

**ANALISIS PRELIMINAR DE LAS VARIABLES FISICAS Y MICROBIOLOGICAS  
DEL COMPOSTAJE DE BIOSOLIDOS**

**DIANA CAROLINA CABALLERO ARIAS  
DANIEL FERNANDO SIERRA OTALORA.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2015**

**ANALISIS PRELIMINAR DE LAS VARIABLES FISICAS Y MICROBIOLOGICAS  
DEL COMPOSTAJE DE BIOSOLIDOS**

**DIANA CAROLINA CABALLERO ARIAS  
DANIEL FERNANDO SIERRA OTALORA.**

**Proyecto de grado en la modalidad de investigación presentado como  
requisito parcial para optar el título de ingeniero civil**

**DIRECTOR: PEDRO MAURICIO ACOSTA CASTELLANOS  
Ingeniero Civil, M.Cs. ingeniería sanitarias y ciencias ambientales**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DE AQUINO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2015**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Firma presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Tunja, 14 de Abril del 2015**

## **DEDICATORIA**

Esta tesis va dedicada principalmente a mis padres, ya que con su dedicación y trabajo, me dejan como dicen ellos su mayor herencia el estudio.  
A mis hermanos que siempre me han apoyado en cada una de las dificultades, que se presentaron en el transcurso de mi carrera.  
A mi abuelita porque siempre confió en mí y sus consejos me ayudaron a no darme por vencida

**DIANA CABALLERO**

Con el desarrollo de esta tesis termino una etapa primordial en mi proyecto de vida para empezar con mi desarrollo laboral.  
Esta tesis se la dedico a mis padres José Mario Sierra y Adelaida Otálora quienes con su esfuerzo y dedicación me han apoyado en cada una de las decisiones que he tomado, teniendo siempre palabras de motivación y consejos para seguir adelante, no dejándome desistir. A mis hermanos y hermana Sandra Yolanda Sierra quienes siempre estuvieron presentes en los momentos difíciles, dándome fuerza y tranquilidad para seguir adelante.

**DANIEL SIERRA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios primordialmente, quien nos dio la fortaleza y sabiduría para sacar este trabajo de investigación adelante.

Le agradecemos a nuestros padres, y al ingeniero guía, quienes nos motivaron durante todo el proceso de trabajo y siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos.

A la UNIVERSIDAD SANTO TOMAS por ofrecernos los conocimientos necesarios para la culminación exitosa, además de brindarnos un espacio en su planta física para el desarrollo de la investigación.

A los coordinadores del laboratorio de Ingeniería Civil JOSE Y FREDY quienes nos colaboraron y apoyaron asesorándonos durante la elaboración y la realización de distintos procedimientos.

Al personal encargado del mantenimiento de la Planta Física de la Universidad Santo Tomas por su colaboración en el montaje y adecuación de la zona en la que se desarrolló la investigación.

