

**EVALUACION DE LA DIGESTION ANAEROBIA COMO ALTERNATIVA DE  
ESTABILIZACION DE BIOSOLIDOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA  
DETRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD  
TECNOLOGICA DE PEREIRA**

**Facultad de  
TECNOLOGIA**

**Programa  
TECNOLOGIA QUIMICA**

**JOHN MARIO MOSQUERA CALLE  
1088254490**

**BEATRIZ ELENA MARTINEZ MARTINEZ  
42157707**

**Director  
LILIANA BUENO LOPEZ  
Licenciada en Biología y Educación Ambiental**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGIA  
ESCUELA DE QUIMICA  
PEREIRA  
2012**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b>	<b>8</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>9</b>
<b>2. JUSTIFICACION</b>	<b>10</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
3.1 Objetivo general	11
3.2 Objetivos específicos	11
<b>4. DEFINICIONES</b>	<b>12</b>
<b>5. MARCO LEGAL</b>	<b>15</b>
<b>6. MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
6.1 Tratamiento de aguas residuales y sus productos.	19
6.2 Aguas residuales UTP	19
6.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales UTP. Sistema de Lodos Activados de Aireación Extendida.	21
6.4 Proceso de Biodigestión.	23
6.5 Digestión Anaerobia.	24
6.6 Etapas de la digestión anaerobia	24
6.7 Parámetros del proceso	26
6.8 Inhibidores de la Digestión Anaerobia,	29
6.9 Productos Finales de la Digestión Anaerobia	31
6.10 Tipos de procesos de la digestión anaerobia de lodos	35
6.11 Clasificación de los Biodigestores	38
6.12 Acondicionamiento del lodo	40
6.13 Microbiología de los lodos residuales	42
6.14 Actividad Metanogénica Específica (AME)	43
<b>7. METODOLOGÍA</b>	<b>44</b>
7.1 Área de Estudio	44
7.2 Métodos	45
7.3 Toma de muestras	46
7.4 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS	47
7.5 Análisis Microbiológicos	55
7.6 Esquema Análisis microbiológico	55
7.7 Determinación Actividad Metanogénica Específica (AME)	56
7.8 Producción de metano y cálculo de la AME	57
7.9 Análisis Estadístico	59
<b>8. RESULTADOS</b>	<b>60</b>
8.1 Resultados Análisis Estadístico SPSS.	60
8.2 Resultados Análisis Físicoquímicos.	61
8.3 Resultados Análisis Microbiológicos.	81

9. CONCLUSIONES	85
10. Recomendaciones	87
11. Bibliografía	88
12 ANEXOS	92

## Índice de Tablas

<b><i>TABLA No. 1 Requisitos específicos de los productos orgánicos usados como abonos y enmiendas del suelo</i></b>	<b>18</b>
<b><i>Tabla No. 2 Sistemas de tratamiento de aguas UTP</i></b>	<b>20</b>
<b><i>TABLA No. 3 Tiempo requerido para la digestión de lodos a diversas temperaturas</i></b>	<b>28</b>
<b><i>Tabla No. 5 Condiciones Ambientales Universidad Tecnológica de Pereira</i></b>	<b>47</b>
<b><i>TABLA No. 6 Medias de la caracterización del lodo dispuesto para alimentar los digestores en los tres ensayos.</i></b>	<b>61</b>
<b><i>Tabla No 7 Actividad Metanogénica Específica</i></b>	<b>80</b>

## Índice de Figuras

<i>Figura No. 1 PTAR-UTP Sistema de Lodos Activados</i>	21
<i>Figura No. 2 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO PTAR-UTP</i>	22
<i>Figura No. 3 Biometanización de residuos orgánicos</i>	26
<i>Figura No. 4 Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia</i>	27
<i>Figura No. 5 Usos del biogás</i>	34
<i>Figura No 6. Digestor en etapa única con mezcla completa.</i>	35
<i>Figura No 7. Digestor en etapa única sin mezcla</i>	36
<i>Figura No. 8 Digestión en doble etapa</i>	37
<i>Figura No. 9 Digestión en dos fases</i>	37
<i>Figura No.10 Biodigestor Tipo Indu</i>	39
<i>Figura No. 11 Biodigestor Chino</i>	39
<i>Figura No. 12 Mapa satelital Ubicación PTAR-UTP</i>	44
<i>Figura No 13 Digestores Anaerobios</i>	45
<i>Figura No 14. Esquema general de la metodología desarrollada</i>	54
<i>Figura No.15 Montaje Actividad Metanogénica Específica</i>	57
<i>Figura No.16 Curva de la producción de biogás acumulado con el punto de medición de la pendiente.</i>	59
<i>Figura No.17: Comportamiento de la Temperatura del biodigestor con respecto al tiempo de retención transcurrido.</i>	62
<i>Figura No. 18: Comportamiento del pH en el lodo, con respecto al tiempo establecido de digestión anaerobia.</i>	63
<i>Figura No. 19 Concentración en ppm de Calcio en los ensayos uno dos y tres.</i>	64
<i>Figura No. 20 Concentración en ppm de Magnesio en los ensayos uno dos y tres.</i>	65
<i>Figura No. 21 Concentraciones en ppm de Hierro en los ensayos uno dos y tres.</i>	65
<i>Figura No. 22 Concentraciones en ppm de Manganeso en los ensayos uno dos y tres.</i>	66
<i>Figura No. 23 Concentraciones en ppm de Zinc en los ensayos uno dos y tres</i>	66

<b>Figura No. 24 Concentraciones en ppm de Cobre en los ensayos uno dos y tres</b>	<b>_____ 67</b>
<b>Figura No. 25 Concentraciones en ppm de Sodio en los ensayos uno dos y tres</b>	<b>_____ 67</b>
<b>Figura No. 26 Concentración en porcentaje de Nitrógeno total Kjeldahl en los ensayos 1, 2 y 3.</b>	<b>_____ 69</b>
<b>Figura No. 27 concentración en ppm de Fosforo en los ensayos uno dos y tres.</b>	<b>_____ 71</b>
<b>Figura No. 28 Concentración en ppm de Potasio en los ensayos uno dos y tres</b>	<b>_____ 71</b>
<b>Figura No.29 % de Materia Orgánica en los ensayos uno dos y tres.</b>	<b>_____ 72</b>
<b>Figura No. 30 Concentración en porcentaje de Carbono Orgánico en los 3 ensayos</b>	<b>____ 73</b>
<b>Figura No. 31 Concentración en porcentaje de Nitrógeno Orgánico antes y después del proceso de digestión anaerobia en los 3 ensayos.</b>	<b>_____ 73</b>
<b>Figura No. 32 Relación Carbono Nitrógeno, en los ensayos uno dos y tres</b>	<b>_____ 74</b>
<b>Figura No.33 Porcentaje de humedad antes y después del proceso de digestión anaerobia en los ensayos uno dos y tres.</b>	<b>_____ 75</b>
<b>Figura No.34 Concentración en porcentaje de sólidos totales (ST) en los ensayos uno, dos y tres antes y después del proceso de digestión anaerobia</b>	<b>_____ 76</b>
<b>Figura No.35 Porcentaje de cenizas antes y después del proceso de digestión anaerobia</b>	
<b>Figura No.36 Porcentaje de sólidos volátiles (SV) antes y después del proceso de digestión anaerobia</b>	<b>_____ 78</b>
<b>Figura No. 37 Volumen acumulado de biogás vs tiempo de digestión anaerobia</b>	<b>_____ 79</b>
<b>Figura No.38 Relación entre el % eliminado de Materia Orgánica con respecto al volumen acumulado de Biogás.</b>	<b>_____ 80</b>
<b>Figura No.39 Número Más Probable de Coliformes totales, antes y después del proceso de di gestión anaerobia.</b>	<b>_____ 82</b>
<b>Figura No. 40 Número Más Probable de Coliformes fecales, antes y después del proceso de digestión anaerobia.</b>	<b>_____ 83</b>
<b>Figura No. 41 Número Más Probable de Coliformes fecales, utilizando reactivo de Kovacs para confirmar su presencia.</b>	<b>_____ 83</b>

## TABLA DE ANEXOS

<b>Anexo No.1 Condiciones de operación de la digestión anaerobia de flujo discontinuo en los ensayos 1, 2 y 3</b>	<b>92</b>
<b>Anexo No. 2 Tabla de (NMP) Numero Mas Probables de Bacterias Sembrando Tres Tubos Por Cada Dilución</b>	<b>92</b>
<b>Anexo No. 3 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk y T- student para los valores obtenidos a la salida de los digestores 1 y 2 en el ensayo 1</b>	<b>93</b>
<b>Anexo No.4 Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis</b>	<b>94</b>
<b>Anexo No. 5 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk y T- student para los valores obtenidos a la salida de los digestores 1 y 2 en el ensayo 2</b>	<b>94</b>
<b>Anexo No. 6 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk y T- student para los valores obtenidos a la salida de los digestores 1 y 2 en el ensayo 3</b>	<b>95</b>
<b>Anexo No. 7 Control diario de la temperatura ambiente en los ensayos 1, 2 y 3</b>	<b>96</b>
<b>Anexo No.8 Control Diario de pH en el Lodo Durante los Ensayos 1, 2 y 3</b>	<b>97</b>
<b>Anexo No. 9 Concentraciones en ppm y Analisis estadístico de los Metales Analizados en el Ensayo 1</b>	<b>98</b>
<b>Anexo No. 10 Concentraciones en ppm y Analisis estadístico de los Metales Analizados en el Ensayo 2</b>	<b>99</b>
<b>Anexo No.11 Concentraciones en ppm y Analisis estadístico de los Metales Analizados en el Ensayo 3</b>	<b>99</b>
<b>Anexo No.12 Concentraciones en ppm y Analisis Estadístico de los Nutrientes Analizados en el Ensayo 1</b>	<b>100</b>
<b>Anexo No 13 Concentraciones en ppm y Analisis Estadístico de los Nutrientes Analizados en el Ensayo 2</b>	<b>100</b>
<b>Anexo No. 14 Concentraciones en ppm y Analisis Estadístico de los Nutrientes Analizados en el Ensayo 3</b>	<b>101</b>
<b>Anexo No.15 Porcentajes y Analisis Estadístico de Humedad,solidos Totales, Solidos Volatiles y Cenizas en el Ensayo 1</b>	<b>101</b>
<b>Anexo No.16 Porcentajes y Analisis Estadístico de Humedad,Solios Totales, Solidos Volatiles y Cenizas en el Ensayo 2</b>	<b>102</b>

**Anexo No.17 Porcentajes y Analisis Estadístico de Humedad, Solidos totales, Solidos Volatiles y Cenizas 3 en el Ensayo 3 \_\_\_\_\_ 102**

**Anexo No.18 Control diario de volumen acumulado de biogás durante los ensayos 1, 2 y 3 \_\_\_\_\_ 103**

## INTRODUCCION

Actualmente para la sociedad es de gran importancia la protección del medio ambiente, la reducción del consumo energético, la preservación de fuentes de materias primas y la reducción de residuos contaminantes, con el fin de evitar su efecto nocivo; para ello se hace necesario estabilizar los contaminantes garantizando de esta manera la seguridad ambiental en la disposición de aquello que por razones tecnológicas o económicas no haya podido ser reutilizado (Rodríguez, 2010).

Para esta investigación es de gran importancia el creciente aumento de la producción de lodos, procedentes del tratamiento de aguas residuales en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira (PTAR-UTP), ya que generan serios problemas para su almacenamiento y aún más, para su disposición final.

La composición de estos lodos representa una fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes que pueden ser usados en actividades agrícolas, permitiéndoles ser incorporados a los ciclos naturales de la materia y la energía. Además de ser utilizados como materia prima de procesos biotecnológicos para la producción de biogás. De esta manera se produce un doble beneficio, ambiental y agrario, consiguiéndose su eliminación sin alteración relevante del equilibrio ecológico (Rodríguez, 2010).

Teniendo presente el potencial de los biosólidos con fines agrícolas, en el desarrollo de este trabajo se presentará la posibilidad de uso de un biodigestor anaerobio, a escala laboratorio, como alternativa de estabilización del lodo producido en la PTAR-UTP. Para alcanzar este objetivo y específicamente para esta investigación, se construyeron dos biodigestores anaerobios, se realizaron análisis químicos y microbiológicos, como porcentaje de materia orgánica, pH, metales, Coliformes totales y fecales, entre otros, antes y después de someter el lodo a la digestión anaerobia el lodo y así, obtener herramientas de juicio que permitan establecer que tipos de cambios se presentaron durante el proceso, estableciendo además el alcance de uso de la digestión para el manejo del lodo.



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los biosólidos ofrecen una serie de ventajas como es el alto contenido de materia orgánica para la producción de metano y producción de compostaje como mejorador de los suelos, además de contener algunos microorganismos que pueden enriquecer su flora, sin embargo la acumulación de lodos sin tratar como subproducto de depuración de los procesos aerobios que se le realizan al agua residual, generan una situación adversa para la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira y sus alrededores.

La producción de residuos sólidos remanentes del proceso de tratamiento de aguas residuales de la **PTAR-UTP** en cercanías al Jardín botánico se ha convertido en una problemática mayor, ya que la falta de medidas para la estabilización y disposición de estos residuos sólidos que contienen sustancias peligrosas y gran variedad de microorganismos patógenos que concentrados y combinados con otros compuestos hacen de este un material altamente contaminante, causando un impacto negativo sobre el medio ambiente y afectando directamente la calidad del agua, el suelo y la salud pública al generar malos olores.

Por tal razón, los biosólidos producidos deben ser estabilizados antes de ser desechados o de dar algún tipo de aprovechamiento agrícola.

La planta de tratamiento de agua residual cuenta con un lecho de secado destinado para la deshidratación y neutralización del lodo remanente, pero este no es suficiente para dicha función debido a la gran cantidad de lodo producido.

Dado a que las condiciones topográficas no son favorables para la construcción de otros lechos de secado, se desea plantear como alternativa de estabilización, el uso de un biodigestor anaerobio de flujo discontinuo, ya que este requiere de menos espacio y hace posible la obtención de productos útiles como gas metano, abono orgánico o enmiendas del suelo.

De acuerdo al contexto anterior, se plantea como pregunta de investigación para este proyecto: ¿es posible mejorar la calidad del lodo generado en la PTAR-UTP, utilizando un biodigestor anaerobio, operado a condiciones ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira?

## **2. JUSTIFICACION**

La digestión anaerobia de sólidos remanentes, representa una oportunidad para controlar los riesgos de contaminación que estos manifiestan en la PTAR- UTP, además que se tiene la posibilidad de aprovechar los efectos energéticos que ofrece dicho proceso.

La digestión anaerobia es actualmente una de las técnicas más utilizadas en el campo y en la industria para disminuir considerablemente los olores y mejorar la capacidad fertilizante del biosólido haciendo uso de su alto contenido de Materia Orgánica, Nitrógeno, Fosforo y micronutrientes, aportando grandes beneficios en la agricultura y en actividades de recuperación de tierras degradadas(Rodríguez, 2010).

El biodigestor a utilizar es un reactor anaerobio de flujo discontinuo, el cual permite una mayor carga de materiales poco diluidos, que una vez almacenados deberán ser extraídos cuando finalice el proceso de degradación y producción de biogás. Este tipo de digestor presenta una solución viable a las limitaciones generadas por la ubicación y el espacio reducido de la planta de tratamiento de aguas residuales en la UTP, ya que estos reactores no requieren de mucho espacio, y hacen posible la reducción de impactos ambientales que estos generan al no ser tratados y finalmente aprovechar su valor energético para obtener energía térmica y/o eléctrica(Hilbert 1999).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Evaluar la digestión anaerobia, en un biodigestor a escala laboratorio, como alternativa de estabilización de biosólidos producidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Estimar las características fisicoquímicas y microbiológicas, de acuerdo a la NTC 5167, del biosólido generado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Determinar los cambios fisicoquímicos y de coliformes totales y fecales del biosólido de la PTAR, mediante el uso de un biodigestor anaerobio escala laboratorio de flujo discontinuo para el tratamiento de los lodos generados en la PTAR de la UTP.
- Evaluar la eficiencia de remoción lograda en la estabilización de los lodos, mediante la determinación de las características fisicoquímicas y microbiológicas del biosólido generado.

#### 4. DEFINICIONES

Para efecto de la siguiente investigación se establecen las siguientes definiciones de acuerdo al Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS(RAS, 2000)y a la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT 2002 protección ambiental;. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final(NOM-004, 2002) que han sido ajustadas para esta investigación.

**Aguas residuales:** Las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.

**Aguas residuales domésticas (ARD):** Son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación, también residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.

**Almacenamiento:** Acumulación o depósito temporal de residuos, en recipientes o lugares, para su posterior recolección, aprovechamiento, transformación, comercialización o disposición final.

**Aprovechamiento:** Proceso mediante el cual, a través de un manejo integral de los residuos sólidos, los materiales recuperados se reincorporan al ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio de la reutilización, el reciclaje, la incineración con fines de generación de energía, el compostaje o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales o económicos.

**Biodegradabilidad:** Capacidad de descomposición rápida bajo condiciones ambientales naturales o controladas.

**Biogás:** Mezcla de gases, producto del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica cuyo componente principal es el metano.

**Biosólidos:** Lodos que han sido sometidos a diferentes procesos y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento.

**Coliformes fecales:** Bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos, bacilos cortos gram negativos no esporulados, también conocidos como coliformes termotolerantes. Pueden identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44 C y 55 C. Tienen la capacidad de fermentar la lactosa a temperaturas de 44.5 C incluyen al género *Escherichia* y algunas especies de *Klebsiella*.

**Digestión anaerobia:** Es la transformación bioquímica de la materia orgánica que es transformada en gas metano, bióxido de carbono y agua por los microorganismos en ausencia de oxígeno.

**Disposición final:** La acción de depositar de manera permanente lodos y biosólidos en sitios autorizados.

**Estabilización:** Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionamiento y posterior aprovechamiento o disposición final con el fin de evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente.

**Estabilización alcalina:** Es el proceso mediante el cual se añade suficiente cal viva (óxido de calcio  $\text{CaO}$ ) o cal hidratada (hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ ) o equivalentes, a la masa de lodos y biosólidos para elevar el pH.

**Límite máximo permisible:** Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido por los lodos y biosólidos para que puedan ser dispuestos o aprovechados.

**Lodos:** Son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

**Lodo primario:** El lodo primario es producido durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales. Esto ocurre después de las pantallas y desarenado y consiste en productos no disueltos de las aguas residuales.

**Lodo activo:** Normalmente se caracteriza por la interacción de distintos tipos de bacterias y microorganismos, que requieren oxígeno para vivir, crecer y multiplicarse y consumen materia orgánica. El lodo resultante se llama lodo activo. Normalmente este lodo está en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta además de partes minerales y orgánicas adsorbida y almacenada.

**Mejoramiento de suelos:** Es la aplicación de productos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas.

**Muestra:** Parte representativa de un universo o población finita, obtenida para conocer sus características

**Patógeno:** Microorganismo capaz de causar enfermedades, si está presente en cantidad suficiente y condiciones favorables.

**Residuos peligrosos:** Aquellos que por sus características infecciosas, combustibles, inflamables, explosivos, radiactivas, volátiles, corrosivas, reactivas o tóxicas pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente. Así mismo, se consideran residuos peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.

**Sólidos Totales (ST):** Son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos, que han sido deshidratados entre 103°C a 105°C, hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.

**Sólidos Volátiles (SV):** Son sólidos orgánicos totales presentes en los lodos y biosólidos, que se volatilizan cuando éstos se calcinan a 550°C en presencia de aire por un tiempo determinado.

**Tratamiento:** Conjunto de operaciones, procesos o técnicas encaminadas a la eliminación, la disminución de la concentración o el volumen de residuos, o su conversión en formas más estables.

**Tratamiento biológico:** Tratamiento tecnológico que utiliza bacterias u otros organismos para consumir residuos orgánicos.

**Terrenos con fines agrícolas:** Son las superficies sobre las cuales se pueden cultivar productos agrícolas para consumo humano y animal, incluyendo los pastizales.

## 5. MARCO LEGAL

Con el fin de tener un conocimiento más amplio y situar la problemática planteada en la PTAR-UTP sobre el tratamiento y disposición de los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales, se cita a continuación algunos aspectos contemplados en el código de regulaciones federales de los Estados Unidos para la protección del medio ambiente.

### **Legislación de estados unidos.**

En los Estados Unidos, el uso y disposición de los biosólidos está regulado por la norma 40 CFR Parte 503 del 19 de febrero de 1993, estableciendo la protección de la salud pública y al medioambiente por medio de unos requisitos para reducir el riesgo de contacto con microorganismos portadores de enfermedades, existentes en los lodos procedentes de las estaciones depuradoras de agua residual en su aplicación al terreno o disposición en superficie (Rodríguez, 2010).

Estos requisitos se dividen en dos:

- Requisitos destinados a controlar y reducir los patógenos en los biosólidos
- Requisitos destinados a reducir la posibilidad de que los biosólidos atraigan vectores que puedan transportar a los patógenos.

Las normas internacionales vigentes exigen que los biosólidos sean sometidos a un tratamiento de eliminación de patógenos con carácter previo a su utilización agrícola. La

normativa distingue en este sentido dos tipos de lodos tratados “**Lodos Clase A**” Y “**Lodos Clase B**” (e-CFR, 1993).

**Lodos Clase A:** Requieren un mayor grado de tratamiento y son los que están previstos para su utilización en sitios públicos. Esto incluye áreas residenciales, márgenes de carreteras, parques entre otros. También exige esta calidad para el sembrado de césped, cultivo de vegetales, tubérculos o jardines privados.

Los biosólidos Clase A deben cumplir con las siguientes limitaciones bacterianas.

- Coliformes fecales menos de 1000 NMP por gramo de sólidos totales (peso seco).
- Bacteria salmonella sp menos de 3 NMP por cada 4 gramos de sólidos totales (peso seco)

**Lodos Clase B:** Con una densidad de coliformes fecales inferior a  $2 \times 10^6$  NMP por gramo de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento para reducir significativamente los organismos patógenos este tipo de lodo será el que mayores restricciones presente para su uso y disposición(Vélez, 2007).

### **Restricciones.**

Las siguientes restricciones son establecidas por Código Electrónico de Regulaciones Federales (e-CFR), para el uso o eliminación de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales(e-CFR, 1993).

- 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 recogerá 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.



- El césped cultivado para uso en tierras con alto potencial de exposición pública o jardín no se recogerá por un año después de su aplicación.
- El acceso público a la tierra con un alto potencial para la exposición pública. Se limitara a un año después de la aplicación de lodos de depuradora.
- El acceso público a la tierra con un bajo potencial para la exposición pública. Se limitara a 30 días después de la aplicación de lodos de depuradora.

En Latino América, México, Brasil, Chile y Argentina son los países que más esfuerzo han dedicado a validar algunas de las experiencias norteamericanas y europeas y en algunos casos, a plantear hipótesis argumentativas sobre el tratamiento de lodos producidos en las plantas de aguas residuales. En Colombia, el proceso de tratamiento de aguas residuales es relativamente reciente y sólo ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Bucaramanga han utilizado este procedimiento(Vélez, 2007).

En Colombia no se dispone de leyes, reglamentos o normas sobre la gestión de biosólidos; a la fecha, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial estudia un borrador de norma presentado en marzo de 2003 por los operadores BAS, EMCALI y EEPPM de las 3 plantas más grandes del país El Salitre, Cañaveralejo y San Fernando. La propuesta ha sido elaborada cuidadosamente, teniendo en cuenta las referencias obligadas de las reglamentaciones de Estados Unidos “normas EPA” y de la Unión Europea(Daguer, 2004).

La Norma Técnica Colombiana NTC-5167 Productos Para la Industria Agrícola, Productos Orgánicos Usados Como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo, tiene como objeto establecer los requisitos que deben cumplir los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas del suelo; en la tabla No. 1 se resumen estos requisitos(NTC-5167,2004).

**TABLA No. 1 Requisitos específicos de los productos orgánicos usados como abonos y enmiendas del suelo**

<b>FERTILIZANTES O ABONOS ORGANICOS</b>			
Clasificación del Producto	Indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros a caracterizar	Parámetros a garantizar (en base húmeda)
Abono orgánico	Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos (separados en la fuente) o mezcla de los anteriores, que contiene porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican.	* Pérdidas por volatilización % * Contenido de cenizas máximo 60% * Contenido de humedad: - Para materiales de origen animal, máximo 20% - Para materiales de origen vegetal, máximo 35% - Para mezclas, el contenido de humedad estará dado por el origen del material predominante. * Contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15%. * N1P2O5 Y K2O totales (declararlos si cada uno es mayor de 1%) * Relación C/N * Capacidad de intercambio catiónico, mínimo 30 cmol(+) Kg (meq/100g) * Capacidad de retención de humedad, mínimo su propio peso. * pH mayor de 4 y menor de 9 * Densidad máximo 0,6 g/cm <sup>3</sup> * Límites máximos en mg/Kg (ppm)) de los metales pesados expresados a continuación. Arsénico (As) 41 Cadmio (Cd) 39 Cromo (Cr) 1 200 Mercurio (Hg) 17 Niquel (Ni) 420 Plomo (Pb) 300	Contenido de carbonoorgánico oxidable total (%C) Humedad máxima (%) Contenido de Cenizas (%) Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/Kg-1) (meq/100g) Capacidad de Retención de Humedad (%) pH Contenido de Nitrógeno Total (%N) Densidad (g/cm <sup>3</sup> )

Fuente: NTC 5167 (2004)

- Los productos deben presentarse en forma sólida como granulados, polvos o agregados líquidos como concentrados solubles, suspensiones o dispersiones.
- Todo producto cuyo origen sea materia orgánica fresca debe ser sometido a procesos de transformación que aseguren su estabilización agronómica tales como: compostaje o fermentación.
- Deberá declararse el origen (clase y procedencia) de las materias primas y los procesos de transformación empleados.

