

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA  
MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE UN MODELO PILOTO DE  
RELLENO SANITARIO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
AMBIENTAL**

**CLAUDIA MARGOTH ENCALADA BORJA**  
clau.encalada@gmail.com

**DIRECTOR: Ing. ISAÍAS MARCELO MUÑOZ RODRÍGUEZ, M.Sc**  
marcelo.munoz@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR: Ing. MARÍA BELEN ALDAS SANDOVAL, M.Sc**  
maría.aldas@epn.edu.ec

**Quito, marzo 2017**

## DECLARACIÓN

Yo, Claudia Margoth Encalada Borja, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

**CLAUDIA MARGOTH ENCALADA BORJA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Claudia Margoth Encalada Borja, bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. MARCELO MUÑOZ, M,Sc**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. MARÍA BÉLEN ALDÁS, M,Sc**  
**CODIRECTORA DEL PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar quiero agradecer a mi familia que han sido mi apoyo y soporte durante toda mi vida, a mi mami, que aunque hoy ya no está conmigo físicamente fue y siempre será mi fortaleza y fuente de amor, a quien le debo todo lo que soy, a mi padre por todo su esfuerzo para permitirme que cumpla mis metas y a mi hermano que siempre ha estado cuando lo he necesitado y ha sido un ejemplo a seguir, tanto en lo personal como en lo profesional.

A David, que ha sido mi compañero en este viaje y mi refugio en estos últimos meses, gracias por todo lo que has hecho por mí, por apoyarme y darme ánimos para terminar este proyecto.

Un sincero agradecimiento a todos los profesores que compartieron sus conocimientos y han sido una guía durante todos estos años; en especial a mis directores de tesis Ing. Marcelo Muñoz e Ing. María Belén Aldás por haber sido parte de este proyecto y guiarme en todo momento.

Y como dejar de lado a mis poli amigos: Joys, Raque, Juani, Víctor, Jona, Robert y Naty y a mis amigos de la vida: Matosh, Hipa y Katy. Cada uno de ellos ha estado conmigo en diferentes momentos, con una palabra de apoyo, un consejo o simplemente un chiste para romper el hielo. Gracias por su linda amistad y por demostrarme que los amigos de verdad siempre están en las buenas y sobretodo en las malas.

A Don Santiaguito por su ayuda en la construcción de los reactores.

Por el apoyo y las facilidades brindadas para culminar mi carrera quiero agradecer a mis jefes y compañeros de la EPMAPS.

## DEDICATORIA

Este trabajo y toda mi carrera quiero dedicarle a mi mami, que a pesar de que la vida no nos permitió terminar esto juntas, siempre estuvo conmigo, nunca me soltó la mano y ha sido mi inspiración para seguir adelante incluso cuando las cosas se ponían difíciles.

Todo lo que soy se lo debo a usted, sé que me he convertido en la mujer que soy ahora gracias a todas sus enseñanzas y su ejemplo. Solo faltaba este último pasito para que pueda celebrar junto conmigo que cumplí esta meta.

Estaré eternamente agradecida con usted mami y sé que algún día nos volveremos a ver y juntas podremos decir que lo logramos, porque este logro también es suyo.

## CONTENIDO

|                            |      |
|----------------------------|------|
| DECLARACIÓN.....           | II   |
| CERTIFICACIÓN.....         | III  |
| AGRADECIMIENTO.....        | IV   |
| DEDICATORIA.....           | V    |
| CONTENIDO.....             | VI   |
| LISTA DE TABLAS.....       | X    |
| LISTA DE FIGURAS.....      | XII  |
| LISTA DE GRÁFICAS.....     | XIII |
| LISTA DE ANEXOS.....       | XIV  |
| RESUMEN.....               | XV   |
| ABSTRACT.....              | XVII |
| PRESENTACIÓN.....          | XIX  |
| CAPÍTULO I.....            | 1    |
| 1. ASPECTOS GENERALES..... | 1    |
| 1.1. INTRODUCCIÓN.....     | 1    |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN.....    | 3    |
| 1.3. OBJETIVOS.....        | 5    |

|  |           |
|--|-----------|
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....  | 5         |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 5         |
| <b>CAPÍTULO II.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2.1. RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>2.2. RELLENO SANITARIO .....</b>  | <b>9</b>  |
| 2.2.1. LIMITACIONES DE UN RELLENO SANITARIO .....                                    | 11        |
| 2.2.2. CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN UN RELLENO<br>SANITARIO .....       | 12        |
| 2.2.3. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO ..                            | 13        |
| 2.2.4. PROBLEMÁTICA DE UN RELLENO SANITARIO.....                                     | 16        |
| <b>2.3. LIXIVIADOS .....</b>   | <b>18</b> |
| 2.3.1. COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVADOS.....   | 18        |
| <b>2.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA .....</b>  | <b>19</b> |
| 2.4.1. FUNDAMENTO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA ....                            | 20        |
| 2.4.2. ETAPAS DE LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA.....                                       | 21        |
| 2.4.3. FACTORES FÍSICO – QUÍMICOS QUE INTERVIENEN EN LA<br>DIGESTIÓN ANAEROBIA ..... | 24        |
| 2.4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTÓN ANAEROBIA ...                           | 26        |
| <b>CAPÍTULO III.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>3. METODOLOGÍA.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>3.1. FASE EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>28</b> |
| 3.1.1. SEPARACIÓN Y RECOLECCIÓN DEL SUSTRATO .....                                   | 28        |
| 3.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO .....  | 28        |
| 3.1.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES .....   | 29        |
| 3.1.4. ACONDICIONAMIENTO Y LLENADO DE LOS REACTORES .....                            | 32        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1.5. OPERACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LOS REACTORES .....   | 33        |
| <b>3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>CAPÍTULO IV .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4.1. FASE INICIAL DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>   | <b>39</b> |
| 4.1.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUSTRATO .....   | 39        |
| 4.1.2. PESO ESPECÍFICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS EN CADA<br>REACTOR.....                                    | 40        |
| <b>4.2. EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS DE CONTROL DEL<br/>SUSTRATO .....</b>                                  | <b>41</b> |
| 4.2.1. EVALUACIÓN DEL pH DEL SUSTRATO .....   | 41        |
| 4.2.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA INTERNA DE LOS<br>REACTORES .....                                       | 44        |
| 4.2.3. EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUSTRATO.....   | 47        |
| 4.2.4. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE SÓLIDOS DEL SUSTRATO<br>49  |           |
| 4.2.5. RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO C/N DEL SUSTRATO .....  | 52        |
| 4.2.6. COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN EL INTERIOR<br>DE LOS REACTORES .....                        | 54        |
| <b>4.3. EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS DE CONTROL DEL<br/>LIXIVIADO .....</b>                                 | <b>56</b> |
| 4.3.1. EVALUACIÓN DEL pH DEL LIXIVIADO .....  | 56        |
| 4.3.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LIXIVIADO .....   | 58        |
| 4.3.3. EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LA<br>DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EL LIXIVIADO..... | 59        |
| 4.3.4. VOLUMEN DE LIXIVIADO GENERADO.....   | 62        |
| <b>CAPÍTULO V .....</b>   | <b>66</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b> | <b>66</b> |
| <b>5.1. CONCLUSIONES.....</b>                  | <b>66</b> |
| <b>5.2. RECOMENDACIONES .....</b>              | <b>70</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>        | <b>72</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>                             | <b>77</b> |
| <b>ANEXO No 1.....</b>                         | <b>78</b> |
| <b>ANEXO No 2.....</b>                         | <b>84</b> |
| <b>ANEXO No 3.....</b>                         | <b>90</b> |
| <b>ANEXO No 4.....</b>                         | <b>92</b> |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN SU ORIGEN.....   | 7  |
| TABLA 2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RSM .....                                       | 8  |
| TABLA 2.3. CLASIFICACIÓN GENERAL DEL LIXIVIADO POR EDAD .....   | 19 |
| TABLA 2.4. CONDICIONES IDEALES PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN FUNCIÓN DE LA FASE .....                                  | 26 |
| TABLA 2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA   | 27 |
| TABLA 3.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA EL SEGUIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL ..... | 37 |
| TABLA 4.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUSTRATO.....  | 39 |
| TABLA 4.2. VALORES MEDIDOS DE pH EN LOS REACTORES .....   | 41 |
| TABLA 4.3. VALORES MEDIDOS DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE LOS REACTORES.....   | 45 |
| TABLA 4.4. VALORES REGISTRADOS DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN LOS REACTORES.....  | 47 |
| TABLA 4.5. PORCENTAJE DE SÓLIDOS DURANTE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN CADA REACTOR .....                                   | 49 |
| TABLA 4.6. RELACIÓN SV/ST EN LOS REACTORES.....   | 50 |
| TABLA 4.7. RELACIÓN CARBONO - NITRÓGENO EN CADA REACTOR ...   | 52 |
| TABLA 4.8. PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS .....   | 54 |
| TABLA 4.9. VARIACIÓN DE LA MEDIDA DE pH EN EL LIXIVIADO GENERADO POR CADA REACTOR.....                                  | 56 |

|   |    |
|---|----|
| TABLA 4.10. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LIXIVIADO<br>GENERADO.....        | 58 |
| TABLA 4.11. VALORES MEDIDOS DE DQO DE LOS LIXIVIADOS DE CADA<br>REACTOR ..... | 60 |
| TABLA 4.12. VOLUMEN DE LIXIVIADO GENERADO POR CADA REACTOR<br>.....           | 62 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2.1. CORTE DE UN RELLENO SANITARIO .....                        | 10 |
| FIGURA 2.2. RELLENO SANITARIO SEMI-MECANIZADO TIPO TRINCHERA<br>.....  | 14 |
| FIGURA 2.3. MÉTODO DE ÁREA PARA CONSTRUIR UN RELLENO<br>SANITARIO..... | 15 |
| FIGURA 2.4. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....                     | 23 |
| FIGURA 3.1. REACTORES ANAEROBIOS INSTALADOS .....                      | 30 |
| FIGURA 3.2. DIAGRAMA DE LOS REACTORES ANEROBIOS .....                  | 31 |
| FIGURA 3.3. INYECCIÓN DE ALCALINIZANTE AL SISTEMA .....                | 35 |
| FIGURA 4.1. SUSTRATO FINAL REACTOR 1 .....                             | 65 |
| FIGURA 4.2. SUSTRATO FINAL REACTOR 2 .....                             | 65 |

## LISTA DE GRÁFICAS

|  |    |
|--|----|
| GRÁFICA 4.1. VARIACIÓN DEL VALOR MEDIDO DE pH EN CADA REACTOR .....                                      | 42 |
| GRÁFICA 4.2. VARIACIÓN DEL VALOR MEDIDO DE TEMPERATURA EN CADA REACTOR.....                              | 46 |
| GRÁFICA 4.3. VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN CADA REACTOR .....                                   | 48 |
| GRÁFICA 4.4. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE SÓLIDOS VÓLÁTILES VS SÓLIDOS TOTALES EN LOS REACTORES .....     | 51 |
| GRÁFICA 4.5. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN C/N EN CADA REACTOR....  | 53 |
| GRÁFICA 4.6. VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS AL INTERIOR DE LOS REACTORES ..... | 55 |
| GRÁFICA 4.7. VARIACIÓN DEL VALOR MEDIDO DE pH DEL LIXIVIADO EN CADA REACTOR.....                         | 57 |
| GRÁFICA 4.8. VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL LIXIVIADO EN CADA REACTOR .....                                | 59 |
| GRÁFICA 4.9. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DQO EN EL LIXIVIADO GENERADO POR CADA REACTOR.....         | 61 |
| GRÁFICA 4.10. VARIACIÓN DEL VOLUMEN GENERADO DE LIXIVIADO EN CADA REACTOR.....                           | 63 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| TABLA A. 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE SÓLIDOS EN EL REACTOR 1 .....         | 79 |
| TABLA A. 2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE SÓLIDOS EN EL REACTOR 2 .....         | 80 |
| TABLA A. 3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE HUMEDAD EN LOS DOS REACTORES .....    | 81 |
| TABLA A. 4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE pH EN LOS DOS REACTORES .....         | 82 |
| TABLA A. 5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN LOS DOS REACTORES..... | 82 |
| TABLA A. 6. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE DQO EN LOS DOS REACTORES .....        | 83 |
| TABLA A. 7. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE PH EN EL LIXIVIADO .....              | 83 |
| TABLA A. 8. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL PERIODO JULIO – DICIEMBRE 2017 .....               | 91 |
| <br>   |    |
| FIGURA A. 1. RECOLECCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS .....                                     | 93 |
| FIGURA A. 2. SEPARACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS .....                                      | 93 |
| FIGURA A. 3. TRITURACIÓN Y LLENADO .....   | 94 |

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación pretende evaluar el tiempo de digestión anaerobia para materia orgánica y la producción de lixiviado dentro de una gestión de residuos sólidos separados en condiciones de cero lluvia, bajo temperatura ambiente y presión atmosférica de la ciudad de Quito; mediante la construcción de dos reactores piloto simulando una celda de relleno sanitario; para lo cual se instalaron dos reactores anaerobios, el primer reactor fue llenado con residuos orgánicos en su estado original (reactor 1) y el segundo reactor con residuos orgánicos triturados (reactor 2). La temperatura interna de operación de los reactores estuvo entre 15 y 20 °C, trabajando en rango psicrófilico.

Durante la operación de los reactores los parámetros analizados fueron: pH, temperatura, humedad, porcentaje de sólidos totales, fijos y volátiles para el sustrato y para el lixiviado se midió el volumen generado, pH, temperatura y DQO. Además de determinar el peso específico del sustrato utilizado y el porcentaje de compactación.

Se obtuvo un peso específico de 911,23 kg/m<sup>3</sup> con los residuos en su estado original y 1145,70 kg/m<sup>3</sup> al triturar los residuos, con lo que se identifica que el peso específico es mayor cuando se disminuye el tamaño de partícula de los residuos, lo que permite que la capacidad de un relleno sanitario aumente; sin embargo, al tener una mayor compactación se presentan problemas de acidez y a su vez se fomenta la formación de un lodo hidrófilo que retiene la humedad en su interior.

Los residuos orgánicos presentan una alta tasa de acidificación por lo que no es posible que se cambie de la fase ácida de la digestión anaerobia a la fase metanogénica, por esta razón es necesaria la adición de alcalinizante al sustrato, para alcanzar la neutralidad. Se utilizó tres tipos de alcalinizantes: CaO, NaHCO<sub>3</sub> y NaOH, obteniendo mejores resultados con el último; puesto

que se alcanzó un pH de 7,27 en el reactor 1 y 5,47 en el reactor 2 partiendo de un pH inicial de 4,49 en cada reactor.

En cuanto a la humedad de los reactores, ésta se mantiene generalmente por encima de 80% en ambos reactores, lo que resulta óptimo para el proceso de digestión anaerobia.

La relación SV/ST se mantiene constante entre 0,7 y 0,8, esto se debe a la acidez del sustrato que no permite el cambio de la fase ácida a la fase metanogénica de la digestión anaerobia; con la adición de alcalinizante a cada reactor se logró aumentar el pH y a la vez disminuir la relación SV/ST hasta 0,45 en el reactor 1 y 0,68 en el reactor 2.

De igual manera, a partir del cambio de la fase ácida a la fase metanogénica la relación C/N tiene una disminución de un 20% en el reactor 1 y 10% en el reactor 2.

En cuanto a la evaluación de la calidad y cantidad del lixiviado generado, se tiene que la concentración de la DQO del lixiviado de cada reactor va disminuyendo a medida que la digestión anaerobia avanza y se tiene una mayor disminución cuando el pH tiende a la neutralidad. En el reactor 1, la disminución de la DQO es 18% y 5% en el reactor 2. De igual manera, el volumen del lixiviado generado disminuye durante el transcurso de la digestión anaerobia alcanzando un volumen final poco significativo.



## ABSTRACT

This project aims to evaluate the anaerobic digestion time for organic material and the production of leachate within a separated solid waste management under zero rain conditions, at ambient temperature and pressure of Quito; through the construction of two pilot reactors simulating a landfill cell. Two anaerobic reactors were installed; the first reactor was filled with organic waste in its original state (reactor 1) and the second reactor with crushed organic wastes (reactor 2). The internal operating temperature of the reactors was between 15 and 20 ° C, working in a psychophilic range.

The parameters analyzed during the operation of the reactors were: pH, temperature, percentage of humidity, percentage of solids (totals, volatiles and fixed) for the substrate and for the leachate were: volume, pH, temperature and COD. It was also determined the specific weight of the substrate used and the percentage of compaction.

A specific weight of 911.23 kg/m<sup>3</sup> was obtained with the residues in their original state and 1145.70 kg/m<sup>3</sup> to the crush the residues, which indicates that the specific weight is higher when the particle size of the wastes is decreased, which allows the capacity of a landfill to increase; however, due to its higher compaction, acidity problems occur and in turn the formation of a hydrophilic sludge that retains humidity inside is encouraged.

The organic residues present a high rate of acidification so they are not able to change from the acid phase to the methanogenic phase of the anaerobic digestion, for this reason it was necessary the addition of alkalizing to the substrate, to reach neutrality. Three types of alkalining were used: CaO, NaHCO<sub>3</sub> and NaOH, obtaining better results with NaOH.

As for the humidity of the reactors, it is generally maintained above 80% in both reactors, which is optimum for the anaerobic digestion process.

The SV/ST ratio remains constant between 0.7 and 0.8, this is due to the acidity of the substrate that does not allow the change of the acid phase to the methanogenic phases of the anaerobic digestion; with the addition of alkalizing to each reactor, the pH was increased and the SV/ST ratio was reduced to 0.45 in reactor 1 and 0.68 in reactor 2.

Likewise, since of the change from the acid phase to the methanogenic phase the C/N ratio has a decrease of 20% in reactor 1 and 10% in reactor 2.

The COD concentration of the leachate from each reactor decreases during the anaerobic digestion advances and there is a greater decrease when the pH tends to neutrality. In reactor 1, the COD decrease is 18% and 5% in reactor 2. Likewise, the volume of leachate generated decreases during the course of the anaerobic digestion to a final volume of little significance.

## **PRESENTACIÓN**

El fin del presente trabajo es contribuir con una alternativa a la gestión de residuos sólidos y minimizar los problemas ocasionados con la inadecuada disposición de los residuos sólidos municipales.

El presente trabajo está conformado por cinco capítulos:

En el Capítulo 1 “Aspectos Generales”, se detalla una breve introducción de la problemática a nivel nacional y mundial de la gestión de los residuos sólidos, enfocada principalmente en la disposición final de los mismos, con lo cual se justifica el propósito y se plantean los objetivos de la investigación.

El Capítulo 2 “Marco Teórico”, contiene los fundamentos teóricos en los que el presente trabajo se basa, donde se incluye información sobre la problemática y características de los residuos orgánicos, rellenos sanitarios, lixiviados y digestión anaerobia.

En el Capítulo 3 “Metodología”, se detalla la metodología utilizada en el desarrollo de la presente investigación, donde se describe la separación, recolección y caracterización del sustrato, construcción, operación y seguimiento de los reactores, la evaluación de los parámetros de control y el proceso de ajuste del pH a través de la alcalinización del sustrato.

En el Capítulo 4 “Resultados y Discusión” se presentan los resultados obtenidos luego del monitoreo de los reactores y la evaluación de los parámetros de control, además de un análisis de cada parámetro de control, donde se discute las posibles causas de los resultados.

Finalmente el Capítulo 5 “Conclusiones y Recomendaciones” contiene las conclusiones y recomendaciones obtenidas en base a los resultados presentados y los objetivos planteados.

# CAPÍTULO I

## 1. ASPECTOS GENERALES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos municipales (RSM) ha ido en aumento debido al acelerado crecimiento poblacional, siendo una de las mayores fuentes de generación de RSM los hogares; se estima que a nivel mundial la generación de residuos domésticos es de 2 millones de toneladas al día; debido a la magnitud de los RSM, la disposición final de los mismos se ha convertido en un problema a tratar (Yabroudi et al., 2010).

El método más común para la disposición final RSM son los rellenos sanitarios, los cuales generan biogás ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) y efluentes líquidos (lixiviados), ocasionando impactos en el ambiente y afectaciones en la salud pública (Comstock et al., 2010). Sin embargo, en los países en vías de desarrollo, los rellenos sanitarios no son la opción más utilizada para la disposición final de los RSM, debido primordialmente a su costo; es así que en pequeñas ciudades donde no existe un relleno sanitario, la manera más común de disponer los residuos es mediante botaderos a cielo abierto, los cuales provocan contaminación al ambiente por su alta generación de lixiviados y gases, además tienen efectos adversos en la salud de las personas, ya que son una fuente de producción de vectores (Oakley & Jiménez, 2012).

Uno de los principales problemas en un relleno sanitario es la fracción de materia orgánica que contienen los RSM, ya que está entre el 30 y 70%, lo que ocasiona problemas de contaminación en los sitios de disposición final; puesto que los residuos orgánicos tienen un alto contenido de humedad (70 –

90%), materia orgánica, nutrientes y patógenos; lo que debido a su magnitud los convierte en un problema de contaminación para el ambiente (Parra et al., 2014). En 2013 la Empresa Pública Metropolitana de Gestión de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP) realizó la caracterización de residuos sólidos generados en la ciudad de Quito, mediante información disponible de las Estaciones de Transferencia Norte y Sur, con lo que se obtuvo que el mayor porcentaje (53%) de RSM corresponde a los residuos orgánicos biodegradables.

La fracción de materia orgánica presente en los RSM, puede convertirse en material más simple y estable, mediante procesos biológicos como la digestión aerobia y digestión anaerobia. Este material biológicamente estable, que se obtiene al degradar la materia orgánica, puede ser utilizado como biofertilizante, además mediante este tratamiento se logra reducir el volumen de residuos, eliminar patógenos y retener el máximo contenido nutricional (Álvarez, 2014).

Tanto la digestión aerobia como anaerobia, tienen como objetivo principal transformar la materia orgánica en material estable mediante la actividad de microorganismos determinados, los cuales son los responsables de la degradación de materia orgánica. A pesar de que ambos tratamientos tienen el mismo fin, referencias bibliográficas indican que la digestión anaerobia es la mejor tecnología disponible para degradar materia orgánica, principalmente en climas cálidos y húmedos (Keng Zi Xiang et al., 2013). Además en la digestión anaerobia se optimiza la materia orgánica utilizada, con lo que se tiene menos pérdida de elementos nutritivos y el digestado tiene mayor riqueza nutricional que el obtenido en la digestión aerobia (Soria et al., 2001).

