. (2016). *Sewage sludge production and disposal*, Recuperado el 23 de febrero del 2018 de <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do>
- Fioravanti, M., Vega, N., Hernández, C., Okumoto, S., & Yeomans, J. (2005). Eficiencia de los microorganismos eficaces (EM) en la estabilización de lodos sépticos para su uso agrícola. *Tierra Tropical*, 69-71.
- Franco H.M.O., Espinosa C. F., López O. A. M., Gonzáles Mc. A. N.y Castro F. D. (2000). Efecto de la aplicación de lodos residuales de la industria farmacéutica en el funcionamiento biológico de un suelo de Mezquital. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitaria y Ambiental.
- Genevini P.L.; Vismara R.; Mezzanotte V. (1986). *Utilizzo agricolo dei fanghi di depurazione*. *Ingegneria ambientale*, 5. Milano.
- German Environment Agency (2016), *Technical guide on the treatment and recycling techniques for sludge from municipal wastewater treatment with references to best available techniques (BAT)*. INTECUS GmbH. Recuperado de [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/technical\\_guide\\_on\\_the\\_treatment\\_and\\_recycling\\_techniques\\_for\\_sludge\\_from\\_municipal\\_waste\\_water\\_treatment\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/technical_guide_on_the_treatment_and_recycling_techniques_for_sludge_from_municipal_waste_water_treatment_0.pdf)
- Hester, R. E., & Harrison, R. M. (Eds.). (2016). *Pharmaceuticals in the environment*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua (HGPT). (2018). Proyecto de Generación Comunitaria de Energía. Recuperado de: <http://rrnn.tungurahua.gob.ec/#/programas/ver/52406446bd92eab80f000001>
- Jang, H.M., Park, S.K., Ha, J. H., Park, J.M. (2013). *Microbial community structure in a thermophilic aerobic digester used as a sludge*

- pretreatment process for the mesophilic anaerobic digestion and the enhancement of methane production.* *Bioresour. Technol.*, 145: 80–89.
- Jinfeng, S., Xuan, Y., Heping, G. L. (2007). *Studies of ultrasound disintegration of residual sludge and its energy consumption in water treatment of petrochemical plant.* *Front. Chem. Eng. China.*, 1: 395–398.
- Khanal, S.K., Grewell, D., Sung, S., Leeuwen, J.V. (2007). *Ultrasound Applications in Wastewater Sludge Pretreatment: A Review*, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 37: 277- 313.
- Kim, K.-R., & Owens, G. (2010). *Potential for enhanced phytoremediation of landfills using biosolids. A review.* *Journal of Environmental Management*, 91(4), 791-797. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479709003727?via%3Dihub>
- Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. (1997). *Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion.* *Water Research*, vol. 31 (10).
- Luduvic M. Sludge treatment and disposal. (2007). *Sludge stabilisation in sludge treatment and disposal.* In Andreoli Cleveron Vitorio, von Sperling Marcos, Fernandes Fernando, editors. p. 48e75.
- M. Mahamud. A. Gutiérrez Y H. Sastre. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II). Métodos de Tratamiento. *Ingeniería del Agua*, Vol. 3, Núm. 3.
- Martín del Campo M. G. (1996). Caracterización de lodos residuales de dos plantas tratadoras de agua (Toluca Norte y EPCCA) del Estado de México para una 10 propuesta de utilización en la agricultura. Tesis de Licenciatura. UAEM. Toluca, Estado de México, México.64 pp.
- McCarty P.L. (2007) *Thermodynamic electron equivalents model for bacterial yield prediction: Modifications and comparative evaluations.* *Biotech. Bioeng.* 97(2), 377- 388.
- Metcalf & Eddy (2013). *Wastewater Engineering*, Volume II.
- Metcalf & Eddy Inc. (2003) *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.

- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2013). Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador. Recuperado de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PTAR4.pdf>
- Montes M.E. (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" Universidad Politécnica de Madrid
- Ortiz Hernández M.L. (1994). Caracterización y propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de CIVAC, Estado de Morelos. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM, Ciudad de México, México. pp 146.
- Parkin, G. F., Miller, S.W. (1982). *Response of Methane Fermentation to Continuous Addition of Selected Industrial Toxicants*. Proceedings of 37th Purdue IndustrialWaste Conference, West Lafayette, Indiana
- Ramírez L.S., Manual de microbiología. Primera edición ed. (2007), Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. pp 83.
- Rittmann B.E. and McCarty P.L. (2001) *Environmental Biotechnology. Principles and Applications*. New York, McGraw-Hill.
- Safdari, M.-S., Kariminia, H.-R., Rahmati, M., Fazlollahi, F., Polasko, A., Mahendra, S., Fletcher, T. H. (2018). *Development of bioreactors for comparative study of natural attenuation, biostimulation, and bioaugmentation of petroleum-hydrocarbon contaminated soil*. Journal of Hazardous Materials, 342, 270-278. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.044>
- Schnitzer M. (1991). *Soil organic matter - The next 75 years*. Soil Sci., 151 (1), 41-58.
- Show, K., Lee, D. y Tay, J. (2012). *Anaerobic Disgestion of Sewage Sludge in Biological*. In Sludge Minimization and Biomaterials/Bioenergy Recovery Technologies. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons

- Sidhu & Toze (2009). *Human pathogens and their indicators in biosolids*. A literature review. Recuperado de: doi: 10.1016/j.envint.2008.07.006
- Singh, A., Kuhad, R. C., & Ward, O. P. (Eds.). (2009). *Advances in Applied Bioremediation* (Vol. 17, pp 152-185). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89621-0>
- Singh, A., Parmar, N., Kuhad, R. C., & Ward, O. P. (2011). *Bioaugmentation, Biostimulation, and Biocontrol in Soil Biology*. En A. Singh, N. Parmar, & R. C. Kuhad (Eds.), *Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol* (Vol. 108, pp. 1-23). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado de [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7_1)
- Singh, A., Parmar, N., Kuhad, R. C., & Ward, O. P. (2011). *Bioaugmentation, Biostimulation, and Biocontrol in Soil Biology*. En A. Singh, N. Parmar, & R. C. Kuhad (Eds.), *Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol* (Vol. 108, pp. 1-23). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado de [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7_1)
- Tenney M.W., Stumm W., (1965). *Chemical Flocculation of Microorganisms in Biochemical Waste Treatment* – Journal W.P.C.F., Vol N°37 – pp. 1370-1388
- Tsagarakis K.P., Papadogiannis, Ch. (2006). *Technical and Economic Evaluation of the Biogas Utilization for Energy Production at Iraklio Municipality, Greece*. EnergyConversion and Management.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2018). *Frequent Questions about Biosolids*. Recuperado de <https://www.epa.gov/biosolids/frequent-questions-about-biosolids>
- Wenzl, I. (2006). La Revolución de los “Microbis Efectivos”. Integral: Vive mejor en un mundo mejor. España: RBA Revistas. 38-43
- Winkler, M. (2015). Tratamiento biológico de Aguas de Desecho. Editor José O. Valderrama, Centro de información tecnológica. Edición 86.
- Xu, J., Yuan, H., Lin, J., Yuan, W. (2013). *Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to*

- enhance anaerobic biogas production*. J. Taiwan Institute Chem. Engin., 45: 2531–2536.
- Yang, X. (2009). *Potencial of Sludge Treatment In Air, Water and Soil Pollution Science and Technology*. New York, NY, USA: Nova Science Publishers; Incorcopated
- You, S., Ren, N. y Zhao, Q. (2012). *Microbial Fuel Cell Technology for Sustainable Treatment of Organic Wastes and Electrical Energy Recovery*. In Biological Sludge Minimization and Biomaterials/Bioenergy Recovery technologies. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons
- Zinder, S. H. (1988). *Conversion of acetic acid to methane by thermophiles*. In Anaerobic Digestion, E. R. Hall, P. N. Hobson (Eds), pp. 1–12. Proceedings of the 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Italy
- Zinder, S. H., Mah, R. A. (1979). *Isolation and characterization of a thermophilic strain of Methanosarcina unable to use H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> for methanogenesis*. Appl. Environ. Microbiol. 38:996–1008.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Solución del Balance de masa del inóculo por espesamiento