## **6. MARCO TEÓRICO**

### **6.1 Tratamiento de aguas residuales y sus productos.**

El primer proceso que sufre el agua en la planta se le denomina proceso preliminar, en donde son removidos los sólidos gruesos por medio de un canal de rejillas, antes de ingresar al sistema de tratamiento.

El tratamiento de las aguas residuales mediante el proceso de lodos activos se denomina tratamiento secundario. Se basa en que la materia orgánica de las aguas residuales se oxida y se transforma en Biomasa microbiana, mediante una amplia gama de organismos. El proceso se lleva a cabo en un tanque aireado, donde las aguas residuales y los microorganismos permanecen en contacto durante algunas horas, posteriormente la mezcla fluye a un tanque de decantación donde los flóculos microbianos se precipitan en el fondo y el agua residual tratada fluye por el desagüe. Los flóculos acumulados en el fondo son extraídos en forma de lodo, del cual una parte es reciclada al tanque de aireación, para mantener el proceso, mientras que el exceso de lodo producido debe ser eliminado.

Los lodos residuales se deben tratar para facilitar su manejo y evitar posibles problemas desde el olor hasta los agentes patógenos. Estos tratamientos modifican las características de los lodos, haciéndolos más adecuados para su uso o eliminación.

Uno de los principales problemas que se le puede atribuir al uso de lodos a la aplicación de los suelos, es la presencia de organismos patógenos a pesar de la eliminación que se realiza en el proceso de digestión anaerobia. Este problema se solucionaría mediante el compostaje de lodos antes de su aplicación al suelo, garantizando la sanidad y calidad del producto (Rodríguez, 2010).

### **6.2 Aguas residuales UTP**

La Universidad Tecnológica de Pereira genera aguas residuales como consecuencia de las actividades normales de funcionamiento del campus universitario, el cual alberga un gran número de personas distribuidas entre estudiantes, trabajadores, administrativos, docentes y visitantes. Al considerar el tiempo de ocupación del campus durante el día, se

encuentra que en la UTP se realizan grandes consumos de agua potable, teniendo aproximadamente 18 horas del día durante 6 días de la semana, para una población de alrededor 18000 personas.

Cerca del 80% de las aguas residuales generadas en el campus son conducidas a los cuatro sistemas de tratamiento antes de ser vertidas a las corrientes superficiales urbanas (afluente de la quebrada La Dulcera).

Teniendo en cuenta su población, se consideran estos vertimientos como aguas residuales domésticas dado el funcionamiento normal de sus instalaciones. Parte de las aguas negras del campus universitario son llevadas hasta una planta de tratamiento de lodos activados cuyo efluente es vertido a la quebrada el Bosque que pasa por el Jardín Botánico de la UTP (Caro,2009).

También existen sistemas de tratamiento de aguas residuales independientes para el Vivero que tiene una zanja de infiltración y el edificio de Bellas Artes y Humanidades posee un tratamiento compuesto por un tanque séptico y filtro anaerobio.

Actualmente, en la Universidad existen cuatro sistemas (tabla No. 2) diferentes para el tratamiento de las aguas residuales generadas al interior del campus, sin embargo, de estos cuatro sistemas, solo tres se encuentran en funcionamiento.

**Tabla No. 2 Sistemas de tratamiento de aguas UTP**

NOMBRE DEL SISTEMA	TIPO DE TRATAMIENTO	PORCENTAJE DEL CAMPUS ATENDIDO
Centro de Visitantes*	Tanque séptico-humedal deflujo superficial	24%
Vivero	Tanque séptico- pozo de infiltración	
Bellas Artes	Sedimentador – digestor – filtro anaeróbico	
Planta de tratamiento principal	Sistema de lodos activados de aireación extendida	56%

**Fuente: Caro (2009)**

Aproximadamente el 80% de las aguas residuales generadas en el campus son tratadas y el 20% de las aguas residuales restantes son las correspondientes a la Facultad de Ciencias de la Salud y al Bloque L, que hacen sus vertimientos sin tratamiento interno directamente a la red de Alcantarillado municipal.

### **6.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales UTP. Sistema de Lodos Activados de Aireación Extendida.**

El sistema de la Planta de Tratamiento está diseñado para tratar aguas residuales domésticas y tiene una capacidad de 95 m<sup>3</sup>/día, y consiste en la digestión aerobia de la materia orgánica (figura No. 1) causante de la contaminación en las aguas residuales, por medio de microorganismos aeróbicos, se convierte la materia orgánica en gas carbónico, agua y un residuo estabilizado. (Caro, 2009)



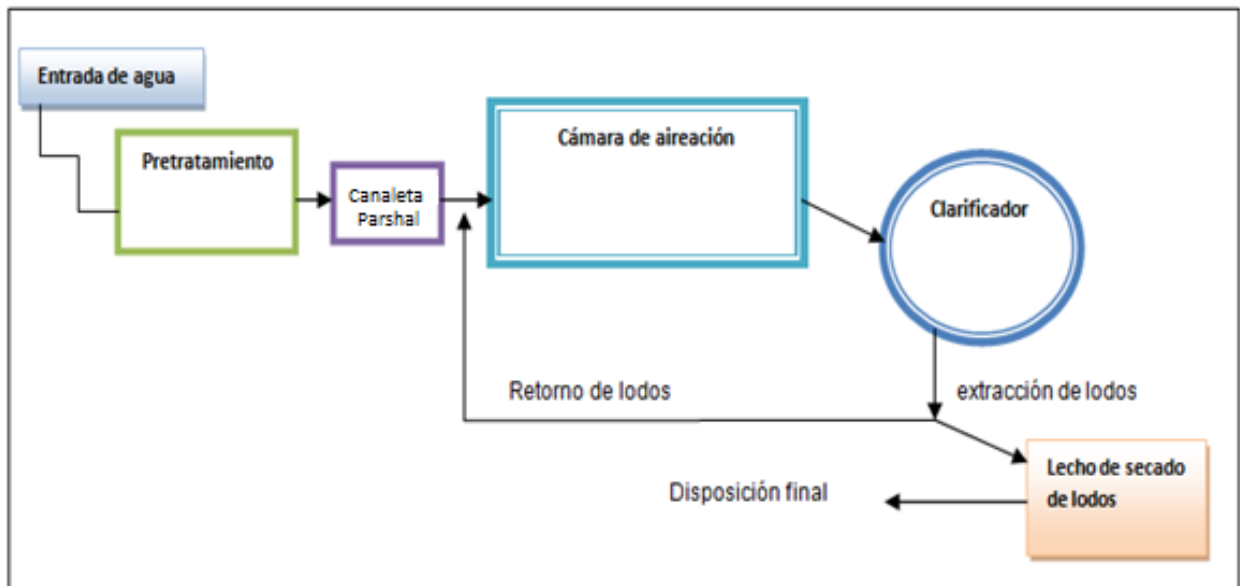
**Figura No. 1 PTAR-UTP Sistema de Lodos Activados**  
Fuente: Caro (2009)

El proceso biológico aerobio empleado es de lodos activados con aireación por difusión, un sistema de recirculación de lodos y uno de clarificación. Este sistema fue elegido por su fácil adaptación, buena eficiencia y menor impacto ambiental (Botero, 2009)

Todos los procesos de lodos activados tienen en común el contacto de aguas residuales con floc biológico previamente formado en un tanque de aireación. El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y

materiales inorgánicos; tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual debe su nombre de activado (Botero, 2009)

El tratamiento que se realiza a las aguas residuales en el sistema principal es un tratamiento secundario que se define como el tratamiento biológico de las aguas residuales e incluye: un sistema de aforo (Canaleta Parshall), seguida por el tratamiento biológico y concluyendo con una sedimentación secundaria. El sistema de tratamiento principal opera como se esquematiza en la Figura No. 2



**Figura No. 2 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO PTAR-UTP**  
Fuente: Botero J.(2009)

**Pretratamiento:** Las aguas residuales que llegan a la planta pasan por una reja de acero, que se encarga de detener los sólidos más grandes.

**Desarenador primario:** estructura diseñada para decantar sólidos tales como arena y piedras, con el fin de evitar que obstruyan el sistema difusor.

**Canaleta Parshall:** Este es un sistema que se utiliza para medir el caudal del agua y sirve para realizar el aforo.

**Cámara de Aireación:** Para eliminar algunos de las sustancias biodegradables que están presentes en el agua, se cuenta con un tanque en el cual se produce un proceso de aireación. Este tanque cuenta con “Bacterias Aeróbicas”, que ayudan a la degradación de la materia orgánica.

**Clarificador o Sedimentador Secundario:** El agua que sale de la cámara de aireación, llega al tanque clarificador, allí los lodos son separados y enviados nuevamente a la cámara a través de una motobomba, así como los sólidos que quedan flotando, los cuales son recogidos y retornados a la cámara de aireación.

**Recirculación de lodos:** con el fin de optimizar el uso de los lodos activados, éstos son enviados nuevamente al tanque de aireación, a través de una bomba que se encuentra sumergida en el tanque clarificador.

**Lecho de Secado de Lodos:** cuando los lodos que se encuentran en el clarificador, sobrepasan el nivel óptimo, es necesario extraerlos y pasarlos al lecho de secado, donde los lodos son mezclados con cal, posteriormente deshidratados y luego llevados al sitio de disposición final (Jardín Botánico).

#### **6.4 Proceso de Biodigestión.**

El correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos.

La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos. (Hilbert, 1999)

## **6.5 Digestión Anaerobia.**

Es un proceso biológico en el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los lodos se introducen en el reactor continuo, intermitente o discontinuo y son retenidos en el mismo durante periodos de tiempos variables. El lodo estabilizado, que se extrae continua o intermitentemente del proceso, no es putrescible y su contenido patógeno es bajo (Rodríguez, 2010).

Cada etapa del proceso descrito en la Figura No. 3, la llevan a cabo grupos distintos de bacterias, que han de estar en perfecto equilibrio.

## **6.6 Etapas de la digestión anaerobia**

### **Etapa hidrolítica**

Consiste en la degradación de moléculas orgánicas complejas como lípidos proteínas ácidos grasos constituyentes de la biomasa, originando moléculas más simples. En esta etapa, la materia orgánica se encuentra normalmente en estado sólido. Las bacterias que producen la hidrólisis pueden ser anaerobias estrictas o facultativas, son muy numerosas, se desarrollan espontáneamente en el medio cuando las condiciones son favorables, o bien pertenecen a la flora de la sustancia orgánica a digerir.

Realizan un amplio espectro de actividades enzimáticas sobre los polímeros orgánicos, desdoblándolos en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos.

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



### **Etapa acidogénica**

Los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), esto es, ácido acético, propiónico, butírico y valérico, principalmente y en menor proporción, anhídrido carbónico e hidrógeno. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5-6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae (Montes, 2008).

### **Etapa acetogénica.**

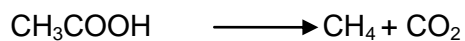
Durante esta etapa actúan las bacterias productoras de hidrógeno, las cuales producen ácido acético junto con CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> a partir de ácido propiónico, butírico o de cadena más larga.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, han de eliminar sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Rodríguez, 2010).

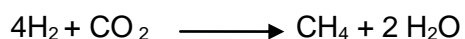
### **Etapa metanogénica**

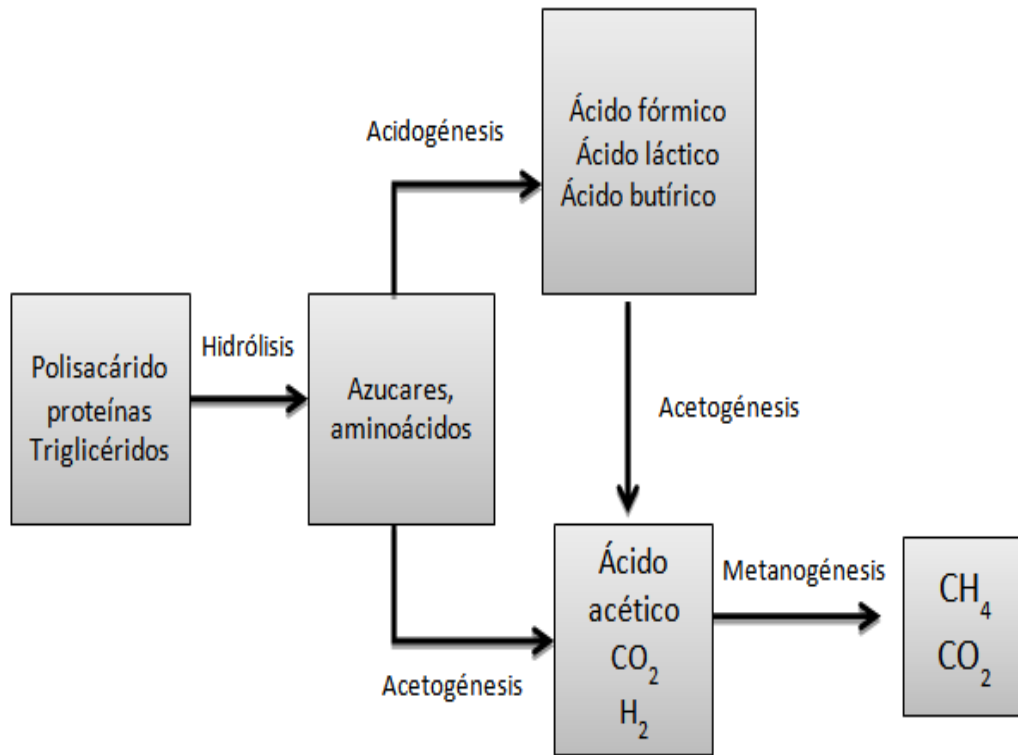
Constituye la etapa final del proceso, en el que compuestos como el ácido acético hidrogeno y dióxido de carbono son transformados a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que consumen hidrogeno (metanogénicas hidrogenófilas). La principal vía de formación del metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido, de forma general (Hilbert 1999).

#### **Acetoclásticas**



#### **Hidrogenofilas**



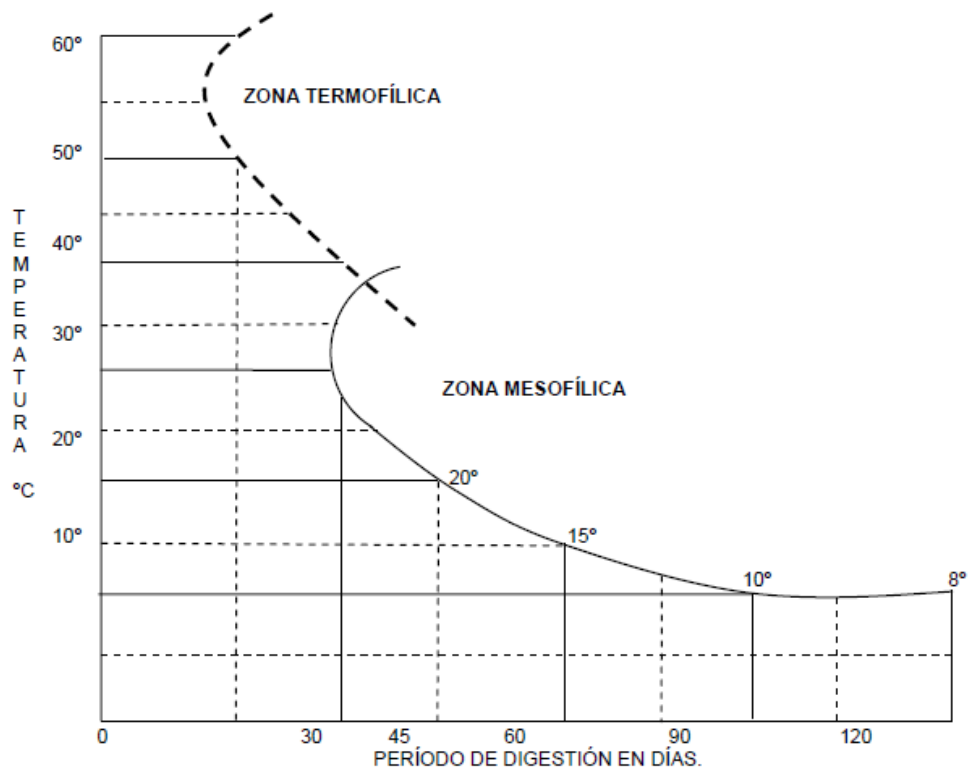


**Figura No. 3** Biometanización de residuos orgánicos  
Fuente: Brown and Tata (1985).

## 6.7 Parámetros del proceso

### Temperatura:

Dado que la digestión anaerobia es un proceso lento, con frecuencia es necesario aplicar calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas. La digestión “en frío” o la digestión psicrófila operan a temperaturas bajo 20°C. La mayoría de los digestores convencionales funcionan en la gama mesófila (Figura No. 4), es decir, entre 12 y 35° C, optimizándose el proceso entre los 29 y 33°C. Ambas poblaciones anaerobias psicrófilas y mesófilas son encontradas de manera natural, en los sedimentos inferiores de los lagos y zonas pantanosas (Montes, 2008).



**Figura No. 4 Efecto de la temperatura en la digestión anaerobia**  
**Fuente: (Rodríguez, 2010)**

#### **Concentración de sólidos:**

La contaminación que se le quita a las aguas residuales es arrastrada por los lodos, ya sea íntegramente (lodo primario) o parcialmente (lodo activado).

En consecuencia, el lodo residual, puede llegar a contener entre un 1 y 10% de sólidos, siendo el resto agua, conteniendo en él una gran cantidad de materia orgánica biodegradable. Los productos residuales del proceso serán sólidos inorgánicos, líquidos y gases. Los líquidos deberán ser recirculados al proceso de tratamiento del agua con el objeto de disminuir el volumen del lodo de salida de la digestión, no es recomendable obtener concentraciones de sólidos que exceda el 10%, ya que tales lodos son viscosos y difíciles de bombear (Montes, 2008).

## pH

Los organismos que intervienen en cada fase son diferentes, y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión, para que ambos tipos de organismos puedan coexistir dentro del digestor y encuentren las posibilidades ambientales para su desarrollo. Concretamente, los organismos productores de ácidos y por consiguiente, el proceso de digestión suele interrumpirse por el decaimiento de los organismos productores de metano debido a algún cambio ambiental que les hace menos viables.

Esta es la razón de que el pH del lodo en digestión sea indicio de que la digestión se está realizando en condiciones adecuadas, ya que, si los organismos productores de metano son inhibidos o destruidos, no se degradan los ácidos producidos y el pH dentro del digestor disminuirá progresivamente. Por debajo de pH 6.2 la supervivencia de los microorganismos productores de metano es imposible y, por consiguiente, cuando en un digestor se alcanza este pH, la digestión puede considerarse como interrumpida (Rodríguez, 2010).

## El tiempo y la temperatura

El tiempo necesario para la estabilización de los lodos es función de la temperatura de digestión (tabla No. 3). En la gama de las temperaturas de 14°C a 65 °C, las bacterias ordinarias o mesófilas mantienen su actividad hasta los 35°C; a partir de este momento, dejan paso a las bacterias que se adaptan más al calor, razón por la que se les llama termófilas (Montes, 2008).

**TABLA No. 3 Tiempo requerido para la digestión de lodos a diversas temperaturas**

<b>Concepto</b>	<b>Digestión mesofílica</b>				
Temperatura °C	10	16	21,1	26,7	32,2
Periodo de digestión, días	75	56	42	30	25

**Fuente: (Metcalf& Eddy, 2002)**

## **Ácidos volátiles**

La concentración de ácidos volátiles, producto de fermentación, tiene una gran importancia en el proceso de la digestión, ya que puede llegar a acidificar el lodo provocando el fallo del proceso. Los valores óptimos están comprendidos entre 50 y 500 mg/L como ácido acético, siendo un valor extremo 2,000 mg/L.

El aumento de la concentración de ácidos volátiles puede venir producido por sobrecarga de alimentación, o por una inhibición de las metanobacterias. A su vez, una gran concentración puede provocar la rotura de la capacidad tampón del lodo, disminución del pH y en consecuencia, inhibición de las bacterias formadoras de metano (Montes, 2008).

## **6.8 Inhibidores de la Digestión Anaerobia,**

La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo. Cuando es demasiado alta la concentración de ácidos volátiles (más de 2.000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3.600 ppm para la termofílica) se inhibirá la digestión, igualmente cuando el Nitrógeno se encuentra en exceso puede producir amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico, destruye las bacterias e inhibe el proceso ocasionado cambios de pH intracelular, acumulación de ácidos grasos volátiles provocando una reducción del pH (Rivera 2010). Según Ortega (2002), los inhibidores de la metanogénesis son:

### **Cationes y metales pesados**

Los cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos tienen un efecto estimulador de la actividad de las bacterias a bajas concentraciones. A partir de un nivel de concentración, pueden proporcionar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento.

La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración. El orden de toxicidad de los metales pesados es Ni > Cu > Cr(IV) ≈ Cr(III) > Pb > Zn. En el caso de aguas residuales industriales las elevadas concentraciones de metales suelen ser la causa de la ineficacia del proceso anaerobio.

## Hidrogeno

El hidrogeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaerobio. Su acumulación en el medio, provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono.

## Nitrógeno amoniacal

Durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento.

## Sulfatos y sulfuros

La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaerobio, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias Metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competición determinará la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido(Ortega, 2002), estos y otros compuestos inhibidores se describen en la tabla No. 4.

**TABLA No. 4 Compuestos Inhibidores de la Metanogénesis**

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO <sub>4</sub>	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitratos (según contenido de nitrógeno)	0,05 mg/L
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
CN (después que se han acondicionado las bacterias Metanogenicas a 2-10 mg/ml)	25mg/L
Ni	200 – 500 mg/L
ABS (detergente sintético)	20- 40 mg/L
Na	3500 – 5500 mg/L
K	2500 – 4000 mg/L
Ca	2500 – 4000 mg/L
Mg	1000-1500 mg/L

Fuente: Gene(1986)

Otros factores que pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia según Montes, (2008) son el pH, la temperatura y el tiempo de retención de la materia orgánica en el reactor.

**pH :** Cada microorganismo posee un rango de pH óptimo diferente. Las bacterias productoras de metano son extremadamente sensibles al pH, con un rango óptimo entre 6,8-7,2; los rangos de pH óptimo para los demás grupos tróficos de microorganismos son de 7,2-7,4 para las bacterias hidrolíticas; 6,6 para las especies acetogénicas y 5- 6 para las acidogénicas

**Temperatura:** Es importante mantener una temperatura de operación estable en el digestor, dado que fluctuaciones fuertes y/o frecuentes en la temperatura afectaría a las bacterias, especialmente las Metanogénicas, produciendo desequilibrios ecológicos en el proceso, y este efecto se traducirá en una baja de producción y en algunos casos, en la paralización del proceso

**Tiempos de Retención:**El factor más importante en el dimensionamiento de un digestor anaerobio es que las bacterias tengan un tiempo suficiente para reproducirse y metabolizar los sólidos volátiles (SV). Los parámetros clave en este sentido son el tiempo de retención de sólidos (TRS), que es el tiempo promedio en que las bacterias están en el digestor, y el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el tiempo promedio en que el lodo líquido se mantiene en el digestor.

## **6.9 Productos Finales de la Digestión Anaerobia**

El biogás y un efluente estabilizado son los principales productos del proceso de la digestión anaerobia.

- **Biosólidos**

Los biosólidos son principalmente material Orgánico que puede ser utilizado en diversos usos benéficos por su contenido de nutrientes especialmente N, P, K. Un ejemplo de tales usos es la incorporación de biosólidos al terreno para abastecerlo de nutrientes y para renovar la materia orgánica del terreno.

## **Aplicación al Terreno de biosólidos.**

En la Norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales (Regla 40 CFR Part 503) requiere que los sólidos de las aguas residuales sean procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno. Cuando ya se ha cumplido correctamente con la estabilización del biosólido se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación(EPA, 2000).

El reciclaje de los biosólidos a través de la aplicación al terreno tiene varios propósitos. mejoran las características del suelo, tales como la textura y la capacidad de absorción de agua, las cuales brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía. La aplicación de biosólidos también provee nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el zinc y el cobre. Los biosólidos pueden servir también como una alternativa o sustituto de los costosos fertilizantes químicos(EPA, 2000).

## **Contaminantes en los Biosólidos**

La calidad de los biosólidos según Vélez (2007), depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales:

### **Metales.**

Principalmente zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr). Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación en la cadena alimentaria suscitan preocupaciones medioambientales y sanitarias. Los metales están siempre presentes, en concentraciones bajas, en las aguas residuales domésticas, pero las concentraciones preocupantes son sobre todo las que se encuentran en las aguas residuales industriales.

### **Nutrientes importantes.**

Son el nitrógeno y el fosforo, su peligrosidad radica en su potencial de eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como



fertilizantes valiosos, y su principal valor para la agricultura reside en su alto contenido de materia orgánica.

### **Contaminantes orgánicos.**

Los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción son motivo de preocupación por sus efectos potenciales sobre el medio ambiente y sobre la salud humana. Una característica de las más importantes es su variado potencial de biodegradación. Muchos se biodegradan lentamente, por lo tanto los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales con tiempos de residencia más largos, tendrán una mayor capacidad para biodegradar estos compuestos indeseables.

El grupo de trabajo de la OMS (Organización Mundial de la Salud) sobre riesgos para la salud de los productos químicos presentes en los lodos residuales aplicados a las tierras, llegó a la conclusión de que la absorción total por el hombre, de contaminantes orgánicos procedentes de la aplicación de lodos a las tierras de cultivo, es poco importante y probablemente no causará efectos adversos para la salud.