La digestión anaerobia es la transformación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, es una fermentación catalizada por bacterias específicas (facultativas y anaerobias) (Campos et al., 2012). Este proceso se divide en cuatro etapas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis.

Otro de los problemas que se tiene por el alto contenido de residuos orgánicos biodegradables en los RSM es la generación de lixiviados. Los lixiviados que se generan en un relleno sanitario son de características variables, dependen generalmente del tiempo y del tipo de relleno sanitario. El principal problema de los lixiviados es que pueden llegar a contaminar suelos y aguas subterráneas, debido a que tienen un alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y patógenos, además de sustancias tóxicas (Giraldo, 2001), lo que ocasiona serios problemas en la salud pública y en el ambiente.

Debido a los problemas que la fracción de materia orgánica ocasiona en los sitios de disposición final, en muchos países se ha implementado la separación de residuos sólidos, en orgánicos e inorgánicos, para así disminuir la cantidad de residuos que llegan a un sitio de disposición final y buscar formas de tratamiento para los mismos (Yabroudi et al., 2010).

El fin del presente proyecto es evaluar el tiempo de digestión anaerobia para materia orgánica y la producción de lixiviados en condiciones de cero lluvia para un peso conocido de materia orgánica, a través de la construcción de dos reactores que operan en condiciones similares a las de un relleno sanitario en una gestión de residuos sólidos separados, para lo cual se determina el tiempo en que tarda en estabilizarse dicha materia orgánica, mediante la relación entre sólidos volátiles y sólidos totales y a su vez la calidad y cantidad del lixiviado producido.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El acelerado crecimiento poblacional ha hecho que la magnitud de residuos sólidos municipales que llegan a los sitios de disposición final aumente, ocasionando problemas de contaminación ambiental y afectaciones a la salud pública, debido a la falta de eficiencia en la gestión de residuos sólidos sobre todo en países en vías de desarrollo. La manera más común de disponer los RSM es a través de rellenos sanitarios; sin embargo, en algunas regiones de

África, Asia y Latinoamérica no se cuenta con un método adecuado que tenga las medidas técnicas necesarias para controlar los efectos adversos que generan los residuos sólidos (Oakley & Jiménez, 2012).

En el Ecuador la situación de la disposición final de los RSM sigue siendo un problema a tratar; hasta el año 2015 solo el 35% de residuos sólidos generados en el país eran dispuestos en rellenos sanitarios, que en varias ocasiones se convierten en botaderos a cielo abierto debido a debilidades administrativas, técnicas y financieras; el 65% de los residuos restantes eran dispuestos directamente en botaderos a cielo abierto (Mafla, 2015). Un caso puntual es el de la ciudad de Quito, que cuenta con un relleno sanitario, el cual se encuentra al 80% de su capacidad, por lo que en el 2020 deberá cerrar (Guarachi, 2015); razón por la cual es necesario buscar alternativas para la futura disposición final de RSM del distrito, o su vez, prolongar la vida útil del relleno.

La alta fracción de materia orgánica en los RSM, es una de las causas fundamentales de la contaminación en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto, debido a su alto contenido de humedad, lo que aumenta la producción de lixiviados y gases como el metano (Giraldo, 2001). Debido a que la fracción de materia orgánica que contienen los RSM es alta y presenta problemas de contaminación en los sitios de disposición final es necesario buscar alternativas que minimicen la cantidad de residuos orgánicos que se disponen en rellenos sanitarios y a su vez se obtenga un beneficio extra al tratar estos residuos biodegradables.

Dada la falta de eficiencia en la gestión de los RSM es necesario encontrar alternativas para una correcta disposición final de los mismos a mediano y largo plazo, para que de esta forma se evite los impactos negativos que la inadecuada disposición de los RSM produce. Razón por la cual el sector público tiene la necesidad de implementar medidas para una correcta gestión integral de los residuos sólidos generados dentro de su territorio.

El propósito de esta investigación es evaluar la estabilización de la materia orgánica dentro de un relleno sanitario, partiendo desde una gestión de residuos sólidos separados a través de la determinación del tiempo de digestión anaerobia para la implementación de una alternativa simple y efectiva para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSM y de esta forma tener un método de gestión de residuos sólidos orgánicos en poblaciones rurales o en aquellas que debido al incremento poblacional no se cuenta con el espacio suficiente para la implementación de rellenos sanitarios; puesto que con el método que se va a proponer, el relleno sanitario que se construya puede ser reutilizado una vez que la materia orgánica esté estable y sea retirada para usarse como fertilizante en jardines, áreas verdes, suelos de cultivo, entre otros; disminuyendo de esta manera la carga de materia orgánica que llegue a un relleno sanitario, lo que aumentaría la capacidad del relleno y a su vez se minimizarían los impactos ocasionados al ambiente por la fracción de materia orgánica presente en los RSM.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el tiempo de digestión anaerobia para materia orgánica mediante reactores piloto simulando una celda de relleno sanitario.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ~ Montar dos reactores pilotos simulando una celda de relleno sanitario para ser monitoreados en distintos intervalos de tiempo.
- ~ Establecer el peso específico de los residuos orgánicos compactados que van ser tratados en los reactores pilotos de relleno sanitario.



- ~ Determinar la relación carbono/nitrógeno de la materia orgánica antes y después de la digestión anaerobia.
- ~ Evaluar la relación entre sólidos volátiles y sólidos totales durante el proceso de digestión anaerobia en los reactores pilotos.
- ~ Determinar la producción de lixiviados en condiciones de cero lluvia para un peso conocido de materia orgánica, mediante la simulación de las condiciones de un relleno sanitario en una gestión de residuos sólidos separados.
- ~ Valorar la calidad del lixiviado producido durante la digestión anaerobia mediante el análisis de parámetros químicos (pH, temperatura y DQO).
- ~ Determinar el porcentaje de reducción de volumen de los residuos sólidos orgánicos, mediante la relación de volumen inicial y final de residuos orgánicos.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

El crecimiento acelerado de la población ha ocasionado que la producción de residuos sólidos (RS) haya aumentado en las últimas décadas; un estudio realizado por el Banco Mundial en 2012, revela que la producción mundial de RS es de alrededor 1,3 billones de toneladas al año y se estima que para 2025, esta producción aumentará a 2,2 billones de toneladas al año aproximadamente. La variabilidad de los RS es compleja y depende principalmente del ente que lo produce; los RS pueden clasificarse de acuerdo a la actividad que los genera, a su composición o a su aprovechamiento (Parra Orobio, 2014); generalmente se los clasifica según su origen como se muestra en la Tabla 2.1.

**TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS SEGÚN SU ORIGEN**

| Tipo de residuo     |               | Actividad o lugar de origen   |
|---------------------|---------------|---|
| <b>Municipal</b>    | Doméstico     | Hogares o en cualquier establecimiento similar.   |
|                     | Comercial     | Establecimientos comerciales (almacenes, hoteles, restaurantes, mercados, entre otros)                                    |
|                     | Institucional | Hospitales, escuelas, universidades y entidades gubernamentales.  |
| <b>Agrícola</b>     |               | Ganadería y agricultura.  |
| <b>Industrial</b>   |               | Productos de procesos de producción, mantenimiento de equipos e instalaciones, tratamiento y control de la contaminación. |
| <b>Construcción</b> |               | Desechos de construcción.   |

Fuente: Parra Orobio, 2014.

Los RSM representan un alto porcentaje de la producción de residuos sólidos; la composición de los RSM es muy variada, pero un alto porcentaje de ellos está conformado por residuos orgánicos, principalmente de origen doméstico o con características similares. El porcentaje de la fracción orgánica que está dentro de los RSM se encuentra entre el 30 y 70%, siendo mayor en países en vías de desarrollo (Parra Orobio, 2014; Torres Lozada et al., 2014; EMGIRS-EP, 2013).

Los residuos orgánicos proceden principalmente de alimentos pre y posconsumo de hogares y restaurantes; para este proyecto se excluyen residuos de actividades agrícolas y forestales, estiércol, textiles, madera procesada y papel, como lo recomienda la bibliografía. En la fracción orgánica de los RSM predominan alimentos sin procesar como lo son cáscaras de frutas y verduras; lo que proporciona una alta humedad a los residuos (Oviedo et al., 2014; Oviedo et al., 2012).

El porcentaje de la fracción orgánica de los RSM es un factor importante en la toma de decisiones para la disposición final o tratamiento de los mismos; puesto que los residuos orgánicos tienen un alto contenido de humedad, materia orgánica, nutrientes y patógenos; lo que debido a su magnitud los convierte en un problema de contaminación para el ambiente (Parra et al., 2014).

En la tabla 2.2 se muestra un resumen de las características físico-químicas de los residuos orgánicos de origen municipal.

**TABLA 2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RSM**

| Parámetro       | Valor     |
|-----------------|-----------|
| pH              | 3,8 – 5   |
| Humedad         | 70 – 90 % |
| Sólidos totales | 10 – 18 % |

**CONTINUACIÓN TABLA 2.2**

| <b>Parámetro</b>             | <b>Valor</b> |
|------------------------------|--------------|
| Sólidos volátiles            | 13 %         |
| Carbono Orgánico Total (COT) | 30 – 36 %    |
| Nitrógeno total              | 1,7 %        |
| Fósforo total                | 0,24 – 0,9 % |
| Carbohidratos                | 9,6 %        |
| Proteínas                    | 2,7 %        |

Fuente: García Peña, Parameswaran, Kang, Canul-Chan, & Krajmalnik-Brown, 2011; Parra-Orobio, 2014; Torres-Lozada et al., 2014.

**2.2. RELLENO SANITARIO**

Dentro de una gestión integral de los RSM aparece la disposición final de los mismos como último paso de esta gestión; esta etapa está relacionada con la preservación del ambiente y la salud de las personas, por lo que es necesario un sistema adecuado que minimice los impactos negativos que puedan ocasionarse (Jaramillo, 2002; Muñoz, 2008).

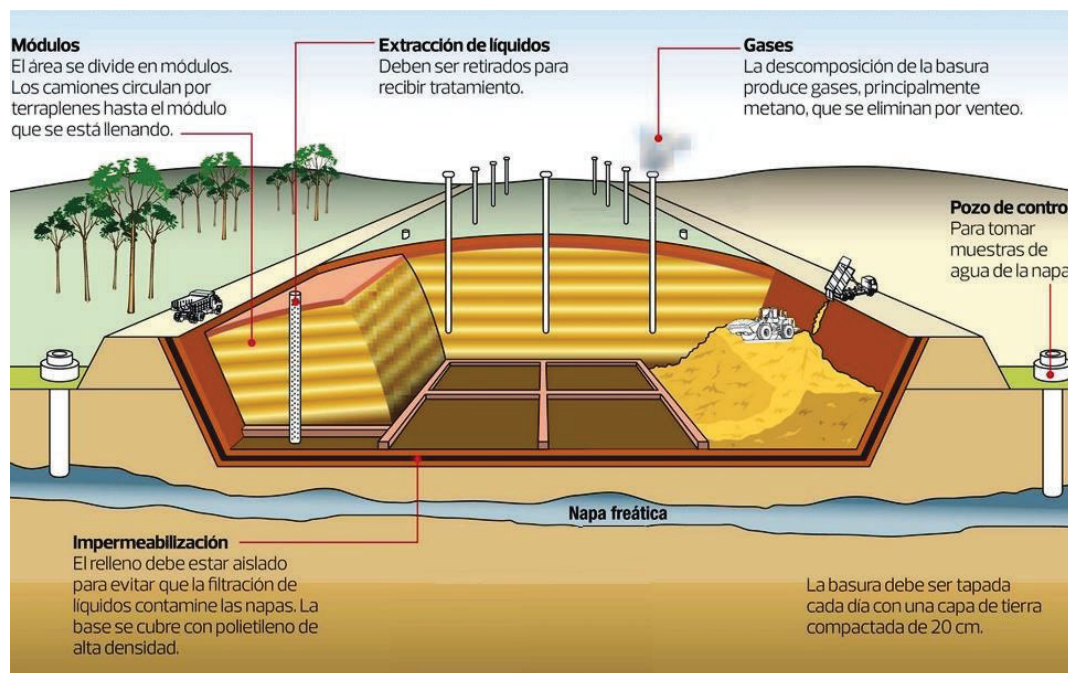
En la actualidad, la manera más común de disponer los residuos sólidos generados por una población es mediante la construcción y operación de un relleno sanitario; sin embargo, en países en vías de desarrollo, principalmente en regiones de África, Asia y Latinoamérica, la forma más común de disponer sus residuos sólidos es a través de botaderos a cielo abierto (Oakley & Jiménez, 2012), los cuales se convierten en un serio problema de salud pública y contaminación ambiental, que debe ser tratado.

Un relleno sanitario es un método para la disposición final de residuos sólidos, que si es manejado adecuadamente no causa afectaciones al ambiente ni a la salud de las personas; para esto se utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor superficie posible y de esta forma reducir al

máximo su volumen. Para evitar la proliferación de olores y vectores los residuos depositados dentro de un relleno sanitario son cubiertos diariamente con capas de tierra. Otro requisito que se debe cumplir en un relleno sanitario es la impermeabilización del mismo para evitar los problemas que pueda causar la generación de lixiviado producto de la descomposición de la materia orgánica y la infiltración de agua lluvia; además es importante controlar los gases producidos por la actividad microbiana dentro del relleno sanitario (Brión, 2010).

Hace varios años se llamaba relleno sanitario a la acción de depositar y enterrar los residuos sólidos en el suelo, sin control alguno. En la actualidad, un relleno sanitario es una obra de ingeniería que tiene como objetivo principal la disposición final de los RSM, de una manera técnica donde el diseño y operación minimizan los impactos al ambiente y a la salud de las personas (Sancho y Cervera et al., 2010). En la figura 2.1 se muestra el corte de un relleno sanitario.

**FIGURA 2.1. CORTE DE UN RELLENO SANITARIO**



Fuente: Fundación Azul Ambientalistas, 2013

En un relleno sanitario se da una descomposición natural de los RSM, por lo que se lo puede considerar como un digestor anaerobio, debido a que casi todos los RSM que llegan a un relleno sanitario se descomponen, teniendo como subproductos principalmente líquidos y gases (Jaramillo, 2002).

En comparación con otros métodos de disposición final de los residuos sólidos, un relleno sanitario presenta una serie de ventajas detalladas a continuación:

- ~ Inversión inicial menor, además que los costos de operación y mantenimiento son inferiores.
- ~ Capacidad para recibir todo tipo de residuos sólidos, excepto los residuos peligrosos.
- ~ Permite recuperar terrenos considerados improductivos o marginales (Jaramillo, 2002).

### **2.2.1. LIMITACIONES DE UN RELLENO SANITARIO**

A pesar de que un relleno sanitario tiene una serie de ventajas y contribuye con las mejoras de una población, presenta ciertas limitaciones que dificultan su instalación y operación, entre las principales limitaciones que un relleno sanitario presenta son:

- ~ Dificultad en la adquisición del terreno, debido principalmente a la oposición de la población vecina.
- ~ Debido al incremento urbano, cada vez la ubicación de los rellenos sanitarios es más lejana, lo que aumenta los costos de transporte.
- ~ Si no existe el debido control puede convertirse en un botadero a cielo abierto.
- ~ No es apto para residuos sólidos peligrosos.
- ~ Los terrenos cercanos pueden devaluarse (Sancho y Cervera et al., 2010).

Además si se piensa en la idea de construir rellenos sanitarios o tratamientos exclusivos para materia orgánica las limitaciones que podrían presentarse son un alto grado de contaminación de la materia prima, uso de tecnologías no adecuadas, deficiente separación de residuos en la fuente y poca comercialización de los subproductos obtenidos (Oviedo et al., 2012).

### **2.2.2. CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN UN RELLENO SANITARIO**

Dentro de un relleno sanitario se tiene una serie de cambios físicos, químicos y biológicos, los cuales se dan de manera paralela e interrelacionada.

#### **2.2.2.1. Cambios físicos**

Entre los cambios físicos más importantes que se presentan en un relleno sanitario están los asociados a la compactación de los residuos, difusión interna y externa de gases, el ingreso de agua y el movimiento de líquidos en el interior y exterior del relleno. De estos cambios, el movimiento de gases es uno de los más importantes durante la operación y mantenimiento, puesto que si el biogás queda atrapado, puede causar fisuras al relleno debido a la presión interna, aumentando de esta forma la generación de gases y lixiviados (Jaramillo, 2002).

#### **2.2.2.2. Reacciones químicas**

En un relleno sanitario ocurren distintas reacciones químicas como la disolución y suspensión de materiales de conversión biológica, evaporación de compuestos químicos y agua, adsorción de compuestos orgánicos volátiles, descomposición y deshalogenación de compuestos orgánicos y reacciones de óxido-reducción (afectación a metales y sales metálicas).

Principalmente la descomposición de compuestos orgánicos tiene una gran importancia puesto que pueden ser incorporados a la atmosfera a través de los lixiviados (Jaramillo, 2002).

#### **2.2.2.3. Reacciones biológicas**

Las reacciones biológicas que ocurren dentro de un relleno sanitario se asocian directamente con la fracción orgánica de los RSM, son realizadas a través de microorganismos aerobios y anaerobios. El proceso inicia con la fase aerobia (en presencia de oxígeno), donde se genera  $\text{CO}_2$ , una vez que los residuos son cubiertos y el oxígeno es consumido en su totalidad por la actividad biológica se da inicio a la segunda fase, que es la fase anaerobia (en ausencia de oxígeno), en esta etapa los microorgánicos transforman la fracción orgánica de los RSM en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y pequeñas cantidades de amoníaco y ácido sulfhídrico (Sancho y Cervera et al., 2010).

### **2.2.3. MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO**

La elección del método de construcción de un relleno sanitario depende principalmente de la topografía del terreno; aunque también es importante tomar en cuenta factores como el nivel freático y tipo de suelo (Jaramillo, 2002).

Los métodos de construcción se clasifican en tres: trinchera, área y combinado; las principales características de los mismos se detallan a continuación.

#### **2.2.3.1. Método trinchera o zanja**

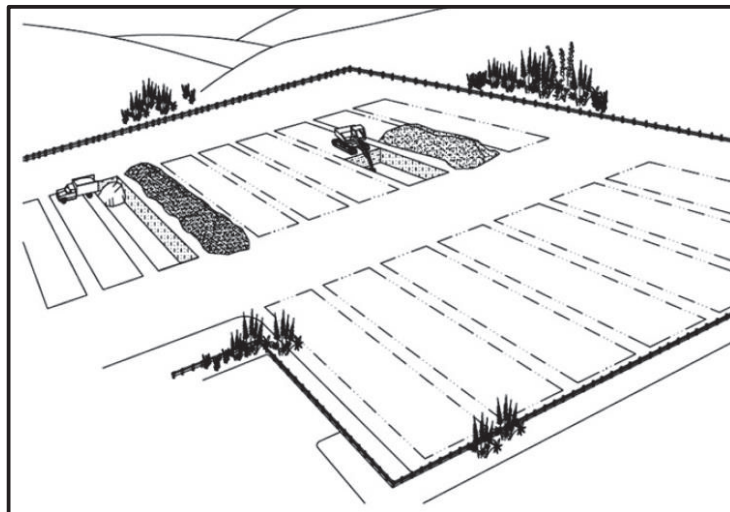
El método consiste en excavar periódicamente zanjas con profundidad de dos o tres metros; se utiliza principalmente en lugares donde el nivel freático es



profundo, debido a que si éste es alto, puede ocasionar contaminación en aguas subterráneas. No es adecuado para suelos rocosos puesto que dificulta la excavación; de preferencia se elige terrenos planos (Jaramillo, 2002).

Los residuos son depositados y compactados dentro de la trinchera, formando celdas, para posteriormente ser cubiertos con la tierra excavada, como se muestra en la figura 2.2; la frecuencia mínima de este procedimiento es de una vez al día (Muñoz, 2008).

#### **FIGURA 2.2. RELLENO SANITARIO SEMI-MECANIZADO TIPO TRINCHERA**



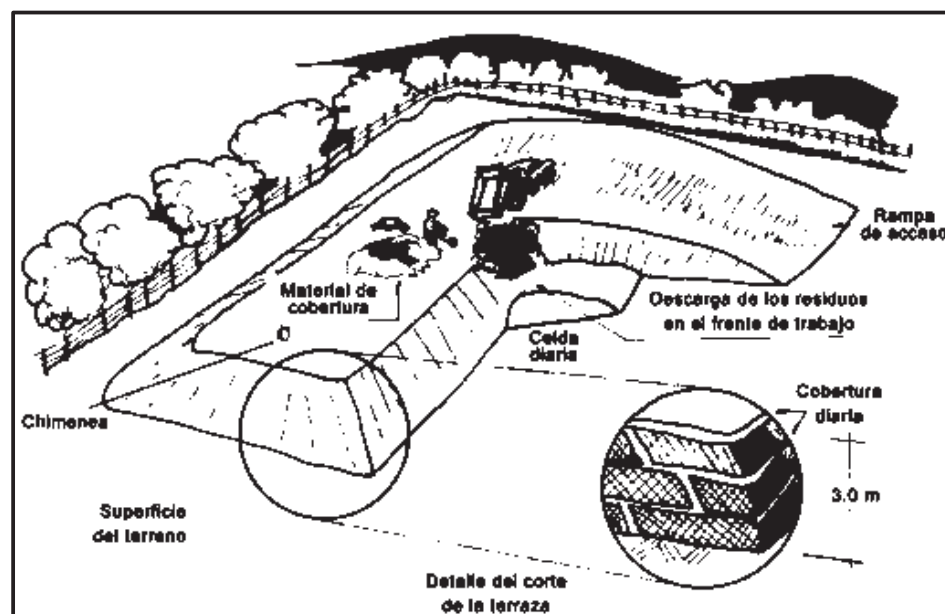
Fuente: Oakley & Jiménez, 2012

##### **2.2.3.2. Método de área**

En este método se deposita los residuos directamente al suelo, una vez que se haya levantado unos cuantos metros e impermeabilizado el terreno; es útil para zonas donde la excavación no sea factible. Consiste en la formación de celdas con los residuos depositados, desde abajo hacia arriba del terreno, para evitar los deslizamientos el talud debe tener una leve inclinación y de esta manera se logra mayor estabilidad. Los residuos se descargan en la base

del talud, se esparce y compacta contra él; y diariamente son recubiertos con una capa de tierra. De esta manera se continúa con la operación del relleno avanzando en el terreno, manteniendo una pendiente suave (Jaramillo, 2002). La construcción de un relleno sanitario mediante el método de área se muestra en la figura 2.3.