W Lodo 1	1000		H Lodo 1	0.88	
W Zeolita	?	gr	H Zeolita	0.0325	*100%
W Lodo 2	?		H Lodo 2	0.6	

$$(1) W_{\text{lodo2}} = W_{\text{lodo1}} + W_{\text{Zeolita}}$$

$$(2) (H_{\text{lodo2}} * W_{\text{lodo 2}}) = (H_{\text{lodo1}} * W_{\text{lodo1}}) + (H_{\text{Zeolita}} * W_{\text{Zeolita}})$$

$$0.6 * (W_{\text{lodo}} + W_{\text{Zeolita}}) = (H_{\text{lodo1}} * W_{\text{lodo1}}) + (H_{\text{Zeolita}} * W_{\text{Zeolita}})$$

$$(0.6 * 1000\text{gr}) + (0.6 W_{\text{Zeolita}}) = (0.88 * 1000\text{gr}) + (0.0325 W_{\text{Zeolita}})$$

$$0.6 W_{\text{Zeolita}} - 0.0325 W_{\text{Zeolita}} = 280 \text{ gr}$$

$$0.5675 W_{\text{Zeolita}} = 280 \text{ gr}$$

$$W_{\text{Zeolita}} = 493.39207 \text{ gr}$$

## Anexo 2. Solución del porcentaje masa/masa de EMAs

$$\% \text{ m/m} = \frac{W_{EMAs}}{W_{EMAs} + W_{Lodo_2}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$10 \% = \frac{W_{EMAs}}{W_{EMAs} + 1000\text{gr}}$$

$$0.2 \times (W_{EMAs} + W_{Lodo_2}) = 1000\text{gr}$$

$$W_{EMAs} - (0.1 \times W_{EMAs}) = 0.1 \times 1000\text{gr}$$

$$W_{EMAs} = \frac{0.1 \times 1000\text{gr}}{0.9}$$

$$W_{EMAs} = 111.11\text{gr}$$

### Anexo 3. Tablas de reporte de parámetros de control

Ph						
A	B	B1	C	C1	D	D1
8.20	6.32	6.02	6.34	6.01	6.11	5.98
8.22	6.73	5.98	6.69	5.92	6.66	5.76
8.23	5.98	5.93	6.18	5.83	6.14	5.64
8.31	6.01	5.86	6.31	5.75	6.21	5.53
8.3	6.05	5.44	6	5.39	6.17	5.45
8.37	6.44	5.77	6.05	5.55	6.24	5.87
8.33	6.32	5.64	6.26	5.48	6.32	5.79
8.32	5.99	5.51	6.19	5.55	6.39	5.76
8.28	6.13	5.62	6.21	5.57	6.35	5.74
8.15	6.17	5.78	6.01	5.53	6.23	5.68
8.07	6.25	5.98	5.42	5.61	6.15	5.66
8.04	6.22	5.67	5.68	5.57	6.11	5.67
8.13	6.26	5.56	6.22	5.52	6.08	5.62
8.17	6.13	5.42	6.47	5.49	6.13	5.53
8.21	6.17	5.45	6.43	5.42	6.07	5.54
8.24	6.21	5.39	6.38	5.47	6.04	5.48
8.15	6.18	5.35	6.35	5.44	5.98	5.44
8.20	6.17	5.36	6.36	5.42	5.93	5.41
8.23	6.13	5.32	6.24	5.38	5.91	5.38
8.21	6.08	5.28	6.22	5.27	5.88	5.36
8.24	6.07	5.24	6.19	5.28	5.85	5.31

Conductividad $\mu S/cm$						
A	B	B1	C	C1	D	D1
329	1845	1436	1067	1264	1852	1544
264	1676	1000	765	1140	1608	1489
352	1437	1433	1276	1053	1528	1266
445	1240	1556	1318	1273	1523	1178
425	1020	1214	862	1332	1847	1129
530	1116	1298	876	1280	1524	1256
610	1153	1333	901	1157	1469	1474
865	994	1657	1046	944	1684	1563
844	923	1521	1355	1076	1865	1499
633	775	1434	1579	1278	1942	1213
620	894	1689	1543	1187	2085	1354
538	1258	1822	1278	1096	1787	1521
470	1334	2091	733	1018	1568	1629
429	1305	1976	872	964	1473	1547
385	1267	1638	902	1075	1378	1428
358	1243	1524	1025	1358	1402	1309
326	1206	1427	1128	1536	1492	1388
301	1178	1389	945	1476	1354	1288
250	1056	1246	873	1378	1247	1059
233	958	1104	834	1189	1076	978
159	844	966	745	957	961	953