### **Agentes patógenos**

Los agentes patógenos más importantes que se han encontrado en los lodos son las bacterias, los virus (especialmente enterovirus), los protozoos, los trematodos, los cestodos y los nematodos. Como resultado, para que cualquier vertido de lodos sea seguro, se precisa la eliminación o la inactivación eficaz de estos agentes patógenos. A este fin, se puede aplicar a los lodos una serie de tratamientos, como la pasteurización, la digestión aerobia o anaerobia, el compostaje, la estabilización con cal, el almacenamiento en estado líquido, la deshidratación y el almacenamiento en seco

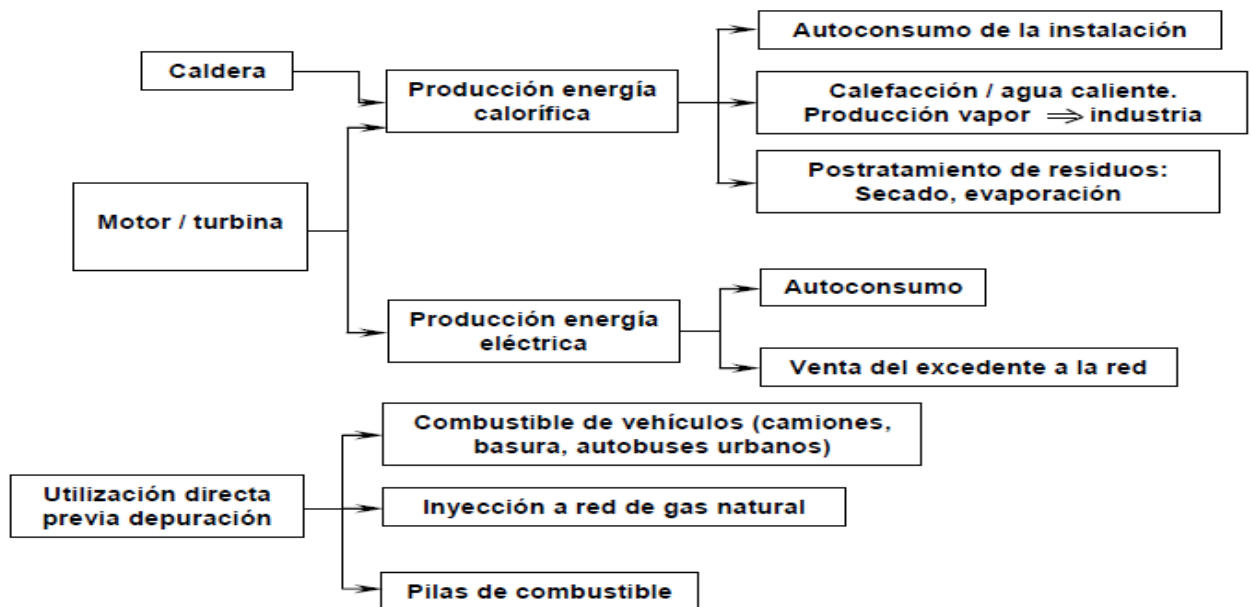
Otro beneficio importante es la producción de energía renovable (biogás) si el gas se aprovecha energéticamente y sustituye a una fuente de energía fósil, se reducen las emisiones de gas metano que produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO<sub>2</sub>(Hilbert, 1999).

## Biogás

El denominado biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el metano (55-65%) y el anhídrido carbónico (35-45%) y en menor proporción, nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de microorganismos(Hilbert, 1999).

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos (figura No. 5):

- En calderas para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H<sub>2</sub>S y otros contaminantes de las membranas.
- Purificándolo y añadiéndole los aditivos necesarios para introducirlo en una red de gas natural.



**Figura No. 5 Usos del biogás**  
Fuente: Montes C,(2008)

## 6.10 Tipos de procesos de la digestión anaerobia de lodos

En la práctica podemos distinguir dos tipos de procesos: sin enriquecimiento de biomasa y con enriquecimiento de biomasa (Hernández, 2002)

- **Procesos sin enriquecimiento de biomasa**

Pueden dividirse a su vez en tres grandes grupos:

- a) **Digestión en etapa única con mezcla completa**

El lodo se mezcla íntimamente mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración y se calienta para conseguir optimizar la velocidad de digestión, este tipo de digestión se caracteriza por los siguientes parámetros:

### Proceso en etapa única

- Temperatura en el rango mesófilo (aprox. 35 °C)
- Mezcla completa de todo el lodo varias veces al día
- Alimentación con lodo crudo espesado
- Sin retirada de sobrenadantes

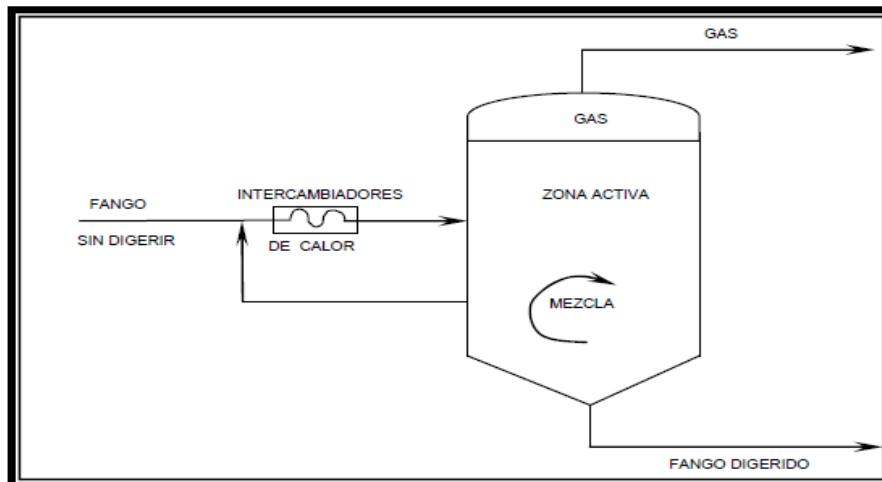
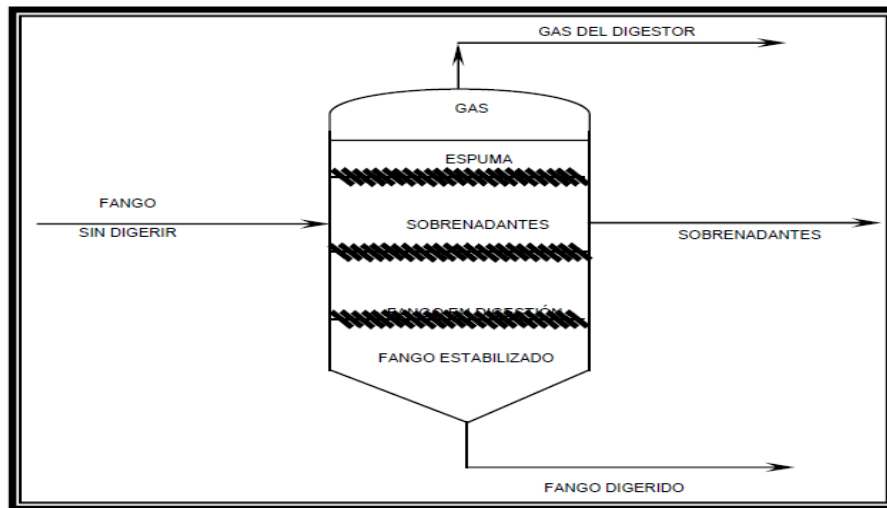


Figura No 6. Digestor en etapa única con mezcla completa.

Fuente: Montes C. (2008)

Las formas más sencillas de este tipo de proceso son aquellas en las que no existe mezcla completa del lodo dentro del sistema, produciéndose por tanto una estratificación, formándose una capa de sobrenadante por encima del lodo digerido. Como consecuencia de esta estratificación, en la práctica, en este tipo de digestores se utiliza menos del 50% de su volumen. Debido a estas limitaciones este tipo de procesos se utiliza en instalaciones muy pequeñas.

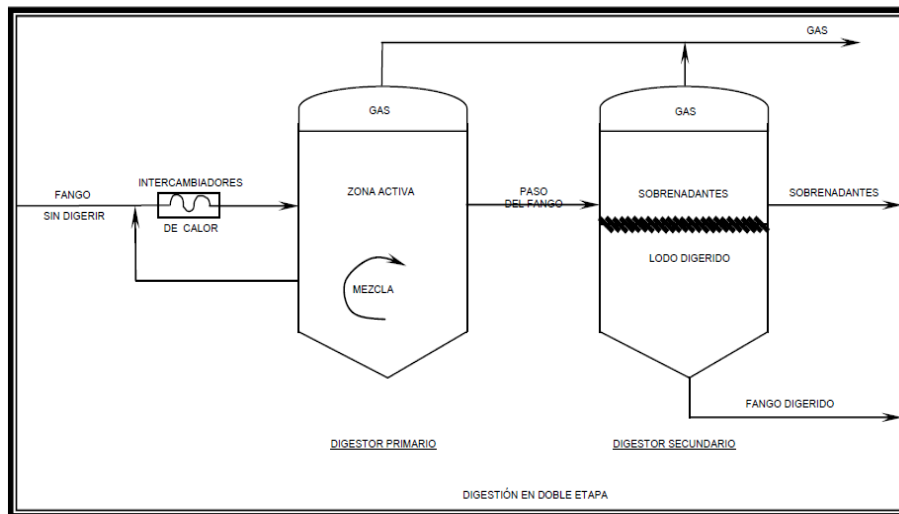
En la figura No. 7, se muestra un esquema de una instalación de este tipo.



**Figura No 7. Digestor en etapa única sin mezcla**  
Fuente: Montes C. (2008)

#### **b) Digestión en doble etapa**

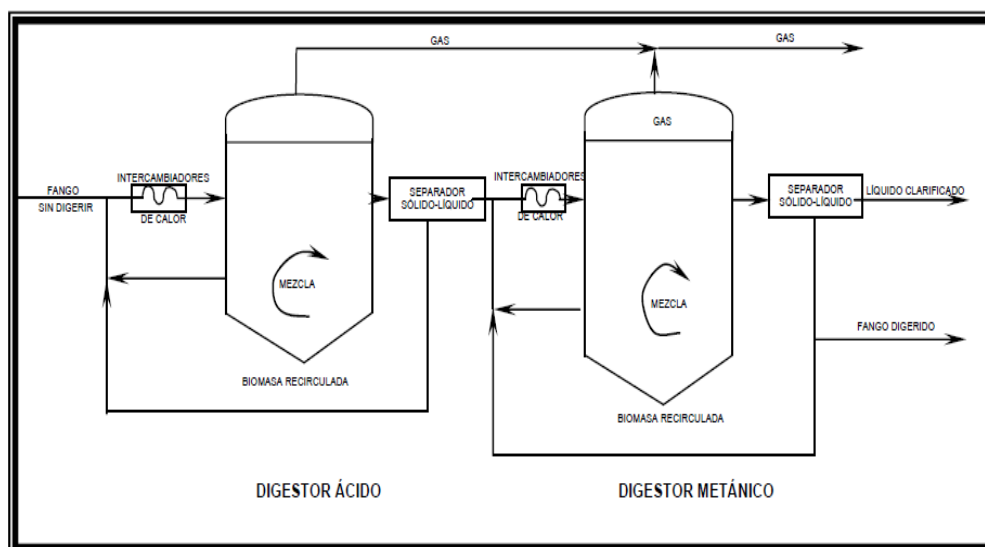
En este proceso el primer tanque se utiliza para la digestión y se equipa con los dispositivos necesarios para el mezclado. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y concentración del lodo digerido y para la concentración de un sobrenadante relativamente clarificado. En la mayoría de los casos y por razones económicas, el segundo de los tanques es abierto y no calentado. En la figura No. 8, se muestra un esquema de una instalación de este tipo (Hernández, 2002).



**Figura No. 8 Digestión en doble etapa**  
**Fuente: Montes C.(2008)**

**c) Digestión en dos fases**

En este proceso mediante el establecimiento de unas condiciones específicas se consigue separar en dos reactores los dos tipos de microorganismos actuantes. En el primer reactor (Figura No. 9) tienen lugar los procesos de hidrólisis y acidificación y en el segundo reactor tienen lugar los procesos de metanogénesis (Montes, 2008).



**Figura No. 9 Digestión en dos fases**  
**Fuente: Montes C. (2008)**

- **Procesos con enriquecimiento de biomasa**

El objetivo de las últimas tecnologías desarrolladas en el campo de la digestión anaerobia es conseguir incrementar los rendimientos de reducción de la materia orgánica consiguiendo una mayor estabilidad y menores costos que en los procesos convencionales. Este aumento del rendimiento se pretende conseguir a través del enriquecimiento con biomasa activa de los digestores (Hernández, 2002).

- a) Fijación de Biomasa mediante la instalación en el interior de los digestores material de soporte fijo.
- b) Fijación de biomasa mediante el relleno del reactor con materiales de soporte flotante
- c) Recirculación de parte de la biomasa ya formada una vez extraída del digestor

## **6.11 Clasificación de los Biodigestores**

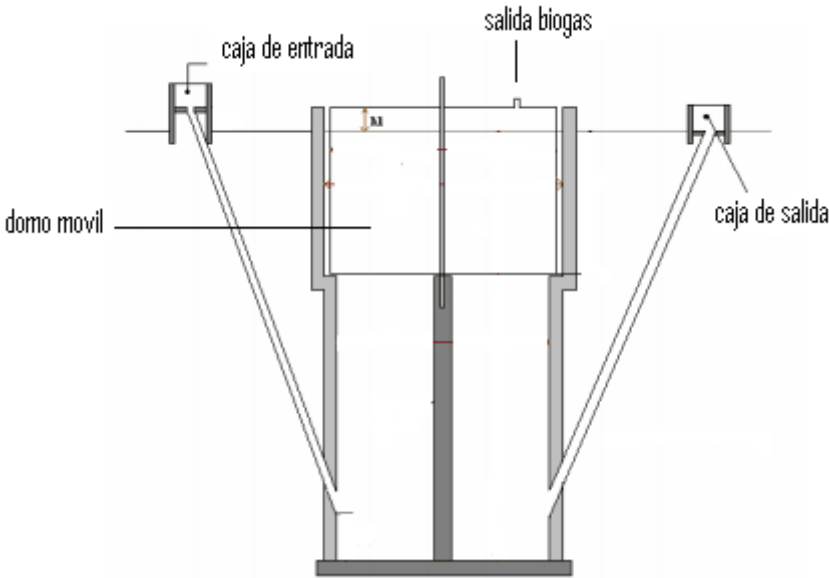
### **Sistema Batch o Discontinuo:**

Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir gas combustible. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás. Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. Este tipo de digestor es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas (Fernández, 2006).

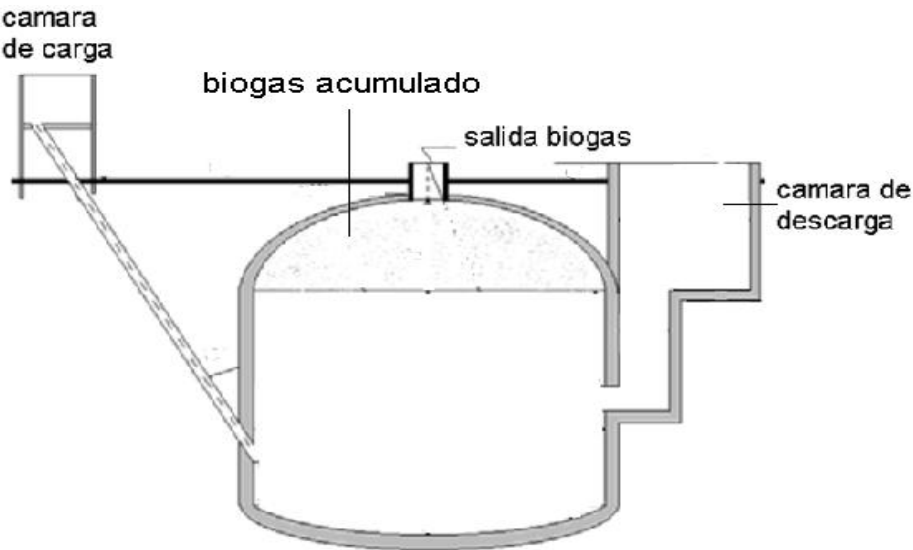
### **Sistemas Semi - Continuos:**

Es el tipo de digestor más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son domo flotante y domo fijo. Entre los de tipo hindú (ó domo flotante) existen varios diseños, pero en general son verticales y enterrados. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. El gasómetro está integrado al sistema, en la parte superior del pozo se tiene una campana flotante donde se almacena el gas y de ésta sale el gas para su uso. En lo que respecta a los digestores tipo chino (ó domo fijo), estos son tanques cilíndricos con el techo y el piso

en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados. En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del mismo sistema(Fernández, 2006).



**Figura No.10 Biodigestor Tipo Indu**  
Fuente:Deganutti, (2012)



**Figura No. 11 Biodigestor Chino**  
Fuente:Deganutti, (2012)

### **Sistemas Continuos:**

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción, agitación, y de igual forma para su control. Por lo tanto este tipo de plantas son más bien instalaciones tipo industriales, donde se genera una gran cantidad de biogás el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales (Fernández, 2006).

## **6.12 Acondicionamiento del lodo**

El acondicionamiento del lodo se realiza con el fin de mejorar sus características de deshidratación. Los métodos más usados suponen la adición de productos químicos y el tratamiento térmico Villaseñor propone las siguientes alternativas para el Tratamiento y disposición de lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

### **Acondicionamiento Químico**

EL acondicionamiento químico da como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua. Los productos químicos empleados son cloruro férrico, cal, sulfato de alúmina y polímeros orgánicos, las ventajas del cloruro férrico y el limo es que proveen una desinfección y estabilización del lodo al reducir el riesgo de daño a la salud y los malos olores. Los polímeros no proporcionan una desinfección pero son más fáciles de suministrar y frecuentemente más económicos.

### **Tratamiento térmico**

Como proceso de acondicionamiento, el tratamiento térmico consiste en calentar el lodo durante cortos periodos de tiempo bajo presión. El tratamiento térmico da como resultado la coagulación de los sólidos y una reducción de la afinidad del agua por parte de los sólidos del lodo. El secado es necesario en la fabricación de fertilizantes para poder triturar el lodo, reducir su peso y evitar una continua acción biológica.

### **Deshidratación y secado del lodo**

La deshidratación y secado son operaciones unitarias físicas (mecánicas) utilizadas para reducir el contenido de humedad del lodo, de forma que pueda manipularse y procesarse como semisólido. Los métodos comúnmente utilizados para deshidratar el lodo



son filtración al vacío, filtración a presión, extensión sobre eras de secado y centrifugación. La elección sobre estos métodos depende de las características del lodo, del método de eliminación final, de la disponibilidad de terreno y de la economía obtenible.

### **Filtración al vacío**

De esta manera se puede conseguir una torta de lodo crudo o digerido uniformemente deshidratado. La concentración mínima de sólidos generalmente aceptable para una filtración económica es de 4%. El lodo deshidratado puede ser cargado para su eliminación final, venta, uso como acondicionador de suelos o fertilizante, o sometido a secado térmico y/o incineración. El líquido filtrado contiene una alta concentración de sólidos finos suspendidos el cual puede ser mezclado con el agua residual que entra en la planta.

### **Filtración a presión**

Para deshidratar el lodo se han utilizado distintos tipos de filtros prensa uno de estos tipos consiste en una serie de placas rectangulares, ranuradas a ambos lados, que están colocadas una en frente de la otra en posición vertical, sobre un bastidor de altura fija o variable y una tela filtrante se ajusta sobre cada placa. Las placas se mantienen juntas con fuerza suficiente para que se adhieran herméticamente y puedan así resistir la presión aplicada durante el proceso de filtración. Para que las placas permanezcan unidas se utilizan prensas hidráulicas o tornillos acondicionados mecánicamente.

Durante el funcionamiento se bombea lodo acondicionado al espacio existente entre las placas y se aplica una presión forzando el líquido a pasar a través de la tela filtrante y de los orificios de las placas. Estas seguidamente se separan y se procede a retirar el lodo; el filtrado es normalmente retornado a la entrada de la planta de tratamiento (Villaseñor, 1995).

### **Otros Tratamientos Comunes de Lodos Residuales.**

Otros medios de estabilización eficaces para reducir la presencia de patógenos, eliminación de olores, disminución de su potencial de putrefacción y reducción del volumen son:

### **El ajuste del pH o estabilización alcalina**

Los lodos se filtran a presión y la pasta de lodo húmedo se mezcla con  $\text{Ca(OH)}_2$ . La reacción de la cal con la humedad eleva la temperatura y el pH lo suficiente para eliminar los microorganismos patógenos disminuir el contenido de humedad y disminuir su olor. La mezcla es aprovechable como fertilizante orgánico(Villaseñor, 1995).

### **6.13 Microbiología de los lodos residuales**

El buen funcionamiento de un sistema de depuración puede definirse por la presencia o ausencia de determinados tipos de organismos que intervienen. El examen microscópico puede ser útil en la previsión de la calidad del efluente y en la determinación de las causas de un mal funcionamiento. Los lodos activados son ecosistemas sujetos a una entrada continua de materia orgánica, por lo que el desarrollo normal de la sucesión ecológica no se lleva a cabo. La sucesión se mantiene en una etapa concreta de régimen estacionario, en la que el rendimiento de depuración sea máximo y exista un equilibrio entre el lodo producido, purgado y recirculado(Villaseca, 2001).

El aprovechamiento o la valorización más conveniente de un efluente por vía microbiana depende del producto a ser obtenido o más precisamente de las aplicaciones y limitaciones del producto final.

Por acción de los microorganismos sobre la materia orgánica puede obtenerse:

- a) Energía a partir de residuos sólidos o líquidos, como es el caso del metano,
- b) Fertilizantes o acondicionadores del suelo, a partir de residuos sólidos (biosólidos),
- c) Alimentos de tipo no convencional como proteínas unicelulares.
- d) Metabolitos específicos, como alcohol, enzimas, etc.

A pesar de que el Biosólidos puede aprovecharse como acondicionador y mejorador del suelo, después de ser sometidos a procesos de estabilización como la digestión anaerobia, se debe controlar entre otras medidas, la concentración de microorganismos patógenos contenidos en ellos, la EPA brinda las especificaciones y límites máximos permisibles de agentes patógenos para el aprovechamiento y disposición final de lodos y biosólidos(Merlí, 2009).

#### **6.14 Actividad Metanogénica Específica (AME)**

Permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios. La AME, además de ser usada para el monitoreo de la calidad del lodo en reactores anaerobios, es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema, con el fin de examinar la degradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos.

Para cuantificar la producción de metano, existen métodos sofisticados como la medición manométrica, cromatográfica o tan simples como el uso de mediciones volumétricas. El primero demanda equipos con especificaciones técnicas especiales y el segundo necesita de un montaje sencillo, sin mayores requerimientos. Teniendo en cuenta la facilidad de implementar mediciones de AME por el método volumétrico, se enfatizará en este tipo de medición por su potencialidad de aplicación en nuestro medio (Torres, 2010).

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 Área de Estudio

La investigación fue realizada en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira específicamente en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR-UTP) ubicada en cercanías al Jardín Botánico (figura No. 12), el cual hace parte del “Corredor Ambiental Otún Consota Pereira”, considerado como un pulmón de la ciudad por la biodiversidad presente en el mismo.



Figura No. 12 Mapa satelital Ubicacion PTAR-UTP  
Fuente: Green MapSystem(2012)

## 7.2 Métodos

Se construyeron 2 biodigestores de flujo discontinuo, (imagen 3) a escala laboratorio, utilizando 2 tanques plásticos con una capacidad máxima de volumen de 19 litros. El lodo fué depositado en el fondo de los tanques a través de una tubería de una pulgada y media (1½”) que se inserta en un tapón limpieza sujeto a la tapa del tanque, por donde se alimentó el reactor; ocupando aproximadamente el 50 % del volumen de cada digestor.



**Figura No 13 Digestores Anaerobios**  
**Fuente: Propia**

La toma de muestra y posterior evacuación del biosólido se realizó por la parte inferior del reactor, que presenta una llave de paso a unos cinco centímetros de la base del tanque aproximadamente.

En la parte superior del reactor, se instaló una llave de paso que permite regular la salida del gas, conectada a una manguera que conduce el gas generado hasta un recipiente que contiene una solución de hidróxido de sodio, donde se cuantificó mediante el desplazamiento de volumen por el método (AME) Actividad Metanogénica Especifica.

La construcción de dos digestores anaerobios tuvo como fin, obtener por duplicado los datos revelados durante toda la investigación dado que se desconocía el comportamiento que pudiera presentar el montaje dispuesto para desarrollar el proyecto.

El desarrollo de esta investigación consto de tres ensayos, realizados en tres tiempos distintos de retención (ANEXO No.1) y con muestras diferentes, tomadas en el mismo punto cada vez, con el fin de estimar un tiempo de digestión adecuado de acuerdo a las condiciones ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

El tiempo destinado para la digestión anaerobia del lodo fue de 62 días, para el primer ensayo, siendo este el periodo de experimentación más extenso, dado a que se ignoraba el comportamiento del sustrato frente al montaje realizado y al constante cambio de la temperatura que se presenta en el lugar. Finalizado el tiempo dispuesto para el primer ensayo y estimando unas condiciones básicas de operación se determina un tiempo de operación de 45 días para los dos ensayos siguientes.

Cumplido el tiempo establecido para las digestiones del segundo y tercer ensayo, y en vista de que no fue posible iniciar inmediatamente el proceso de caracterización del material de salida de los digestores por la limitada disposición de los equipos de laboratorio, se optó por continuar con el proceso de digestión anaerobia, finalizando el segundo ensayo a los 47 días y el tercer ensayo a los 50 días, partiendo del momento en que se ingresó el lodo a los digestores; en los días posteriores al tiempo estimado para la culminación de los ensayos 2 y 3 se continua con el monitoreo de la digestión anaerobia sin encontrar cambios inesperados.

### **7.3 Toma de muestras**

Debido a las características nocivas del material a analizar, se tomaron diversas medidas de seguridad. Entre los elementos de protección utilizados para la toma, manejo y procesamiento de las muestras tenemos: guantes de látex, delantal, gafas de seguridad y tapabocas, con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación al estar en contacto directo con el lodo residual.

Se tomaron muestras representativas directamente del tubo de recirculación del lodo, desde el tanque de sedimentación al tanque de aireación y fueron trasladadas hasta el

laboratorio de procesos biológicos, ubicado en la facultad de ciencias ambientales para posteriormente ser sometidas a un proceso de digestión anaerobia bajo las condiciones ambientales de la UTP (Tabla No 5).