**FIGURA 2.3. MÉTODO DE ÁREA PARA CONSTRUIR UN RELLENO SANITARIO**



Fuente: PAHO, s/f

### 2.2.3.3. Método combinado

El método combinado no es más que la unión de los métodos mencionados anteriormente, puesto que ambos métodos tienen condiciones similares de operación pueden ser fusionados, con lo cual se aprovecha de mejor manera el terreno y el material de excavación; además aumenta la vida útil del relleno sanitario (Sancho y Cervera et al., 2010).

#### **2.2.4. PROBLEMÁTICA DE UN RELLENO SANITARIO**

Cuando los residuos sólidos son dispuestos en un relleno sanitario con escaso o nulo control, se crea una preocupante problemática ambiental y de salud pública; puesto que se contamina el aire, suelo y agua; además se afecta el paisaje. La problemática de los RSM de un botadero a cielo abierto o un relleno sanitario con manejo inadecuado, está relacionada con la cantidad y tipo de los residuos que llegan hacia él (Muñoz, 2008).

El impacto ambiental que se genera dentro de estos sitios de disposición final está principalmente asociado con la emisión de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) y de efluentes líquidos (Boumechhour et al., 2013).

##### **2.2.4.1. Impactos sobre el aire**

Uno de los principales impactos al aire ocasionado por un botadero a cielo abierto o un relleno sanitario con manejo inadecuado, es la producción de biogás, que es el producto de la descomposición de la fracción de materia orgánica presente en los RSM. Los componentes principales del biogás son metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); estos gases son precursores del efecto invernadero. Además de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , en la descomposición de la materia orgánica se presentan otro tipo de gases en pequeñas cantidades, tales como:

- ~ Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )
- ~ Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ )
- ~ Hidrógeno ( $\text{H}_2$ )
- ~ Sulfuro hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ )

El  $\text{H}_2\text{S}$  es el principal responsable del mal olor dentro de un botadero a cielo abierto (Muñoz, 2008).

#### **2.2.4.2. Impactos sobre el agua**

La descomposición de la materia orgánica presente en los RSM también genera lixiviados. Los lixiviados son líquidos altamente contaminados que pueden alcanzar cuerpos de aguas superficiales o subterráneas. Por lo que se afecta a la fauna acuática y a los distintos usos que se le dé a estos cuerpos de agua (agua potable, de riego, recreacional, turismo, entre otros) (Barradas, 2009).

#### **2.2.4.3. Impactos sobre el suelo**

Aunque el principal agente contaminante del suelo son los residuos industriales, la inadecuada disposición de los RSM puede provocar contaminación del suelo; debido a la presencia de organismos patógenos, metales pesados, material no digerible y materia orgánica semidigerida; si bien los RSM no tienen a un aporte significativo de contaminantes al suelo, la continua generación de los mismos en el tiempo puede llegar a ocasionar serios problemas al recurso, como: contaminación y afectaciones al crecimiento de cultivos, calentamiento del suelo (condiciones aerobias), acidez del suelo y olores desagradables (condiciones anaerobias) (Muñoz, 2008).

#### **2.2.4.4. Impactos sobre la salud pública**

Los botaderos a cielo abierto son fuente de vectores como ratas, moscos, cucarachas entre otros, los cuales son transmisores de enfermedades, además la contaminación del aire y agua afecta a la salud de las personas, que ya sea que estén expuestas por contacto directo o indirecto (Muñoz, 2008).

## **2.3. LIXIVIADOS**

Los lixiviados son subproductos líquidos del funcionamiento normal de rellenos sanitarios que se forma por la percolación de agua lluvia dentro del relleno o botadero a cielo abierto y la humedad propia de los residuos (Torres Lozada et al., 2014). Debido a su alto contenido de materia orgánica, los lixiviados, son altamente contaminantes; llegando a obtener valores de DQO por encima de 10000 mg/L y pH ácido (Aziz et al., 2010; Renou et al., 2008); además tienen la capacidad de solubilizar metales pesados por su pH, lo que los hace aún más contaminantes (Muñoz, 2008).

### **2.3.1. COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVADOS**

La composición de un lixiviado está determinada por distintos factores como son el tipo y solubilidad de los residuos, tipo de relleno sanitario, diseño y operación del relleno, condiciones climáticas y la edad de las celdas; siendo el tipo de residuos y la edad de las celdas los más determinantes. Debido a que la composición de un lixiviado depende de varios factores ésta es compleja; un lixiviado es una mezcla de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, amoníaco, sales inorgánicas, metales pesados, ácidos orgánicos, entre otros; siendo los ácidos orgánicos los principales compuestos (Comstock et al., 2010).

Debido que la composición de un relleno sanitario es compleja y variada, distintas fuentes bibliográficas clasifican a un lixiviado de acuerdo a su edad; en la tabla 2.3 se indica los tres tipos de lixiviados encontrados en relación a la edad.

**TABLA 2.3. CLASIFICACIÓN GENERAL DEL LIXIVIADO POR EDAD**

|                             | <b>Nuevo</b>                      | <b>Intermedio</b>                       | <b>Viejo</b>              |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------|
| <b>Edad</b>                 | <5                                | 5 – 10                                  | >10                       |
| <b>pH</b>                   | 6,5                               | 6,5 – 7,5                               | >7,5                      |
| <b>DQO [mg/L]</b>           | >10000                            | 4000 – 10000                            | <4000                     |
| <b>Compuestos orgánicos</b> | 80% Ácidos Grasos Volátiles (AGV) | 5 - 30% AGV + ácidos húmicos y fúlvicos | Ácidos húmicos y Fúlvicos |
| <b>Biodegradabilidad</b>    | Importante                        | Media                                   | Baja                      |

Fuente: Renou et al., 2008.

## 2.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico, ampliamente estudiado y aplicado en distintos fines, que se da lugar en un medio anóxico, en el cual microorganismos específicos (facultativos y anaerobios) degradan moléculas orgánicas complejas en material más simple. En la digestión anaerobia se dan a lugar una serie de reacciones bioquímicas que ocurren simultáneamente, por la acción de un conjunto de microorganismos, por esta razón se la considera como un proceso complejo. Este proceso se divide en dos fases básicamente: ácida y metanogénica, las mismas que pueden subdividirse en cuatro etapas como se indica en la figura 2.4 (Corrales et al., 2015; Parra Orobio, 2014; Varnero, 2011).

Como subproductos de esta degradación se obtiene biogás y digestado. El biogás es una mezcla gaseosa compuesta en su mayoría por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); la proporción de  $\text{CH}_4$  en el biogás esta entre 50 – 70%; razón por la cual se utiliza la degradación anaerobia como una tecnología para generar energía alternativa, puesto que el biogás puede ser aprovechado mediante la combustión del mismo, en motores, calderas o en mezcla con otro combustible. Además de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , el biogás tiene trazas de otros componentes (N,  $\text{O}_2$ , H,  $\text{H}_2\text{S}$ ). A su vez, el digestado obtenido en el

proceso de la degradación anaerobia no es más que una suspensión acuosa que contiene a los microorganismos responsables de la degradación y a la materia orgánica estabilizada. El digestado obtenido puede ser aprovechado para fertilización de suelos, debido a que tiene un alto contenido nutricional y se encuentra estabilizado (Corrales et al., 2015; Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005).

Generalmente la materia prima utilizada en este proceso es biomasa con alto contenido de humedad, como lo son restos de comida, residuos de jardinería, residuos ganaderos y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005).

#### **2.4.1. FUNDAMENTO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Como ya se ha mencionado anteriormente en la digestión anaerobia un gran número de microorganismos intervienen durante todo el proceso, estos microorganismos pueden ser facultativos o anaerobios estrictos, los cuales interactúan entre sí para degradar la materia orgánica a través de reacciones bioquímicas, las cuales pueden ocurrir simultáneamente.

Los microorganismos que intervienen en la degradación obtienen su energía a través de la ruptura de enlaces de los compuestos orgánicos como ácidos y alcoholes mediante vías fermentativas (Corrales et al., 2015). Por varios años se ha estudiado este proceso a través de la bioquímica y la microbiología, con lo que se ha dividido este proceso en cuatro etapas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. Las dos primeras etapas corresponden a la fase ácida de la digestión y las dos restantes a la fase metanogénica.

En la degradación anaerobia, las moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) se hidrolizan para formar compuestos solubles más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga), esta primera etapa es realizada por enzimas extracelulares producidas por los

microorganismos acidogénicos. Una vez terminada la primera etapa de la degradación anaerobia los compuestos obtenidos en la hidrólisis son metabolizados por bacterias acidogénicas dando lugar a ácidos grasos de cadena corta, hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), alcoholes y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta se transforman en ácido acético ( $CH_3COOH$ ),  $H_2$  y  $CO_2$ , a través de organismos acetanogénicos; finalmente, se culmina la digestión anaerobia con la acción de bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas), las mismas que transforman al  $CH_3COOH$ ,  $H_2$  y  $CO_2$  en metano ( $CH_4$ ) (Varnero, 2011).

#### **2.4.2. ETAPAS DE LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia se divide en cuatro etapas, las mismas que se detallan a continuación y se resumen en la figura 2.4.

##### **2.4.2.1. Hidrólisis**

Es la etapa inicial de la degradación anaerobia, donde se realiza la conversión de polímeros (carbohidratos, lípidos y proteínas) a sus respectivos monómeros, mediante la acción de enzimas excretadas por las bacterias hidrolíticas, las cuales solubilizan a los compuestos orgánicos complejos para que puedan atravesar la pared celular y de esta forma ser aprovechados por los microorganismos en el proceso de degradación (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005; Varnero, 2011).

Las proteínas son hidrolizadas por la acción de enzimas proteolíticas conocidas como proteasas; son un sustrato importante en la degradación anaerobia, no solo por ser fuente de carbono y energía, sino también porque los aminoácidos derivados de la hidrólisis tienen un alto contenido nutricional (Varnero, 2011).



A su vez, los lípidos son degradados a ácidos grasos de cadena larga y glicerol por la acción de enzimas hidrolíticas llamadas lipasas. La hidrólisis de lípidos es lenta y puede llegar a limitar la velocidad de esta etapa, esto se debe a que la lignina es resistente a la degradación de microorganismos anaerobios (Varnero, 2011).

#### **2.4.2.2. Acidogénesis**

En la segunda etapa de la degradación anaerobia, los productos de la hidrólisis son convertidos principalmente a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , alcoholes y ácidos grasos de cadena corta por bacterias fermentativas (anaerobias y facultativas). En esta etapa se forma el ácido más importante del proceso, el acético, el mismo que es consumido por las bacterias metanogénicas para la producción de  $\text{CH}_4$ . La acidogénesis tiene una gran importancia durante la degradación, puesto que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan más adelante y elimina cualquier ración de oxígeno presente en el sistema (Parra Orobio, 2014; Varnero, 2011).

#### **2.4.2.3. Acetogénesis**

Si bien el  $\text{H}_2$  y el  $\text{CH}_3\text{COO}^-$  productos de la anterior etapa pueden ser metabolizados directamente por las bacterias metanogénicas, los otros productos como etanol y ácidos grasos volátiles tienen que ser convertidos en productos más sencillos como acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) e  $\text{H}_2$ ; y esto ocurre por la acción de bacterias acetogénicas (Varnero, 2011).

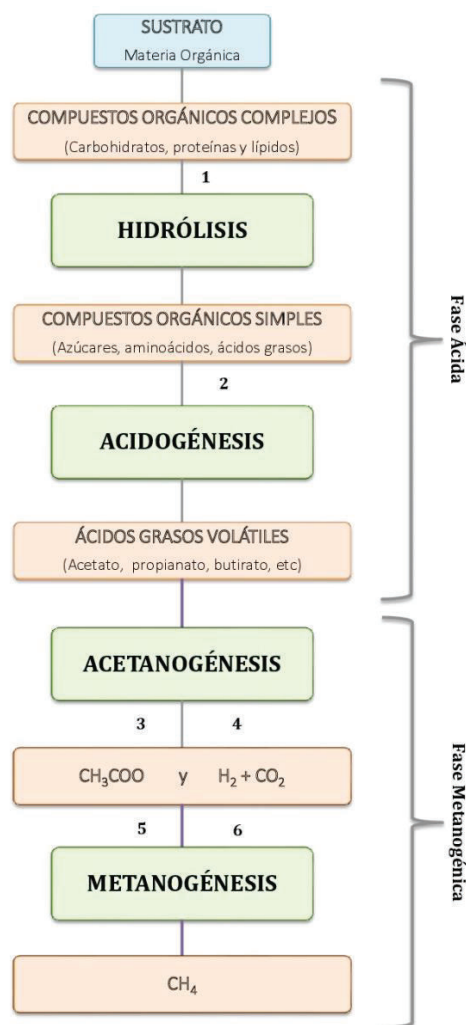
#### **2.4.2.4. Metanogénesis**

En la última etapa de la digestión anaerobia intervienen bacterias estrictamente anaerobias, que actúan sobre los productos de las anteriores

etapas para tener como resultado la producción de  $\text{CH}_4$ . En esta etapa, básicamente actúan dos grupos de bacterias: las arqueas metanogénicas acetoclásticas y las arqueas metanogénicas reductoras, las primeras son responsables de la producción del 70% de  $\text{CH}_4$ , debido a la descarboxilación del ácido acético; el 30% restante proviene del  $\text{CO}_2$  por el hidrógeno a  $\text{CH}_4$  (Parra Orobio, 2014).

El metano también puede ser formado a partir del ácido fórmico y metanol, dependiendo del sustrato disponible las bacterias metanogénicas desempeñan su rol (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005).

**FIGURA 2.4. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**



Fuente: Adaptado de Corrales et al., 2015; MAPAMA, 2010.

Los números indican los grupos de bacterias involucradas en el proceso:

1. Bacterias hidrolíticas
2. Bacterias fermentativas
3. Bacterias homoacetogénicas
4. Bacterias metanogénicas acetoclásicas
5. Bacterias metanogénicas hidrogenitrólicas

#### **2.4.3. FACTORES FÍSICO – QUÍMICOS QUE INTERVIENEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Como todo proceso biológico, en la digestión anaerobia, distintos factores físico-químicos están involucrados y pueden influenciar durante todo el proceso. Entre los principales factores que tienen incidencia en el proceso de digestión anaerobia se tiene a los siguientes:

- ~ Características del sustrato: Dependiendo de la composición de sustancias que tenga el sustrato, la digestión anaerobia tendrá un comportamiento determinado. La calidad y tamaño de las partículas del sustrato, tienen influencia sobre el proceso de digestión; es así que a menor tamaño de partícula se mejora el proceso, reduce tiempos de digestión y mejora la producción de biogás, debido a que el área superficial se incrementa. También la cantidad de compuestos como carbohidratos, lípidos y proteínas determinan la calidad del productos y tienen influencia sobre los tiempos en cada una de las etapas (Parra Orobio, 2014).
- ~ Temperatura: Es uno de los factores ambientales más importante en este proceso, puesto que a temperaturas no adecuadas los microorganismos no crecen. En el proceso de digestión anaerobia existen tres rangos de temperatura en los que se puede trabajar: psicrófilico (< 25 °C), mesófilo (25 – 45 °C) y termófilo (45 – 65 °C),

siendo los más utilizados el rango mesófilo y termófilo (Varnero, 2011). Se considera un funcionamiento óptimo alrededor de los 35 °C y 55°C para tratamientos mesófilos y termófilos respectivamente. La digestión anaerobia puede trabajar a temperatura ambiente, aunque se tiene afectaciones en la producción de biogás, debido que a condiciones ambientales se tiene fluctuaciones en la temperatura; la eficiencia de este proceso decrece a temperaturas inferiores a los 15°C; por esta razón se recomienda trabajar en lugares de clima cálido (MAPAMA, 2010; Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005).

- ~ pH: A pesar de que la mayoría de microorganismos tienen un mejor crecimiento con pH cercanos a la neutralidad, cada etapa tiene un rango de pH óptimo; los microorganismos hidrolíticos y acidogénicos son bastante tolerables a ambientes ácidos, es así que el pH puede oscilar entre 5,5 y 6,5; sin embargo, los microorganismos acetogénicos y metanogénicos son muy sensibles a medios ácidos y pueden ser inhibidos en estas condiciones, en estas etapas el pH óptimo es alrededor de 7 (Parra Orobio, 2014).
- ~ Alcalinidad: Se recomienda un valor de alcalinidad cercano a 2kg/m<sup>3</sup> de CaCO<sub>3</sub>, aunque este valor no es del todo constante, debido que cuando se debe elevar el pH, se añade álcali al proceso, comúnmente cal, compuesto no muy recomendable debido a que puede traer consecuencia al proceso, como es la dificultad de salida de efluentes por la solidificación de la cal y la obtención de gas con bajo contenido de CO<sub>2</sub> (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005).
- ~ Nutrientes: A pesar de que el proceso de la digestión anaerobia tiene necesidades bajas de nutrientes, es importante para la estabilización del proceso que la relación C/N se mantenga entre 20 y 30 (MAPAMA, 2010).

- ~ Tóxicos: Concentraciones considerables en el sustrato de metales pesados y el ion amonio pueden afectar durante el proceso de digestión anaerobia.

En la tabla 2.4 se presenta un resumen de las condiciones ideales para la digestión anaerobia en cada fase del proceso.

**TABLA 2.4. CONDICIONES IDEALES PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN FUNCIÓN DE LA FASE**

| Parámetro                | Fase                                  |  |
|--------------------------|---------------------------------------|--|
|                          | Ácida                                 | Metanogénica                                   |
| Temperatura [°C]         | 25 – 30                               | Mesófilo: 32 – 42<br>Termófilo: 50 – 58        |
| pH                       | 5,2 – 6,3                             | 6,7 – 7,5                                      |
| Relación C/N             | 10 – 45                               | 20 – 30  |
| Contenido de sólidos [%] | <40                                   | <30  |
| Elementos traza          | No existen requerimientos Específicos | Micronutrientes esenciales:<br>Ni, Co, Mo, Se. |

Fuente: Adaptado de MAPAMA, 2010.

#### 2.4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso que ha sido estudiado durante varios años, obteniéndose resultados relevantes en el tratamiento de residuos orgánicos y lodos residuales, ya que este sistema presenta una serie de ventajas que lo convierten en método ampliamente usado; sin embargo, la digestión anaerobia también puede presentar algunos inconvenientes que dificultan el éxito del proceso.

En la tabla 2.5 se muestra algunas de las ventajas y desventajas que tiene este proceso.

**TABLA2.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

| <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>~ Reducción de sólidos volátiles (entre 40 y 60%).</li> <li>~ Costos bajos de operación (con la recuperación de CH<sub>4</sub>).</li> <li>~ Reducción del número de microorganismos patógenos.</li> <li>~ Digestado puede utilizarse como fertilizante de suelos en la agricultura.</li> <li>~ Reducción de la carga de residuos que lleva a los sitios de disposición final.</li> <li>~ Reduce el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.</li> <li>~ Eliminación de malos olores.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>~ Inversión elevada en la instalación</li> <li>~ Posibilidad de depósitos minerales en el equipo, dificultades de limpieza y posible formación de espumas</li> <li>~ Puede presentar problemas de "digestión ácida", disminuyendo la velocidad de la fase metanogénica.</li> </ul> |

Fuente: Varnero, 2011; MAPAMA, 2010.

## **CAPÍTULO III**

### **3. METODOLOGÍA**

El desarrollo de la presente investigación se basó en el cumplimiento de las siguientes fases:

- ~ Separación, recolección y caracterización del sustrato
- ~ Construcción, operación y seguimiento de los reactores
- ~ Evaluación de los parámetros de control

#### **3.1. FASE EXPERIMENTAL**

##### **3.1.1. SEPARACIÓN Y RECOLECCIÓN DEL SUSTRATO**

Para dar comienzo a la investigación se procedió con la recolección y separación de los residuos orgánicos desde fuentes fijas de generación, como lo fueron hogares y la cafetería de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) ubicada en la planta baja del Edificio de la Facultad de Ingeniería en Sistemas. La recolección se realizó una semana previa al llenado de los reactores en los sitios mencionados anteriormente.

##### **3.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO**

El sustrato recolectado tiene características similares a las que fueron detalladas en la tabla 2.2, por esta razón puede ser considerado como residuo sólido domiciliario.

El sustrato utilizado estaba compuesto principalmente por:

- ~ Verduras: Restos de cebolla, zanahoria, pimiento, papa, pepinillo, yuca, lechuga, nabo, apio y col.
- ~ Frutas: Cáscaras y restos de sandía, banano, naranja, fresa, piña, limón, uvas, melón, mandarina, maracuyá, durazno y moras.
- ~ Carnes: Restos de carnes procesados y sin procesar, huesos.
- ~ Otros: Alimentos procesados y cáscara de huevos.

Previo a la alimentación de los reactores, se caracterizó una muestra inicial del sustrato de 200 g aproximadamente para conocer las características preliminares del mismo y de esta manera determinar la viabilidad de la investigación. Una vez caracterizado el sustrato, parte de la muestra de residuos orgánicos fue triturada de manera manual con un cuchillo de acero, hasta alcanzar un tamaño entre 0,5 y 1,5 cm y de esta forma evaluar el comportamiento de los residuos en su estado original y cuando éstos son triturados.

### **3.1.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES**

La construcción y posterior operación de los reactores anaerobios se realizó en el Laboratorio de Hidráulica de la EPN; el material que se utilizó para la construcción de los dos reactores anaerobios fue un tubo PVC de 160 mm de diámetro y 3 metros de altura para cada reactor; la altura de los tubos de PVC se debe a la altura de una celda típica de un relleno sanitario, que es 3 m (Jaramillo, 2002).

En cada tubo se colocó un tapón ciego en la parte superior e inferior del mismo (dos tapones por tubo). Además, para la extracción de las muestras de los residuos orgánicos y el lixiviado, durante el seguimiento de los reactores, se utilizaron cuatro válvulas de media vuelta de ½ pulgada y 5 neoplos de ½ pulgada de diámetro y 4 cm de longitud a distintas alturas, para cada reactor.



Además para evitar que los cambios bruscos de temperatura afecten al proceso de degradación se envolvió a los tubos PVC con aglutinado de espumas de poliuretano de 4 cm de espesor.