Temperatura °C						
A	B	B1	C	C1	D	D1
17.7	17.8	19.4	18.9	19	17.9	19
17.2	17.2	19.1	17.2	18.6	17	17.3
17	17.7	17.7	17.6	17.4	16.9	17.4
17.1	17.4	17.6	17.6	17.5	17	17.4
17.3	17.5	17.8	17.7	17.7	17.1	17.4
17.6	17.7	17.8	17.5	17.6	17.6	17.9
17.9	18.5	18.4	18.7	18.9	18.3	18.5
18.7	19	19.1	18.9	19.2	19.1	19.1
19.3	19.6	19.4	19.6	19.7	20	19.7
19.8	20.3	20.2	19.9	19.8	20.1	20
20.4	20.6	20.6	20.1	20.1	20.4	20.2
21.6	21.3	20.8	20.3	20	20.6	20.4
20.3	20	20.6	20.4	20.1	19.9	20.1
19.7	19.9	20.4	20	20.3	19.8	20.2
19.9	20	20.7	20.2	20.8	20.1	20.4
19.6	21.6	21.3	20.8	21.2	20.7	20.8
19.9	21.8	22.2	21.3	21.5	21.6	21.4
20	22.2	22.5	21.8	21.6	22	21.9
19.8	22.4	22.7	22	21.8	22.2	22.1
19.9	22.5	22.9	22.3	22	22.5	22.3
19.8	22.5	23.2	22.6	22.1	22.5	22.6

#### Anexo 4. Tablas de reportes de parámetros iniciales y finales

%	A	B	B1	C	C1	D	D1
<b>Humedad</b>	70.539	74.809	67.42	74.569	67.058	73.891	67.964
<b>Sólidos Totales</b>	29.460	25.191	32.580	25.430	32.942	26.109	32.036
<b>Sólidos Fijos</b>	23.154	18.516	23.682	21.863	26.674	19.441	26.130
<b>Sólidos Volátiles</b>	6.306	6.675	8.898	3.567	6.268	6.668	5.906

mg/L	A	B	B1	C	C1	D	D1
<b>DQO</b>	45000	45000	35000	46000	46000	53000	55000
<b>DBO<sub>5</sub></b>	14000	28000	21000	28000	18000	32000	24000

NMP/gr

Dilución	A	B	B1	C	C1	D	D1
<b>10<sup>-1</sup></b>	5	4	2	2	1	1	0
<b>10<sup>-2</sup></b>	5	2	2	1	1	1	0
<b>10<sup>-3</sup></b>	5	2	0	1	0	0	0
<b>Total</b>	> 1600	32	9.3	9.2	4	4	< 1.8

## Anexo 5. Reporte de Resultados de Abono Orgánico por AGRARPROJEKT



AGRARPROJEKT S.A.  
Urb. El Condado Calle V # 941 y Avda. A  
Telfs.: 2490575 / 2492148  
Quito Ecuador  
E-mail: agrarprojekt@cablemodem.com.ec  
www.agrarprojekt.com

### Reporte Análisis de Abono Orgánico ("Inóculo/Lodo") - Contenido Total de Nutrientes -

**Cliente:** María Isabel Toasa  
**Muestras:** 1 muestra de Abono Orgánico Sólido ("Inóculo/Lodo")  
**Fecha, toma de muestra:** 09/03/2018  
**Fecha, recibo de muestra:** 12/03/2018  
**Fecha, análisis:** 15/03 – 28/03/2018  
**Fecha, informe:** 29/03/2018  
**Número de reporte:** MToasa-AbOrg-12-03-18  
**Análisis certificado por:** Dr. Karl Sponagel

#### **Métodos de Análisis utilizados:**

##### Proceso Análisis C.E. y pH:

Elaboración del extracto según método Volumen 1:1% (reglamento de Holanda para sustratos) – Medición de la CE (ISO 7888, EN 27888) y pH (DIN 38404) en el extracto.

##### Métodos utilizados para Análisis de Elementos:

Contenido Total de Nutrientes: Secamiento del material hasta 0 % de humedad → Determinación % Materia Seca → Desmenuzación ("40 mesh") → Incineración Seca → Dilución en "Agua Regia" → Determinación de los macro- y micronutrientes según las normas DIN (Alemania), EPA / US Standard Methods (EE.UU) e ISO.