Después del proceso de digestión, la toma de muestras se realiza mediante una llave de paso ubicada en la parte inferior del digestor; los análisis se realizaron por triplicado para permitir una mayor confiabilidad de los resultados, siguiendo el esquema de metodología de la figura No. 14.

**Tabla No. 5 Condiciones Ambientales Universidad Tecnológica de Pereira**

<b>Altura</b>	<b>Temperatura Promedio</b>	<b>Humedad Relativa Promedio</b>	<b>Presión Barométrica</b>
1300 msnm	20 a 26 °C	71 %	637,16 mmHg

**Fuente: Red Hidroclimatologica de Risaralda 2010**

Se determinaron las características fisicoquímicas y microbiológicas a la entrada y a la salida del biosólido. Las condiciones para los análisis microbiológicos, fueron estrictamente aplicadas, el área de trabajo y el material empleado, fue estrictamente lavado y desinfectado, las muestras obtenidas antes y después del proceso de biodigestión, fueron recolectadas en 2 frascos de vidrio estériles, de boca ancha, tapa rosca, y con capacidad de 1 Litro; fueron conservadas en frío hasta su utilización en el laboratorio de microbiología de la escuela de química.

## **7.4 ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS**

Las determinaciones llevadas a cabo para este tipo de muestra las sugiere la NTC 5167.

Los análisis propuestos son pH, Materia Orgánica, Humedad, Cenizas, Nitrógeno Total, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y Na. La metodología para cada uno de los parámetros propuestos, fueron proporcionadas por el laboratorio de análisis químico de Suelos de la Escuela de Química UTP.

## ➤ pH

**Método:** Potenciométrico

**Equipo:** pH-metro Fisher Scientific Accumet basic AB15 13636-AB15

El pH es una de las variables utilizadas en el diagnóstico de los sistemas anaerobios, ya que muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Un ejemplo de ello, son las situaciones de acidificación de un reactor anaerobio provocadas por desequilibrios en la producción y consumo de ácidos grasos volátiles.

En el procedimiento de medida del pH, se debe calibrar el **pH-metro** con las soluciones reguladoras de pH 7.0 y pH 4.0 (Soluciones buffer), posteriormente se introduce el electrodo en la muestra, agitar la muestra para asegurar su homogeneidad y registrar la lectura.

## ➤ % HUMEDAD

**Método:** Gravimétrico

**Equipo:** Estufa BINDER FD 15I

La determinación de la humedad se lleva a cabo mediante la evaporación de agua contenida en una muestra representativa del lodo, la cual es pesada en una capsula de porcelana previamente tarada, secada en una estufa a 105°C durante 24 horas, las muestras se pesan nuevamente para obtener el peso constante y empleando la siguiente fórmula se determina el % de humedad en la muestra.

**P<sub>i</sub>**= peso de la muestra húmeda

**P<sub>f</sub>**= peso de la muestra seca

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Los sólidos totales son los residuos resultantes luego de la evaporación y secado de la muestra es posible calcularlos con la siguiente fórmula.

**P<sub>i</sub>**= peso de la capsula

**P<sub>f</sub>**= peso de la capsula + peso de la muestra seca



$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

### ➤ **SOLIDOS VOLÁTILES**

**Metodo:** Gravimetrico

**Equipo:** Mufla digital programable. Ney. Modelo 2-1350

Los sólidos volátiles corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a  $550 \pm 50$  °C de la muestra seca. Se determinan por diferencia de peso empleando la siguiente formula:

$$\% SV = \frac{MS - SF}{MS} \times 100$$

Donde:

MS = peso muestra seca

SF = peso sólidos suspendidos fijos

SV = sólidos suspendidos volátiles

### ➤ **%CENIZA**

**Metodo:** Gravimétrico

**Equipo:** Mufla digital programable. Ney. Modelo 2-1350

Obtener peso constante del crisol, tarar y pesar la muestra seca, homogénea. La calcinación de la muestra se lleva a cabo en dos tiempos, la mufla es programada para que la temperatura ascienda cada 20°C hasta que alcanza la temperatura deseada y permanezca el tiempo programado para cada rampa, al alcanzar la temperatura final (475°C) la muestra permanece durante 4 horas. La temperatura de la mufla debe descender aproximadamente a 200°C o 150 °C antes de retirar el crisol y depositarlo en el desecador para posteriormente ser pesado.

El porcentaje de cenizas se determina mediante la siguiente formula.

$$\% \text{ CENIZAS} = \frac{(P_i - P_f)}{X} * 100$$

Dónde:

Pi = peso crisol solo

Pf = peso crisol + cenizas

X = muestra lodo seco

Una vez pesado y frío el crisol se adiciona cuidadosamente unas gotas de agua y se acidifica con HCl 1:1, calentar hasta sequedad en la cabina de extracción, dejar enfriar y adicionar HCl 1:1 y aforar a 25 ml.

Esta solución se empleará para las determinaciones de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Na.

### ➤ DETERMINACION DE FÓSFORO (P)

**Método:** Fotométrico

**Equipo:** Fotómetro UV-visible UV-1700 SHIMADZU

Se basa en la reacción del ión fosfato con el molibdo vanadato para formar un complejo de color amarillo estable en medio ácido.

Preparación de soluciones

- Solución coloreadora: esta solución se prepara en el momento que se tengan las muestras listas para colorear. Se mezclan iguales cantidades de las soluciones de Molibdato y Vanadato.
- Patrón de 100 ppm a partir de la sal  $\text{KH}_2\text{PO}_4$
- Patrones de lectura de (2, 5, 10, 15 y 20) ppm a partir de la solución patrón

Una fracción de la solución original se disuelve en agua destilada y se le adiciona la solución coloreadora se deja que permanezca en reposo durante 15 minutos y se realiza la lectura a una longitud de onda de 430 nm se registra su absorbancia y se calcula la concentración de la muestra con la ecuación de la curva obtenida con los patrones de lectura.

### DETERMINACION DE ELEMENTOS MAYORES (K, Ca, Mg) Y MENORES (Fe, Mn, Zn, Cu,) y Na

**Método:** Absorción Atómica

**Equipo:** Espectrofotómetro UNICAM SOLAAR

La determinación se realiza por medio de la Espectroscopia de Absorción Atómica (E.A.A.), donde la radiación de una longitud de onda determinada, es emitida por una lámpara de cátodo hueco que es específica para cada elemento a analizar, experimentando una pérdida de intensidad al atravesar una llama en la que se encuentra atomizada la muestra en estudio, esta pérdida es proporcional a la concentración del analito elemental en la muestra.

Se preparan diluciones de la solución original (cenizas) para las determinaciones de los elementos Mayores (K, Ca, Mg), los elementos menores (Fe, Mn, Zn, Cu) y Na se pueden leer directamente en la solución original.

Las diluciones de muestras para leer K, Ca, Mg: adicionar a 0.5 ml de la solución original, 5 ml de la solución Na+La, y aforar a 100 ml en balones volumétricos.

#### **Preparación de Patrones:**

Los patrones de trabajo, se preparan a partir de los titrisoles de 1000 ppm de Fe, Mn, Zn, Cu, K, Ca, Mg y Na, se preparan como se indica a continuación.

Para preparar los patrones de trabajo se parte de patrones de 100 ppm, usando la siguiente relación  $V_C C_C = V_D C_D$  donde C = Patrón concentrado y D = Patrón diluido (Patrón de trabajo)

#### **➤ MATERIA ORGÁNICA**

**Método:** Fotométrico (Walkley y Black)

**Equipo:** Espectrofotómetro UV-visible UV-1700 SHIMADZU.

En este método la muestra se trata con una cantidad conocida de  $K_2Cr_2O_7$  (oxidante) en presencia de un medio ácido ( $H_2SO_4$ ). El calor desprendido por la reacción exotérmica del ácido al diluirse, favorece la acción del bicromato para que oxide la Materia Orgánica. Se desarrolla un color por acción del Ácido Crómico reducido el cual es proporcional a la Materia Orgánica oxidada y se puede determinar fotométricamente a 585 nm.

## Preparación de patrones

- *Patrón principal de Sacarosa:* 50000 ppm
- *Soluciones de trabajo:* Tomar alícuotas del patrón principal y preparar patrones de 5, 10, 15, 20, 25 y 50 ppm.

Para realizar la curva, los patrones son sometidos al mismo procedimiento que las muestras.

Para determinar el % de la materia orgánica, se toma la absorbancia que da el equipo y por medio de la siguiente ecuación se obtiene el % de M.O:

$$\% M.O = -0.649 + (51.233 \times Abs) - (16.307 \times Abs^2)$$

Del porcentaje de materia orgánica se obtiene % de carbono orgánico, % de nitrógeno orgánico y la relación carbono nitrógeno empleando las siguientes formulas.

$$\% C Org = \frac{\% M. O}{\left(\frac{100}{58}\right)}$$

$$\% N org = 0,014497 + [0,0044757 \times \% M. O] - [0,000597 \times (\% M. O^2)]$$

$$Relación C:N = \frac{\%C}{\%N}$$

### ➤ NITRÓGENO TOTAL

**Método:** SemimicroKjeldahl

**Equipo:** Digestor y destilador Kjeldahl UDK 142 VELP Científica.

El método Kjeldahl comprende tres fases fundamentales:

- 1) Digestión de la muestra. La muestra de suelo se somete a una digestión por calentamiento con ácido sulfúrico y por una mezcla de sales que aceleran y facilitan tanto la oxidación de la materia orgánica como la conversión de todas las formas de nitrógeno en  $N^{+3}$ , que en medio ácido se encuentran en forma de radical amonio ( $NH_4^+$ ); es decir, se llevan las formas orgánicas a formas minerales de nitrógeno.

- 2) Destilación. Una vez transformado el nitrógeno en  $\text{NH}_4^+$ , se expone a una base fuerte como el hidróxido de sodio para formar hidróxido de amonio, que por la acción del calor se descompone en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y agua.
- 3) Valoración. El amoníaco desprendido por la reacción se recoge en un volumen conocido de solución valorada de ácido bórico y por comparación con un blanco se determina la cantidad de ácido que reaccionó con el  $\text{NH}_3$ .

La concentración de nitrógeno se obtiene sustituyendo en la siguiente fórmula:

$$\%N = \frac{\text{volumenACIDO} * \text{normalidadACIDO}}{\text{PesoMUESTRA}} * 1.4007$$

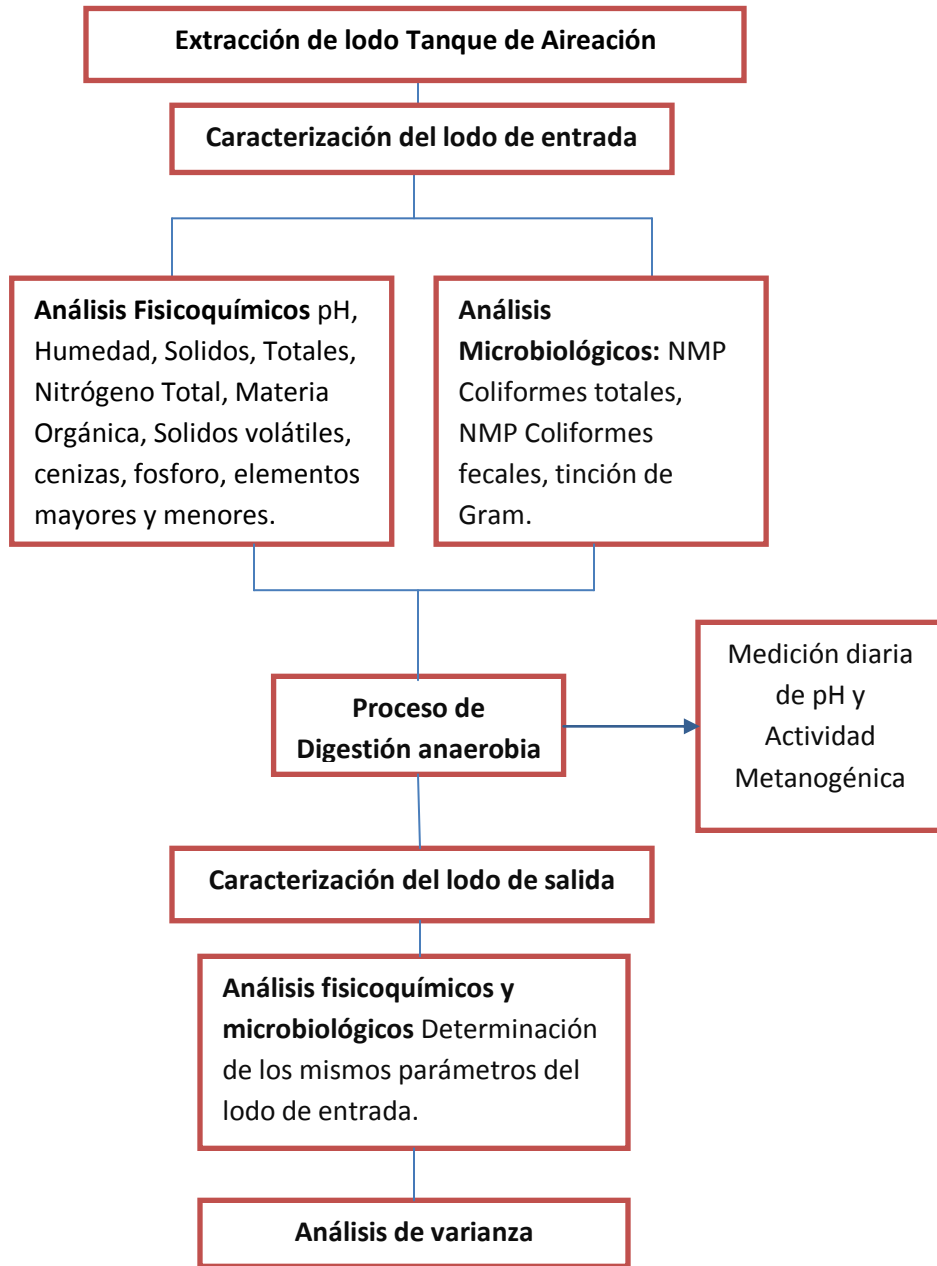
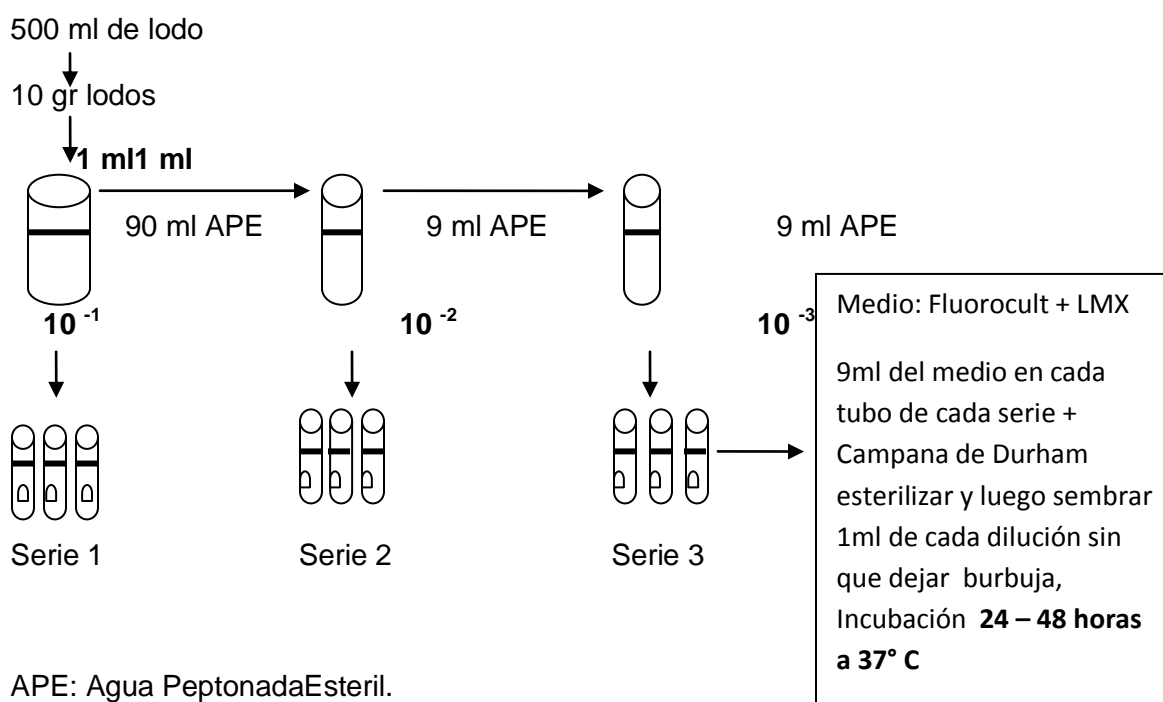


Figura No 14. Esquema general de la metodología desarrollada

## 7.5 Análisis Microbiológicos

Para cumplir con la calidad microbiológica del lodo generado en la PTAR-UTP y conocer la influencia que representa el proceso de digestión anaerobia sobre los microorganismos sugeridos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, se realiza la cuantificación de Coliformes totales y Fecales, por el método de número más probable (NMP). (Anexo No.2)

## 7.6 Esquema Análisis microbiológico



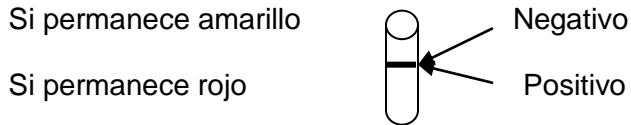
### Determinación de Coliformes Totales

Observar para cada serie de tubos turbidez y producción de gas “sin agitar” y anotar el código formado por el número de tubos con resultados positivos.

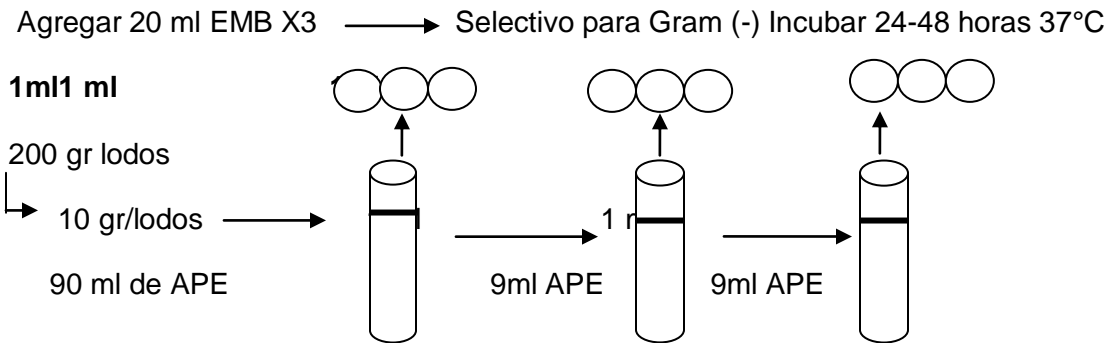
### Determinación de Coliformes Fecales

Observar para cada serie de tubos la fluorescencia, producto de la exposición a luz UV “sin agitar” y anotar el código formado por el número de tubos con resultados positivos.

Confirmar con la prueba del indol Reactivo de Kovacs un cambio de coloración en la superficie del medio de amarillo a púrpura confirma la presencia de coliformes totales.



Adicional a la determinación de coliformes totales y fecales se procede a confirmar la presencia o ausencia de E. COLI mediante observación microscópica



## 7.7 Determinación Actividad Metanogénica Específica (AME)

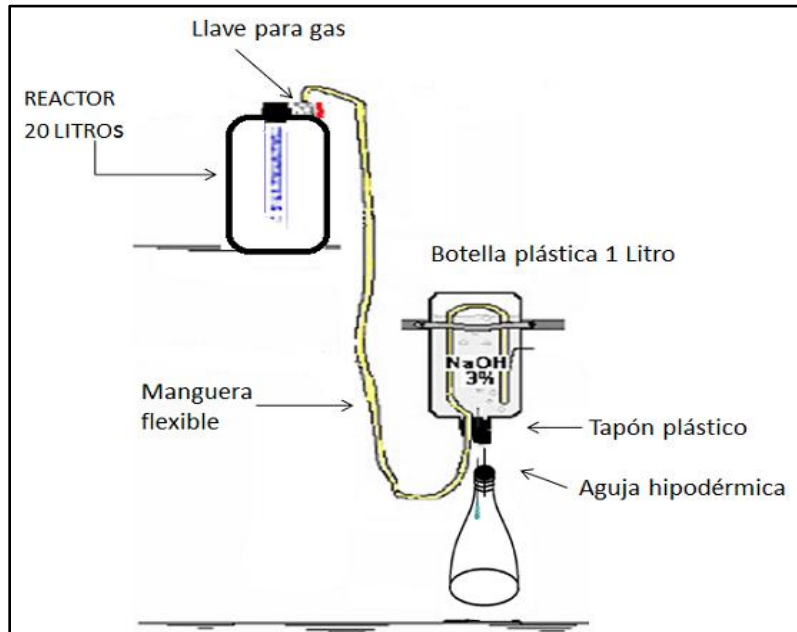
Para cuantificar la producción de metano por el grupo de microorganismos presente en el lodo se utiliza la AME, esta herramienta no cuenta con un protocolo estandarizado que facilite la comparación de resultados. Su aplicación resulta más útil en términos comparativos, por ejemplo, entre condiciones o fases operacionales de reactores anaerobios (Torres, 2010).

### Ensayo AME por Método Volumétrico.

El método volumétrico se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH o el KOH, por su propiedad de reaccionar con el CO<sub>2</sub> presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido. Se recomienda chequear que el pH del NaOH sea superior a 12 unidades para garantizar que éste secuestre el CO<sub>2</sub> producido (Torres, 2010). El diseño del montaje a utilizar se esquematiza en la figura No.



Las reacciones que se presentan son las siguientes:

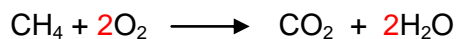


**Figura No.15 Montaje Actividad Metanogénica Específica**  
Fuente: (Torres, 2010)

## 7.8 Producción de metano y cálculo de la AME

Para calcular la producción teórica de metano se debe tener en cuenta las condiciones de temperatura y presión atmosférica bajo las cuales se realizarán los montajes de AME.

Considerando la ecuación de combustión del metano.



Teniendo una oxidación completa de este, un mol de metano consume dos moles de oxígeno, por lo tanto a condiciones normales de temperatura ( $T=273\text{ K}$ ) y presión ( $P=1\text{ Atm}$ ), 22,4 litros de metano corresponden a 64g de DQO, es decir, 0,35 L de  $\text{CH}_4$  por gramo de DQO removida. Esta relación permite estimar la fracción de materia orgánica convertida en metano a partir del volumen experimental de metano producido en el reactor con respecto al tiempo (Torres, 2010).

**Corrección del volumen obtenido:** en vista de que el ensayo de AME no se practicó en condiciones normales de temperatura y presión es indispensable corregir este valor como sigue:

$$K(t) = \frac{P * K}{R * (273 + T^{\circ}C)}$$

K(t) = factor de corrección (g DQO/ L)

P = presión atmosférica local

K = carga orgánica digerida correspondiente a una mol de CH<sub>4</sub> (64g DQO/mol)

R = constante de los gases ideales

T = temperatura operacional del montaje

El volumen teórico se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

V CH<sub>4</sub> = volumen teórico de metano producido (L)

DQO CH<sub>4</sub> = Carga de DQO removida en el reactor anaerobio y convertida en metano

Con el volumen teórico de metano se calcula la actividad metanogénica específica AME.

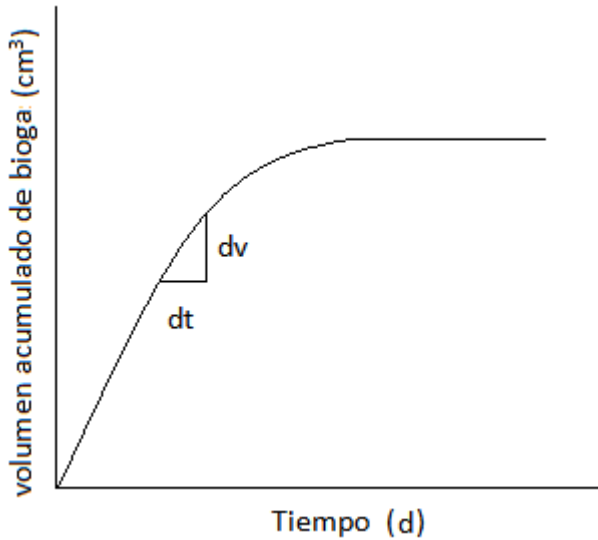
$$AME \text{ (g DQO/gSTV * d)} = \frac{m * 24}{V_{CH_4} * M}$$

Donde

m = pendiente máxima en la curva de producción de metano (ver figura No. 16)

M = masa de lodo (g)

Cálculo de la pendiente



**Figura No.16 Curva de producción de biogás acumulado con el punto de medición de la pendiente.**

$$m = \frac{dv}{dt}$$

$$dv = (\text{cm}^3), dt = (\text{h})$$

## 7.9 Análisis Estadístico

Por medio del paquete estadístico SPSS (Statistical Product and Service Solutions) soluciones estadísticas de productos y servicios, son analizados los datos obtenidos a la salida de ambos digestores en cada uno de los ensayos y se les practica el test de normalidad Shapiro-Wilk; aquellos con distribución normal se les realiza la prueba T student para evaluar la diferencia entre las dos muestras; para aquellas variables dependientes que no muestran distribución normal en alguno de los ensayos, se comparan con la prueba no paramétrica Kruskal Wallis.