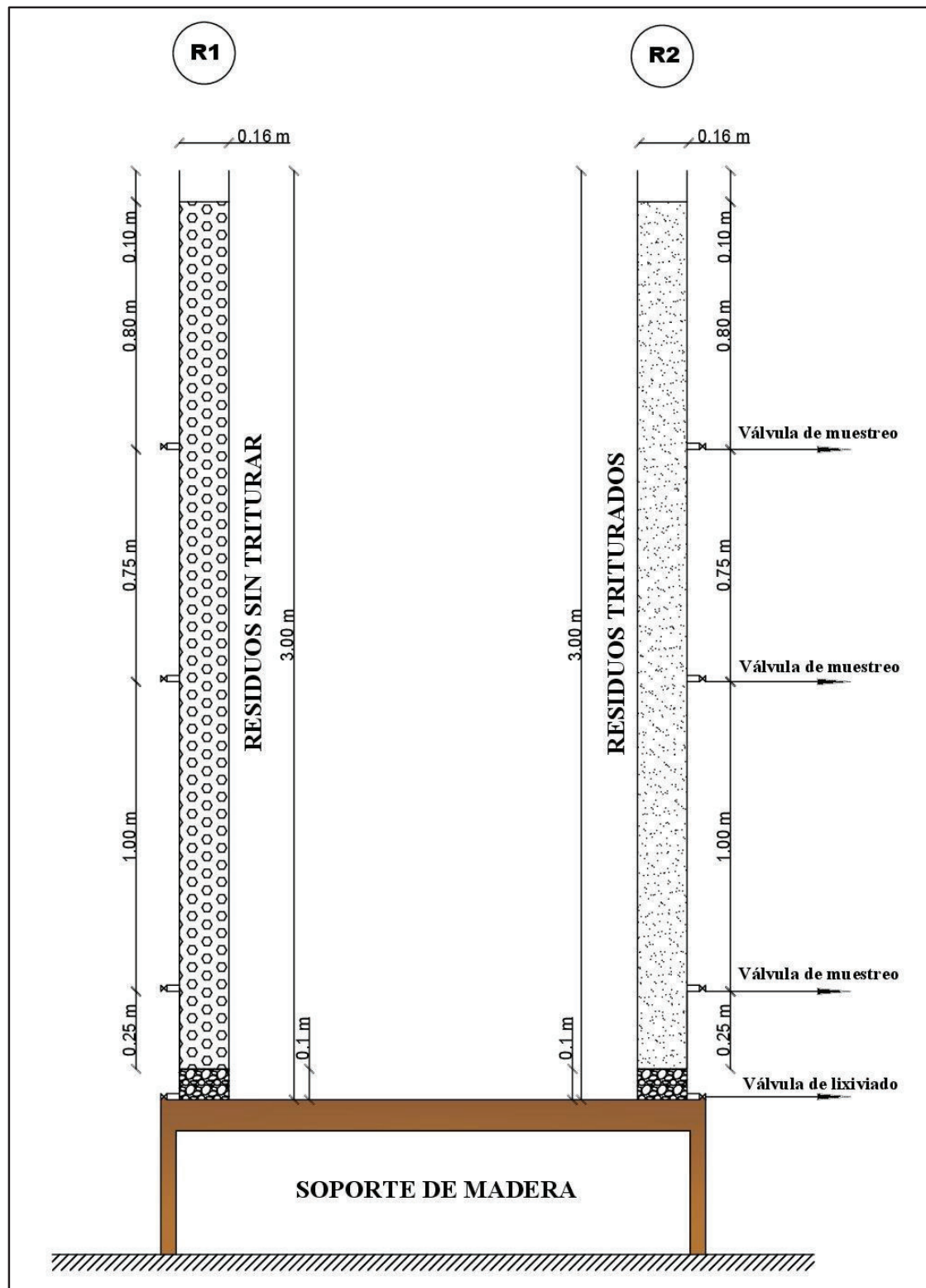
Los reactores fueron instalados en un soporte de madera, ubicados de tal forma que se facilite la toma de las muestras y la compactación de los residuos. En las figuras 3.1 y 3.2 se muestra la instalación de los reactores y un diagrama de las dimensiones de los mismos respectivamente.

**FIGURA 3.1. REACTORES ANAEROBIOS INSTALADOS**



Elaborado por: Claudia Encalada

FIGURA 3.2. DIAGRAMA DE LOS REACTORES ANEROBIOS



Elaborado por: Claudia Encalada

#### 3.1.4. ACONDICIONAMIENTO Y LLENADO DE LOS REACTORES

Antes de que los residuos orgánicos fueran introducidos a los reactores anaerobios se colocó 10 cm de grava en la parte inferior de cada reactor. El reactor 1 fue llenado con 40,25 kg de residuos orgánicos sin triturar y el reactor 2 con 53,85 kg de residuos triturados. Además de los residuos orgánicos, se añadió 15 mL de agua residual del Río Machángara, por cada 60 cm de residuos orgánicos aproximadamente, añadiendo un total de 75 mL de agua residual a cada reactor. El agua residual fue añadida para que cumpla con la función de inóculo dentro de los reactores y de esta manera se favorezca el proceso de degradación anaerobia.

Cuando los reactores estaban completamente llenos, los residuos fueron compactados y posteriormente cubiertos en la parte superior con un tapón de PVC, el mismo que podía ser retirado para continuar con la compactación durante los siguientes días de operación.

Una vez concluido el llenado de los reactores se esperó siete días para que los residuos se aclimaten dentro de los reactores y al mismo tiempo se consuma todo el oxígeno presente y de esta forma se de paso a la degradación anaerobia; al pasar el tiempo dicho se observó que el nivel de los residuos descendió 1 m en cada reactor aproximadamente, por lo que se consideró necesario llenar nuevamente los reactores con residuos orgánicos.

Esta vez se rellenó al reactor 1 con 11,05 kg y el reactor 2 con 10,65 kg; obteniendo un peso total de residuos de 51,30 kg y 64,5 kg respectivamente. Los residuos fueron compactados alcanzando un peso específico de 927 kg/L y 1175 kg/L para cada reactor, de ésta manera se alcanzó un peso específico típico de un relleno sanitario adecuadamente compactado (Jaramillo, 2002; Muñoz, 2008).

Debido a que el objetivo de la presente investigación es simular las condiciones de un relleno sanitario, se trabajó bajo las condiciones ambientales del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), a una temperatura

ambiente promedio de 15,8°C (INAMHI, 2017) y presión atmosférica de 0,72 atm.

### **3.1.5. OPERACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LOS REACTORES**

Después de que los reactores fueron llenados por segunda vez se dio inicio a la fase de operación y seguimiento de los reactores, la misma que consistió en la evaluación de los parámetros de control y el ajuste del pH.

Para evaluar el tiempo de degradación de los residuos orgánicos se realizaron muestreos periódicos (generalmente cada 15 días); donde los parámetros analizados fueron: pH, temperatura, humedad, porcentaje de sólidos totales, fijos y volátiles para el sustrato y para el lixiviado se midió el volumen generado, pH, temperatura y DQO, por triplicado a excepción de la temperatura del lixiviado. También al inicio y el final del proceso de digestión anaerobia se determinó la relación carbono – nitrógeno (C/N).

Además del análisis de los parámetros de control, en cada muestreo se compactó los residuos orgánicos desde la parte superior de los tubos y se recirculó el lixiviado generado en cada reactor, para que los ácidos orgánicos presentes en el mismo lleguen a transformarse a CH<sub>4</sub> y la digestión anaerobia siga su curso.

Para mantener la humedad por encima del 80%, que es el valor recomendado por la bibliografía (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005), se añadió agua a cada reactor; en el reactor 1 el volumen introducido de agua fue de 550 mL y 800 mL en el reactor 2, cuando el porcentaje de humedad disminuyó por debajo del valor recomendado. Se añadió mayor volumen de agua en el reactor 2 porque además este reactor tuvo dificultades en la recirculación del lixiviado generado, puesto que éste quedaba retenido dentro del sistema.

Durante la operación y seguimiento de los reactores se observó que los residuos orgánicos mostraban resistencia al cambio de la fase ácida a la fase metanogénica del proceso de digestión anaerobia, esto se debió a que el

medio donde se desarrollaba el proceso de degradación era ácido, razón por la cual fue necesario el ajuste y estabilización del pH.

Para ajustar el pH al valor óptimo para el desarrollo de la digestión anaerobia se utilizaron tres tipos de alcalinizante: cal (CaO), bicarbonato de sodio  $\text{NaHCO}_3$  e hidróxido de sodio (NaOH), siendo el último el más efectivo.

El primer alcalinizante utilizado fue el CaO, se utilizaron 350 g de CaO en el reactor 1 y 410 g de cal en el reactor 2. La manera de inyectar este alcalinizante a los reactores fue mediante el lixiviado generado en cada uno; se subió el pH del lixiviado de cada reactor a aproximadamente 8 con ayuda de la cal y éste posteriormente fue recirculado a los reactores, este proceso se lo realizó cuatro veces, al observar que no se tenía cambio en pH de los reactores se procedió utilizar bicarbonato de sodio como nuevo alcalinizante. El  $\text{NaHCO}_3$  fue utilizado de la misma manera que la cal, aumentando el pH del lixiviado generado; el total de  $\text{NaHCO}_3$  empleado fue de 460 g para el reactor 1 y para el reactor 2 2480 g.

Si bien el  $\text{NaHCO}_3$  tuvo efectos positivos en el aumento del pH de los reactores, éstos no fueron significativos para la investigación en curso, además el valor de pH no se mantenía sobre la neutralidad por un tiempo prolongado, por lo que era necesario repetir este proceso varias veces. Al no tener los resultados esperados con el  $\text{NaHCO}_3$ , se empezó a inyectar hidróxido de sodio al sistema como nuevo alcalinizante.

Se utilizó una solución 5N de NaOH como alcalinizante; inicialmente la solución de NaOH fue inyectada directamente en el lixiviado generado para aumentar el pH del mismo y éste a la vez ser recirculado en los reactores, con lo cual se obtuvo un aumento en el pH de los reactores, principalmente en la parte superior de los mismo, el volumen inyectado de NaOH en el lixiviado del 1 y 2 fue de 22 mL y 16 mL respectivamente. Al inyectar el alcalinizante a través de lixiviado se logró aumentar el pH de los reactores, pero solo en la parte superior de los mismos, por lo que fue necesario la inyección directa en

cada punto de muestreo y en el interior de los reactores. La inyección directa del NaOH se hizo con una jeringuilla de 60 mL y una manguera plástica como se muestra en la figura 3.3. El volumen utilizado durante la inyección directa de NaOH fue de 170 mL en un volumen de 1,6 L para el reactor 1 y para el reactor 2 se utilizó 330 mL en un volumen de 9,5 L. De esta manera se logró ajustar el pH a un valor óptimo para la digestión; sin embargo, esto fue posible exclusivamente en el reactor 1, puesto que el reactor 2 fue resistente al cambio de pH a pesar de ser que en este sistema se utilizó mayor cantidad de alcalinizante.

### FIGURA 3.3. INYECCIÓN DE ALCALINIZANTE AL SISTEMA



Elaborado por: Claudia Encalada

Es importante mencionar que en el reactor 2 tuvo un comportamiento cercano a la de un lodo hidrófilo, es decir, retuvo la humedad al interior del reactor, esto se pudo observar puesto que su permeabilidad fue casi nula a partir del día 100, ya que el lixiviado no llegaba a la parte inferior del reactor y se quedaba en el interior del mismo, por lo que en los últimos 66 días (etapa de

estabilización) ya no fue posible recircular el lixiviado generado y por esta razón ya no se analizó la calidad del lixiviado de este reactor desde ese momento.

Además durante la etapa de estabilización los ensayos de los parámetros de control fueron suspendidos hasta alcanzar el pH óptimo para el proceso de degradación anaerobia. Una vez que se logró estabilizar el pH en un valor óptimo para la digestión ( $\text{pH} > 7$ ) en el reactor 1, la relación entre sólidos volátiles y sólidos totales disminuyó hasta alcanzar los valores requeridos para considerar que la materia orgánica se encuentra digerida. Lo que no ocurrió en el reactor 2, puesto que en este reactor a pesar que se añadió una dosis mayor de alcalinizante no se alcanzó un pH neutro, por lo tanto la relación SV/ST no tuvo un cambio significativo.

La operación y seguimiento de los reactores se la realizó durante 166 días, después de este tiempo los reactores fueron retirados del lugar de instalación.

### **3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO**

Los ensayos de laboratorio para el seguimiento de los parámetros de control fueron realizados in situ (lugar de instalación y funcionamiento de los reactores) y en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN.

Los parámetros de control analizados durante los 166 días de operación y seguimiento de los reactores fueron:

| Sustrato                             | Lixiviado                          |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| ~ pH                                 | ~ pH                               |
| ~ Temperatura                        | ~ Temperatura                      |
| ~ Humedad                            | ~ Demanda Química de Oxígeno (DQO) |
| ~ Sólidos totales, fijos y volátiles |                                    |



Además se midió el nivel de compactación de los residuos sólidos orgánicos dentro de los reactores y el volumen generado de lixiviado por cada reactor.

Para los ensayos de laboratorio se ha tomado en cuenta los métodos que se detallan en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012, a excepción de los ensayos de Carbono Orgánico Total (COT) y Nitrógeno (N), que fueron realizados en el Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Central del Ecuador (OPS) y en ALS Corplab (ALS). En la tabla 3.2 se resume el parámetro de control, ensayo y equipo utilizado durante la etapa experimental de laboratorio.

**TABLA 3.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA EL SEGUIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL**

| Parámetro                          | Tipo de ensayo   | Método   | Equipo / Materiales   | Realizado por           |
|------------------------------------|------------------|--|---|-------------------------|
| <b>Sustrato</b>                    |                  |  |   |                         |
| pH                                 | Medición in-situ |  | pH-metro de campo (Accumet Fisher)<br>Tiras reactivas para pH (Macherey-Nagel)  | Claudia Encalada        |
| Temperatura                        | Medición in-situ |  | Termómetro de mercurio  | Claudia Encalada        |
| Humedad                            | Laboratorio      | Gravimétrico<br>2540 Sólidos   | Balanza analítica (Nimbus)<br>Estufa (Binder)   | Claudia Encalada        |
| Sólidos totales, fijos y volátiles | Laboratorio      | Gravimétrico   | Balanza analítica (Nimbus)<br>Estufa (Binder)<br>Mufla (Themoscientific)  | Claudia Encalada        |
| COT                                | Laboratorio      | Método Walkley Black (titulométrico)                                   |   | OSP<br>ALS              |
| N                                  | Laboratorio      | Método Kjeldahl<br>4500-N <sub>org</sub> C                             |   | Claudia Encalada<br>ALS |
| <b>Lixiviado</b>                   |                  |  |   |                         |
| pH                                 | Medición in-situ |  | pH-metro de campo (Accumet Fisher)<br>Tiras reactivas para pH (Macherey-Nagel)  | Claudia Encalada        |
| Temperatura                        | Medición in-situ |  | Termómetro de mercurio  | Claudia Encalada        |
| DQO                                | Laboratorio      | DQO por Espectrofotometría UV-VIS. Reflujo cerrado Programa 435 DQO RA | Digestor (Hach DRB200)<br>Viales de digestión de DQO de alto rango (Hach Rango 20 – 1500 mg/L)<br>Espectrofotómetro (Hach DR2700) | Claudia Encalada        |

Elaborado por: Claudia Encalada



En cada parámetro de control se realizó tres repeticiones por parámetro para disminuir la incertidumbre; en los resultados se presenta el valor promedio de las repeticiones realizadas.

Para la compactación del sustrato en los reactores se utilizó émbolo manual de madera, la compactación se realizó desde el inicio hasta el final de la operación de los reactores en cada muestreo realizado. Y al finalizar la investigación se determinó el porcentaje de compactación y el volumen de los residuos.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. FASE INICIAL DE LA INVESTIGACIÓN

##### 4.1.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUSTRATO

Para conocer las características iniciales del sustrato se realizaron pruebas de laboratorio, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1.

**TABLA 4.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL SUSTRATO**

| Parámetro             | Resultados   |
|-----------------------|--------------|
| Humedad (%)           | 83,18 ± 0,56 |
| Sólidos Totales (%)   | 16,82 ± 0,56 |
| Sólidos Volátiles (%) | 11,55 ± 0,88 |
| Sólidos Fijos (%)     | 5,27 ± 0,34  |
| Relación SV/ST        | 0,69 ± 0,03  |
| pH                    | 4,72 ± 0,02  |
| Carbono (%)           | 37,53 ± 1,50 |
| Nitrógeno (%)         | 1,35 ± 0,05  |
| C/N                   | 27,80 ± 0,32 |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la tabla 4.2 se puede observar que los residuos orgánicos de origen domésticos cuentan con las características recomendadas por la bibliografía para una eficiente digestión anaerobia, salvo el valor del pH, puesto los residuos domésticos presentan un pH ácido y el valor óptimo para el proceso de digestión debe estar en torno al neutro (Parra Orobio, 2014).

#### 4.1.2. PESO ESPECÍFICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS EN CADA REACTOR

Los reactores fueron llenados con la misma materia prima, residuos sólidos orgánicos de origen doméstico; sin embargo; el peso total en cada reactor fue distinto, puesto que en el reactor 2, los residuos orgánicos fueron triturados, logrando de esta manera mayor compactación y a su vez el peso específico en el reactor aumentó. A continuación se presenta el peso, volumen y peso específico en cada reactor.

| Reactor 1         |                          | Reactor 2         |                           |
|-------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|
| ~ Peso inicial    | 51,30 kg                 | ~ Peso inicial    | 64,50 kg                  |
| ~ Volumen inicial | 53,30 L                  | ~ Volumen inicial | 56,30 L                   |
| ~ Peso específico | 911,23 kg/m <sup>3</sup> | ~ Peso específico | 1145,70 kg/m <sup>3</sup> |
| ~ Peso final      | ≈ 25 kg                  | ~ Peso final      | ≈ 35 kg                   |
| ~ Volumen final   | ≈ 37,60 L                | ~ Volumen final   | ≈ 38,00 L                 |

Como se puede observar en el reactor 2 se alcanza mayor peso específico, lo que indica que en este reactor se logró una mejor compactación, la que se atribuye a que los residuos orgánicos fueron triturados. En un relleno sanitario se considera una compactación adecuada cuando el peso específico de éste es mayor a 700 kg/m<sup>3</sup> (Jaramillo, 2002; Muñoz, 2008), con lo que se puede considerar que la compactación de ambos reactores es la adecuada.

En cuanto a la reducción de volumen se tiene que para el reactor 1 y reactor 2 el volumen disminuyó en aproximadamente 29,5% y 32,5% respectivamente; con lo que se puede determinar que los residuos sólidos orgánicos compactados dentro de un relleno sanitario a través de un proceso de degradación anaerobia tienen una reducción de volumen de alrededor de un 30%.

## 4.2. EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS DE CONTROL DEL SUSTRATO

### 4.2.1. EVALUACIÓN DEL pH DEL SUSTRATO

Se esperaba que el pH de los residuos orgánicos se autorregule y alcance la neutralidad, esto no sucedió, lo que indica que el sistema no tiene la capacidad de amortiguamiento, razón por la cual el pH en la primera etapa de la investigación se mantuvo en condiciones ácidas, por lo que fue necesario la inyección de alcalinizante para la corrección del pH.

Durante el proceso de operación y seguimiento de los reactores se midió el pH de cada uno, los valores registrados de pH se indican la tabla 4.2.

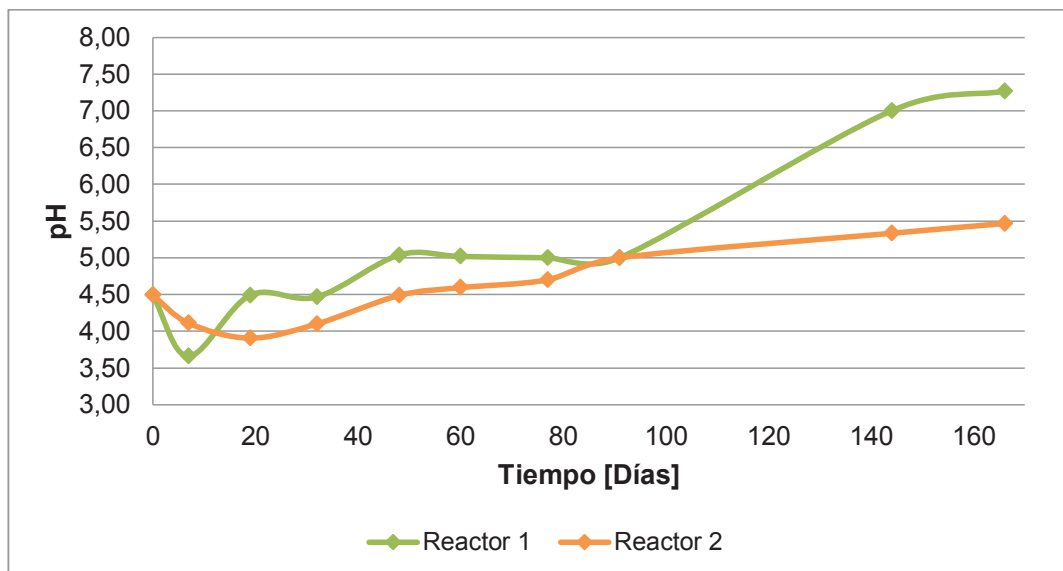
**TABLA 4.2. VALORES MEDIDOS DE pH EN LOS REACTORES**

| pH  |             |             |
|-----|-------------|-------------|
| Día | Reactor 1   | Reactor 2   |
| 0   | 4,49 ± 0,02 | 4,49 ± 0,02 |
| 7   | 3,66 ± 0,01 | 4,11 ± 0,01 |
| 19  | 4,49        | 3,91 ± 0,03 |
| 32  | 4,47 ± 0,1  | 4,10        |
| 48  | 5,04 ± 0,03 | 4,49 ± 0,01 |
| 60  | 5,02 ± 0,02 | 4,59 ± 0,09 |
| 77  | 5,00        | 4,70 ± 0,17 |
| 91  | 5,00        | 5,00        |
| 144 | 7,00        | 5,33 ± 0,06 |
| 166 | 7,27 ± 0,06 | 5,47 ± 0,06 |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.1 se muestra la variación del pH de cada uno de los reactores.