##### Análisis de Macro- y microelementos:

- Nitrógeno Total Kjeldahl: Método "Semi-Micro-Kjeldahl" (US Standard Methods 4500-NorgC)
- Fosfato: Método "Vanadomolibdophosphoric Acid" (ISO 6878-1, EN 1189)
- Potasio y Sodio: Fotómetro de Llama (ISO 9964-3)
- Calcio, Magnesio, Hierro, Manganeso, Zinc, Cobre y Molibdeno: Espectrómetro de Absorción Atómica, Llama/Horno de Grafito (DIN 38406)
- Boro: Método "Azomethin" (DIN 38405-D17)
- Sulfato: Método "Turbidimétrico con BaCl<sub>2</sub>" (DIN 38405-DS-1)
- Materia Orgánica: Método LOI (DIN-EN 13039)

**Resultados sobre los niveles nutricionales encontrados a continuación:**

**Resultados # 1: María Isabel Toasa, Abono Orgánico(Inóculo/Lodo), 12-03-2018**

**Contenido Total de elementos en Materia Seca (%)**

Parámetro	Unidad	# 1: Muestra "Inóculo/Lodo" Relación NPK:C:N
Materia Orgánica	%	86.4
Carbono (C)	%	38.0
Relación C:N		7 : 1
Nitrógeno Total (N)	%	5.34
Fósforo (P)	%	0.81
Potasio (K)	%	0.10

**Resultados # 1 - 3: María Isabel Toasa, Abono Orgánico ("Lodo"), 03-05-2018**

Contenido Total de elementos en Materia Seca (%)

Parámetro	Unidad	# 1 Lodo + EMA'S 1	# 2 Lodo + EMA'S 2	# 3 Lodo + EMA'S + Humatos 1
Materia Orgánica	%	26.4	22.1	28.8
Carbono (C)	%	14.8	12.8	18.7
Relación C:N		10 : 1	8 : 1	11 : 1
Nitrógeno Total (N)	%	1.60	1.64	1.68
Fósforo (P)	%	0.18	0.07	0.10
Potasio (K)	%	0.22	0.18	0.23

**Resultados # 4 - 6: María Isabel Toasa, Abono Orgánico ("Lodo"), 03-05-2018**

Contenido Total de elementos en Materia Seca (%)

Parámetro	Unidad	# 4 Lodo + EMA'S + Humatos 2	# 5 Lodo + Pasteurización + EMA'S 1	# 6 Lodo + Pasteurización + EMA'S 2
Materia Orgánica	%	22.2	28.1	22.1
Carbono (C)	%	12.8	18.9	12.8
Relación C:N		10 : 1	11 : 1	11 : 1
Nitrógeno Total (N)	%	1.28	1.80	1.21
Fósforo (P)	%	0.07	0.13	0.08
Potasio (K)	%	0.28	0.23	0.20

## Anexo 6. Reporte de Resultados de Huevos de Helminto por Laboratorios LASA



### INFORME DE RESULTADOS

INF.LASA 15/03/2018 2238  
ORDEN DE TRABAJO Nº 1309

**SOLICITADO POR:** MARÍA ISABEL TOASA CORDERO  
**DIRECCIÓN:** DE LOS COLIMES Y GRANADOS  
**TELÉFONO:** 02-2430616  
**TIPO DE MUESTRA:** LODO  
**PROCEDENCIA:** LODO DE AGUA RESIDUAL DEL CANTÓN PATATE

**FECHA DE RECEPCIÓN:** 12/03/2018  
**FECHA DE ANÁLISIS:** 12 AL 16/03/2018  
**FECHA DE ENTREGA:** 15/03/2018  
**NÚMERO DE MUESTRAS:** UNA (1)  
**MUESTREO POR:** SOLICITANTE

CÓD. MUESTRA	IDENTIFICACIÓN
5100-18	LODO DE AGUA RESIDUAL (PATATE)

### ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADO	MÉTODO DE ENSAYO	INCERTIDUMBRE %U (K=2)
HUEVOS DE PARÁSITOS	AUS/PRES	AUSENCIA	MÉTODO INTERNO	NO APLICA

  
Dr. Marco Guisjarro Ruales  
GERENTE DE LABORATORIO

Las incertidumbres de los resultados para los ensayos se encuentran disponibles en los registros de Laboratorio LASA  
LASA se responsabiliza exclusivamente de los análisis, el resultado se refiere únicamente a la muestra recibida en el laboratorio  
Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del Laboratorio  
NOTA 1. Opiniones e interpretaciones de los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio.  
Av. de la Prensa N.º 3-113 y Coronel Gallo • Teléfonos: 2469- 814 / 2269-012  
Juan Ignacio Pareja OE5-97 y Simón Cárdenas • Teléfono: 2290-815  
Celular: 099 9236 287 • e-mail: info@laboratoriolasa.com  
web: www.laboratoriolasa.com • Quito - Ecuador



## Anexo 7. Crecimiento de EMAs activadas con humatos en el medio PDA



**Anexo 8. Crecimiento de EMAs activadas con agua peptona en el medio PDA**