Posteriormente se lleva a cabo un Análisis de la Varianza (ANOVA), que permite probar hipótesis referidas a los parámetros de posición de dos o más distribuciones. La hipótesis que se somete a prueba generalmente se establece con respecto a las medias de las poblaciones en estudio o de cada uno de los tratamientos evaluados en un experimento;

para esto se usa el paquete estadístico INFOSTAT. El análisis de varianza realizado en esta investigación se enfoca en comprar los datos obtenidos a la entrada y la salida de cada ensayo, no es posible comparar los grupos formados por el factor tiempo (Ensayo 1: 62 días; Ensayo 2: 47 días; Ensayo 3: 50 días) porque las características del lodo para cada tratamiento son diferentes y no hay igualdad de condiciones para los tres niveles del factor tiempo.

Las hipótesis a evaluar serán

Ho: Las características fisicoquímicas del lodo se ven afectadas por la digestión anaerobia

Ha: Las características fisicoquímicas del lodo no se ven afectadas por la digestión anaerobia

El factor corresponde con la digestión anaerobia y los dos niveles a establecer serán con o sin digestión.

## **8. RESULTADOS**

### **8.1 Evaluación de la Distribución Normal con SPSS.**

Para el ensayo 1 los elementos mayores y menores, Nitrógeno total, Fosforo, humedad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas mostraron distribución normal, el T-student practicado a estos parámetros con un intervalo de confianza de 95% se obtuvieron resultados de significancia  $> 0,05$ , exceptuando el fósforo con valores de 0,038 para el digestor 1 y 0,043 para el digestor 2, por tal razón se practicó la T-student con un 99% de confiabilidad ( $\alpha = 0,01$ ) (ver anexo 3).

Concluyendo para ambos intervalos de confiabilidad que ( $\mu_1 = \mu_2$ ) por tal motivo se acepta que los resultados obtenidos a la salida de los dos digestores son iguales. Las variables dependientes que no mostraron distribución normal como, materia orgánica, carbono orgánico, nitrógeno orgánico y relación carbono nitrógeno fueron comparadas con la prueba no paramétrica Kruskal Wallis obteniendo valores de significancia  $> 0,05$  por lo tanto se acepta ( $\mu_1 = \mu_2$ ) (Anexo 4).

En los ensayos 2 y 3 todas las variables dependientes para los resultados obtenidos a la salida de cada digestor cumplen con una distribución normal, por lo tanto, es posible aplicar T-student obteniendo resultados de significancia  $> 0,05$  concluyendo que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos ( $\mu_1 = \mu_2$ ) (ver anexo 5, 6).

## 8.2 Resultados y Análisis Físicoquímicos.

Con el fin de obtener un punto de referencia para los resultados presentados en cada uno de los ensayos de digestión anaerobia, se procede a realizar una caracterización del lodo de alimentación, proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira (**PTAR-UTP**). Posteriormente se evaluaron los mismos parámetros del lodo después de haber sido sometido al proceso de digestión anaerobia en condiciones ambientales de la UTP.

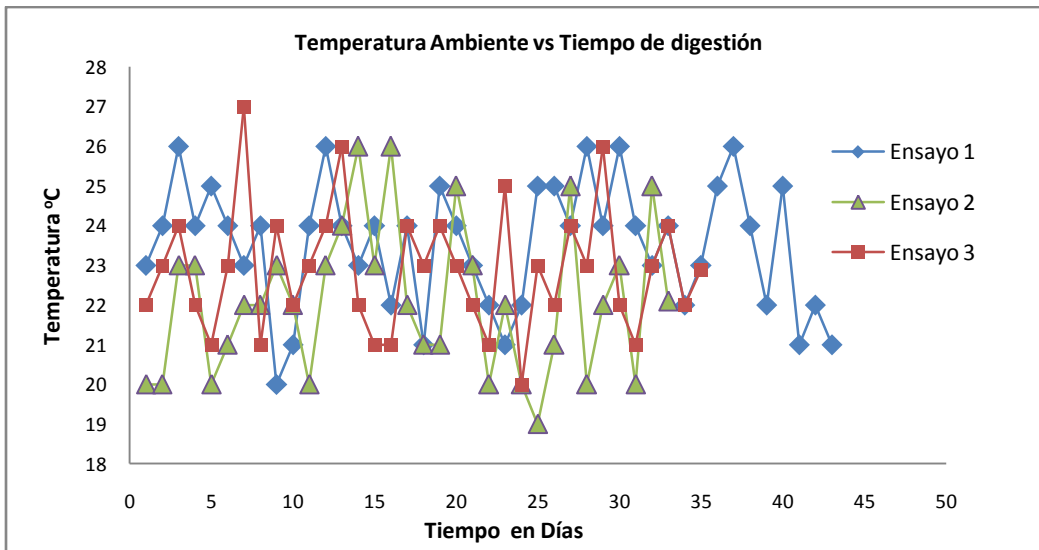
En la tabla N°6 se pueden observar las medias de los parámetros físicoquímicos evaluados para el inicio de cada ensayo; estos datos corresponden con la caracterización del lodo, nombrada anteriormente.

**TABLA No. 6 Medias de la caracterización del lodo dispuesto para alimentar los digestores en los tres ensayos.**

Parámetros	media		
	Entrada E1	Entrada E2	Entrada E3
ppm Ca	1029,14	1244,47	858,15
ppm Mg	219,08	168,15	228,41
ppm Fe	1028,27	353,34	1237,54
ppm Mn	179,54	120,21	199,94
ppm Zn	93,24	121,96	87,14
ppm Cu	63,97	74,63	83,42
ppm Na	110,18	103,9	119,04
N total %	0,97	1,53	0,98
ppm P	630,78	571,83	569,03
ppm K	852,42	1186,29	954,95
% MO	29,61	33,32	30,21
% C Orgánico	17,17	19,32	17,52
% N Orgánico	0,81	0,84	0,82
r C/N	21,09	22,99	21,45
% Humedad	97,45	97,66	97,74
% ST	2,55	2,34	2,26
% SV	58,034	60,45	62,12
% CENIZAS	41,46	40,4	43,51

- **Temperatura**

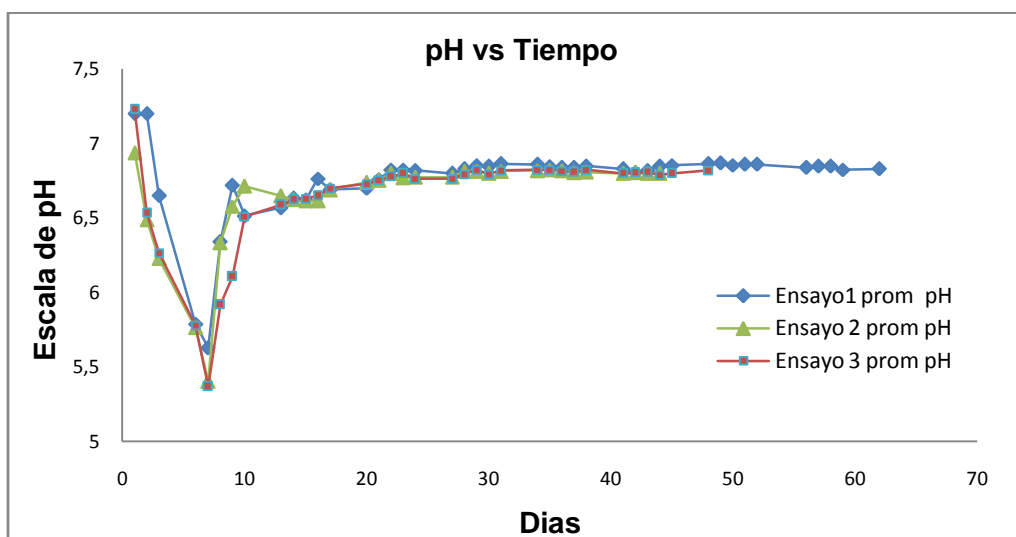
La figura No. 17 describe de manera conjunta el comportamiento de la temperatura Ambiente para los tres ensayos; esta fue tomada en la parte externa del laboratorio de Procesos Biológicos, ubicado en la Facultad de Ciencias Ambientales en la UTP, con respecto al tiempo destinado para cada uno de los ensayos realizados; en el graficose aprecia el constante cambio de la temperatura, dado a que este parámetro está totalmente relacionado con las condiciones climáticas que se presentaron en cada uno de los días de operación de los digestores (anexoNo.7). La temperatura promedio para el ensayo 1, fue de 23,5 °C; durante el ensayo 2 se presentó una temperatura promedio de 22,1°C y por último, para el ensayo 3, la temperatura fue de 22,9 °C. Rodríguez (2010) propone que estas temperaturas se encuentran dentro del rango mesofílico, comprendido entre los 12°C y 35°C. El tiempo de digestión está en función de la temperatura y según Metcalf& Eddy (1977) el periodo de digestión a una temperatura de 21,1 °C es de 42 a 45 días, por esta razón los ensayos dos y tres se desarrollaron en un tiempo menor que en el ensayo uno. De acuerdo a las medias de temperatura anotadas no se alcanzó la temperatura optima de operación para la digestión anaerobia, que según Montes (2008) ocurre entre 29 y 33 °C..



**Figura No.17: Comportamiento de la Temperatura del biodigestor con respecto al tiempo de retención transcurrido.**

- **pH:**

La figura No.18 muestra el comportamiento del pH de las fracciones de lodo extraído diariamente (Anexo No.8) de los digestores, durante los tiempos establecidos para los ensayos uno, dos y tres, el pH inicial se encuentra entre 6,94 y 7,23 para los tres ensayos, en la figura se observa una baja considerable del pH entre los días 1 y 8, el cual podría atribuirse al inicio de la etapa acidogénica alcanzando un valor mínimo de pH de 5,92 en el tercer ensayo.



**Figura No. 18: Comportamiento del pH en el lodo, con respecto al tiempo establecido de digestión anaerobia.**

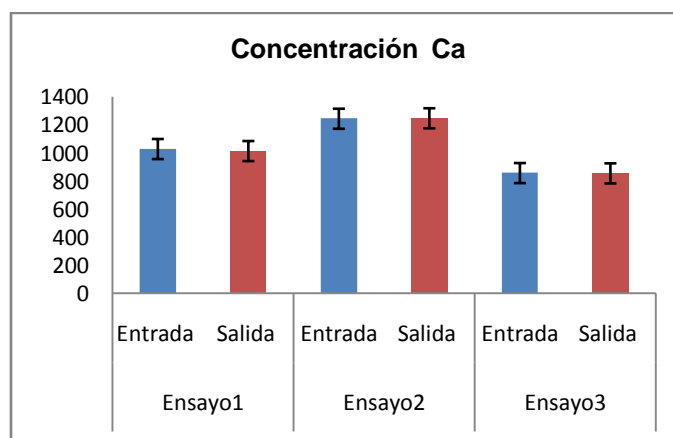
Con el paso del tiempo el sistema se equilibró, sin la adición de compuestos que aporten a la estabilización del pH, como el bicarbonato de sodio, manteniéndose en cercanías a la neutralidad obteniendo una media de pH en el primer ensayo de 6,80; en el segundo ensayo de 6,76 y en el tercer ensayo 6,73. El sistema no retornó al pH inicial posiblemente por las constantes variaciones de la temperatura o debido a un alto contenido en la producción de ácidos grasos volátiles (propiónico, butírico, acético u otros) Según Varnero, (2011) para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0. El mismo autor plantea que para cultivos mixtos (bacterias acidogénicas y metanogénicas) el pH óptimo se encuentra entre 6,8 y 7,4, valores muy cercanos a los registrados en esta investigación.

El proceso anaeróbico puede verse afectado adversamente por pequeños cambios en los niveles de pH. Los organismos metanogénicos son más susceptibles a los cambios de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica (Hilbert, 1999), de ahí radica la importancia de monitorear constantemente este parámetro.

- **Elementos Mayores (Ca y Mg)**

Las muestras de lodo antes y después de ser sometidas al tratamiento de digestión anaerobia en los ensayos 1, 2 y 3 presentaron las características anotadas para los elementos mayores y menores en las siguientes figuras.

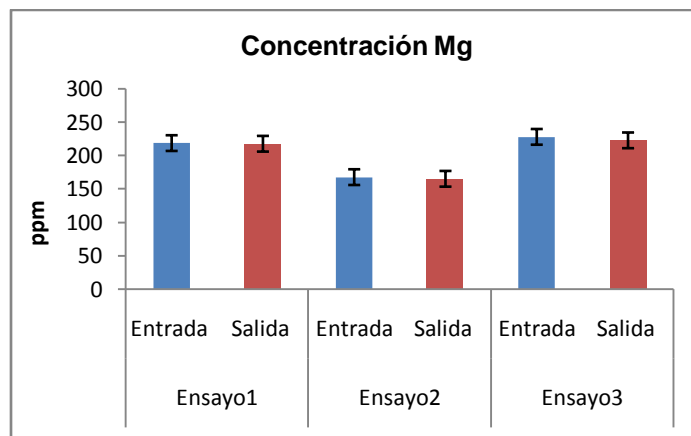
Las figuras No. 19 y 20 muestran las medias correspondientes a las concentraciones de Calcio y Magnesio obtenidas en los ensayos 1, 2 y 3 a la entrada y la salida del digestor, encontrando que para las tres muestras analizadas, la concentración inicial de los parámetros mencionados difieren entre sí, y al finalizar cada uno de los ensayos las concentraciones de salida guardan semejanza con las obtenidas a la entrada. Para el calcio en el ensayo 1, se obtiene a la entrada una media de 1029,14 ppm y a la salida 1014,76 ppm; en el ensayo 2 se registra la concentración más alta, 1244,47 a la entrada y 1247,99 a la salida y en el ensayo 3, se registra una concentración menor con respecto a los ensayos anteriores, 858,18 ppm a la entrada y 856,11 ppm a la salida.



**Figura No. 19 Concentración en ppm de Calcio en los ensayos uno dos y tres.**

Para el Magnesio en el ensayo 1 se obtiene una media de 219,08 ppm a la entrada y 218,09 ppm a la salida; el ensayo 2 presenta a la entrada una media de 168,15 y 165,66 a la salida; en el ensayo 3 la media registrada a la entrada es de 228,41 ppm y a la salida 223,17 ppm.



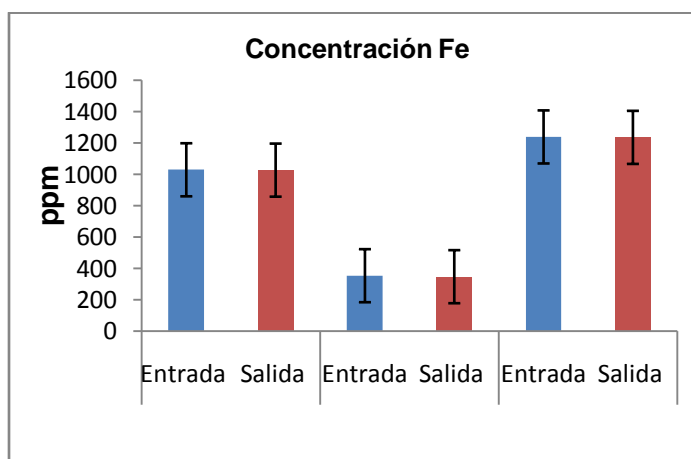


**Figura No. 20** Concentración en ppm de Magnesio en los ensayos uno dos y tres.

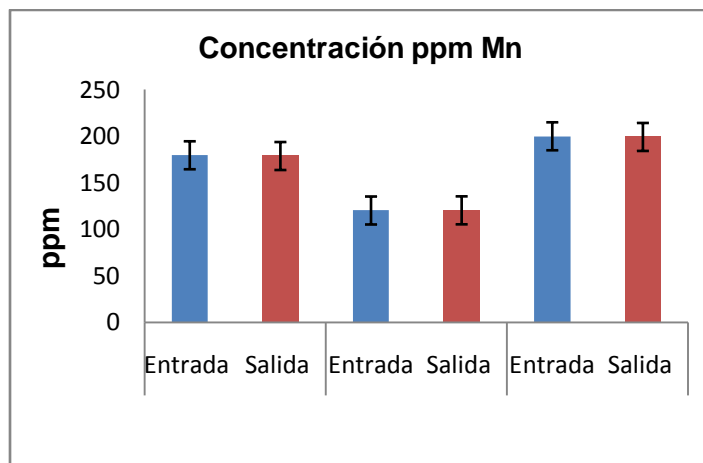
- **Elementos Menores (Fe, Mn Zn Cu) y Na**

En las figuras No. 21 y 22 se reportan las medias obtenidas para los metales hierro y manganeso, donde no se observan cambios importantes de la concentración entre la entrada y la salida de cada ensayo que describan si existe remoción de dichos parámetros por efecto del tratamiento de digestión anaerobia.

El hierro, a la entrada del ensayo 1 presenta una media de 102,27 ppm y a la salida de 1026,01 ppm; en el segundo ensayo se obtiene una media de 353,34 ppm a la entrada y 347,11 ppm a la salida; finalmente en el ensayo 3 se registra una media de 1237,54 ppm a la entrada y 1234,66 ppm a la salida.



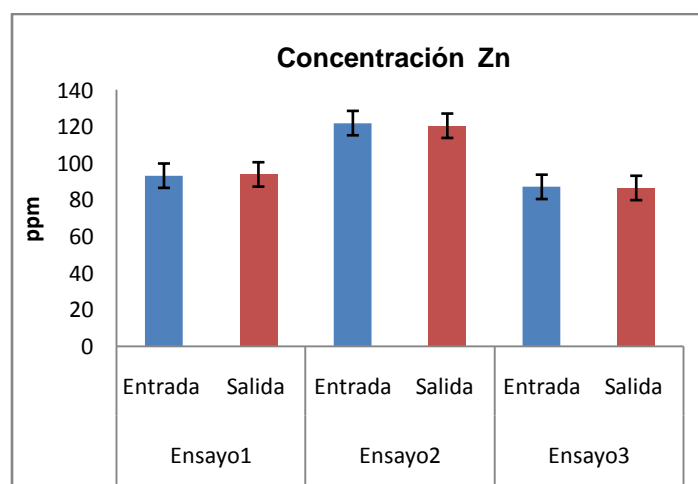
**Figura No. 21** Concentraciones en ppm de Hierro en los ensayos uno dos y tres.



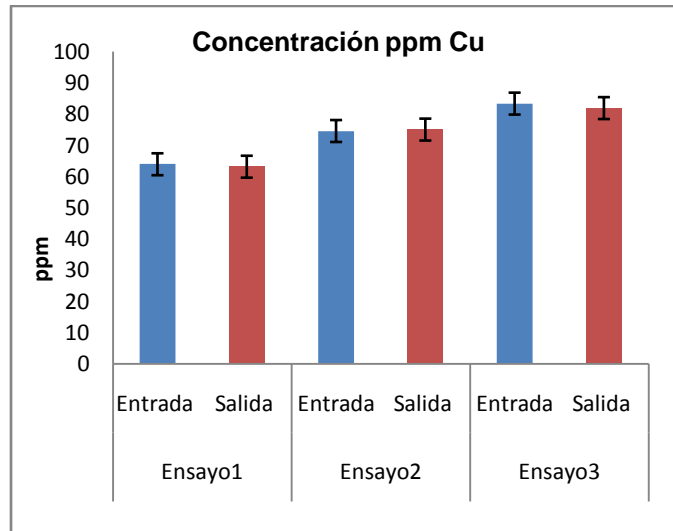
**Figura No. 22 Concentraciones en ppm de Manganeso en los ensayos uno dos y tres.**

Para el manganeso se reporta una media a la entrada del ensayo 1 correspondiente a 179,54 ppm y 178,75 ppm a la salida, en el ensayo dos la concentración de entrada es menor obteniendo una media de 120,21 ppm y al finalizar el ensayo se registra un valor idéntico de 120,37 ppm, por último en el tercer ensayo se obtiene una media de 199,94 ppm a la entrada y 199,22 a la salida ppm.

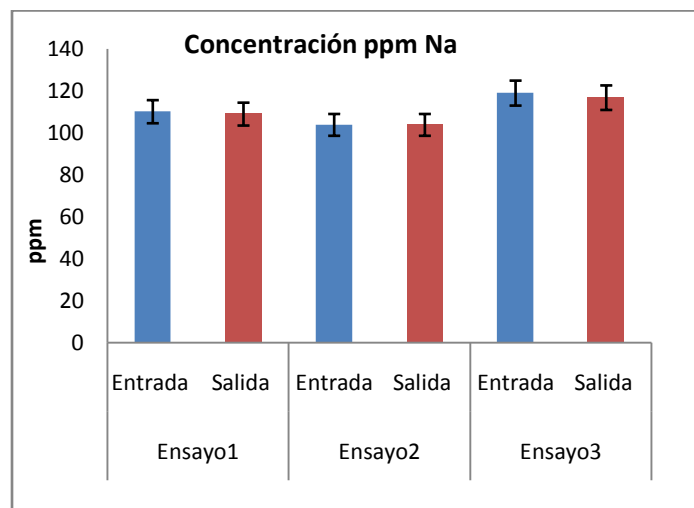
En las figuras No. 23, 24 y 25 se encuentran representados los valores de las medias obtenidas en ppm de zinc, cobre y sodio, las cuales tampoco presentan cambios representativos en su concentración entre la entrada y la salida de cada ensayo, los valores correspondientes se encuentran consignados en los anexos (9, 10 y 11).



**Figura No. 23 Concentraciones en ppm de Zinc en los ensayos uno dos y tres**



**Figura No. 24 Concentraciones en ppm de Cobre en los ensayos uno dos y tres**



**Figura No. 25 Concentraciones en ppm de Sodio en los ensayos uno dos y tres**

Para los metales en general, se observa un comportamiento similar, tanto a la entrada del lodo al digestor representada por la barra color azul, como a la salida del mismo representada por la barra de color rojo en los tres ensayos, donde se observa que la concentración de cada parámetro es variable en los diferentes ensayos independientemente de que hayan sido tomadas de la misma fuente. En las figuras se aprecia la concentración del Ca, Mg Fe, Mn, Zn Cu y Na; de manera individual, evidenciando que en cada uno de los ensayos su concentración no varía significativamente entre la entrada y a la salida.

La caracterización del lodo permite asegurar que las concentraciones de algunos de los parámetros evaluados no interrumpen el proceso de digestión anaerobia en la etapa metanogénica. Según Gene (1986) en su artículo “Fundamentos de la Digestión Anaerobia de Lodos de Aguas Residuales”, establece las concentraciones límite para los siguientes metales que pueden inhibir el proceso de metanogénesis: Cobre (Cu 100 mg/L), Sodio (Na 3500 mg/L), Potasio (K 2500 mg/L), Calcio (Ca 2500 mg/L), Magnesio (Mg 1000 mg/L).

En la figura correspondiente a cada analito se puede apreciar la concentración más alta que se haya registrado en los tres ensayos de digestión anaerobia; para el cobre (Cu 83,42 mg/L), Sodio (Na 119,04 mg/L), Calcio (Ca 1247,48 mg/L), Magnesio (Mg 228,41 mg/L), siendo evidente que el lodo de la PTAR –UTP cumple con las características químicas para ser sometido a un proceso de digestión anaerobia.

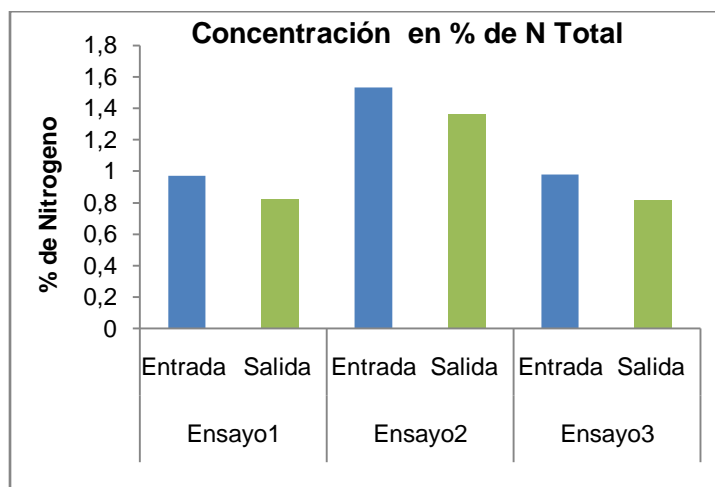
Debido a que no se evidencia algún cambio representativo en la concentración de los elementos mayores y menores por efecto de la digestión anaerobia y con el fin de demostrar que el tratamiento al que fue sometido el biosólido, tuvo o no un efecto significativo sobre la concentración de los elementos mayores y menores, se realizó un análisis de varianza desarrollado con 5% de probabilidad de error para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos de entrada y salida para Ca, Mg Fe, Mn, Zn Cu y Na; los resultados del análisis de varianza se evidencian en los (anexos No.9-11) para los respectivos ensayos, donde muestra que no se encontró una relación estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) entre las concentraciones de entrada y salida de los elementos mayores y menores durante la investigación, lo que indica que no se presentó una remoción para metales.

La Environmental Protection Agency (EPA) en la parte 503 “Estándares Para el Uso o la Eliminación de Lodos de Aguas Residuales”, establece los límites de agentes contaminantes en los lodos, el cual incluye al cobre, con un límite de 1500 ppm y al Zinc con un límite de 2800 ppm; estas concentraciones superan a las registradas durante la investigación.

Según Cauwenberghe y Roote (1998), el principal problema de los metales en especial los metales pesados en el ambiente, es que no pueden ser biodegradados; sin embargo los microorganismos pueden interactuar con ellos transformándolos, obedeciendo a cambios en su estado de oxidación, influyendo notablemente en la inmovilización del contaminante o en la eliminación del medio mediante procesos de biorremediación, que de acuerdo a la Environmental Protection Agency (EPA), se define como los procesos en los que se usan microorganismos o enzimas producidas por estos para transformar o degradar contaminantes tóxicos en los ecosistemas; esta estrategia biológica depende de las propiedades catabólicas que presentan los microorganismos, quienes utilizan los contaminantes para su desarrollo. Las reacciones responsables del proceso de biotransformación y biodegradación están relacionadas con el metabolismo de los microorganismos existentes. Para que los microorganismos puedan crecer y desarrollar sus funciones vitales necesitan un aporte de nutrientes, básicamente carbono, nitrógeno y fósforo; así como donantes y aceptores de electrones (Soto C, 2010).