**GRÁFICA 4.1. VARIACIÓN DEL VALOR MEDIDO DE pH EN CADA REACTOR**



Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.1 se puede observar que desde el día 70 el pH tiende a ser constante ( $\approx 5$ ) en los dos reactores, por ésta razón fue necesario adicionar alcalinizante a cada reactor para alcanzar la neutralidad y de esta manera continuar con el proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, esto fue posible únicamente en el reactor 1, lo que indica que los residuos triturados (reactor 2) tienen una tasa de generación de ácidos orgánicos mayor que en el reactor 1.

Con los resultados obtenidos de pH se pudo determinar que los residuos orgánicos se mantienen en un pH constante, el mismo que es ácido, lo que no permite que la degradación anaerobia continúe. Los residuos orgánicos no tienen la capacidad de cambiar de la fase ácida a la fase metanogénica de la degradación anaerobia, puesto que para alcanzar la segunda fase de la degradación anaerobia el pH de los residuos debe estar por encima de la neutralidad (Parra Orobio, 2014), es por esta razón que para continuar con el proceso de degradación fue necesario añadir alcalinizante a cada reactor,

para aumentar el pH del sustrato y de esta manera se pase de la fase ácida a la fase metanogénica.

El ajuste y estabilización de pH se lo realizó desde el día 90 hasta el día 144, debido a la alcalinización de los reactores se tiene un aumento del pH alcanzando de esta forma la neutralidad para el reactor 1, condición recomendada por la bibliografía (Parra Orobio, 2014); sin embargo no sucedió lo mismo en el reactor 2, puesto que este reactor mostró resistencia al cambio de pH, el mismo que permaneció con un pH ácido.

Al añadir alcalinizante al sistema, los residuos mostraban resistencia al cambio de pH, sobretodo en el reactor 2 (residuos triturados), donde a pesar de que la cantidad de alcalinizante añadido fue mayor no se consiguió que el pH del sustrato del sistema aumente, lo que indica que los residuos triturados tienen una mayor tasa de acidificación. El tamaño de la partícula es un factor determinante en el tiempo de retención de la hidrólisis, que es la primera etapa de la degradación anaerobia, esto se debe a que a menor tamaño de partícula aumenta la superficie de absorción de las enzimas hidrolíticas (Varnero, 2011), es decir que la reducción de tamaño del sustrato utilizado aceleró la fase ácida de la digestión, pero a su vez dificultó el paso a la segunda fase; es por esta razón que el reactor 2 presentó mayor resistencia al cambio de pH. Otro motivo por lo que no se pudo alcanzar la neutralidad en el reactor 2 fue que el sustrato que contenía este reactor comenzó a presentar características de un lodo hidrófilo, debido a que en este sistema se retenía el líquido presente, lo que no permitió la recirculación de lixiviado y con esto la alcalinización del reactor fue casi nula.

Para la alcalinización del reactor 1 se utilizaron 350 g de CaO, 460 g de  $\text{NaHCO}_3$  y 192 mL de una solución de 5N de NaOH en un volumen de 53,3 L de residuos orgánicos; ya que se obtuvieron los resultados esperados con la adición de NaOH se estima que para aproximadamente 50 L de residuos orgánicos se requiere 38,4 g de NaOH, lo que implica un costo de \$16,84 por cada metro cúbico de residuos orgánicos (Novachem Ecuador, 2017).

De igual forma para la alcalinización del reactor 2 se utilizaron 410 g de CaO, 2480 g de NaHCO<sub>3</sub> y 346 mL de una solución de NaOH de 5N, debido a que la acidificación en el reactor 2 fue mayor y no se alcanzó a determinar la cantidad de alcalinizante que los residuos orgánicos triturados requieren para cambiar el pH a valores cercanos a la neutralidad y así continuar con la digestión anaerobia.

Además, es importante destacar que para la alcalinización de los residuos se utilizó tres alcalinizantes: cal, bicarbonato de sodio y sosa cáustica, obteniendo mejores resultados con el NaOH.

Durante la fase de ajuste y estabilización de pH se pudo observar que en ambos reactores existía producción de gas metano; esto se determinó puesto que durante la alcalinización de los reactores se mezcló el sustrato y durante esta mezcla se evidenció desde la parte superior de los reactores la aparición de burbujas, lo que indica que los reactores estaban produciendo CH<sub>4</sub> en pequeñas cantidades y que debido al cambio del pH, la digestión anaerobia estaba siguiendo su curso.

Es importante recalcar como se menciona en el apartado 2.4.4, una de las desventajas de la digestión anaerobia es que puede producirse una digestión ácida, lo que disminuye la velocidad de la fase metanogénica (Varnero, 2011), desventaja que quedó evidenciada en la operación de los reactores y que fue la determinante para el digestión anaerobia continúe su curso.

#### **4.2.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA INTERNA DE LOS REACTORES**

La temperatura interna de los reactores se midió en cada punto de muestreo (tres puntos por reactor), los valores registrados se muestra en la tabla 4.3.

**TABLA 4.3. VALORES MEDIDOS DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE LOS REACTORES**

| TEMPERATURA INTERNA [°C] |              |              |
|--------------------------|--------------|--------------|
| Día                      | Reactor 1    | Reactor 2    |
| 0                        | 20,33 ± 0,6  | 20,67 ± 0,6  |
| 7                        | 19,67 ± 1,2  | 20,00        |
| 19                       | 20,00        | 20,33 ± 0,6  |
| 32                       | 19,83 ± 0,3  | 19,50 ± 0,5  |
| 48                       | 18,83 ± 0,8  | 18,83 ± 0,3  |
| 60                       | 18,33 ± 0,6  | 18,50 ± 0,5  |
| 77                       | 12,67 ± 0,6  | 12,00 ± 1    |
| 91                       | 15,37 ± 0,3  | 15,40 ± 0,2  |
| 144                      | 18,77 ± 0,4  | 17,87 ± 0,3  |
| 166                      | 19,00 ± 0,2  | 18,47 ± 0,2  |
| <b>Promedio</b>          | 18,30 ± 2,42 | 18,20 ± 2,60 |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.2 se muestra la variación de la temperatura interna de los reactores durante los 166 días de operación; en dicha gráfica se observa que los cambios de temperatura en ambos reactores está entre 15 y 20 °C, teniendo una baja considerable de temperatura en el día 77.

La operación de los reactores se la realizó a las condiciones ambientales de la ciudad de Quito, temperatura ambiente promedio 15,8 °C (INAMHI, 2017) y presión atmosférica de 0,72 atm, lo que afecta a la temperatura interna de los reactores, debido a que se inhibe la acción de algunos microorganismos y se reduce la velocidad de reacción de proceso (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005; Varnero, 2011).



**GRÁFICA 4.2. VARIACIÓN DEL VALOR MEDIDO DE TEMPERATURA EN CADA REACTOR**



Elaborado por: Claudia Encalada

Si bien el parámetro más determinante para que la digestión anaerobia siguiera su curso bajo las condiciones de esta investigación fue el pH; la temperatura y humedad también son parámetros relevantes para el desarrollo del proceso de digestión. La temperatura promedio al interior de los reactores fue de 18,3 °C para el reactor 1 y 18,2 °C para el reactor 2. La temperatura en la cual se operó los reactores no fue la óptima para que las bacterias facultativas y anaerobias tengan un desarrollo adecuado, debido a que la temperatura recomendada para este tipo de procesos es de 35 °C para tratamientos mesofílicos y para tratamientos termófilos 55 °C (Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005); a pesar de que la temperatura de operación no es la óptima se considera que es una temperatura adecuada (MAPAMA, 2010).

En la gráfica 4.2 se puede observar que se tiene una baja considerable de temperatura interna de los reactores en el día 77, este descenso de temperatura está relacionado a la temperatura ambiente. El día 77 de muestreo corresponde al 13 de octubre de 2017; el mes de octubre es, junto a diciembre, uno de los meses con menor temperatura durante el tiempo de

operación de los reactores (INAMHI, 2017), razón por la cual tiene efectos significativos sobre la temperatura interna de los reactores.

Durante esta investigación los reactores trabajaron bajo un rango psicrófilico, dado que la temperatura interna promedio fue de 18,20 y 18,30 °C para el reactor 1 y el reactor 2 respectivamente; estas temperaturas se las considera óptimas si se trabaja en rango psicrófilico (Varnero, 2011).

El rango psicrófilico no ha sido menos estudiado en comparación a los otros rangos de temperatura; sin embargo, no es recomendado para este tipo de proceso, puesto que disminuye la velocidad de reacción de las bacterias y la producción de biogás (Varnero, 2011); es así, que si se desea trabajar bajo condiciones ambientales, sin ningún suministro de energía, se recomienda hacerlo en climas cálidos y subtropicales (Keng Zi Xiang et al., 2013; Obaya Abreu & Lorenzo Acosta, 2005).

#### 4.2.3. EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUSTRATO

Durante el proceso de operación y seguimiento de los reactores se realizaron ensayos de humedad, para controlar que este parámetro esté por encima del 80%, valor óptimo para el proceso de digestión anaerobia. Los valores obtenidos de humedad se indican la tabla 4.4.

**TABLA 4.4. VALORES REGISTRADOS DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN LOS REACTORES**

| PORCENTAJE DE HUMEDAD [%] |              |              |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Día                       | Reactor 1    | Reactor 2    |
| 0                         | 83,16 ± 0,17 | 81,53 ± 1,5  |
| 7                         | 90,47 ± 0,99 | 82,31 ± 1,95 |
| 19                        | 87,09 ± 0,1  | 80,57 ± 1,31 |
| 32                        | 84,56 ± 0,9  | 85,53 ± 1,74 |
| 48                        | 74,10 ± 1,28 | 71,54 ± 5,78 |
| 60                        | 72,74 ± 0,91 | 82,88 ± 0,08 |

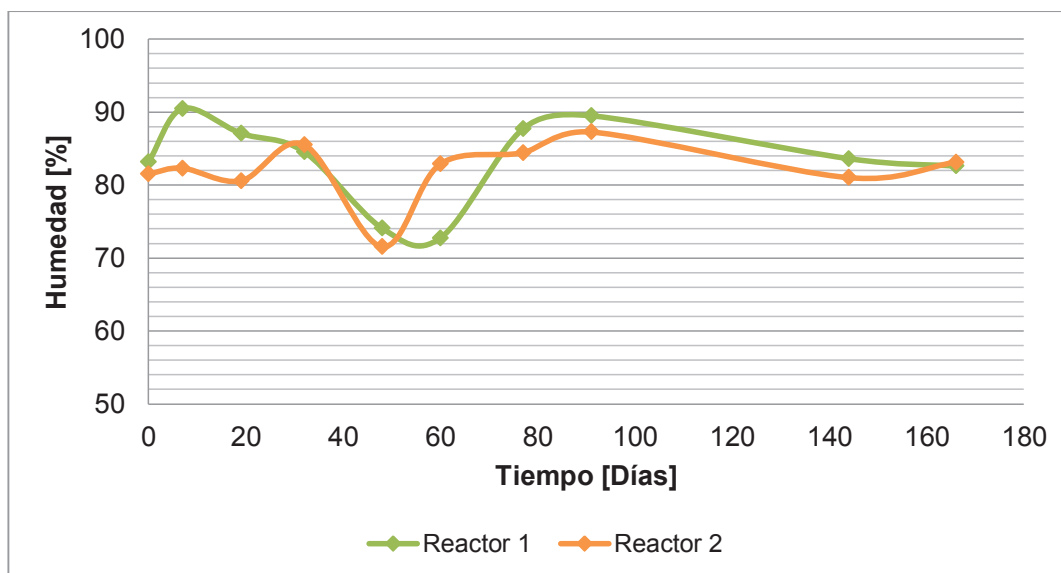
## CONTINUACIÓN TABLA 4.4

| PORCENTAJE DE HUMEDAD [%] |              |              |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Día                       | Reactor 1    | Reactor 2    |
| 77                        | 87,71 ± 1,66 | 84,43 ± 0,98 |
| 91                        | 89,50 ± 2,10 | 87,27 ± 0,68 |
| 144                       | 83,62 ± 0,24 | 81,01 ± 1,71 |
| 166                       | 82,60 ± 1,58 | 83,14 ± 0,31 |
| <b>Promedio</b>           | 83,77 ± 5,97 | 82,09 ± 4,23 |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráficas 4.3 se muestra la variación del porcentaje de humedad en cada uno de los reactores; donde se puede observar que la variación de la humedad es similar en ambos reactores, manteniéndose por encima del 80% en casi todo el periodo de investigación. Entre los días 40 y 60 se tiene un descenso del porcentaje de humedad el mismo que fue corregido al añadir agua al sistema de cada reactor.

**GRÁFICA 4.3. VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN CADA REACTOR**



Elaborado por: Claudia Encalada

La humedad es un parámetro importante para el desarrollo de la flora bacteriana en la digestión anaerobia; este parámetro se mantuvo dentro del rango recomendado, esto se debe principalmente a la humedad propia de los residuos orgánicos (Parra Orobio, 2014).

Si bien el porcentaje de humedad se mantiene relativamente constante durante la investigación, entre los días 40 y 60 este porcentaje disminuye, esto se debe principalmente a que durante estas dos semanas no se recirculó el lixiviado generado debido a que los reactores presentaron fugas en las válvulas de muestreo, una vez reparadas las fugas se continuó con la recirculación de lixiviado.

#### 4.2.4. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE SÓLIDOS DEL SUSTRATO

Durante los 166 días de operación y seguimiento de los reactores anaerobios se realizaron diez análisis para determinar el porcentaje de sólidos del sustrato de cada reactor; en estos ensayos se determinó el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV); para posteriormente calcular la relación entre sólidos volátiles y sólidos totales (SV/ST). En la tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados de sólidos.

**TABLA 4.5. PORCENTAJE DE SÓLIDOS DURANTE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN CADA REACTOR**

| Día | Reactor 1      |                |               | Reactor 2      |                |               |
|-----|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
|     | % ST           | % SV           | % SF          | % ST           | % SV           | % SF          |
| 0   | 16,8386 ± 0,17 | 12,2516 ± 0,27 | 4,5870 ± 0,15 | 18,4693 ± 1,55 | 13,8568 ± 1,59 | 4,6126 ± 0,04 |
| 7   | 9,5276 ± 0,99  | 7,2767 ± 0,43  | 2,2509 ± 0,43 | 17,6869 ± 1,95 | 14,0503 ± 1,70 | 3,6366 ± 0,47 |
| 19  | 12,9113 ± 0,10 | 8,8625 ± 0,48  | 4,0489 ± 0,48 | 19,4266 ± 1,31 | 14,6550 ± 1,17 | 4,7716 ± 0,14 |
| 32  | 15,4379 ± 0,90 | 11,8779 ± 0,77 | 3,5600 ± 0,77 | 14,4720 ± 1,74 | 10,913 ± 1,60  | 3,5585 ± 0,14 |
| 48  | 25,8972 ± 1,28 | 19,4776 ± 1,76 | 6,4196 ± 1,76 | 28,4625 ± 5,78 | 23,2869 ± 5,63 | 5,1756 ± 0,43 |

CONTINUACIÓN TABLA 4.5

| Día | Reactor 1      |                |               | Reactor 2      |                |               |
|-----|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
|     | % ST           | % SV           | % SF          | % ST           | % SV           | % SF          |
| 60  | 27,2588 ± 0,91 | 20,5891 ± 0,70 | 6,6698 ± 0,70 | 17,1234 ± 0,08 | 12,9726 ± 0,07 | 4,1508 ± 0,04 |
| 77  | 12,2927 ± 1,66 | 8,3088 ± 2,21  | 3,9839 ± 2,21 | 15,5734 ± 0,98 | 11,9906 ± 2,25 | 3,5828 ± 1,30 |
| 91  | 10,5048 ± 2,10 | 7,8024 ± 1,67  | 2,7024 ± 1,67 | 12,7344 ± 0,68 | 9,4784 ± 0,28  | 3,2559 ± 0,40 |
| 144 | 16,3826 ± 0,24 | 8,3419 ± 1,02  | 8,0406 ± 1,0  | 18,9876 ± 1,71 | 11,5868 ± 2,71 | 7,4008 ± 3,32 |
| 166 | 17,4005 ± 1,58 | 7,9232 ± 0,67  | 9,4773 ± 0,67 | 16,8636 ± 0,31 | 11,6144 ± 0,28 | 5,2492 ± 0,18 |

Elaborado por: Claudia Encalada

Un vez obtenidos los resultados de porcentaje de sólidos presente en el sustrato se calcula la relación SV/ST, los valores obtenidos de esta relación se presentan en la tabla 4.6.

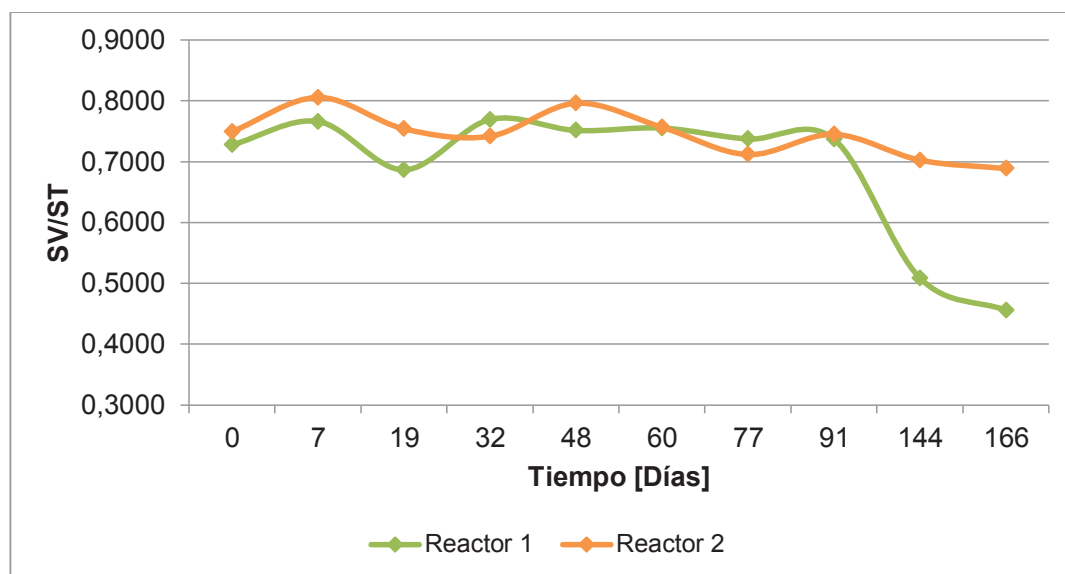
TABLA 4.6. RELACIÓN SV/ST EN LOS REACTORES

| Tiempo | Reactor 1     | Reactor 2       |
|--------|---------------|-----------------|
|        | SV/ST         | SV/ST           |
| 0      | 0,7276 ± 0,01 | 0,7493 ± 0,02   |
| 7      | 0,7661 ± 0,04 | 0,8057 ± 0,01   |
| 19     | 0,6866 ± 0,04 | 0,7541 ± 0,01   |
| 32     | 0,7694 ± 0,02 | 0,7418 ± 0,01   |
| 48     | 0,7513 ± 0,03 | 0,7962 ± 0,003  |
| 60     | 0,7553 ± 0,01 | 0,7567 ± 0,002  |
| 77     | 0,7374 ± 0,02 | 0,7117 ± 0,0001 |
| 91     | 0,7370 ± 0,01 | 0,7449 ± 0,02   |
| 144    | 0,5087 ± 0,06 | 0,7025 ± 0,01   |
| 166    | 0,4558 ± 0,02 | 0,6887 ± 0,01   |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.4 se observa la variación de la relación SV/ST durante el periodo de operación de los reactores.

**GRÁFICA 4.4. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE SÓLIDOS VÓLATILES VS SÓLIDOS TOTALES EN LOS REACTORES**



Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.4 se puede observar que la relación SV/ST se mantiene entre 0,7 y 0,8 hasta el momento que se comienza a añadir alcalinizante a los reactores; después del tiempo de ajuste y estabilización del pH. En el reactor 2 se obtuvo un pH de aproximadamente 5,5 después de la alcalinización; lejos del pH óptimo para que la digestión anaerobia se dé lugar, es por esta razón que en este reactor la relación SV/ST alcanzada fue de 0,68; lo que indica que la materia orgánica no se encuentra estabilizada, puesto que la relación entre los SV y los ST debe estar alrededor de 0,3 y 0,4 (Encarnación & Enríquez, 2014).

A diferencia del reactor 2, en el reactor 1 (residuos en su estado original), al alcalinizar el sustrato se consiguió el aumento de pH hasta alcanzar la neutralidad, lo que permitió el cambio de la fase ácida a la fase metanogénica; consiguiendo de esta forma que la relación SV/ST baje hasta 0,45, valor próximo para considerar a la materia orgánica estabilizada. Se puede evidenciar claramente que la degradación de la materia orgánica fue mayor en el reactor 1, además se tiene que la relación SV/ST es inversamente

proporcional al pH, por lo que una vez más se recalca la importancia de mantener al pH sobre la neutralidad.

Si bien no se consiguió que la materia orgánica se estabilice en su totalidad, los resultados obtenidos indican que la fracción orgánica de los RSM puede degradarse de manera anaerobia, siendo únicamente necesario el control del pH y se obtiene mejores resultados cuando se utiliza los residuos orgánicos en su estado original, es decir, sin trituración. A pesar de que en varios estudios realizados se recomienda menor tamaño de partícula (Encarnación & Enríquez, 2014; Parra Orobio, 2014; Varnero, 2011), en esta investigación se observa que para condiciones similares a las de un relleno sanitario y trabajando a temperatura ambiente, la reducción del tamaño de partícula afectan al proceso de digestión anaerobia, debido a la acidificación del sustrato.

#### 4.2.5. RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO C/N DEL SUSTRATO

Al inicio y final del proceso de degradación anaerobia se realizaron ensayos para determinar la relación C/N, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.7.

**TABLA 4.7. RELACIÓN CARBONO - NITRÓGENO EN CADA REACTOR**

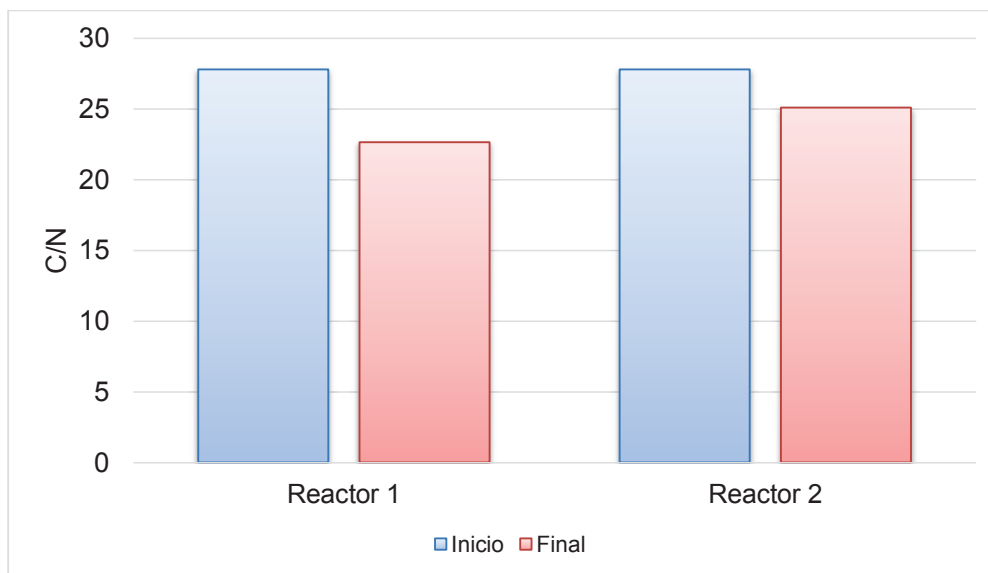
| Parámetro     | Reactor 1    |       | Reactor 2    |       |
|---------------|--------------|-------|--------------|-------|
|               | Inicio       | Final | Inicio       | Final |
| Carbono [%]   | 37,53 ± 1,50 | 45,53 | 37,53 ± 1,50 | 59,98 |
| Nitrógeno [%] | 1,35 ± 0,05  | 2,01  | 1,35 ± 0,05  | 2,39  |
| C/N           | 27,80 ± 0,32 | 22,65 | 27,80 ± 0,32 | 25,10 |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.5 se muestra la variación de la relación C/N desde el inicio al final de la degradación, se puede observar que en ambos reactores disminuye

la relación C/N, siendo más significativo en el reactor 1, lo que está relacionado con el aumento del pH y la disminución de la relación SV/ST.

#### GRÁFICA 4.5. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN C/N EN CADA REACTOR



Elaborado por: Claudia Encalada

Además de la relación SV/ST, otro indicador de que la materia orgánica se encuentra estable es la relación C/N, que debe estar entre 10 y 15 (Román et al., 2013; Soliva & López, 2004). Se determinó la relación C/N del sustrato del reactor 1, en la que se tuvo una disminución del 20% aproximadamente, de 27,80 a 22,65; sin embargo, no se alcanza el valor indicado para considerar al sustrato final del reactor como materia orgánica estable.

De igual manera para el reactor 2 se alcanzó una relación C/N igual a 25,10 partiendo de 27,80; con lo que se observa que después de los 166 días de operación de los reactores se tuvo una disminución del 10% aproximadamente; sin embargo, no se alcanza el valor indicado para considerar que la materia orgánica se encuentre estable.

Una vez más se evidencia que se obtuvo mayor degradación de la materia orgánica en el reactor 1, por lo que se ratifica que el triturar el sustrato inicial afecta al proceso de digestión anaerobia.



Otra razón por lo que se alcanzó la relación deseada de SV/T y C/N en los reactores, es debido a la presencia de material fibroso en el sustrato. Durante los últimos muestreos realizados, se observó la presencia de material fibroso en el interior de los reactores, este material fibroso está relacionado con la celulosa de las frutas y verduras. La celulosa es un material de lenta biodegradabilidad, por lo que demanda mayor tiempo para su completa degradación (Varnero, 2011).

#### 4.2.6. COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN EL INTERIOR DE LOS REACTORES

En la tabla 4.8 se muestra los valores medidos de altura de los residuos orgánicos al interior de los reactores después de compactarlos en cada muestreo. Con el nivel de los residuos se calcula el volumen de los mismos dentro de cada reactor y el porcentaje de compactación.

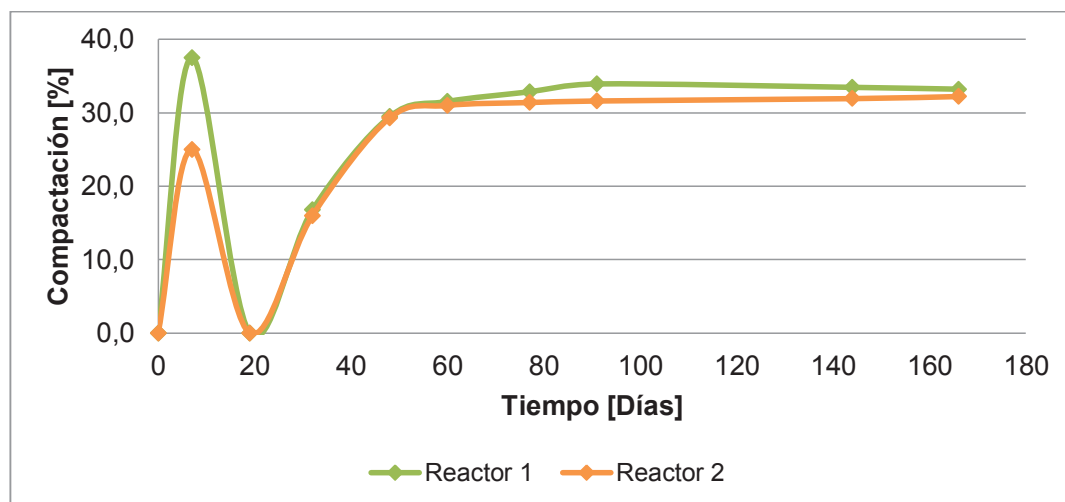
**TABLA 4.8. PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS**

| Día | Reactor 1                |             |                  | Reactor 2                |             |                  |
|-----|--------------------------|-------------|------------------|--------------------------|-------------|------------------|
|     | Nivel [cm <sup>3</sup> ] | Volumen [L] | Compactación [%] | Nivel [cm <sup>3</sup> ] | Volumen [L] | Compactación [%] |
| 0   | 280,0                    | 56,3        |                  | 280,0                    | 56,3        |                  |
| 7   | 175,0                    | 35,2        | 37,5             | 210,0                    | 42,2        | 25,0             |
| 19  | 275,0                    | 55,3        |                  | 278,0                    | 55,9        |                  |
| 32  | 233,0                    | 46,8        | 16,8             | 235,2                    | 47,3        | 16,0             |
| 48  | 197,5                    | 39,7        | 29,5             | 198,0                    | 39,8        | 29,3             |
| 60  | 191,7                    | 38,5        | 31,5             | 193,2                    | 38,8        | 31,0             |
| 77  | 188,0                    | 37,8        | 32,9             | 192,1                    | 38,6        | 31,4             |
| 91  | 185,0                    | 37,2        | 33,9             | 191,5                    | 38,5        | 31,6             |
| 144 | 186,3                    | 37,5        | 33,5             | 190,6                    | 38,3        | 31,9             |
| 166 | 187,0                    | 37,6        | 33,2             | 189,8                    | 38,2        | 32,2             |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.6 se observa la compactación y cambio del nivel de los residuos dentro de cada reactor durante el tiempo de operación de los reactores.

**GRÁFICA 4.6. VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS AL INTERIOR DE LOS REACTORES**



Elaborado por: Claudia Encalada

La compactación fue mayor en el reactor que fue llenado con materia orgánica triturada, lo que permitió que el peso específico de éste aumentara y por ende el volumen inicial del sustrato dentro del reactor fue mayor. Es por esta razón que la compactación dentro de la operación de un relleno sanitario es importante puesto que aumenta la capacidad del mismo, lo que a su vez está directamente relacionado con la vida útil del relleno (Jaramillo, 2002).

Debido a que en los siete primeros días de la operación de los reactores se tuvo un descenso significativo del nivel de los residuos, alcanzando una compactación de 37,5% para el reactor 1 y 25% para el reactor 2, se procedió a llenar nuevamente los reactores; por lo que para el día 19 se encera el nivel de los residuos y desde ese momento la compactación va en aumento.

Como se observa en la gráfica 4.5 la compactación es similar en los dos reactores, volviéndose constante alrededor del 30%, lo que indica que los residuos orgánicos no pueden compactarse más allá de ese límite.

### 4.3. EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS DE CONTROL DEL LIXIVIADO

#### 4.3.1. EVALUACIÓN DEL pH DEL LIXIVIADO

En la tabla 4.9 se muestra los valores medidos de pH del lixiviado generado por cada reactor. Los dos últimos registros de pH en el reactor 2, corresponden a la medida de pH tomada del líquido retenido en este reactor, debido a que el lixiviado se quedaba retenido por lo que no fue posible una medición directa del pH.

**TABLA 4.9. VARIACIÓN DE LA MEDIDA DE pH EN EL LIXIVIADO GENERADO POR CADA REACTOR**

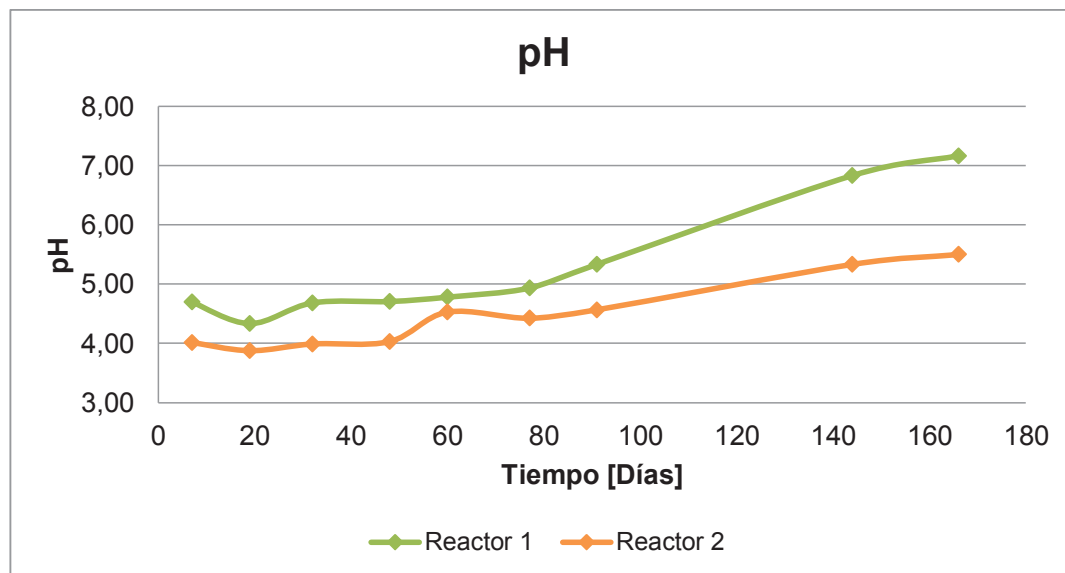
| pH  |             |             |
|-----|-------------|-------------|
| Día | Reactor 1   | Reactor 2   |
| 7   | 4,70 ± 0,10 | 4,00 ± 0,03 |
| 19  | 4,33 ± 0,13 | 3,88 ± 0,03 |
| 32  | 4,68 ± 0,03 | 3,99 ± 0,02 |
| 48  | 4,71 ± 0,01 | 4,03 ± 0,04 |
| 60  | 4,78 ± 0,02 | 4,53 ± 0,03 |
| 77  | 4,93 ± 0,06 | 4,42 ± 0,28 |
| 91  | 5,33 ± 0,58 | 4,57 ± 0,12 |
| 144 | 6,83 ± 0,06 | 4,33 ± 0,58 |
| 166 | 7,17 ± 0,12 | 5,50 ± 0,12 |

Elaborado por: Claudia Encalada

En la gráfica 4.6 se puede observar la variación del pH del lixiviado, esta variación tiene el mismo comportamiento que el pH del sustrato; en los

primeros 77 días el pH del lixiviado es ácido y a partir de la alcalinización de los reactores el pH del lixiviado alcanza la neutralidad en el reactor 1, lo que no sucedió en el reactor 2.

#### GRÁFICA 4.7. VARIACIÓN DEL VALOR MEDIDO DE pH DEL LIXIVIADO EN CADA REACTOR



Elaborado por: Claudia Encalada

Debido a que en los primeros 77 días de operación de los reactores solo se da lugar la fase ácida de la digestión anaerobia, manteniendo el pH de lixiviado en valores inferiores a 5, no permite que se desarrollen las bacterias metanogénicas que son las encargadas de transformar los AGV a  $\text{CH}_4$ , por esta razón el pH del lixiviado generado por cada reactor es ácido, igual al pH del sustrato.

De igual forma que ocurrió con el pH del sustrato, en el lixiviado este parámetro tuvo un incremento a partir de la alcalinización, por lo que se observa que es necesario agregar alcalinizante a una celda de residuos orgánicos. A partir de la alcalinización de los reactores se alcanzó un pH neutro en el reactor 1; sin embargo, el reactor 2 mostró resistencia al cambio de pH, esto se debió principalmente a la dificultad que se presentó al momento de recircular el lixiviado, puesto que el sustrato del reactor 2 mostró

características de un lodo hidrófilo, lo que ocasionó que este sistema retenga el lixiviado en su interior.

#### 4.3.2. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LIXIVIADO

Los valores medidos de temperatura del lixiviado generado por cada reactor se muestran en la tabla 4.10, igual que en el caso de la medición del pH, en los dos últimos controles se midió el líquido interno en la base del reactor.

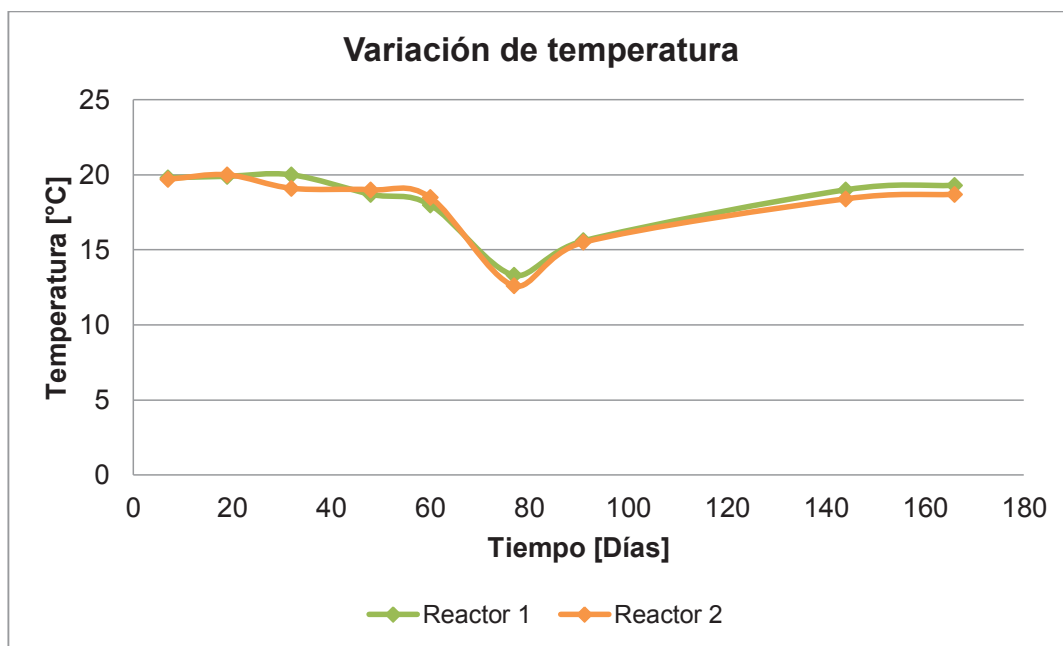
**TABLA 4.10. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LIXIVIADO GENERADO**

| TEMPERATURA     |              |              |
|-----------------|--------------|--------------|
| Día             | Reactor 1    | Reactor 2    |
| 7               | 19,8         | 19,7         |
| 19              | 19,9         | 20           |
| 32              | 20           | 19,1         |
| 48              | 18,7         | 19           |
| 60              | 18           | 18,5         |
| 77              | 13,3         | 12,6         |
| 91              | 15,6         | 15,5         |
| 144             | 19           | 18,4         |
| 166             | 19,3         | 18,7         |
| <b>Promedio</b> | 18,18 ± 2,28 | 17,94 ± 2,38 |

Elaborado por: Claudia Encalada

La variación de la temperatura del lixiviado se muestra en la gráfica 4.8.

**GRÁFICA 4.8. VARIACIÓN DE TEMPERATURA DEL LIXIVIADO EN CADA REACTOR**



Elaborado por: Claudia Encalada

La temperatura del lixiviado tiene un comportamiento similar a la temperatura interna de cada reactor. En el reactor 1 y reactor 2 se tiene una temperatura promedio de 18,18 °C y 17,94 °C respectivamente.

Debido a que la temperatura del lixiviado tiene un comportamiento similar a la temperatura interna de los reactores, de igual manera se puede observar que se tiene una baja considerable en la temperatura del lixiviado generado en el día 77, este descenso de temperatura está relacionado a la temperatura ambiente como se mencionó con anterioridad.

#### **4.3.3. EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EL LIXIVIADO**

Para determinar la calidad del lixiviado generado por cada reactor se realizaron ensayos para determinar la Demanda Química de Oxígeno (DQO),

los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.11. En los últimos dos muestreos no se analizó este parámetro para el reactor 2 porque el lixiviado quedaba retenido al interior del mismo.

Debido al alto contenido de materia orgánica presente en el lixiviado, fue necesario realizar una dilución de 1/100 para de esta manera poder realizar el ensayo de DQO y que la muestra a analizarse no se salga del rango.

**TABLA 4.11. VALORES MEDIDOS DE DQO DE LOS LIXIVIADOS DE CADA REACTOR**

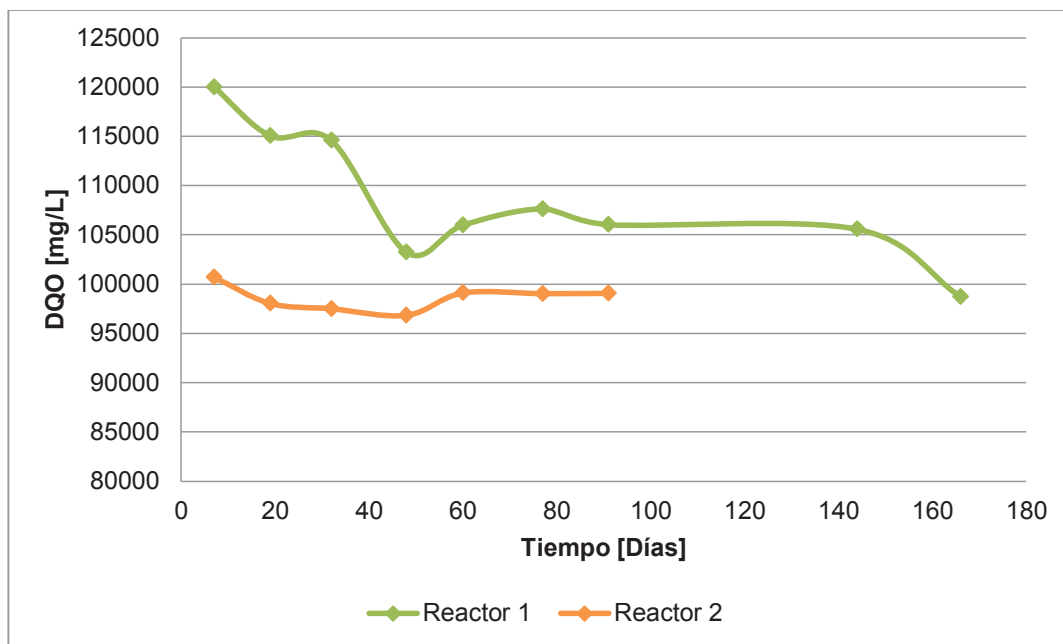
| DQO    |             |             |
|--------|-------------|-------------|
| Tiempo | Reactor 1   | Reactor 2   |
| 7      | 120000± 100 | 100700± 100 |
| 19     | 115033± 58  | 98033± 58   |
| 32     | 114567± 58  | 97500± 100  |
| 48     | 103233± 58  | 96833± 58   |
| 60     | 105967± 115 | 99100± 100  |
| 77     | 107633± 115 | 99033± 58   |
| 91     | 106033± 115 | 99067± 115  |
| 144    | 105567± 58  | *           |
| 166    | 98733± 58   | *           |

Elaborado por: Claudia Encalada

\* Valores no medidos debido a la retención del lixiviado dentro del reactor

En la gráfica 4.9 se puede observar la variación de la concentración de DQO durante el proceso de digestión anaerobia, en ambos sistemas se tienen una disminución de la concentración, pero cabe destacar que el reactor 1 la disminución de la DQO es más significativo que en la del reactor 2, esto se debe principalmente a que en este reactor se pudo recircular el lixiviado durante todo el tiempo de operación de los reactores.

**GRÁFICA 4.9. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DQO EN EL LIXIVIADO GENERADO POR CADA REACTOR**



Elaborado por: Claudia Encalada

La disminución de la DQO fue de aproximadamente 18 y 5% en el reactor 1 y reactor 2 respectivamente. Esta diferencia en la disminución de la DQO en cada reactor puede deberse a que en el reactor 2 la recirculación del lixiviado se dificultó, debido a que este sistema retenía la humedad en su interior, lo que no permitió que los ácidos grasos volátiles presentes en el lixiviado se transformaran a  $\text{CH}_4$ .

Los AGVs son uno de los principales productos de la digestión anaerobia, para tener un sistema anaerobio óptimo se recomienda que el efluente, en este caso el lixiviado, tenga bajas concentraciones, caso contrario estos ácidos inhiben la acción de las bacterias metanogénicas y por consiguiente detienen el proceso de degradación (Varnero, 2011). Es por esta razón que la disminución de concentración de DQO es mayor en el reactor 1, debido a que en el reactor 2 no se consiguió que las bacterias metanogénicas se desarrollen adecuadamente, puesto que el sistema trabajaba en condiciones ácidas.



#### 4.3.4. VOLUMEN DE LIXIVIADO GENERADO

En la tabla 4.12 se indican los valores del volumen medido de lixiviado en cada reactor.