- **Nitrógeno total Kjeldahl:**

La figura No. 26 muestra la remoción de Nitrógeno total de los tres ensayos; en el primer ensayo la media de la concentración inicial fue de 0,97% y la final de 0,82% alcanzándose una reducción de 15,4%; en el segundo ensayo la entrada registro una media de 1,53% y la salida 1,36% reduciéndose 11,11% y en el tercer ensayo la media inicial fue de 0,98% y la final de 0,81% removiéndose el 16,46% de nitrógeno total.



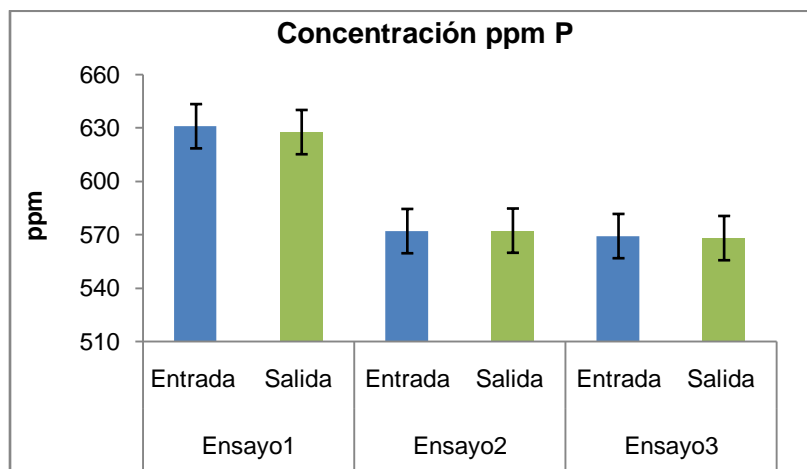
**Figura No. 26 Concentración en porcentaje de Nitrógeno total Kjeldahl en los ensayos 1, 2 y 3.**

Los resultados de esta prueba fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) donde se hallaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre los porcentajes de entrada y salida de los respectivos ensayos de esta manera se puede suponer que el tratamiento anaerobio al que fue sometido el lodo, tuvo un comportamiento óptimo frente a la remoción de nitrógeno total. Los resultados del análisis de varianza para este parámetro están registrados en los (anexos No.12-14) evidenciando que existe una diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) entre los porcentajes de nitrógeno total de las muestras analizadas a la entrada y a la salida de cada digestión.

Según Fernández (2006) este comportamiento podría atribuirse a procesos de desnitrificación; este tipo de procesos hacen parte del metabolismo degradativo de la respiración anaerobia llevándose a cabo la eliminación de  $\text{NO}_3^-$ , donde el nitrato actúa como aceptor de electrones y su fuente de carbono es Materia Orgánica. Según Polprasert(1996), después de la digestión por lo menos el 50 % del Nitrógeno presente en forma de amoníaco puede ser nitrificado para su fácil absorción, por lo tanto la digestión aumenta la disponibilidad de Nitrógeno en los residuos orgánicos.

- **Fosforo Total:**

La figura No. 27 muestra las medias de las concentraciones en partes por millón de fosforo que contiene el lodo antes y después de ser sometido al tratamiento de digestión anaerobia para cada uno de los ensayos realizados. El primer ensayo presenta la concentración más alta, 630 ppm a la entrada y 627 ppm a la salida, la concentración de fosforo en los ensayos 2 y 3 presentan concentraciones muy similares; 581,83 ppm y 572,09ppm en el ensayo 2 y 569,03ppm y 567,90ppm en el ensayo 3.

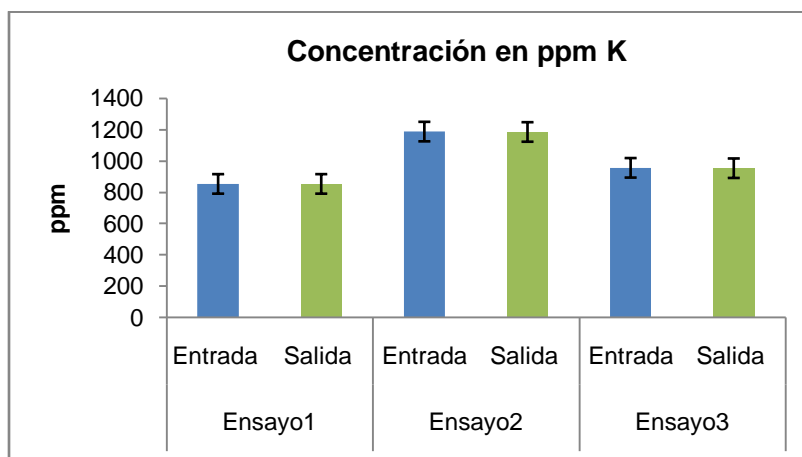


### Figura No. 27 concentración en ppm de Fosforo en los ensayos uno dos y tres.

El análisis de varianza para los valores obtenidos, determino que no existen diferencias estadísticamente significativas, ( $p < 0.05$ ) evidenciadas en los anexos (No.12-14), del cual es posible suponer que el tratamiento de digestión anaerobia no reduce el contenido de fosfatos. Según Fernández (2006), los microorganismos en un ambiente anaerobio parecen tener la tendencia a no consumir fosforo para el crecimiento, debido a la presencia de ácido acético. Caso contrario cuando posterior al tratamiento anaerobio, la masa bacteriana es sometido a un sistema de digestión aerobia.

- **Potasio:**

En la gráfica No. 28 se puede observar que de acuerdo a los contenidos de potasio en el lodo antes de adicionar al biodigestor y el lodo luego del tiempo de retención, no se generan cambios representativos en la concentración de potasio; esta información es confirmada al realizar el análisis de varianza (anexos No.12-14), el cual no arroja diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre las concentraciones de potasio obtenidas a la entrada y la salida de cada ensayo.

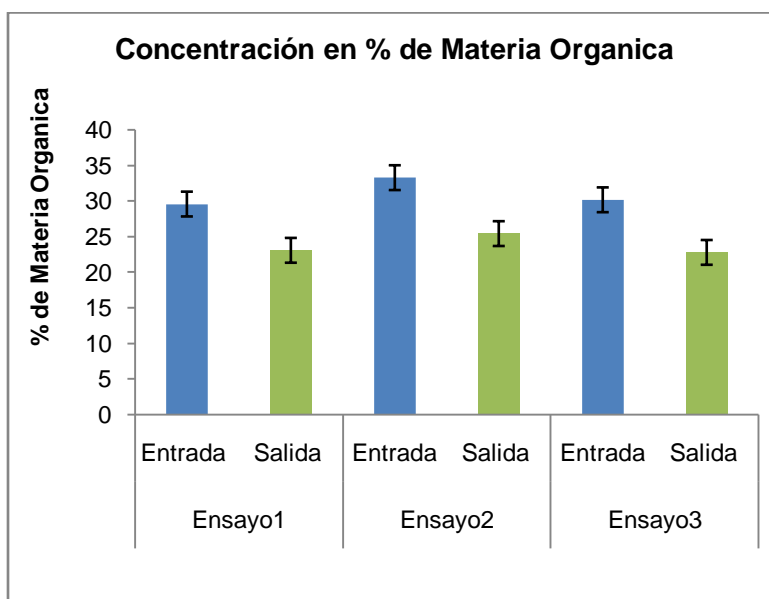


### Figura No. 28 Concentración en ppm de Potasio en los ensayos uno dos y tres

Durante la investigación, la media más alta registrada para este parámetro, fue de 1186,29ppm a la entrada y 1183,82 ppm a la salida; concentración que no representó riesgos en la producción de metano, ya que no sobrepasó los límites propuestos por Gene(1986)de 2500 ppm.

- **Materia Orgánica:**

La figura No. 29 indica por medio de las barras, el porcentaje promedio en cada uno de los ensayos realizados de materia orgánica (M.O), demostrando que hubo una disminución considerable del porcentaje de este parámetro en cada digestión, ya que se aprecia una clara diferencia entre las concentraciones de entrada (azul) y salida (verde). También ilustra un comportamiento muy similar entre cada ensayo, independientemente que los tiempos de digestión de los lodos hayan sido diferentes en cada uno de estos.

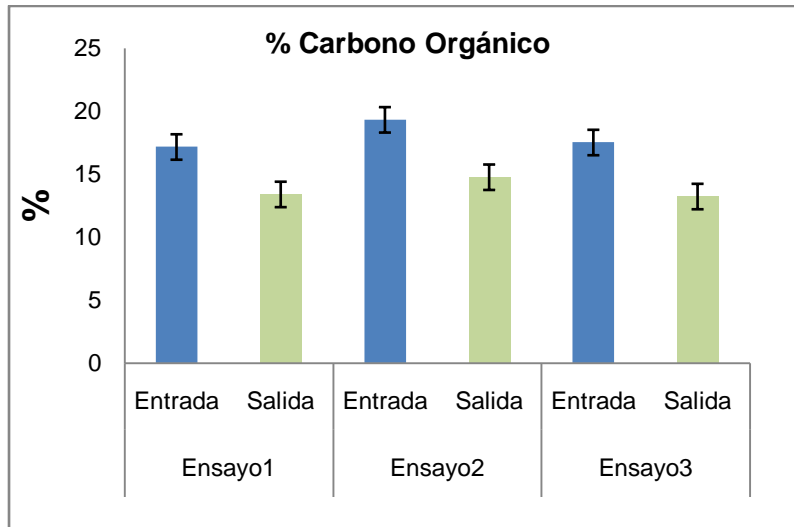


**Figura No.29 % de Materia Orgánica en los ensayos uno dos y tres.**

El análisis de varianza (ver anexo 12-14) determinó que existen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre las concentraciones de entrada y salida para los respectivos ensayos, encontrándose que en el ensayo uno el % de MO disminuyó un 21,95%, en el segundo ensayo un 23,13 % y en el tercer ensayo un 24,46%.

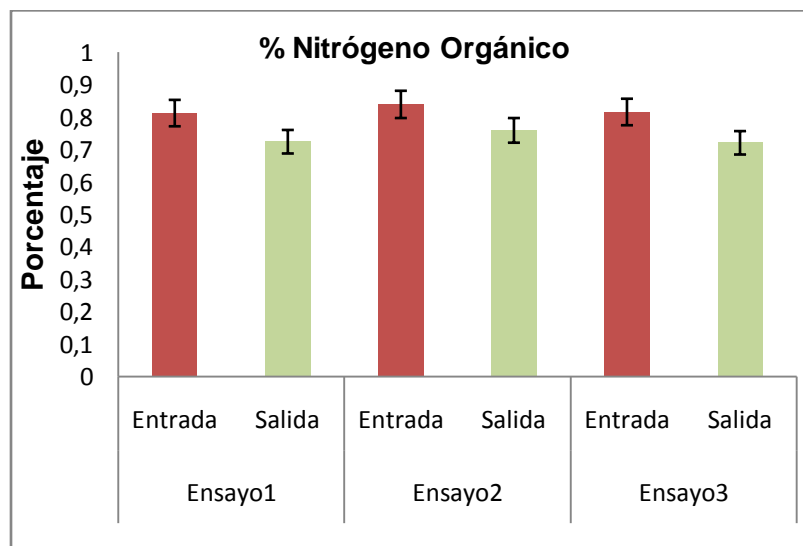
Las figuras No. 30 y 31 muestran de manera más detallada y precisa como se redujo la materia orgánica, expresando los porcentajes de carbono orgánico oxidable y de nitrógeno orgánico. El carbono orgánico se redujo un 21,96% en el ensayo uno (E1); para el ensayo dos (E2) en un 23,55% y en el ensayo tres (E3) 24,49% la reducción del nitrógeno orgánico se dio en una menor proporción obteniendo una disminución de 12,19% en E1, 9,53% en E2 y 9,87% en E3.





**Figura No. 30 Concentración en porcentaje de Carbono Orgánico en los 3 ensayos**

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, en los requisitos para fertilizantes o abonos orgánicos; el contenido de Materia Orgánica expresada como Carbono Orgánico oxidable total debe ser mayor de 5 % y menor del 15 %; la media más baja de Carbono Orgánico registrado después de la digestión, fue de 13,2 % y la media más alta corresponde al 14,7 % cumpliendo con este parámetro para la NTC 5167.



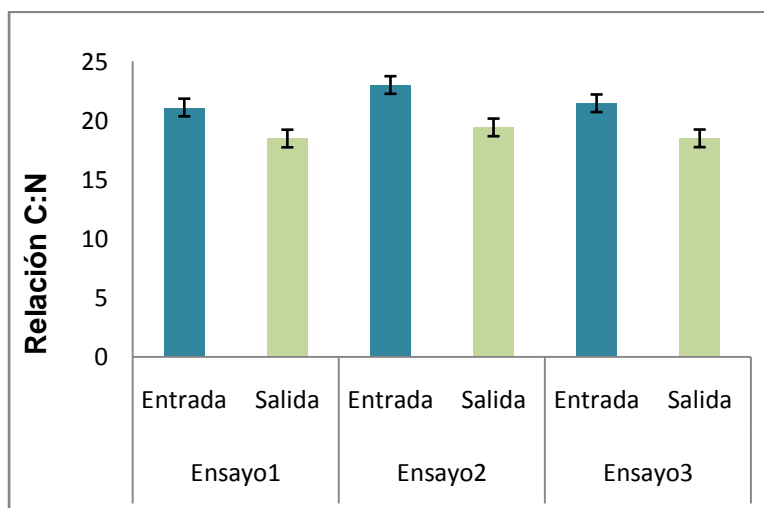
**Figura No. 31 Concentración en porcentaje de Nitrógeno Orgánico antes y después del proceso de digestión anaerobia en los 3 ensayos.**

Al comparar los valores obtenidos antes y después de la digestión anaerobia mediante el análisis de varianza ANOVA(anexo 6-8) ,se pudo determinar que existen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) por lo que se puede suponer que el tratamiento al que fue sometido el lodo, tuvo efectos representativos en cuanto a la eliminación conjunta de materia orgánica.

- **Relación Carbono Nitrógeno:**

La figura No. 32 expresa la relación C/N existente antes y después del proceso de digestión anaerobia. El análisis de varianza determinó que existen diferencias estadísticamente significativas, obteniéndose los siguientes resultados; E1 (21,09 -18,47) reduciéndose un 12,42 %; E2 (22,99 – 19,41) reduciéndose 15,57 %; E3 (21,47 – 18,48) 13,93 %.

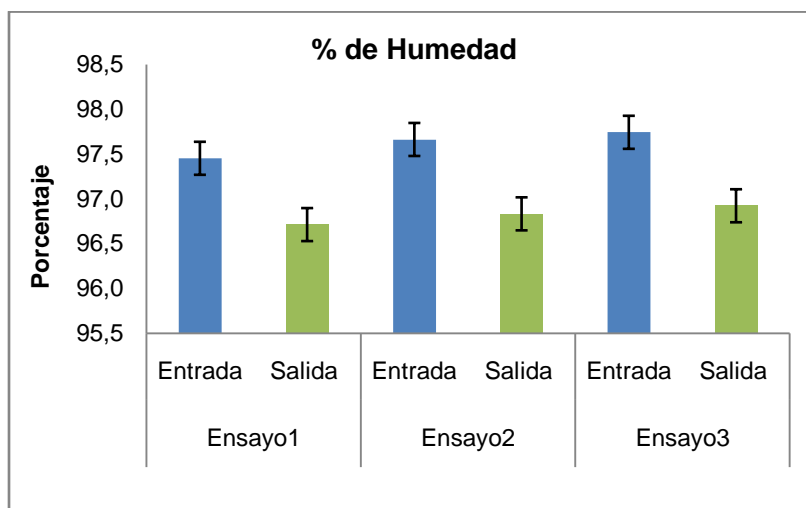
La NTC5167 en cuanto a este parámetro no establece un valor que limite el uso del biosólido como abono orgánico o enmienda del suelo, pero es necesario su registro para un análisis general con relación a otros parámetros comprendidos en dicha norma.



**Figura No. 32 Relación Carbono Nitrógeno, en los ensayos uno dos y tres**

- **Humedad**

La figura No.33 presenta las medias del porcentaje de humedad del lodo, a la entrada y a la salida del digestor, evidenciando que el comportamiento de humedad en los tres ensayos es muy similar; en el primer ensayo el contenido de humedad fue de 97,45% a la entrada y 96,71% a la salida, en el ensayo dos 97,66% a la entrada y 96,83% a la salida y en el ensayo tres 97,74% a la entrada y 96,92% a la salida.



**Figura No.33 Porcentaje de humedad antes y después del proceso de digestión anaerobia en los ensayos uno dos y tres.**

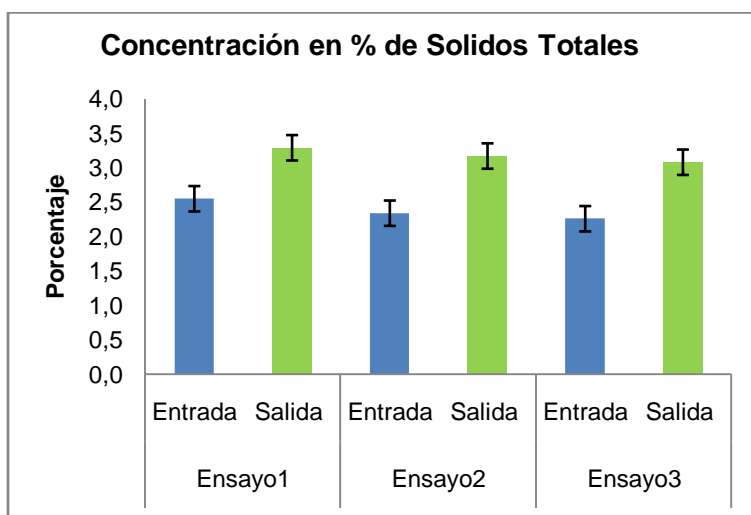
La NTC 5167 establece los porcentajes máximos de humedad del producto solido dependiendo del origen del material utilizado; para materiales de origen vegetal máximo 35% y para materiales de origen animal máximo 20%; el porcentaje de humedad para productos obtenidos mediante la estabilización de residuos de origen urbano no está establecido en la NTC 5167.

- **Sólidos Totales**

En Las figuras No. 33 y 34 se puede observar un aumento en el porcentaje de sólidos totales (ST) y una reducción en el porcentaje de humedad, después de la digestión anaerobia, comportamiento atribuido al espesamiento del lodo, al separar por decantación el sobrenadante y los sólidos sedimentados, según Villaseñor (1995) la reducción de volumen de lodo se puede obtener gracias a la concentración del mismo, los lodos activados sin tratar poseen como característica valores de concentraciones de Sólidos

Totales entre 0,5 a 1,0 %; la media más baja registrada de los porcentajes de Sólidos Totales en esta investigación fue de 2,26% para un volumen inicial de 10 litros de lodo a la entrada del ensayo tres, esta concentración difiere de los valores típicos sugeridos por Villaseñor, posiblemente porque las muestras fueron tomadas de la fracción inicial bombeada del tanque de sedimentación primaria, fracción que generalmente es más espesa; a la salida se obtuvo una concentración de 3,08% de ST y un volumen final de 8,32 litros de lodo digerido aproximadamente.

En los ensayos uno y dos el volumen inicial del lodo sin tratar es igual que en el tercer ensayo; registrándose para el ensayo uno, una concentración inicial de ST de 2,55% y al final 3,29% y un volumen final de lodo digerido de 8,4 litros. Para el segundo ensayo la concentración de ST inicial fue de 2,34 % y la final de 3,17% y un volumen final de 8,37litros aproximadamente.

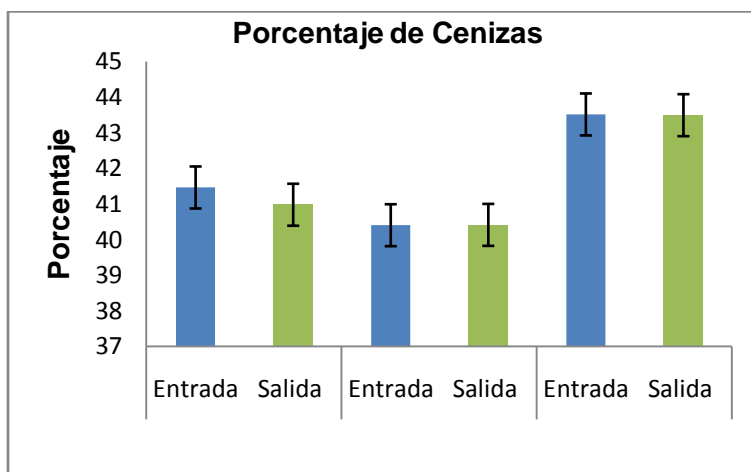


**Figura No.34 Concentración en porcentaje de sólidos totales (ST) en los ensayos uno, dos y tres antes y después del proceso de digestión anaerobia**

- **Cenizas**

La figura No.35 representa los porcentajes de ceniza que constituye la fracción mineral del lodo, antes y después del proceso de digestión, obteniéndose los siguientes valores para los respectivos ensayos: E1 (41,46 – 40,98) %; E2 (40,4 – 40,41) %; E3 (43,51 – 43,49) %. El análisis de varianza determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas, ( $p > 0.05$ ) resultado esperado, ya que la digestión anaerobia no generó cambios en la concentración de los metales analizados en esta investigación y al parecer

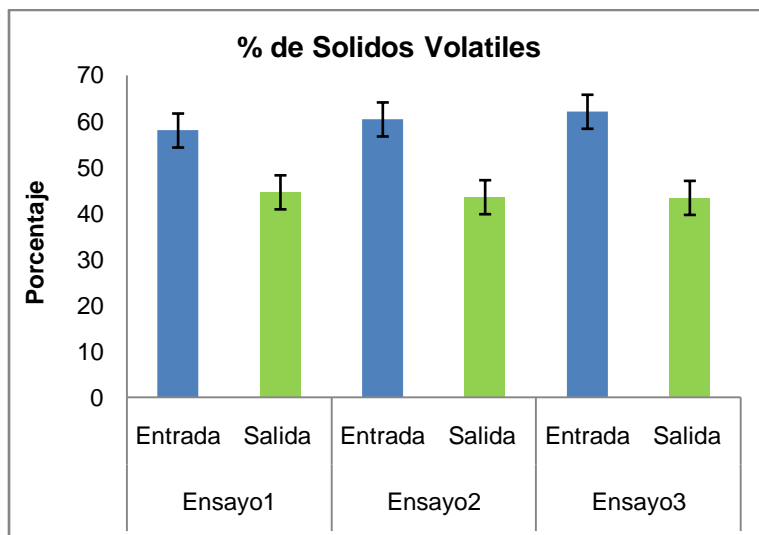
tampoco en la concentración de otros minerales que pudiesen estar presentes en el lodo generado de la PTAR-UTP. La NTC 5167 establece un contenido máximo de cenizas del 60% valor que supera a los resultados obtenidos en los ensayos realizados.



**Figura No.35 Porcentaje de cenizas antes y después del proceso de digestión anaerobia**

- **Sólidos volátiles**

La figura No.36 expresa la pérdida de Sólidos Volátiles (SV) por la calcinación de materia seca a 550°C obteniéndose los siguientes resultados E1 (58,04 – 44,62) %; E2 (60,45 – 43,65) %; E3 (62,12 – 43,41) %; en el primer ensayo se alcanzó una reducción de SV de 23,12 % en el segundo ensayo de 27.94% y en el tercer ensayo de 30,11%. Esta reducción de SV puede estar asociada al consumo de materia orgánica, ya que según Murillo (2005), los sólidos volátiles pueden ser utilizados como indicadores del proceso de digestión; La NTC 5167 no establece un límite para este parámetro pero si el registro de la concentración que presenta el producto final como abono orgánico.

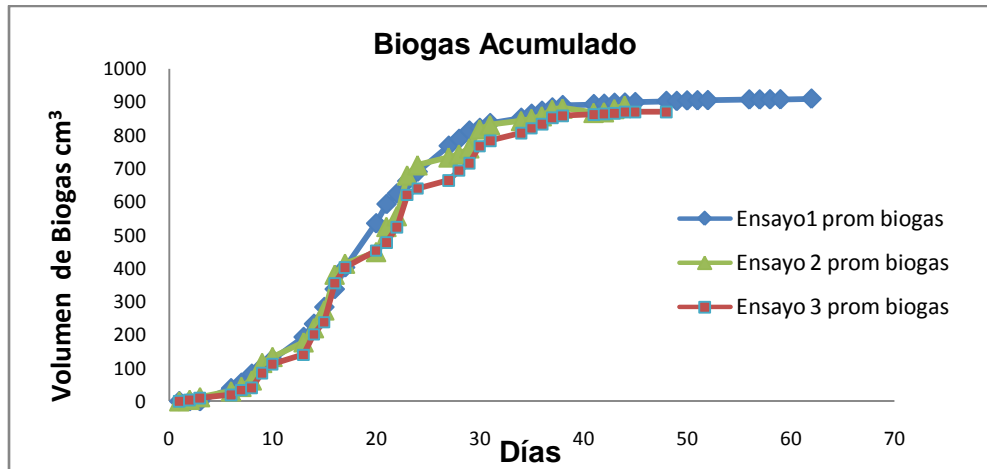


**Figura No.36 Porcentaje de sólidos volátiles (SV) antes y después del proceso de digestión anaerobia**

El análisis de varianza para el porcentaje de humedad, porcentaje de sólidos totales y porcentaje de sólidos volátiles confirma que existen cambios representativos en la concentración de estos parámetros al presentar diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos a la entrada y a la salida de los digestores en cada uno de los ensayos realizados, mientras que para el % de cenizas se obtuvo resultados de probabilidad superiores a 0,05(ver anexos 15-17).