**TABLA 4.12. VOLUMEN DE LIXIVIADO GENERADO POR CADA REACTOR**

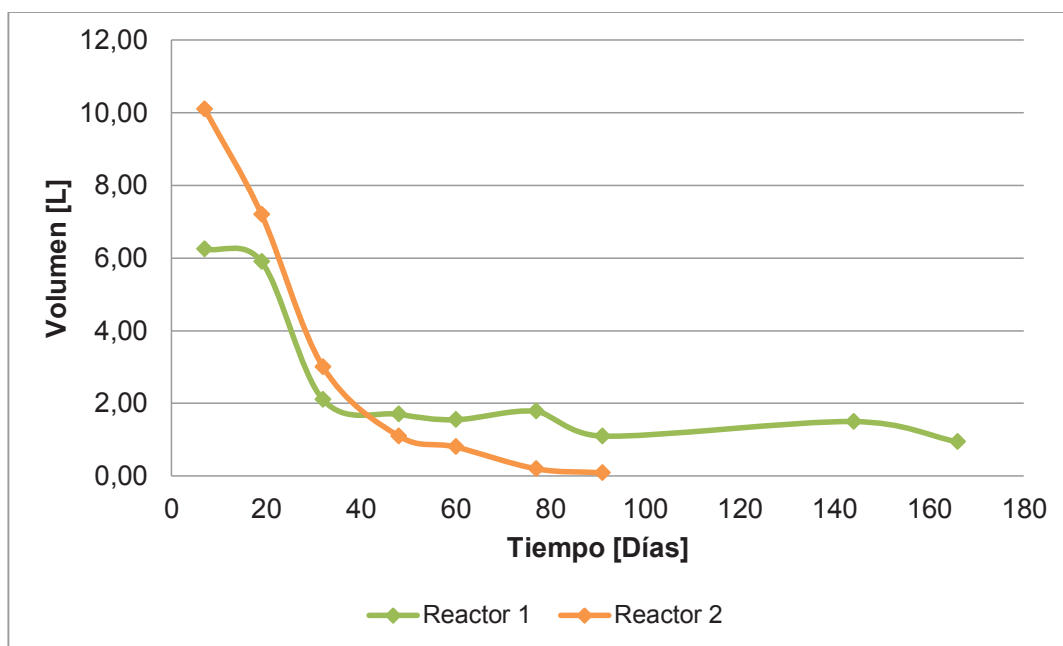
| Tiempo | Volumen [L] |           |
|--------|-------------|-----------|
|        | Reactor 1   | Reactor 2 |
| 7      | 6,25        | 10,10     |
| 19     | 5,90        | 7,20      |
| 32     | 2,10        | 3,00      |
| 48     | 1,70        | 1,10      |
| 60     | 1,55        | 0,80      |
| 77     | 1,78        | 0,20      |
| 91     | 1,10        | 0,09      |
| 144    | 1,50        | *         |
| 166    | 0,94        | *         |

Elaborado por: Claudia Encalada

\* Valores no medidos debido a la retención del lixiviado dentro del reactor

En la gráfica 4.10 se muestra la variación del volumen de lixiviado generado, se debe tomar en consideración que durante los días 40 y 60 se tuvo fugas en los reactores, donde se perdió lixiviado y no se pudo recircular el lixiviado durante éste periodo.

**GRÁFICA 4.10. VARIACIÓN DEL VOLUMEN GENERADO DE LIXIVIADO EN CADA REACTOR**



Elaborado por: Claudia Encalada

El volumen de lixiviado producido por cada reactor va disminuyendo a medida que el proceso de degradación anaerobia avanza; cuando existen incrementos de volumen, éstos están relacionados a la adición de agua o alcalinizante. Como ya se ha mencionado anteriormente para el reactor 2 no se pudo analizar el lixiviado debido a que éste se quedaba retenido al interior del mismo.

La disminución de volumen fue más significativa en el reactor 2, pero cabe destacar que este sistema retenía el líquido en su interior. La variación de volumen está ligada al avance de la digestión anaerobia, puesto que a medida que el lixiviado era recirculado se daba paso a que los AGVs se transformen a  $\text{CH}_4$ , por acción de las bacterias anaerobias.

Por otro lado, se observa que la generación de lixiviados es mínima en el reactor 1 (0,94 L) y nula en el reactor 2 (debido a la retención del líquido en el interior) cuando no se tiene intervención de precipitaciones, lo que indica que

la producción de lixiviados dentro de un relleno sanitario es función, en su mayoría, de la infiltración de agua lluvia, más que de la humedad y descomposición de los residuos orgánicos, motivo por el cual es importante que el drenaje en un relleno sanitario sea eficiente.

Además de los parámetros de control analizados, se puede mencionar algunas características del sustrato final, que fueron observadas al momento de desinstalar los reactores anaerobios, estas características son: el olor y aspecto.

En cuanto al olor y aspecto final del sustrato, existen diferencias notables entre los reactores. Ambos reactores presentaron olores desagradables, lo que una vez más indica que la degradación de la materia orgánica no fue completa, puesto que al finalizar la digestión anaerobia los olores deben desaparecer (Parra Orobio, 2014; Varnero, 2011); sin embargo, cabe destacar que en el reactor 2 el olor era más penetrante y desagradable que el reactor 1, esto corrobora a que la degradación fue mayor en el reactor 1.

Finalmente otra diferencia que se observó en el momento de desinstalar los reactores y retirar el sustrato final, fue que el sustrato del reactor 1 se mantenía semisólido y similar al sustrato usado inicialmente, a diferencia del reactor 2, donde el sustrato final era una solución acuosa, con lo que se puede corroborar que en este reactor el sustrato presentó características de un lodo con nula permeabilidad. En las figuras 4.1 y 4.2 se puede observar la diferencia entre los sustratos finales de cada reactor.

**FIGURA 4.1. SUSTRATO FINAL REACTOR 1**

Elaborado por: Claudia Encalada

**FIGURA 4.2. SUSTRATO FINAL REACTOR 2**

Elaborado por: Claudia Encalada

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

El propósito de esta investigación fue evaluar el tiempo de degradación anaerobia para materia orgánica bajo condiciones de cero lluvia, además de evaluar la producción de lixiviado y la calidad del mismo; mediante la construcción de dos reactores anaerobios, que estuvieron en marcha por aproximadamente seis meses a temperatura ambiente de la ciudad de Quito y presión atmosférica, los cuales contenían el mismo sustrato y la única diferencia entre ambos fue que en el reactor 1 la materia orgánica fue introducida en su estado natural y en el reactor 2 previamente fue triturada; con esta única diferencia se puede concluir que:

- ~ Los residuos triturados permiten una mejor compactación de los mismos, con lo que se alcanza mayor peso específico y de esta manera se aumenta la capacidad y por ende la vida útil del relleno sanitario. Sin embargo, en este caso de estudio particularmente triturar los residuos resultó contraproducente, debido a que la acidificación de los residuos triturados es mayor.
- ~ En los residuos sólidos orgánicos después de un proceso de digestión anaerobio se alcanza una compactación máxima y una disminución del volumen de los residuos que se encuentra alrededor del 30 %.
- ~ La fracción orgánica de los RSM no tiene la capacidad de completar el proceso de degradación anaerobia sin que haya intervención externa, debido a que los residuos orgánicos en general presentan un pH ácido,

lo que no permite que se pase de la fase ácida a la fase metanogénica. Es por esta razón que fue necesario la adición de alcalinizante para de esta manera lograr que el sustrato cambie su pH y se de paso a la segunda fase de la digestión anaerobia.

- ~ El uso de CaO y NaHCO<sub>3</sub> en bajas concentraciones como alcalinizante no presentó cambios significativos en el pH de los residuos; por lo que fue necesario añadir una solución de NaOH concentrada directamente al lixiviado e inyectar la solución en los distintos puntos de muestreo de los reactores, con esto se pudo lograr que el sustrato de los reactores aumente su pH, lo que permitió que la relación SV/ST disminuyera. Sin embargo este proceso fue posible en el reactor que contenía los residuos orgánicos en su estado original, puesto que el reactor 2 la acidificación de los residuos fue mayor, lo que indica que este sistema no tiene capacidad de amortiguamiento.
- ~ Para un volumen de 53,3 L de residuos orgánicos en estado original (sin trituración) con un peso específico de 911,23 kg/m<sup>3</sup> se utilizaron 38,4 g de NaOH, lo que implica un costo aproximado de \$17 por cada metro cúbico de residuos orgánicos.
- ~ Para controlar y estabilizar el pH de los residuos orgánicos se tiene mejores resultados con el uso de una solución de NaOH; sin embargo, para el uso cotidiano en un relleno sanitario es mejor la adición de grandes concentraciones de CaO, debido a que el CaO es accesible en el mercado y en comparación al NaOH es más económico.
- ~ Se obtuvo mayor degradación de la materia orgánica en el reactor que contenía residuos orgánicos en su estado original. Esto se evidenció por la disminución de la relación de SV/ST que fue de 0,73 a 0,45 y la disminución en la relación C/N que fue de 27,80 a 22,65.

- ~ El reactor 2 presentó mayor acidificación debido al tamaño de partícula, lo que dificultó la degradación de la materia orgánica; sin embargo se puede observar que la materia orgánica de este reactor también tuvo una leve degradación como lo indican los resultados obtenidos de la relación SV/ST y C/N.
- ~ La temperatura de la ciudad de Quito no es la óptima para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, puesto que el crecimiento de las bacterias facultativas y anaerobias se ve afectado cuando existen temperaturas inferiores a 33 °C.
- ~ La composición de los residuos orgánicos tiene relación directa en el proceso de digestión anaerobia, en la presente investigación se utilizó un sustrato con un alto porcentaje de vegetales que su mayoría presentan un gran contenido de celulosa, lo que dificulta la degradación de la materia orgánica, debido a su poca biodegradabilidad y a su vez aumenta el tiempo de retención de los reactores.
- ~ La fracción orgánica de los RSM puede degradarse de manera anaerobia, siendo únicamente necesario el control del pH y se obtiene mejores resultados cuando se utiliza los residuos orgánicos en su estado original, es decir sin trituración.
- ~ La generación de lixiviados en un sistema sin intervención de agua lluvia es mínima o nula, como se pudo evidenciar en los dos reactores. Lo que indica que dentro de un relleno sanitario la producción de lixiviado está directamente relacionada con la infiltración de agua lluvia, es por esta razón que el drenaje dentro de un relleno sanitario debe ser eficiente, minimizando la producción de lixiviado.
- ~ Debido a que el volumen generado de lixiviado por los residuos orgánicos bajo condiciones de cero lluvia es mínimo, éste puede ser tratado únicamente con la recirculación del lixiviado, dado que este

proceso disminuye la carga de materia orgánica presente en el mismo, debido a que favorece a la transformación de los AGVs a  $\text{CH}_4$ , lo que se puede evidenciar con la disminución de la DQO en ambos reactores; siempre y cuando, se controle el pH del sistema, manteniéndolo en valores óptimos que favorezcan la fase metanogénica de la digestión anaerobia.

- ~ Durante el tiempo de operación y seguimiento de los reactores se obtuvo una disminución mayor de la DQO en el reactor 1, siendo ésta de 18% aproximadamente, debido a que en este reactor la recirculación del lixiviado fue posible realizarla durante todo el tiempo de digestión de los residuos; lo que indica que la trituración de los residuos no es factible si se pretende recircular el lixiviado.
- ~ La alcalinización de los residuos orgánicos contribuye a la desaparición de olores desagradables que la materia orgánica en descomposición genera; es por esta razón que en la operación de un relleno sanitario, sea éste exclusivo de residuos orgánicos o mixtos (residuos orgánicos e inorgánicos), es importante la alcalinización de los residuos, lo que permite que la materia orgánica se estabilice y desaparezca cualquier tipo de olores.
- ~ No fue posible determinar el tiempo que la materia orgánica tarda en degradarse de manera anaerobia, debido a la acidez de los residuos orgánicos. Sin embargo, se determinó que los residuos orgánicos en un medio anaerobio tienden a estabilizar su pH al cabo de 70 días aproximadamente permaneciendo en condiciones ácidas hasta la adición de un alcalinizante; posterior a la alcalinización de los residuos y alcanzar un pH neutro, se evidenció el cambio de la fase ácida a la fase metanogénica al interior del reactor 1 en un tiempo aproximado de 15 días.



- ~ El tiempo de digestión anaerobia se prolonga si no se mantiene bajo condiciones neutras el pH, lo que indica que el factor más determinante para esta investigación es el pH.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- ~ Si se desea implementar un relleno sanitario exclusivo para materia orgánica con el fin de que una vez estabilizada esta sea retirada y el relleno sanitario pueda ser utilizado nuevamente, se recomienda el control permanente del pH y que se mantenga este parámetro por encima de la neutralidad. Este ajuste y estabilización del pH puede hacerse con inyección directa de alcalinizante en los residuos o controlando el pH del lixiviado que va ser recirculado. Se recomienda el uso de NaOH como alcalinizante si la situación técnica y financiera lo permite, y de no ser este el caso se puede utilizar CaO en grandes concentraciones.
- ~ Realizar pruebas de laboratorio para conocer la concentración exacta de alcalinizante necesaria para mantener estabilizado el pH de los residuos orgánicos durante un proceso de digestión anaerobia.
- ~ Evaluar los efectos que el aumento de temperatura en operación de los reactores produciría en el proceso de digestión anaerobia. Se recomienda operar los reactores en climas cálidos donde la temperatura sea mayor a 25°C y de esta forma los microorganismos se desarrollen de mejor manera.
- ~ Para que la recirculación del lixiviado sea efectiva, se recomienda que los residuos orgánicos se encuentren en su estado original, para evitar que estos se compacten en exceso y se forme un lodo hidrófilo que dificulte la recirculación del lixiviado.

- ~ Debido que la generación de lixiviados en un relleno sanitario es función de la infiltración de agua lluvia, en la operación de un relleno sanitario en condiciones normales es importante el control de la infiltración de agua lluvia para minimizar la producción de lixiviado, por lo que se recomienda realizar un diseño eficiente de drenaje de agua lluvia.
  
- ~ Caracterizar el sustrato final, con el fin de conocer la factibilidad de que sea usado como fertilizante o acondicionador de suelos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Álvarez, D. (2014). Análisis de la gestión de los residuos municipales generados en un entorno metropolitano utilizando un enfoque multicriterio. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Recuperado a partir de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/279244/TMDAdC1de1.pdf?sequence=1>
- (2) American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2012). Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater (22a ed.). Washington, DC, USA.
- (3) Aziz, S. Q., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., Bashir, M. J. K., & Umar, M. (2010). Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2608–2614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.042>
- (4) Banco Mundial. (2012). What a waste. A global review of solid waste management. Recuperado a partir de [http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What\\_a\\_Waste2012\\_Final.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf)
- (5) Barradas, A. (2009). Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales Estado del Arte.
- (6) Boumechhour, F., Rabah, K., Lamine, C., & Said, B. M. (2013). Treatment of landfill leachate using Fenton process and coagulation/flocculation. *Water and Environment Journal*, 27(1), 114–119. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00332.x>
- (7) Brion, J. (2010). Disposición final de residuos sólidos urbanos. ANI - Academia Nacional de Ingeniería. Recuperado a partir de

<http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/detail.action?docID=10418124>

- (8) Campos, E., Elías, X., & Flotats, X. (2012). Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. En *Tratamiento y Valorización Energética* (pp. 618–624). Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado a partir de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/reader.action?docID=10592402&ppg=2>
- (9) Comstock, S. E. H., Boyer, T. H., Graf, K. C., & Townsend, T. G. (2010). Effect of landfill characteristics on leachate organic matter properties and coagulation treatability. *Chemosphere*, 81(7), 976–983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.07.030>
- (10) Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13, 55–81.
- (11) EMGIRS-EP. (2013, octubre). Aprovechamiento de residuos [HTML]. Recuperado el 30 de enero de 2016, a partir de <http://www.emgirs.gob.ec/index.php/zenkit/visitas-al-relleno-sanitario-2>
- (12) Encarnación, G., & Enríquez, L. (2014). Evaluación técnica ambiental de un reactor anaerobio de alta concentración de sólidos volátiles. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Recuperado a partir de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8565>
- (13) Fundación Azul Ambientalistas. (2013). Construir rellenos sanitarios en zonas marginales. Recuperado a partir de <https://www.veoverde.com/2013/11/construir-rellenos-sanitarios-en-zonas-marginadas/>
- (14) Garcia Peña, E. I., Parameswaran, P., Kang, D. W., Canul-Chan, M., & Krajmalnik-Brown, R. (2011). Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology. *Bioresource Technology*, 102(20), 9447–9455. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.068>

- (15) Giraldo, E. (2001). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*; núm. 14 (2001), 44–55.
- (16) Guarachi, E. (2015, abril 21). Cabildo ejecutará 4 proyectos para no construir otro relleno sanitario [HTML]. Recuperado el 30 de enero de 2015, a partir de <http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-basura-rellenos-inga-sanidad.html>
- (17) INAMHI. (2017). Temperatura Ñaquito.
- (18) Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Recuperado a partir de <http://siar.regionpuno.gob.pe/public/docs/324.pdf>
- (19) Keng Zi Xiang, Sumiani Yusoff, & Khadijah Md. Khalid. (2013). Moving from landfill to Integrated Waste Management (IWM) system in Malaysia – Status and proposed strategies. *International Journal of Zero Waste Generation*, 1(2), 18–24.
- (20) Mafla, F. (2015, enero 9). Cerca del 50% de residuos sólidos que se produce en Ecuador proviene de Quito y Guayaquil (Audio) [Agencia Pública de Noticias del Ecuador y Suramérica]. Recuperado a partir de <http://www.andes.info.ec/es/noticias/cerca-50-residuos-solidos-produce-ecuador-proviene-quito-guayaquil-audio.html>
- (21) MAPAMA. (2010, septiembre 16). El sector del biogás agroindustrial en España. Recuperado a partir de <http://www.eurocarne.com/daal?a1=informes&a2=sector-biogas-agroindustrial-espanol.pdf>
- (22) Muñoz, M. (2008). *Manual de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (Primera)*. Quito, Ecuador.
- (23) Novachem Ecuador. (2017). Nota de Cotización.
- (24) Oakley, S. M., & Jimenez, R. (2012). Sustainable sanitary landfills for neglected small cities in developing countries: The semi-mechanized trench method from Villanueva, Honduras. *Waste Management*, 32(12), 2535–2551. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.030>

- (25) Obaya Abreu, M. C., & Lorenzo Acosta, Y. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XXXIX(1), 35–48.
- (26) Organización Panamericana de la Salud (PAHO). (s/f). Diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Recuperado a partir de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_rsm/e/unidad3.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidad3.html)
- (27) Oviedo, E., Marmolejo, L., & Torres, P. (2014). Influencia de la frecuencia de volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30, 91–100.
- (28) Oviedo, R., Marmolejo, L., & Torres, P. (2012). Perspectivas de aplicación del compostaje de biorresiduos provenientes de residuos sólidos municipales. Un enfoque desde lo global a lo local. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20), 67–75.
- (29) Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., Cárdenas-Cleves, L. M., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W. A., & Ordóñez-Andrade, J. A. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17, 553–562.
- (30) Parra-Orobio, B. A. (2014). Producción de metano a partir de la digestión anaerobio de biorresiduos de origen municipal. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Recuperado a partir de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7645/1/7720-0446398.pdf>
- (31) Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- (32) Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor. Chile. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- (33) Sancho y Cervera, J., Aguilar, O., Mulás, A., & Vazquez, J. (2010). Manual para la operación de rellenos sanitarios. Recuperado a

- partir de [http://www.sustenta.org.mx/3/wp-content/files/MT\\_OperacionRellenoSanitario.pdf](http://www.sustenta.org.mx/3/wp-content/files/MT_OperacionRellenoSanitario.pdf)
- (34) Soliva, M., & López, M. (2004). Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y condiciones del proceso. Recuperado a partir de [http://www.ruralcat.net/c/document\\_library/get\\_file?uuid=c154b707-bb22-4c73-b97c-ab786842f130&groupId=10136](http://www.ruralcat.net/c/document_library/get_file?uuid=c154b707-bb22-4c73-b97c-ab786842f130&groupId=10136)
- (35) Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcántar, G., Trinidad, J., Borges, L., & Pereyda, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra*, 19(4), 353–362.
- (36) Torres-Lozada, P., Barba-Ho, L. E., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17, 245–255.
- (37) Varnero, M. T. (2011). *Manual de biogás* (FAO). Chile. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- (38) Yabroudi, S. C., Sobrinho, P. A., Morita, D. M., Queiroz, L. M., & Amaral, M. (2010). Aplicabilidad del proceso de nitrificación/desnitrificación en el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario. *Interciencia*, 35(12), 921–926.

## **ANEXOS**



**ANEXO No 1**

**RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS EN EL**

**LABORATORIO DOCENTE DE INGENIERÍA**

**AMBIENTAL**

**TABLA A. 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE SÓLIDOS EN EL REACTOR 1**

| DIA | Reactor 1 |         |         |         |        |
|-----|-----------|---------|---------|---------|--------|
|     | PESO      | %ST     | %SV     | %SF     | SV/ST  |
| 0   | 22,2876   | 16,9139 | 12,2019 | 4,7120  | 0,7214 |
| 0   | 24,0813   | 16,6428 | 12,0110 | 4,6318  | 0,7217 |
| 0   | 21,8879   | 16,9591 | 12,5421 | 4,4171  | 0,7395 |
| 7   | 18,5945   | 8,7155  | 6,8542  | 1,8613  | 0,7864 |
| 7   | 18,4057   | 10,6342 | 7,7134  | 2,9208  | 0,7253 |
| 7   | 20,7863   | 9,2330  | 7,2625  | 1,9705  | 0,7866 |
| 19  | 14,1044   | 12,8371 | 9,2042  | 3,6329  | 0,7170 |
| 19  | 27,2149   | 12,9855 | 8,5207  | 4,4648  | 0,6562 |
| 32  | 31,0943   | 16,3641 | 12,7554 | 3,6087  | 0,7795 |
| 32  | 28,4074   | 14,5635 | 11,3404 | 3,2231  | 0,7787 |
| 32  | 31,5420   | 15,3862 | 11,5379 | 3,8482  | 0,7499 |
| 48  | 16,9367   | 24,9901 | 18,2308 | 6,7593  | 0,7295 |
| 48  | 10,3241   | 26,8043 | 20,7243 | 6,0799  | 0,7732 |
| 48  | -         | -       | -       | -       | -      |
| 60  | 13,0500   | 27,0398 | 20,7418 | 6,2981  | 0,7671 |
| 60  | 16,7158   | 28,2631 | 21,2039 | 7,0592  | 0,7502 |
| 60  | 12,9495   | 26,4736 | 19,8216 | 6,6520  | 0,7487 |
| 77  | 35,0590   | 11,0856 | 8,0299  | 3,0557  | 0,7244 |
| 77  | 35,8072   | 11,6013 | 6,2479  | 5,3534  | -      |
| 77  | 31,0557   | 14,1913 | 10,6486 | 3,5427  | 0,7504 |
| 91  | 31,4652   | 8,7211  | 6,3348  | 2,3862  | 0,7264 |
| 91  | 25,3501   | 9,9712  | 7,4536  | 2,5175  | 0,7475 |
| 91  | 38,9034   | 12,8223 | 9,6187  | 3,2036  | -      |
| 144 | 31,9217   | 16,5013 | 8,7702  | 7,7311  | 0,5315 |
| 144 | 31,9732   | 16,1113 | 7,1754  | 8,9359  | 0,4454 |
| 144 | 28,8187   | 16,5351 | 9,0802  | 7,4549  | 0,5491 |
| 166 | 28,0535   | 19,2190 | 8,5761  | 10,6429 | 0,4462 |
| 166 | 28,8749   | 16,5881 | 7,9529  | 8,6352  | 0,4794 |
| 166 | 28,8917   | 16,3943 | 7,2405  | 9,1538  | 0,4416 |

Elaborado por: Claudia Encalada

- Valores eliminados porque se considera errores en los análisis.