- **Volumen Acumulado de Biogás con respecto al tiempo**

En la figura No.37 se ilustra el promedio del volumen de biogás acumulado, generado dentro del tiempo estimado para cada digestión. En el ensayo uno (azul) el primer registro de volumen acumulado de biogás se realiza a partir del día 6 obteniendo  $39 \text{ cm}^3$  de volumen desplazado de una solución al 3 % de NaOH equivalentes a  $39 \text{ cm}^3$  aproximadamente de biogás acumulado, finalizando el día 62 con un volumen aproximado de biogás de  $909 \text{ cm}^3$ ; en el segundo ensayo (verde) el primer registro de producción de biogás se obtiene el día 4 con un volumen aproximado de  $4,5 \text{ cm}^3$ , finalizando el día 47 con un volumen aproximado de  $889 \text{ cm}^3$  de biogás acumulado; en el tercer ensayo el primer registro se obtiene el día 4 con un volumen aproximado de  $4 \text{ cm}^3$  culminando el día 50 con un volumen final de biogás acumulado de  $870,5 \text{ cm}^3$  aproximadamente (ver anexo 18).

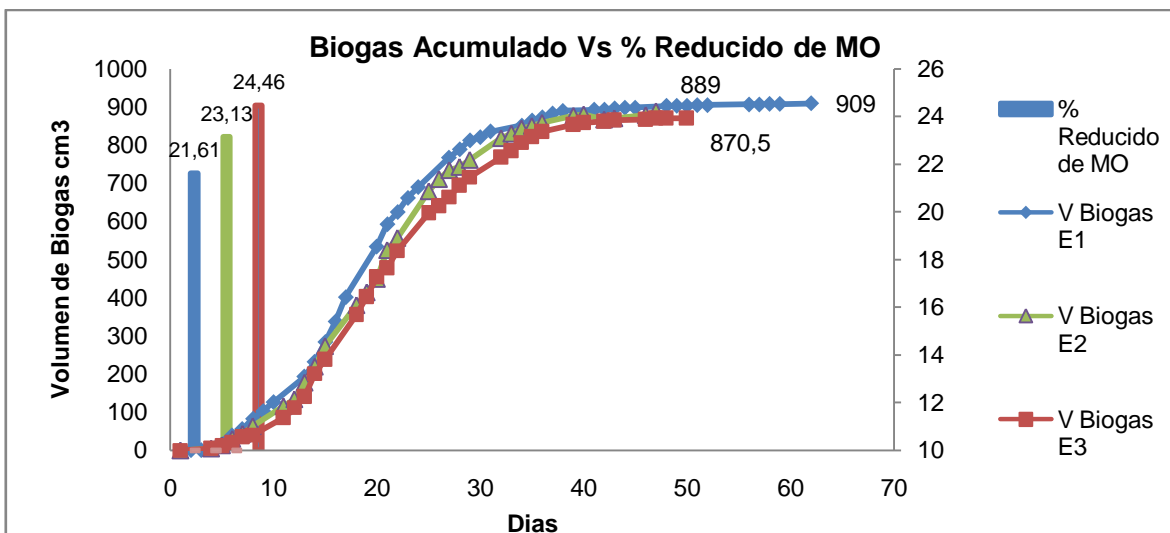


**Figura No. 37 Volumen acumulado de biogás vs tiempo de digestión anaerobia**

El aumento observado en la producción de biogás se puede atribuir a la adaptación y crecimiento esperado de las bacterias metanogénicas realizando el trabajo de conversión de la materia orgánica en biogás, el sistema alcanza un punto máximo de eficiencia en la de producción de biogás aproximadamente entre los días 45 y 50, tiempo en que la producción de este se reduce considerablemente en los tres ensayos. Se puede suponer que este comportamiento se debe a una disminución en la población de bacterias metanogénicas debido al agotamiento de los sustratos aportados en la etapa hidrolítica, modificando la tendencia ascendente de la curva adquiriendo un comportamiento asintótico que es interpretado como el fin del proceso de digestión anaerobia.

- **Volumen Acumulado de Biogás vs % de Materia Orgánica Removido**

En la figura No.38 se aprecia la curva de biogás acumulado en conjunto con el porcentaje de materia orgánica reducido en cada ensayo, representado por las barras identificadas con los colores representativos de cada una de las curvas de volumen acumulado de biogás, encontrando que en el primer ensayo el volumen total de biogás para el día 62 fue de 909 cm<sup>3</sup>, reduciéndose el 21,66% de materia orgánica, la AME para este ensayo a 23,5 °C es de 0,083 (gDQO/gSTV\*d), en el ensayo dos el volumen de biogás acumulado para el día 47 fue de 889 cm<sup>3</sup> y el porcentaje reducido de materia orgánica fue de 23,13% y se registro una AME de 0,072 (gDQO/gSTV\*d) con una temperatura promedio de 22,1°C; al finalizar el tercer ensayo el día 50 el volumen acumulado de biogás fue de 870,5 cm<sup>3</sup> y el porcentaje reducido de materia orgánica de 24,46% el cálculo de la AME obtenido en este ensayo es de 0,091(gDQO/gSTV\*d) a una temperatura promedio de 22,9°C.



**Figura No.38 Relación entre el % eliminado de Materia Orgánica con respecto al volumen acumulado de Biogás.**

Analizando los resultados de porcentaje reducido de materia orgánica en conjunto con los valores de volumen acumulado de biogás, el consumo de materia orgánica en los ensayos dos y tres representado por las barras (verde) y (rojo) es mayor que en el ensayo uno (azul), evento que no se ve reflejado en la producción de biogás ya que el volumen acumulado de biogás en los ensayos dos y tres es menor que en el ensayo 1, independientemente de que el tiempo de operación en los últimos dos ensayos haya sido más corto la producción de biogás debió ser mayor que en el ensayo 1, esto podría atribuirse a pequeñas fugas en el sistema, debido al desgaste del montaje para la recolección del biogás, la tabla No 6 agrupa los valores obtenidos en el ensayo de AME y las condiciones de operación.

**Tabla No 7 Actividad Metanogénica Específica**

Ensayo	Días	Volumen Biogás cm <sup>3</sup>	% Reducción MO	AME (gDQO/gSTV*d)	Temperatura promedio °C
1	62	909	21,66	0,143	23,5
2	47	889	23,13	0,125	22,1
3	50	870,5	24,46	0,129	22,9

López M. (2004) en su estudio, emplea como criterio de baja actividad metanogénica valores que se encuentren por debajo de 0,1 (gDQO/gSTV\*d); los resultados obtenidos se encuentran por encima de este criterio; para esta investigación son satisfactorios y de



gran importancia, ya que para ninguno de los ensayos se realizó un arranque del reactor, el cual consiste en alimentar previamente el sistema con una fracción de lodo, para ser acondicionado durante un tiempo determinado y posteriormente ser utilizado como inóculo, que facilite la presencia de los diferentes grupos de bacterias que intervienen en el proceso de digestión anaerobia y mejorar la condiciones del proceso, además esto permitiría que estas bacterias se adapten a las condiciones ambientales de operación del montaje.

### **8.3 Resultados Análisis Microbiológicos.**

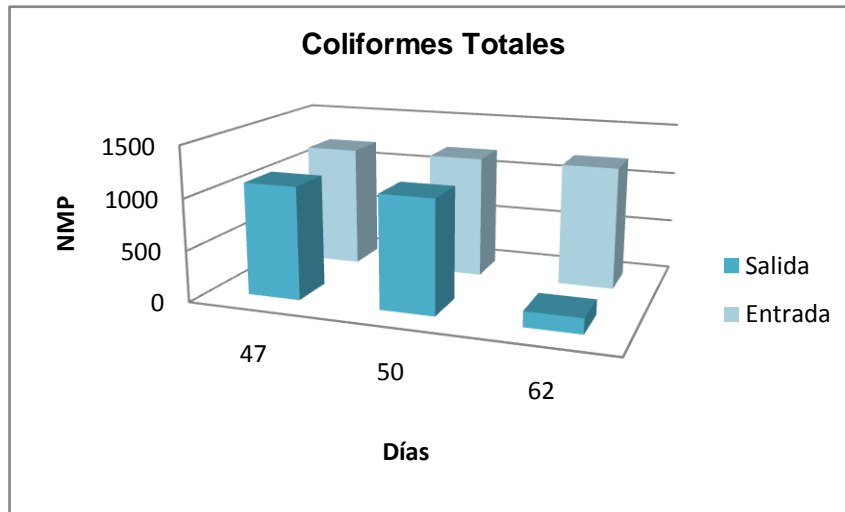
Para determinar la calidad microbiológica del lodo generado en la PTAR-UTP y conocer la influencia que tiene el proceso de digestión anaerobia sobre los microorganismos sugeridos por la Environmental Protection Agency (EPA), se realizó el análisis microbiológico para la cuantificación de Coliformes totales y Fecales, por la técnica número más probable (NMP)

Los microorganismos seleccionados para esta investigación, fueron Coliformes Totales y Fecales, bacterias patógenas utilizadas como indicadores de contaminación en los lodos producidos de la PTAR-UTP, se evaluó en ellos la eficiencia del proceso de digestión anaerobia para su reducción o eliminación, empleando el cálculo de densidad media en las muestras mediante el NMP de microorganismos existentes (ver anexo 19).

- **Coliformes Totales**

La figura No.39 se representa el lodo en la entrada y la salida de los reactores donde se llevó a cabo el proceso de digestión, revelando que la concentración de Coliformes Totales como NPM, es mayor a 1100 bacterias por cada gramo de lodo sin digerir, lo que puede indicar que efectivamente el lodo procedente del tanque de sedimentación de la PTAR-UTP, es un lodo altamente contaminante, el lodo que ha pasado por el proceso de digestión anaerobia (salida), señala que 47 a 50 días de retención, no fueron suficientes para disminuir considerablemente la concentración de Coliformes totales, en estos dos tiempos se aprecia que el NPM en ambas barras es igual a 1100/g, el resultado del proceso después de 62 días, muestra un efecto diferente a los mencionados

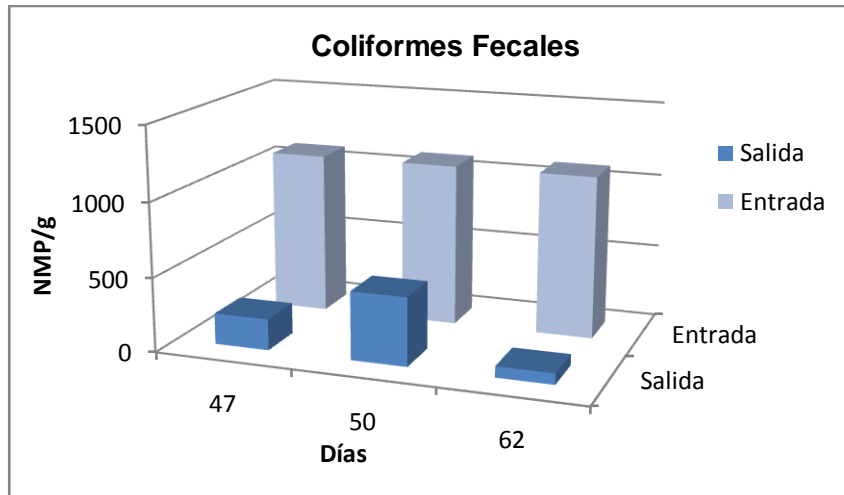
previamente, observando una disminución de aproximadamente el 87,37 % obteniendo una concentración de 150 bacterias/g.



**Figura No.39 Número Más Probable de Coliformes totales, antes y después del proceso de digestión anaerobia.**

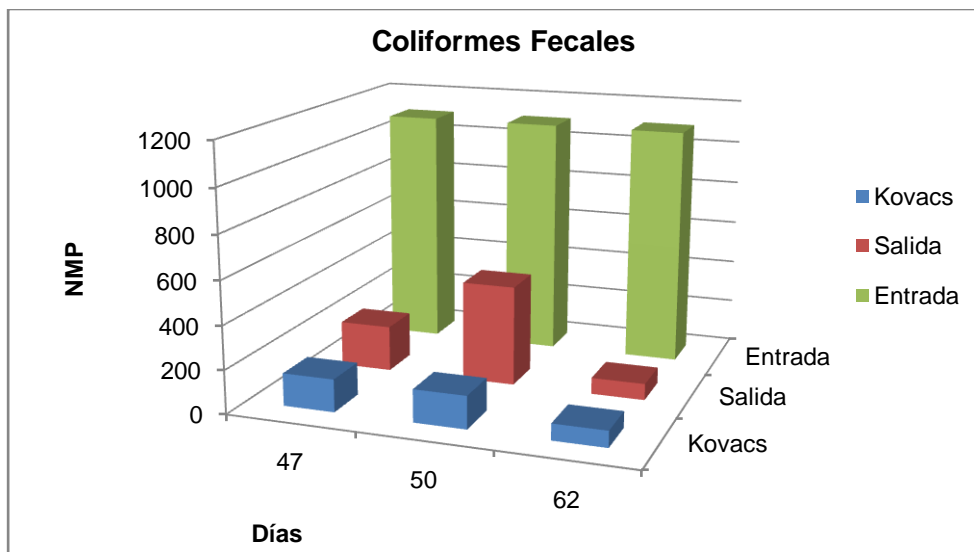
- **Coliformes Fecales:**

La figura No.40 representa el comportamiento de Coliformes fecales, previo y posterior al proceso de digestión en los tres ensayos, donde se aprecian resultados diversos; a los 47 días se presenta una disminución del 79 %, a los 50 días disminuyó 58,18 % y finalmente a los 62 días (E1) se observanuevamente que es superior la disminución de la población de Coliformes, con un 93,18 %.



**Figura No. 40** Número Más Probable de Coliformes fecales, antes y después del proceso de digestión anaerobia.

La figura No.41 muestra un panorama más claro del comportamiento de los Coliformes fecales, bajo el proceso de digestión, utilizando como herramienta la característica de este tipo de microorganismos de producir Indolen presencia de agua peptonada (MacFaddin, 2003) y siendo este detectado por el reactivo de Kovacs, mediante la formación de un anillo de color púrpura en la parte central del tubo, confirmando así la presencia o ausencia de ellos en cada serie.



**Figura No. 41** Número Más Probable de Coliformes fecales, utilizando reactivo de Kovacs para confirmar su presencia.

Esta prueba permitió ratificar cualitativamente y cuantitativamente, que en los resultados de la determinación de Coliformes fecales se presenta una disminución equivalente para los ensayos realizados a los 47 y 50 días de digestión y se continúa observando una disminución considerable en el NMP de Bacterias/g, en el tratamiento del lodo que opero durante 62 días.

En vista de que las muestras utilizadas para el proceso de digestión anaerobia difieren en sus características químicas, es arriesgado precisar que el tiempo es el principal factor en la eliminación de patógenos (Coliformes totales y fecales) pero independientemente del tiempo, en los tres ensayos se logra el objetivo de disminuir considerablemente la población de Coliformes fecales.

## 9. CONCLUSIONES

- El proceso de digestión anaerobia no genera remoción en la concentración de los metales pero es probable que mejore la calidad de estos para ser asimilados por el suelo, simultáneamente el análisis de los metales estudiados, permitió conocer las características químicas del lodo antes de ser sometido al proceso de digestión anaerobia e identificar si existía el riesgo de inhibición del proceso por un alto contenido de Cobre, Sodio, Magnesio, Potasio y Calcio.
- Las condiciones ambientales de la Universidad Tecnológica de Pereira no representan un riesgo para la operación de un sistema anaerobio de flujo discontinuo y conocida la temperatura promedio del lugar, es posible definir el tiempo de digestión de los reactores anaerobios que convenga de acuerdo a las necesidades de la PTAR-UTP.
- El proceso de digestión anaerobia permitió disminuir la relación C:N de acuerdo a lo establecido a la norma NTC 5167 mejorando el contenido de Materia Orgánica, Nitrógeno total y Nitrógeno orgánico; parámetros que permitirán establecer la dosis agronómica para la aplicación de estos residuos orgánicos al suelo en conjunto con los demás parámetros evaluados en la caracterización final del biosólido independientemente que no hayan sido removidos por acción del proceso anaerobio como los elementos mayores y menores.
- El proceso de digestión anaerobia facilita realizar un espesamiento del biosólido eliminando una pequeña fracción en el contenido de humedad de este; pero es necesario que el reactor opere de manera conjunta con otra alternativa que garantice la disminución considerable de humedad y facilitar su traslado al lugar destinado para su disposición final como lo es el lecho de secado. El implementar esta tecnología en la PTAR-UTP, permitirá que durante el tiempo de estabilización del lodo generado en los reactores, el biosólido producto de la digestión anaerobia pueda eliminar un alto porcentaje de humedad en el lecho de secado.

- Según el análisis de resultados, desde el punto de vista técnico, los tres ensayos de digestión anaerobia cumplen con lo establecido en la NTC 5167, en lo que se refiere al contenido de materia orgánica, cenizas pH y demás parámetros que solo requiere su registro como relación carbono-nitrógeno, nitrógeno total y pérdidas por volatilización. Los metales analizados en esta investigación no son regulados por dicha norma y la importancia de ser evaluados radica en que si sus concentraciones son muy elevadas pueden presentar riesgos para el proceso; en cuanto a los Coliformes fecales, de acuerdo a la clasificación asignada por la EPA, para la determinación de la calidad microbiológica de los Biosólidos, podemos concluir que posterior al proceso de digestión anaerobia, los Biosólidos generados en la PTAR- UTP pueden ser clasificados como clase A, donde su uso sustentable se da principalmente en sitios públicos.
- El tratamiento de digestión anaerobia de flujo discontinuo como alternativa para la estabilización de lodos producido en la PTAR-UTP mostró buenos resultados en cuanto a la remoción de materia orgánica y entero bacterias, mejorando la calidad del biosólido y haciendo de este un material apto para la aplicación como abono orgánico u enmienda de suelo.
- El mayor grado de estabilización microbiológica para los lodos producidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UTP, se obtuvo en el primer ensayo operado a condiciones ambientales de la UTP, con un tiempo de retención de 62 días, donde se logró reducir la densidad de enterobacterias fecales en un 87,37 %.
- Se comprobó la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, como tratamiento en la reducción de bacterias patógenas, garantizando la calidad de los biosólidos para ser reusados benéficamente, cumpliendo con la Norma ambiental al obtener valores por debajo de los límites establecidos, en el caso de los Coliformes fecales menos de 1000 NMP por gramo.

## 10. Recomendaciones

- Para facilitar el arranque de la digestión anaerobia puede utilizarse un inóculo que agilice la actividad biológica en la biomasa de las bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas y superar los valores de AME obtenidos.
- Para un mejor desempeño de la actividad biológica dentro del reactor, es importante garantizar condiciones de operación a temperatura constante.
- Así como es indispensable el monitoreo constante de las variables del proceso (pH y temperatura) es necesario garantizar el correcto funcionamiento de las partes que compone el reactor (mangueras, llaves, tubería en general).
- Es importante realizar un estudio que se enfoque en el comportamiento de la salmonella, ácidos grasos volátiles y la alcalinidad, durante el proceso de digestión anaerobia de los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales de la UTP, ya que estos parámetros no pudieron ser determinados en esta investigación por falta de recursos económicos.
- Por su clasificación según la EPA como biosólido clase A, será necesario realizar estudios posteriores para determinar en qué tipos de cultivos se dará un mayor aprovechamiento del producto, ya que los cultivos que tengan por objeto el consumo en fresco y/o estén en posible contacto con el Biosólido, es necesario realizar un tratamiento adicional donde se asegure su calidad e inocuidad.
- Debido al contenido de patógenos mínimo pero existente es recomendable que los biosólidos sean sometidos a un proceso de desinfección para la destrucción de los mismos, como desinfección por radiación ultravioleta, desinfección con ozono, desinfección por cloración y/o desinfección por calor
- Es recomendable realizar una cuantificación detallada de la concentración de Metano y de los demás gases producidos, para determinar su posible uso energético.

## 11. Bibliografía

- Botero J. (2009) "Ingeniería Civil, Hidráulica y Ambiental. Sistema de Tratamiento y Manual de Operación y Mantenimiento". Universidad Tecnológica de Pereira. Biblioteca Jorge Roa Martínez. [Consultado 16 de octubre 2012]
- Brown N.L and Tata, PBS (1985) "Biomethanation ENSIC Review Environmental Sanation Information Center, Asian Institute of Technology, Bangkok [Consultado 10 Marzo de 2011]
- Caro C, García A, Montoya C, Guzman S. (2009) Actualización del Diagnostico Ambiental Universidad Tecnológica de Pereira" [disponible en línea] <http://media.utp.edu.co/institutoambiental2011/archivos/documentos-estrategicos-de-gestion-ambiental-en-el-campus-utp/diagnostico-actual.pdf> [Consultado septiembre 2 de 2012].
- Cauwenberghe y Roote (1998) "Biorremediation In Situ" [disponible en línea] [http://www.environmental-expert.com/Files/0/articles/817/insbio\\_o.pdf](http://www.environmental-expert.com/Files/0/articles/817/insbio_o.pdf) [Consultado octubre 2 de 2012].
- DAGUER G, 2004. "Gestión de biosólidos en Colombia". 2004 [en línea]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtm>. [Consultado 20 septiembre de 2010]
- Deganutti R. (2012). "Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. [disponible en línea] [://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=iso) [Consultado 30 de Noviembre 2012]
- EPA 832-F-00-064 "Aplicación de biosólidos al terreno" 2000. Folleto informativo de tecnología de biosólidos [disponible en línea] <http://www.epa.gov/owm/mtb/cs-00-064.pdf> [consultado 4 de diciembre de 2011]
- Fernández A. R. (2006) García R. R., García P L. "Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales". Informe de Vigilancia Tecnológica Vol2 cap2 p 15-45 [Consultado 21 febrero 2012]
- Grajales S. 2006. "Programa de Manejo Integral de los Lodos Generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira". Tesis de Grado –UTP, Facultad de Ciencias Ambientales
- Gene P; Owen W. (1986) "Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges", Journal of Environmental Engineering, vol.112 No.5 pp. 867-916 [Consultado abril 14 de 2011].



- Green map (2012) "Corredor Ambiental Otún Consota" [disponible en línea] <http://www.opengreenmap.org/es/greenmap/corredor-ambiental-otun-consota-pereira?autoBubbleNID=18496> [consultado 2 de septiembre 2012]
- Hernández Lehmann, A. (2002). "Manual de Diseño de Estaciones Depuradoras de aguas residuales". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Segunda edición, España. [Consultado 2 de Febrero 2012]
- Hilbert J. (1999) "Manual Para la Producción de Biogás". Instituto de ingeniería rural [consultado febrero2 2012]
- López M, villa P, Escobedo R. (2004) "El Comportamiento de los Reactores Anaerobios de Residuos Sólidos a Través de Ensayos Microbiológicos" [disponible en línea] [http://revista.cnice.edu.ar/revistaCB/files/CB-2004-3-179-183\\_0.pdf](http://revista.cnice.edu.ar/revistaCB/files/CB-2004-3-179-183_0.pdf) [consultado 10 diciembre 2012]
- Mcfaddin J.(2003) "Pruebas Bioquímicas para la Identificación de Bacterias de Importancia clínica" [consultado 16 de septiembre 2012]
- Merlí G.F, Ricciuti N.M, (2009). "Microbiología de las aguas residuales-Aplicación de Biosólidos en Suelo". [disponible en línea] [http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem\\_fi\\_qui\\_micrb\\_09/biosolidos\\_en\\_suelo.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem_fi_qui_micrb_09/biosolidos_en_suelo.pdf) [Consultado Julio 3 2012]
- Metcalf & Eddy (2002). "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. [Consultado 2 Abril de 2011]
- 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 [consultado 2 febrero 2012]
- Montoya C. (2005). "Informe de la Caracterización de las Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira". [Consultado 21 de septiembre 2012 Laboratorio de Análisis de Aguas de la Universidad Tecnológica de Pereira
- Murillo A. (2005) "Digestión Anaerobia de Sólidos Provenientes de la Sedimentación Primaria en una Planta de Tratamiento de Agua Residual de Enlatados de Hortalizas" Tesis Profesional. [disponible en línea] : [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/murillo\\_v\\_al/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/murillo_v_al/) [consultado 1 agosto de 2012]
- NOM-004-2002 NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. disponible en

<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Publicaciones/CDs2006/CDAmbiente/pdf/NOM52.pdf>[Consultado 21 de julio 2012]

- NTC-5167, 2004. “Norma Técnica Colombiana NTC-5167 Productos Para la Industria Agrícola Productos Orgánicos Usados Como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo”. [disponible en línea] <http://www.mlabsuelos.com/documentos/NTC%205167%20apartes1.1.pdf>. [consultado 21 julio 2012]
- Ortega N.M. (2006). “Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process”.Universidad de Valencia España. [Disponible en línea] <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>[Consultado 03 marzo de 2012]
- Polprasert C. (1996) “Organic Waste Recycling Technology and management” segundaedición [Consultado 4 septiembre 2012]
- Procedimientos de Ensayo Laboratorio de Análisis Químico de Suelos y Foliare (2011) Universidad Tecnológica de Pereira.
- RAS (2000) “Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico” [disponible en línea] <http://www.cempre.org.co/Documentos/RAS-Oct2.pdf> [consultado febrero2 2012]
- Red Hidroclimatologica de Risaralda 2010. Boletines mensuales estación UTP [disponible en línea]<http://www.utp.edu.co/hidroclimatologica/es/boletinmensual/index/utp> [Consultado 10 de junio 2010]
- Rivera V. (2010) “ Estudio Cinético de la Digestión Anaeróbica Termofílica de paja a Escala Piloto” [consultado 1 diciembre 2012]
- Rodríguez J.A (2010) “Estudio Comparativo de Diferentes Tecnologías de Higienización de Lodos de Depuradora Con Fines Para su Reutilización” Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral [consultado febrero2 2012]
- Soto C, Gutiérrez S, (2010) “Biotransformación de Metales Pesados Presentes en Lodos Rivereños de los Ríos Bogotá y Tunjuelo. Artículo [disponible en línea] [http://www.nova-publicacioncientifica.org/NOVA14\\_ARTORIG6.pdf](http://www.nova-publicacioncientifica.org/NOVA14_ARTORIG6.pdf)[Consultado octubre 4 2012]
- Torres P, (2010). “Actividad Metanogénica Específica: Una Herramienta de Control y Optimización de Sistemas de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”. Artículo [disponible en línea] <http://eidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/9/b.htm>[Consultado agosto 31 2012]