**TABLA A. 2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE SÓLIDOS EN EL REACTOR 2**

| Día | Reactor 2 |         |         |         |        |
|-----|-----------|---------|---------|---------|--------|
|     | PESO      | %ST     | %SV     | %SF     | SV/ST  |
| 0   | 28,3563   | 17,3750 | 12,7337 | 4,6413  | 0,7329 |
| 0   | 24,0343   | 19,5637 | 14,9798 | 4,5839  | 0,7657 |
| 7   | 26,4783   | 15,7219 | 12,5839 | 3,1380  | 0,8004 |
| 7   | 25,0163   | 17,7156 | 13,6535 | 4,0622  | -      |
| 7   | 24,0537   | 19,6232 | 15,9136 | 3,7096  | 0,8110 |
| 19  | 16,5755   | 18,4996 | 13,8252 | 4,6744  | 0,7473 |
| 19  | 17,5462   | 20,3537 | 15,4848 | 4,8689  | 0,7608 |
| 32  | 36,7986   | 13,1880 | 9,7180  | 3,4700  | 0,7369 |
| 32  | 40,6975   | 13,7775 | 10,2883 | 3,4892  | 0,7467 |
| 32  | 30,8268   | 16,4506 | 12,7344 | 3,7162  | -      |
| 48  | 27,8998   | 34,7974 | 29,5905 | 5,2068  | -      |
| 48  | 19,3324   | 23,4829 | 18,7473 | 4,7356  | 0,7983 |
| 48  | 21,5515   | 27,1072 | 21,5229 | 5,5843  | 0,7940 |
| 60  | 27,0657   | 17,1786 | 13,0446 | 4,1340  | -      |
| 60  | 39,3677   | 17,0272 | 12,9032 | 4,1239  | 0,7578 |
| 60  | 41,1323   | 17,1646 | 12,9701 | 4,1945  | 0,7556 |
| 77  | 28,9881   | 16,6734 | 14,5874 | 2,0860  | -      |
| 77  | 29,5067   | 15,2348 | 10,8416 | 4,3932  | 0,7116 |
| 77  | 28,0928   | 14,8120 | 10,5429 | 4,2691  | 0,7118 |
| 91  | 35,7816   | 12,2577 | 9,2933  | 2,9644  | 0,7582 |
| 91  | 34,2080   | 12,4310 | 9,3393  | 3,0917  | 0,7513 |
| 91  | 44,3104   | 13,5144 | 9,8027  | 3,7118  | 0,7253 |
| 144 | 27,6916   | 17,0073 | 11,8480 | 5,1593  | 0,6966 |
| 144 | 30,0875   | 19,9744 | 8,7568  | 11,2176 | -      |
| 144 | 31,3736   | 19,9811 | 14,1555 | 5,8256  | 0,7084 |
| 166 | 19,4210   | 16,5409 | 11,2986 | 5,2423  | 0,6831 |
| 166 | 22,9578   | 17,1602 | 11,7320 | 5,4282  | 0,6837 |
| 166 | 23,1466   | 16,8897 | 11,8125 | 5,0772  | 0,6994 |

Elaborado por: Claudia Encalada

- Valores eliminados porque se considera errores en los análisis.

**TABLA A. 3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE HUMEDAD EN LOS DOS REACTORES**

| Día | Humedad   |           |
|-----|-----------|-----------|
|     | Reactor 1 | Reactor 2 |
| 0   | 83,0861   | 82,6250   |
| 0   | 83,3572   | 80,4363   |
| 0   | 83,0409   | -         |
| 7   | 91,2845   | 84,2781   |
| 7   | 89,3658   | 82,2844   |
| 7   | 90,7670   | 80,3768   |
| 19  | 87,1629   | 81,5004   |
| 19  | 87,0145   | 79,6463   |
| 32  | 83,6359   | 86,8120   |
| 32  | 85,4365   | 86,2225   |
| 32  | 84,6138   | 83,5494   |
| 48  | 75,0099   | 65,2026   |
| 48  | 73,1957   | 76,5171   |
| 48  | -         | 72,8928   |
| 60  | 72,9602   | 82,8214   |
| 60  | 71,7369   | 82,9728   |
| 60  | 73,5264   | 82,8354   |
| 77  | 88,9144   | 83,3266   |
| 77  | 88,3987   | 84,7652   |
| 77  | 85,8087   | 85,1880   |
| 91  | 91,2789   | 87,7423   |
| 91  | 90,0288   | 87,5690   |
| 91  | 87,1777   | 86,4856   |
| 144 | 83,4987   | 82,9927   |
| 144 | 83,8887   | 80,0256   |
| 144 | 83,4649   | 80,0189   |
| 166 | 80,7810   | 83,4591   |
| 166 | 83,4119   | 82,8398   |
| 166 | 83,6057   | 83,1103   |

Elaborado por: Claudia Encalada

- Valores eliminados porque se considera errores en los análisis.

**TABLA A. 4. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE pH EN LOS DOS REACTORES**

| Día | pH        |      |      |           |      |      |
|-----|-----------|------|------|-----------|------|------|
|     | Reactor 1 |      |      | Reactor 2 |      |      |
|     | 1         | 2    | 3    | 1         | 2    | 3    |
| 0   | 4,51      | 4,49 | 4,48 | 4,51      | 4,49 | 4,48 |
| 7   | 3,66      | 3,65 | 3,67 | 4,10      | 4,12 | 4,11 |
| 19  | 4,49      | 4,49 | 4,49 | 3,94      | 3,88 | 3,90 |
| 32  | 4,47      | 4,47 | 4,46 | 4,10      | 4,10 | 4,10 |
| 48  | 5,05      | 5,00 | 5,06 | 4,49      | 4,49 | 4,48 |
| 60  | 5,03      | 5,00 | 5,03 | 4,50      | 4,65 | 4,64 |
| 77  | 5,00      | 5,00 | 5,00 | 4,50      | 4,80 | 4,80 |
| 91  | 5,00      | 5,00 | 5,00 | 5,00      | 5,00 | 5,00 |
| 144 | 7,00      | 7,00 | 7,00 | 5,30      | 5,40 | 5,30 |
| 166 | 7,30      | 7,30 | 7,20 | 5,40      | 5,50 | 5,50 |

Elaborado por: Claudia Encalada

**TABLA A. 5. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN LOS DOS REACTORES**

| Día | Temperatura |      |      |           |      |      |
|-----|-------------|------|------|-----------|------|------|
|     | Reactor 1   |      |      | Reactor 2 |      |      |
|     | 1           | 2    | 3    | 1         | 2    | 3    |
| 0   | 21,0        | 20,0 | 20,0 | 20,0      | 21,0 | 21,0 |
| 7   | 21,0        | 19,0 | 19,0 | 20,0      | 20,0 | 20,0 |
| 19  | 20,0        | 20,0 | 20,0 | 21,0      | 20,0 | 20,0 |
| 32  | 19,5        | 20,0 | 20,0 | 20,0      | 19,0 | 19,5 |
| 48  | 18,0        | 19,0 | 19,5 | 19,0      | 18,5 | 19,0 |
| 60  | 19,0        | 18,0 | 18,0 | 18,0      | 19,0 | 18,5 |
| 77  | 13,0        | 13,0 | 12,0 | 13,0      | 11,0 | 12,0 |
| 91  | 15,0        | 15,5 | 15,6 | 15,2      | 15,6 | 15,4 |
| 144 | 18,3        | 18,9 | 19,1 | 17,9      | 18,1 | 17,6 |
| 166 | 18,8        | 19,1 | 19,1 | 18,5      | 18,6 | 18,3 |

Elaborado por: Claudia Encalada

**TABLA A. 6. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE DQO EN LOS DOS REACTORES**

| Día | DQO       |      |      |           |      |      |
|-----|-----------|------|------|-----------|------|------|
|     | Reactor 1 |      |      | Reactor 2 |      |      |
|     | 1         | 2    | 3    | 1         | 2    | 3    |
| 7   | 1200      | 1201 | 1199 | 1007      | 1008 | 1006 |
| 19  | 1150      | 1151 | 1150 | 980       | 981  | 980  |
| 32  | 1146      | 1145 | 1146 | 975       | 974  | 976  |
| 48  | 1032      | 1032 | 1033 | 968       | 969  | 968  |
| 60  | 1061      | 1059 | 1059 | 992       | 990  | 991  |
| 77  | 1077      | 1077 | 1075 | 990       | 990  | 991  |
| 91  | 1061      | 1059 | 1061 | 992       | 990  | 990  |
| 144 | 1056      | 1056 | 1055 | -         | -    | -    |
| 166 | 987       | 988  | 987  | -         | -    | -    |

Elaborado por: Claudia Encalada

NOTA: Los registros presentados son los valores de la lectura directa del espectrofotómetro, no se encuentran multiplicados por el factor de dilución (factor de dilución = 100)

**TABLA A. 7. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE PH EN EL LIXIVIADO**

| Día | pH        |      |      |           |      |      |
|-----|-----------|------|------|-----------|------|------|
|     | Reactor 1 |      |      | Reactor 1 |      |      |
|     | 1         | 2    | 3    | 1         | 2    | 3    |
| 7   | 4,70      | 4,80 | 4,60 | 4,00      | 4,00 | 4,05 |
| 19  | 4,35      | 4,45 | 4,20 | 3,88      | 3,85 | 3,90 |
| 32  | 4,70      | 4,65 | 4,70 | 3,97      | 4,00 | 4,00 |
| 48  | 4,71      | 4,71 | 4,70 | 4,01      | 4,00 | 4,08 |
| 60  | 4,78      | 4,80 | 4,76 | 4,50      | 4,55 | 4,54 |
| 77  | 4,90      | 5,00 | 4,90 | 4,57      | 4,60 | 4,10 |
| 91  | 5         | 5    | 6    | 4,5       | 4,7  | 4,5  |
| 144 | 6,8       | 6,9  | 6,8  | 5,00      | 5,00 | 6,00 |
| 166 | 7,10      | 7,30 | 7,10 | 5         | 5,5  | 6    |

Elaborado por: Claudia Encalada

**ANEXO No 2**  
**RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS EN**  
**LABORATORIOS EXTERNOS**

## INFORMES SUSTRATO INICIAL



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 41534  
ORDEN DE TRABAJO No. 53199

|   |   |                    |        |
|---|---|--------------------|--------|
| SOLICITADO POR:                                 | ENCALADA CLAUDIA  |                    |        |
| DIRECCION DEL CLIENTE:                          | CALDERON  |                    |        |
| MUESTRA DE:                                     | RESIDUOS SOLIDOS  |                    |        |
| DESCRIPCIÓN:                                    | 1   |                    |        |
| FECHA DE RECEPCIÓN:                             | 27/06/2016  | HORA DE RECEPCIÓN: | 11H55  |
| FECHA DE ANÁLISIS:                              | DEL 27/06/2016 AL 01/07/2016  |                    |        |
| FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: | 01/07/2016  |                    |        |
| CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA                   |   |                    |        |
| CARACTERÍSTICA:                                 | CARACTERISTICO  | ESTADO:            | SOLIDO |
|   |   | CONTENIDO:         | 200g   |
| OBDDERVACIONES:                                 | Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregadas al personal técnico del OSP. |                    |        |

### RESULTADOS

| PARAMETROS       | UNIDADES | RESULTADOS | METODOS        |
|------------------|----------|------------|----------------|
| CARBONO ORGANICO | % (p/p)  | 37,4       | TITULOMETRICCO |



  
B.F. ALICIA CEPA  
JEFE DE AREA DE AMBIENTAL







UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 41535  
ORDEN DE TRABAJO No. 53199

|   |   |                    |        |
|---|---|--------------------|--------|
| SOLICITADO POR:                                 | ENCALADA CLAUDIA  |                    |        |
| DIRECCION DEL CLIENTE:                          | CALDERON  |                    |        |
| MUESTRA DE:                                     | RESIDUOS SOLIDOS  |                    |        |
| DESCRIPCIÓN:                                    | 2   |                    |        |
| FECHA DE RECEPCIÓN:                             | 27/06/2016  | HORA DE RECEPCIÓN: | 11H55  |
| FECHA DE ANÁLISIS:                              | DEL 27/06/2016 AL 01/07/2016  |                    |        |
| FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: | 01/07/2016  |                    |        |
| CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA                   |   |                    |        |
| CARACTERÍSTICA:                                 | CARACTERÍSTICO  | ESTADO:            | SOLIDO |
|   |   | CONTENIDO:         | 200g   |
| OBSERVACIONES:                                  | Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregadas al personal técnico del OSP. |                    |        |

RESULTADOS

| PARAMETROS       | UNIDADES | RESULTADOS | METODOS       |
|------------------|----------|------------|---------------|
| CARBONO ORGANICO | % (p/p)  | 36,1       | TITULOMETRICO |



  
B.F. ALICIA CEPA  
JEFE DE ÁREA DE AMBIENTAL



21/1

RAM-4.1.04



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL  
INFORME DE RESULTADOS


INF. LAB. AMB 41536  
ORDEN DE TRABAJO No. 53199

|   |   |                    |        |
|---|---|--------------------|--------|
| SOLICITADO POR:                                 | ENCALADA CLAUDIA  |                    |        |
| DIRECCION DEL CLIENTE:                          | CALDERON  |                    |        |
| MUESTRA DE:                                     | RESIDUOS SOLIDOS  |                    |        |
| DESCRIPCIÓN:                                    | 3   |                    |        |
| FECHA DE RECEPCIÓN:                             | 27/06/2016  | HORA DE RECEPCIÓN: | 11H55  |
| FECHA DE ANÁLISIS:                              | DEL 27/06/2016 AL 01/07/2016  |                    |        |
| FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA: | 01/07/2016  |                    |        |
| <b>CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA</b>            |   |                    |        |
| CARACTERÍSTICA:                                 | CARACTERÍSTICO  | ESTADO:            | SOLIDO |
|   |   | CONTENIDO:         | 200g   |
| OBSEVACIONES:                                   | Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregadas al personal técnico del OSP. |                    |        |

RESULTADOS

| PARAMETROS       | UNIDADES | RESULTADOS | METODOS       |
|------------------|----------|------------|---------------|
| CARBONO ORGANICO | % (p/p)  | 39,3       | TITULOMETRICO |



  
B.F. ALICIA CEPÁ  
JEFE DE ÁREA DE AMBIENTAL

## INFORMES SUSTRATO FINAL



ALS Ecuador  
Rigoberto Heredia 0e6-157 y Huachi  
Quito, Ecuador  
T: +59 3 2341 4080

|                              |               |
|------------------------------|---------------|
| PROTOCOLO N°: 21673/2017-1.0 | RU-49         |
| SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN | Revisión: 10  |
|                              | Página 2 de 3 |

### RESULTADOS OBTENIDOS

| PARÁMETROS ANALIZADOS     | METODOLOGÍA DE REFERENCIA                                    | MÉTODO INTERNO ALS | UNIDAD | 2798-1              |
|---------------------------|--|--------------------|--------|---------------------|
|                           |  |                    |        | R1                  |
| NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL  | Standard Methods Ed. 22, 2012, 4500-N <sub>org</sub> C       | PA - 72.00         | %      | 2,01 <sup>(*)</sup> |
| CARBONO ORGÁNICO TOTAL(*) | Primo Yúfera, Química Agrícola I, Método Walkley Black, 1934 | PA - 35.00         | %      | 45,53               |



### REFERENCIAS Y OBSERVACIONES:

<sup>(\*)</sup> Los valores reportados se encuentran fuera del rango de acreditación del SAE para Nitrógeno Total Kjeldahl de 62,5 a 3125 mg/kg. Nitrógeno Total Kjeldahl: 20119,6 mg/kg



**ALS Ecuador**  
 Rigoberto Heredia Oe6-157 y Huachi  
 Quito, Ecuador  
 T: +59 3 2341 4080

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| <b>PROTOCOLO N°: 21674/2017-1.0</b> | RU-49         |
| <b>SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN</b> | Revisión: 10  |
|                                     | Página 2 de 3 |

**RESULTADOS OBTENIDOS**

| PARÁMETROS ANALIZADOS     | METODOLOGÍA DE REFERENCIA                                    | MÉTODO INTERNO ALS | UNIDAD | 2798-2              |
|---------------------------|--|--------------------|--------|---------------------|
|                           |  |                    |        | R2                  |
| NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL  | Standard Methods Ed. 22, 2012, 4500-N <sub>org</sub> C       | PA - 72.00         | mg/kg  | 2,39 <sup>(*)</sup> |
| CARBONO ORGÁNICO TOTAL(*) | Primo Yúfera, Química Agrícola I, Método Walkley Black, 1934 | PA - 35.00         | %      | 59,98               |



**REFERENCIAS Y OBSERVACIONES:**

<sup>(\*)</sup> Los valores reportados se encuentran fuera del rango de acreditación del SAE para Nitrógeno Total Kjeldahl de 62,5 a 3125 mg/kg. Nitrógeno Total Kjeldahl: 23885,5 mg/kg

**ANEXO No 3**

**TEMPERATURA AMBIENTE EN LA CIUDAD DE  
QUITO DURANTE EL TIEMPO DE OPERACIÓN DE  
LOS REACTORES**

**TABLA A. 8. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL PERIODO JULIO – DICIEMBRE 2017**

| <b>Día</b>   | <b>Julio</b> | <b>Agosto</b> | <b>Septiembre</b> | <b>Octubre</b> | <b>Noviembre</b> | <b>Diciembre</b> |
|--------------|--------------|---------------|-------------------|----------------|------------------|------------------|
| 1            | 16,0         | 17,2          | 14,4              | 14,0           | 14,7             | 16,1             |
| 2            | 14,1         | 16,6          | 16,4              | 14,9           | 14,9             | 14,6             |
| 3            | 14,8         | 17,1          | 17,2              | 15,8           | 15,7             | 14,3             |
| 4            | 16,5         | 17,9          | 16,2              | 16,8           | 17,0             | 15,7             |
| 5            | 15,1         | 17,6          | 16,9              | 16,8           | 18,2             | 15,7             |
| 6            | 16,8         | 18,3          | 15,7              | 15,6           | 17,2             | 15,7             |
| 7            | 17,5         | 16,8          | 16,2              | 14,6           | 15,0             | 15,6             |
| 8            | 17,5         | 16,6          | 16,3              | 15,3           | 16,4             | 15,9             |
| 9            | 16,3         | 17,8          | 17,4              | 13,9           | 17,6             | 15,0             |
| 10           | 16,3         | 17,5          | 16,5              | 15,4           | 14,6             | 15,3             |
| 11           | 16,2         | 17,0          | 15,9              | 15,0           | 14,6             | 15,8             |
| 12           | 15,0         | 16,7          | 16,3              | 15,9           | 15,1             | 15,9             |
| 13           | 14,4         | 17,1          | 14,9              | 15,0           | 16,1             | 15,0             |
| 14           | 15,3         | 17,7          | 12,5              | 17,4           | 13,5             | 15,5             |
| 15           | 14,8         | 17,7          | 11,6              | 16,1           | -                | 15,4             |
| 16           | 15,2         | 17,8          | 16,4              | 16,1           | -                | 12,9             |
| 17           | 15,9         | 17,8          | 17,1              | 16,9           | 16,1             | 15,4             |
| 18           | 15,3         | 17,3          | 16,3              | 16,1           | 15,8             | 14,9             |
| 19           | 15,7         | 15,4          | 10,2              | 16,9           | 15,7             | 15,2             |
| 20           | 15,6         | 17,2          | 16,9              | 16,2           | 14,1             | 15,2             |
| 21           | 14,9         | 16,9          | 17,7              | 16,1           | 14,4             | 14,6             |
| 22           | 15,8         | 16,8          | 16,2              | 15,3           | 15,4             | 14,1             |
| 23           | 14,5         | 17,8          | 16,6              | 16,1           | 16,4             | 14,7             |
| 24           | 16,1         | 15,9          | 17,3              | 15,5           | 15,8             | 14,9             |
| 25           | 16,1         | 16,1          | 15,7              | 14,0           | 15,2             |                  |
| 26           | 17,3         | 14,9          | 17,0              | 14,8           | 16,0             | 15,5             |
| 27           | 16,0         | 16,8          | 17,2              | 15,3           | 16,1             | 15,7             |
| 28           | 16,0         | 15,4          | 14,5              | 15,3           | 15,8             | 17,2             |
| 29           | 15,8         | 16,9          | 15,9              | 16,3           | 16,2             | 16,4             |
| 30           | 15,6         | 14,9          | 13,5              | 15,5           | 16,7             | 15,3             |
| 31           | 16,2         | 14,4          |                   | 14,5           |                  | 14,9             |
| <b>MEDIA</b> | 15,8         | 16,8          | 15,8              | 15,6           | 15,7             | 15,3             |

Fuente: INAMHI, 2017  
Elaborado por: Claudia Encalada

**ANEXO No 4**  
**FOTOGRAFÍAS**

**FIGURA A. 1. RECOLECCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS**



**FIGURA A. 2. SEPARACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS**





**FIGURA A. 3. TRITURACIÓN Y LLENADO****FIGURA A. 4. GENERACIÓN DE LIXIVIADO**

FIGURA A. 4. ENSAYO DE SÓLIDOS TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES



**FIGURA A. 4. RETIRO DE LOS REACTORES ANAEROBIOS**