- Tsagarakis K.P., Papadogiannis, Ch. (2006). "Technical and Economic Evaluation of the Biogas Utilization for Energy Production at Iraklio Municipality, Greece". Energy Conversion and Management. [Consultado 4 de Diciembre 2012]
- Vélez J.A (2007). "Los Biosólidos una solución o un problema?" [en línea]. Revista Producción + Limpia. Vol 2, No. 2. P. 57-71. [Consultado marzo 3 2011] Disponible en: <http://www.lasallista.edu.co/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/>
- Villegas C 2009, "Actualización del Diagnóstico Ambiental Universidad Tecnológica de Pereira". Biblioteca Jorge Roa Martínez. [consultado 23 agosto 2012]
- Villaseñor G (1995) "Tratamiento y Disposición de Lodos Producidos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" [disponible en línea] <http://www.bibliotecadigital.uson.mx> [consultado mayo 8 2012]
- Villaseca M.M (2001), "Observación Microscópica de Fangos Activados en los Tratamientos de Depuración Biológica" [disponible en línea] <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/1726/1/TREBALL8.pdf>. [Consultado Julio 3 2012]
- Varnero M.T (2011) "manual del biogás" Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [disponible en línea]. <http://www.rlc.fao.org/es/publicaciones/manual-biogas> [Consultado 3 marzo 2012]

## 12 ANEXOS

### Anexo No.1 Condiciones de operación de la digestión anaerobia de flujo discontinuo en los ensayos 1, 2 y 3

Ensayo	Días	T °C promedio de operación
Uno	62	23,5
Dos	47	22,1
Tres	50	22,9

### Anexo No. 2 Tabla de (NMP) Numero Más Probable de Bacterias Sembrando Tres Tubos Por Cada Dilución

SERIE 1 [2] 10 mL	SERIE 2 [1] 1mL	SERIE 3 [1] 0,1 mL	NPM Bacterias/ g
0	0	0	<3
0	0	1	3
0	1	0	3
1	0	0	4
1	0	1	7
1	1	0	7
1	1	1	11
1	2	0	11
2	0	0	9
2	0	1	14
2	1	0	15
2	1	1	20
2	2	0	21
2	2	1	28
3	0	0	23
3	0	1	39
3	0	2	64
3	1	0	43
3	1	1	75
3	1	2	120
3	2	0	93
3	2	1	150
3	2	2	210
3	3	0	240
3	3	1	460
3	3	2	1100
3	3	3	>1100

**Anexo No. 3 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk y T- student para los valores obtenidos a la salida de los digestores 1 y 2 en el ensayo 1**

Parámetros	Tratamiento con digestor	Shapiro-Wilk	Prueba T para igualdad de medias Intervalo 95% de confianza para la diferencia	Prueba T para igualdad de medias Intervalo 99% de confianza para la diferencia
		Sig.> 0,05	Sig bilateral > 0,05	Sig bilateral > 0,01
<b>Ca</b>	digestor 1	0,938	0,317	0,317
	digestor 2	0,077	0,346	0,346
<b>Mg</b>	digestor 1	0,33	0,825	0,825
	digestor 2	0,946	0,834	0,834
<b>Fe</b>	digestor 1	0,971	0,506	0,506
	digestor 2	0,955	0,534	0,534
<b>Mn</b>	digestor 1	0,721	0,627	0,627
	digestor 2	0,058	0,631	0,631
<b>Zn</b>	digestor 1	0,615	0,099	0,099
	digestor 2	0,56	0,126	0,126
<b>Cu</b>	digestor 1	0,646	0,99	0,99
	digestor 2	0,14	0,991	0,991
<b>Na</b>	digestor 1	0,822	0,153	0,153
	digestor 2	0,615	0,171	0,171
<b>%N Tot</b>	digestor 1	1	0,83	0,83
	digestor 2	0,637	0,831	0,831
<b>P Tot</b>	digestor 1	0,59	0,038	0,038
	digestor 2	0,589	0,043	0,043
<b>K</b>	digestor 1	0,465	0,299	0,299
	digestor 2	0,453	0,348	0,348
<b>% M.O</b>	digestor 1	0	0,28	0,28
	digestor 2	0,724	0,289	0,289
<b>C Org</b>	digestor 1	0	0,275	0,275
	digestor 2	0,731	0,284	0,284
<b>NORG</b>	digestor 1	0	0,218	0,218
	digestor 2	0,78	0,246	0,246
<b>r C/N</b>	digestor 1	0	0,36	0,36
	digestor 2	0,637	0,36	0,36
<b>%HUMED</b>	digestor 1	0,363	0,725	0,725
	digestor 2	0,637	0,729	0,729
<b>%ST</b>	digestor 1	0,363	0,725	0,725
	digestor 2	0,637	0,729	0,729
<b>%SV</b>	digestor 1	0,427	0,964	0,964
	digestor 2	0,434	0,965	0,965
<b>%CENIZA</b>	digestor 1	0,78	0,302	0,302
	digestor 2	0,432	0,316	0,316

#### Anexo No.4 Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis

Parámetro	MORG	CORG	NORG	CN
Sig. asintót.	0,268	0,268	0,268	0,268

#### Anexo No. 5 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk y T- student para los valores obtenidos a la salida de los digestores 1 y 2 en el ensayo 2

Parámetros	tratamiento con digestor	Shapiro-Wilk	prueba T para igualdad de medias Intervalo 95% de confianza para la diferencia
		Sig. > 0,05	Sig bilateral > 0,05
Ca	digestor 1		0,565
	digestor 2	0,986	0,588
Mg	digestor 1		0,297
	digestor 2	0,149	0,35
Fe	digestor 1		0,645
	digestor 2	0,686	0,659
Mn	digestor 1		0,099
	digestor 2	0,821	0,124
Zn	digestor 1		0,126
	digestor 2	0,314	0,127
Cu	digestor 1		0,665
	digestor 2	0,613	0,676
Na	digestor 1		0,309
	digestor 2	0,474	0,309
%NTot	digestor 1		0,055
	digestor 2	0,697	0,058
PTot	digestor 1		0,124
	digestor 2	0,731	0,139
K	digestor 1		0,325
	digestor 2	0,107	0,334
% M.O	digestor 1		0,135
	digestor 2	0,927	0,137
COrg	digestor 1		0,134
	digestor 2	0,927	0,135
NORG	digestor 1		0,099
	digestor 2	0,637	0,099
r C/N	digestor 1		0,181
	digestor 2	0,759	0,183

%HUMED	digestor 1		1
	digestor 2	1	1
%ST	digestor 1		0,573
	digestor 2	1	0,573
%SV	digestor 1		0,819
	digestor 2	0,071	0,822
%CENIZA	digestor 1		0,592
	digestor 2	0,88	0,602

**Anexo No. 6 Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk y T- student para los valores obtenidos a la salida de los digestores 1 y 2 en el ensayo 3**

parámetros	tratamiento con digestor	Shapiro-Wilk	prueba T para igualdad de medias Intervalo95% de confianza para la diferencia
		Sig.> 0,05	Sig bilateral > 0,05
Ca	digestor 1	0,983	0,123
	digestor 2	0,477	0,124
Mg	digestor 1	0,915	0,891
	digestor 2	0,505	0,892
Fe	digestor 1	0,899	0,612
	digestor 2	0,665	0,612
Mn	digestor 1	0,983	0,516
	digestor 2	0,695	0,533
Zn	digestor 1	0,676	0,327
	digestor 2	0,812	0,359
Cu	digestor 1	0,354	0,857
	digestor 2	0,627	0,859
Na	digestor 1	0,884	0,388
	digestor 2	0,616	0,395
%NTot	digestor 1	1	0,288
	digestor 2	1	0,288
PTot	digestor 1	0,723	0,443
	digestor 2	0,421	0,444
K	digestor 1	0,74	0,219
	digestor 2	0,496	0,248
% M.O	digestor 1	0,702	0,213
	digestor 2	0,711	0,215
COrg	digestor 1	0,697	0,213
	digestor 2	0,717	0,214
NOrg	digestor 1	0,78	0,218
	digestor 2	0,78	0,218

r C/N	digestor 1	0,576	0,671
	digestor 2	0,61	0,675
%HUMED	digestor 1	0,463	1
	digestor 2	0,463	1
%ST	digestor 1	0,463	1
	digestor 2	0,463	1
%SV	digestor 1	0,864	0,459
	digestor 2	0,771	0,473
%CENIZA	digestor 1	0,387	0,936
	digestor 2	0,913	0,936

### Anexo No. 7 Control diario de la temperatura ambiente en los ensayos 1, 2 y 3

Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Día	Temperatura °C	Día	Temperatura °C	Día	Temperatura °C
1	23	1	20	1	22
2	24	4	20	4	23
3	26	5	23	5	24
6	24	6	23	6	22
7	25	7	20	7	21
8	24	8	21	8	23
9	23	11	22	11	27
10	24	12	22	12	21
13	20	13	23	13	24
14	21	14	22	14	22
15	24	15	20	15	23
16	26	18	23	18	24
17	24	19	24	19	26
20	23	20	26	20	22
21	24	21	23	21	21
22	22	22	26	22	21
23	24	25	22	25	24
24	21	26	21	26	23
27	25	27	21	27	24
28	24	28	25	28	23
29	23	29	23	29	22
30	22	32	20	32	21
31	21	33	22	33	25
34	22	34	20	34	20
35	25	35	19	35	23
36	25	36	21	36	22
37	24	39	25	39	24
38	26	40	20	40	23
41	24	42	22	42	26



42	26	43	23	43	22
43	24	46	20	46	21
44	23	47	25	47	23
45	24		22	48	24
48	22			50	22
49	23				23
50	25				
51	26				
52	24				
56	22				
57	25				
58	21				
59	22				
62	21				

**Anexo No.8 Control Diario de pH en el Lodo Durante los Ensayos 1, 2 y 3**

Ensayo1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Día	pH	Día	pH	Día	pH
1	7,2	1	6,94	1	7,23
2	7,2	4	6,49	4	6,535
3	6,65	5	6,23	5	6,265
6	5,79	6	5,765	6	5,78
7	5,63	7	5,405	7	5,37
8	6,34	8	6,335	8	5,92
9	6,72	11	6,58	11	6,11
10	6,515	12	6,715	12	6,51
13	6,57	13	6,65	13	6,59
14	6,635	14	6,625	14	6,625
15	6,62	15	6,615	15	6,63
16	6,765	18	6,615	18	6,65
17	6,69	19	6,69	19	6,7
20	6,7	20	6,74	20	6,73
21	6,76	21	6,755	21	6,755
22	6,825	22	6,8	22	6,78
23	6,825	25	6,77	25	6,8
24	6,82	26	6,775	26	6,765
27	6,8	27	6,775	27	6,765
28	6,83	28	6,815	28	6,795
29	6,855	29	6,815	29	6,825
30	6,85	32	6,8	32	6,795
31	6,865	33	6,815	33	6,82
34	6,86	34	6,82	34	6,825
35	6,845	35	6,825	35	6,825
36	6,84	36	6,82	36	6,815
37	6,84	39	6,805	39	6,81

38	6,85	40	6,81	40	6,825
41	6,83	42	6,8	42	6,8
42	6,805	43	6,805	43	6,805
43	6,82	46	6,8	46	6,81
44	6,85	47	6,8	47	6,79
45	6,85			48	6,8
48	6,865			50	6,82
49	6,87				
50	6,85				
51	6,86				
52	6,86				
56	6,84				
57	6,85				
58	6,85				
59	6,825				
62	6,83				

**Anexo No. 9 Concentraciones en ppm y Analisis estadístico de los Metales Analizados en el Ensayo 1**

Muestra E1	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Na
<b>Entrada</b>	1023,42	219,53	1031,04	178,35	96,74	63,21	110,24
	1048,34	220,16	1024,62	180,21	94,84	65,07	109,45
	1015,67	217,56	1029,15	180,06	88,14	63,64	110,84
<b>Media</b>	10,2914	219,08	1028,27	179,54	93,24	63,97	110,18
<b>desvest</b>	17,0704316	1,35633083	3,29922718	1,0332957	4,5177428	0,97377273	0,69716091
<b>Salida</b>	1014,53	218,36	1023,84	179,62	93,56	62,78	108,61
	1019,32	217,87	1026,57	177,23	92,29	63,52	108,3
	1016,79	217,76	1029,45	178,73	93,15	63,27	109,04
	1015,84	216,87	1025,38	178,47	95,23	64,02	110,12
	1016,32	219,54	1024,68	179,92	96,02	63,83	109,26
	1005,77	218,14	1026,14	178,52	93,36	61,69	108,85
<b>Media</b>	1014,76	218,09	1026,01	178,75	93,94	63,19	109,03
<b>desvest</b>	4,67733863	0,8744827	1,95134825	0,95581205	1,40126728	0,8522617	0,6297301
<b>probabilidad</b>	0,2177	0,486	0,4321	0,5225	0,6806	0,5442	0,0523

**Anexo No. 10 Concentraciones en ppm y Analisis estadístico de los Metales  
Analizados en el Ensayo 2**

Muestra E2	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Na
<b>Entrada</b>	1239,4	167,9	356,81	120,31	121,96	74,644	103,62
	1245,5	168,24	345,79	120,45	122,03	74,361	102,34
	1248,5	168,32	357,43	119,87	121,89	74,897	105,74
<b>media</b>	1244,47	168,15	353,34	120,21	121,96	74,63	103,9
<b>desvest</b>	4,63716868	0,22300972	6,54871998	0,30265492	0,07	0,26813989	1,71720703
<b>Salida</b>	1247,5	166,84	335,34	121,08	122,1	75,141	104,46
	1251,8	168,02	352,32	120,21	120,92	74,625	103,26
	1249,2	167,14	349,46	120,72	121,45	75,185	105,68
	1246,4	167,12	351,61	119,84	120,26	75,378	102,38
	1238,4	158,44	344,73	120,27	121,25	75,853	104,65
	1254,6	166,37	349,16	120,09	120,05	74,378	102,96
<b>media</b>	1247,96	165,66	347,11	120,37	120,505	75,09	103,9
<b>desvest</b>	5,55712756	3,57536991	6,34533109	0,45199189	0,7656827	0,52912028	1,23677672
<b>probabilidad</b>	0,5647	0,2336	0,4296	0,1446	0,0331	0,4195	0,6293

**Anexo No.11 Concentraciones en ppm y Analisis estadístico de los Metales  
Analizados en el Ensayo 3**

Muestra Ensayo3	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Na
<b>Entrada</b>	856,93	229,53	1231,24	198,35	86,74	83,21	117,24
	858,34	227,31	1243,16	201,68	88,26	84,06	118,73
	859,17	228,39	1238,22	199,79	86,41	82,98	121,15
<b>Media</b>	858,15	228,41	1237,54	199,94	87,14	83,42	119,04
<b>Desvest</b>	1,13244573	1,11013513	5,98902329	1,67005988	0,9867286	0,5688878	1,97334741
<b>Salida</b>	855,61	223,11	1236,29	199,53	85,62	82,66	116,34
	856,28	225,25	1229,87	198,18	86,21	80,56	117,76
	854,96	220,61	1241,63	200,84	86,53	83,17	115,19
	857,23	219,36	1228,52	198,42	87,11	84,34	117,49
	856,14	224,41	1239,34	199,53	85,67	81,32	118,03
	856,42	226,28	1232,27	198,82	88,13	79,84	116,36
<b>Media</b>	856,11	223,17	1234,655	199,22	86,545	81,98	116,86
<b>Desvest</b>	0,76847034	2,70589726	5,28196428	0,9693503	0,95552603	1,70174518	1,08490399
<b>Probabilidad</b>	0,0256	0,0708	0,6907	0,6393	0,4264	0,473	0,1592

**Anexo No.12 Concentraciones en ppm y Analisis Estadístico de los Nutrientes Analizados en el Ensayo 1**

Muestra Ensayo 1	N total %	P	K	%MO	%C Orgánico	%N Orgánico	r C/N
Entrada	0,97	628,75	853,62	31,66	18,36	0,83	22,12
	0,95	637,42	849,39	28,04	16,26	0,8	20,32
	0,98	626,18	854,26	29,12	16,88	0,81	20,83
Media	0,97	630,78	852,42	29,61	17,17	0,81	21,09
Desvest	0,01527525	5,88941706	2,64636228	1,85842227	1,07895011	0,01527525	0,92773919
Salida	0,84	624,71	848,53	23,03	13,35	0,72	18,54
	0,8	627,52	852,23	21,28	12,34	0,7	17,63
	0,82	623,44	853,47	23,03	13,35	0,72	18,54
	0,82	631,39	853,62	22,13	12,84	0,71	18,08
	0,83	629,37	852,64	24,02	13,93	0,74	18,82
	0,8	628,46	853,38	25,15	14,59	0,76	19,19
Media	0,82	627,48	852,31	23,11	13,4	0,725	18,4666667
Desvest	0,01602082	2,96029334	1,92926324	1,36467823	0,79236355	0,02167948	0,5492419
Probabilidad	0,0001	0,229	0,6137	0,0025	0,0025	0,0013	0,0005

**Anexo No 13 Concentraciones en ppm y Analisis Estadístico de los Nutrientes Analizados en el Ensayo 2**

Muestra Ensayo 2	N total %	P2	K	%MO	%C Orgánico	%N Orgánico	r C/N
Entrada	1,5173	579,58	1186,34	31,88	18,49	0,83	22,27
	1,5313	575,35	1185,98	34,8	20,18	0,85	23,74
	1,5457	565,49	1186,55	33,28	19,3	0,84	22,97
Media	1,53	571,83	1186,29	33,32	19,32	0,84	22,99
Desvest	0,01420047	7,23003688	0,28827071	1,4604109	0,84524158	0,01	0,73527773
Salida	1,3476	573,94	1180,4	23,59	15,24	0,73	18,74
	1,3223	571,14	1202,88	25,66	15,98	0,76	19,57
	1,3544	575,97	1182,6	24,56	14,58	0,75	18,99
	1,3899	568,94	1184,2	26,27	13,68	0,77	19,79
	1,3726	570,74	1183,28	27,56	14,88	0,79	20,18
	1,3628	571,83	1169,52	25,14	14,24	0,76	19,18
Media	1,36	572,09	1183,82	25,46	14,77	0,76	19,41
Desvest	0,02301736	2,49767625	10,783266	1,37951682	0,80026662	0,02	0,53685814
Probabilidad	0,0001	0,645	0,4139	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003

**Anexo No. 14 Concentraciones en ppm y Analisis Estadístico de los Nutrientes Analizados en el Ensayo 3**

Muestra Ensayo 3	N total %	P	K	%MO	%C Organco	%N Organico	r C/N
Entrada	0,99	568,75	953,62	30,17	17,5	0,82	21,34
	0,98	570,53	956,93	31,52	18,28	0,83	22,02
	0,97	567,82	954,31	28,94	16,79	0,8	20,98
Media	0,98	569,03	954,95	30,21	17,52	0,82	21,45
Desvest	0,01	1,37703788	1,74626268	1,29046503	0,745274	0,01527525	0,5281414
Salida	0,82	566,46	952,46	22,02	12,77	0,71	17,98
	0,83	568,86	953,58	23,96	13,9	0,74	18,78
	0,81	570,29	954,27	25,07	14,54	0,76	19,13
	0,8	567,86	953,22	22,18	12,86	0,71	18,11
	0,81	568,63	952,19	20,53	11,91	0,68	17,51
	0,82	565,27	949,35	23,14	13,42	0,73	19,38
Media	0,815	567,895	952,51	22,82	13,23	0,72	18,42
Desvest	0,01048809	1,79769575	1,72261913	1,59738119	0,9264915	0,02786874	0,72804991
Probabilidad	0,0001	0,4663	0,1112	0,0008	0,0008	0,0024	0,0032

**Anexo No.15 Porcentajes y Analisis Estadístico de Humedad,solidos Totales, Solidos Volatiles y Cenizas en el Ensayo 1**

Muestra Ensayo 1	%Humedad	%ST	%SV	%CENIZAS
Entrada	97,44	2,56	58,53	41,6
	97,47	2,53	56,41	41,46
	97,43	2,57	59,17	41,33
Media	97,45	2,55	58,034	41,46
Desvest	0,02081666	0,02081666	1,44462221	0,13503086
Salida	96,73	3,27	45,29	40,84
	96,68	3,32	46,12	41,26
	96,72	3,28	42,54	41,54
	96,7	3,3	43,67	40,94
	96,72	3,28	45,24	41,21
	96,73	3,27	44,87	40,06
Media	96,71	3,3	44,62	40,98
Desvest	0,01966384	0,01966384	1,29419344	0,51231826
Probabilidad	0,0001	0,0001	0,0001	0,1683

**Anexo No.16 Porcentajes y Análisis Estadístico de Humedad, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles y Cenizas en el Ensayo 2**

Muestra Ensayo 2	%Humedad	%ST	%SV	%CENIZAS
Entrada	97,66	2,34	59,36	40,9
	97,64	2,36	61,74	39,87
	97,67	2,33	60,25	40,44
Media	97,66	2,34	60,45	40,40
Desvest	0,01527525	0,01527525	1,20253898	0,51597804
Salida	96,86	3,14	43,62	40,06
	96,82	3,18	44,27	40,49
	96,84	3,16	42,36	40,42
	96,81	3,19	41,67	40,02
	96,83	3,17	44,78	40,53
	96,85	3,15	44,65	40,94
Media	96,83	3,165	43,56	40,41
Desvest	0,01581139	0,01870829	1,28033459	0,33952909
Probabilidad	0,0001	0,0001	0,0001	0,8827

**Anexo No.17 Porcentajes y Analisis Estadístico de Humedad, Sólidos totales, Sólidos Volátiles y Cenizas 3 en el Ensayo 3**

Muestra Ensayo 3	%Humedad	%ST	%SV	%CENIZAS
Entrada	97,74	2,26	63,34	43,72
	97,72	2,28	60,83	43,26
	97,77	2,23	62,19	43,56
Media	97,74	2,26	62,12	43,51
Desvest	0,02516611	0,02516611	1,25646329	0,23352373
Salida	96,9	3,1	42,87	43,6
	96,91	3,09	43,6	43,74
	96,94	3,06	43,19	43,08
	96,9	3,1	42,85	43,48
	96,91	3,09	44,24	43,19
	96,94	3,06	43,69	43,82
Media	96,92	3,08	43,41	43,48
Desvest	0,01861899	0,01861899	0,53980243	0,29716999
Probabilidad	0,0001	0,0001	0,0001	0,9869

**Anexo No.18 Control diario de volumen acumulado de biogás durante los ensayos 1, 2 y 3**

Ensayo1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Día	Media biogás Cm <sup>3</sup>	Día	Media biogás Cm <sup>3</sup>	Día	Media biogás Cm <sup>3</sup>
1	0	1	0	1	0
2	0	4	4,5	4	4
3	0	5	12,5	5	10,5
6	39	6	30	6	19
7	55,5	7	43,5	7	34
8	82,5	8	63	8	40,5
9	103	11	115,5	11	85,5
10	126	12	133,5	12	112,5
13	193	13	177,5	13	140
14	232,5	14	220	14	201,5
15	283	15	273,5	15	238
16	337	18	381	18	355,5
17	402	19	414	19	402,5
20	534,5	20	449	20	453,5
21	592,5	21	524,5	21	477
22	624	22	557	22	523,5
23	661,5	25	679,5	25	621
24	689,5	26	710	26	640
27	767,5	27	733,5	27	664,5
28	788	28	742,5	28	694
29	813	29	761	29	716,5
30	821	32	818	32	767,5
31	835,5	33	830,5	33	784
34	851,5	34	843	34	807
35	863,5	35	849,5	35	821
36	872,5	36	857,5	36	834
37	882,5	39	876,5	39	852,5
38	889,5	40	880,5	40	858
41	892,5	42	867,5	42	862
42	893,5	43	869,5	43	864,5
43	896,5	46	879	46	866,5
44	897	47	889	47	870
45	898,5			48	870
48	902			50	870,5
49	902				
50	903,5				
51	904				

52	904,5				
56	906,5				
57	906,5				
58	907				
59	907				
62	909				

### Anexo No.19 Resultados Análisis Microbiológicos

62 días				47 días				50 días			
<b>Entrada coliformes totales ensayo 1</b>				<b>Entrada coliformes totales ensayo 2</b>				<b>Entrada coliformes totales ensayo 3</b>			
Dilución	-1	-2	-3	Dilución	-1	-2	-3	Dilución	-1	-2	-3
Turbidez	3	3	3	Turbidez	3	3	3	Turbidez	3	3	3
Producción de gas	3	3	3	Producción de gas	3	3	3	Producción de gas	3	3	3
Salida coliformes totales ensayo 1				Salida coliformes totales ensayo 2				Salida coliformes totales ensayo 3			
dilución	-1	-2	-3	dilución	-1	-2	-3	dilución	-1	-2	-3
Turbidez	3	2	1	Turbidez	3	3	2	Turbidez	3	3	2
producción de gas	3	2	1	Producción de gas	3	3	2	producción de gas	3	3	2
Entrada coliformes fecales ensayo1				Entrada coliformes fecales ensayo2				Entrada coliformes fecales ensayo 3			
Dilución	-1	-2	-3	Dilución	-1	-2	-3	Dilución	-1	-2	-3
Fluorescencia	3	3	3	Fluorescencia	3	3	3	Fluorescencia	3	3	2
R Kovacs	3+	3+	3+	R Kovacs	3+	3+	3+	R Kovacs	3+	3+	3+
salida coliformes fecales ensayo 1				salida coliformes fecales ensayo 2				salida coliformes fecales ensayo 3			
Dilución	-1	-2	-3	Dilución	-1	-2	-3	Dilución	-1	-2	-3
Fluorescencia	3	1	1	Fluorescencia	3	2	2	Fluorescencia	3	3	1
R Kovacs	3+	1+	1+	R kovacs	3+	2+	1+	R Kovacs	3+	2+	1+