## CONTENIDO

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCION .....                                                                                                                                              | 21 |
| 1. PROBLEMA DE INVESTIGACION .....                                                                                                                              | 23 |
| 1.1 DESCRIPCION DE LA PROBLEMÁTICA.....                                                                                                                         | 23 |
| 1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....                                                                                                                             | 24 |
| 1.2.1 Pregunta general. ....                                                                                                                                    | 24 |
| 1.2.2 Preguntas específicas.....                                                                                                                                | 24 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN.....                                                                                                                                          | 25 |
| 1.4 OBJETIVOS.....                                                                                                                                              | 27 |
| 1.4.1 General. ....                                                                                                                                             | 27 |
| 1.4.2 Específicos.....                                                                                                                                          | 27 |
| 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE .....                                                                                                              | 28 |
| 2.1 GESTION DE BIOSOLIDOS EN COLOMBIA.....                                                                                                                      | 28 |
| 2.2 MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE BIOSÓLIDOS<br>GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES<br>DOMÉSTICAS .....                      | 30 |
| 2.3 EXPERIENCIA PILOTO DE COMPOSTAJE DE BARROS PRIMARIOS<br>CLOACALES DE MAR DEL PLATA .....                                                                    | 31 |
| 2.4 VIABILIDAD DEL PROCESO DE COMPOSTAJE CON BIOSÓLIDOS DE LA<br>PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE SAN<br>MIGUEL DE ALLENDE .....       | 31 |
| 2.5 VIABILIDAD TÉCNICA DE COMPOSTAJE A PARTIR DE BIOSOLIDO SECO<br>PROVENIENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES<br>PTAR CAÑAVERALEJO CALI.....   | 32 |
| 2.6 FACTIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES DE<br>LA PTAR DEL MUNICIPIO DE CHINAVITA (BOYACÁ).....                                              | 33 |
| 2.7 COMPOSTAJE DE BIOSÓLIDOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE<br>AGUAS RESIDUALES.....                                                                              | 33 |
| 2.8 FACTIBILIDAD DE DISPOSICION DE LOS BIOSOLIDOS GENERADOS EN<br>LAS PTAR COMBINADAS.....                                                                      | 34 |
| 2.9 DE RESIDUOS A RECURSOS: EL OTRO CAMINO DE LOS DESECHOS<br>ORGÁNICOS URBANOS. ESTUDIO DE CASO: COMPOSTAJE DE LODOS<br>CLOACALES EN BARILOCHE, ARGENTINA..... | 35 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.10 COMPOSTAJE DE BIOSÓLIDOS: 12 AÑOS DE LA PLANTA DE BARILOCHE .....                 | 36 |
| 3. MARCO TEORICO .....                                                                 | 37 |
| 3.1 AGUA RESIDUAL.....                                                                 | 37 |
| 3.1.1 Disposición final del agua residual.....                                         | 37 |
| 3.1.2 metales disueltos. ....                                                          | 38 |
| 3.1.3 Tratamiento de lodos. ....                                                       | 38 |
| 3.2 Definición de biosolidos y lodos .....                                             | 38 |
| 3.2.1 Biosolido. ....                                                                  | 38 |
| 3.2.2 Lodos: .....                                                                     | 39 |
| 3.3 Producción de biosolidos. ....                                                     | 39 |
| 3.4 Clasificación del biosolido: .....                                                 | 39 |
| 3.4.1 Clase A: .....                                                                   | 39 |
| 3.4.2 Clase B. ....                                                                    | 40 |
| 3.5 Manejo y gestión.....                                                              | 40 |
| 3.6 Aprovechamiento y usos del biosolido.....                                          | 40 |
| 3.7 Alternativas para la disposición.....                                              | 41 |
| 3.7.1 Incineración.....                                                                | 41 |
| 3.7.2 Vertederos. ....                                                                 | 41 |
| 3.7.3 Rellenos sanitarios.....                                                         | 42 |
| 3.7.4 Compostaje.....                                                                  | 42 |
| 3.8 Compostaje.....                                                                    | 42 |
| 3.8.1 Generalidades del compostaje.....                                                | 42 |
| 3.8.2 Técnicas de compostaje por pilas: .....                                          | 43 |
| 3.8.3 Etapas del proceso de compostaje .....                                           | 44 |
| 3.8.4 Parámetros físicos de compostaje de biosolidos por pilas de volteo .....         | 45 |
| 3.8.5 Parámetros microbiológicos de compostaje de biosolidos por pilas de volteo ..... | 46 |
| 3.9 Normatividad acerca del biosolido .....                                            | 47 |
| 3.9.1 Decreto 1287 .....                                                               | 47 |
| 3.9.2 EPA 2003 Norma 40 CFR parte 503.....                                             | 48 |
| 4. metodología .....                                                                   | 53 |
| 4.1 Definición conceptual de variables.....                                            | 53 |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1 Variables independientes:                               | 53 |
| 4.1.2 Variables dependientes:                                 | 53 |
| 4.1.3 Variables intervinientes                                | 53 |
| 4.2 ADECUACIÓN DEL ÁREA DE DISPOSICIÓN.                       | 54 |
| 4.3 RECOLECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA                           | 54 |
| 4.3.1 Biosolido.                                              | 54 |
| 4.3.2 Caña.                                                   | 55 |
| 4.3.3 Pasto.                                                  | 55 |
| 4.3.4 Cascara de huevo.                                       | 55 |
| 4.3.5 Viruta y Aserrín                                        | 55 |
| 4.4 CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA                       | 56 |
| 4.4.1 Biosolido.                                              | 56 |
| 4.5 DISEÑO EXPERIMENTO                                        | 56 |
| 4.5.1 Lugar de disposición y tratamiento.                     | 57 |
| 4.5.2 Dimensiones iniciales.                                  | 57 |
| 4.5.3 Materiales de enmienda y soporte                        | 58 |
| 4.5.4 Toma de datos y muestras.                               | 58 |
| 4.5.5 Preparación de sitio de tratamiento                     | 59 |
| 4.5.6 Elaboración de pilas.                                   | 59 |
| 4.5.7 Toma de datos variables físicas.                        | 60 |
| 4.5.8 Toma de muestras y análisis microbiológico.             | 63 |
| 5. Análisis de resultados                                     | 64 |
| 5.1 caracterizacion de las variables físicas                  | 64 |
| 5.1.1 Temperatura.                                            | 64 |
| 5.1.2 pH.                                                     | 65 |
| 5.1.3 Humedad.                                                | 65 |
| 5.1.4 Variación de volumen                                    | 66 |
| 5.1.5 Relación de temperatura y humedad, promedios mensuales. | 68 |
| 5.2 variables microbiológicas                                 | 70 |
| 5.2.1 Coliformes totales.                                     | 70 |
| 5.2.2 Coliformes fecales.                                     | 71 |
| 5.2.3 Salmonella.                                             | 72 |
| 5.2.4 Remoción de microorganismos.                            | 73 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 5.3 Relación entre variables físicas y microbiológicas ..... | 75 |
| 5.3.1 Pila con caña de maíz.....                             | 75 |
| 5.3.2 Pila con poda de pasto.....                            | 76 |
| 5.3.3 Pila con cascara de huevo.....                         | 77 |
| 6. CONCLUSIONES .....                                        | 79 |
| 7. RECOMENDACIONES .....                                     | 82 |
| 8. GLOSARIO .....                                            | 84 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA .....                                        | 88 |
| 10. ANEXOS .....                                             | 91 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Características físicas ptar Colombia.....                    | 29  |
| Tabla 2 Características químicas biosolido y parámetros .....          | 29  |
| Tabla 3. Contaminación fecal biosolido Colombia .....                  | 30  |
| Tabla 4. Rangos de humedad óptimos para el compostaje .....            | 46  |
| Tabla 5. Parámetros microbiológicos del compost.....                   | 48  |
| Tabla 6. Cantidades de material de soporte y enmienda.....             | 58  |
| Tabla 7. Periodicidad y métodos para la toma de datos y muestras ..... | 58  |
| Tabla 8. Realización de laboratorios .....                             | 63  |
| Tabla 9. Datos promedio de temperatura .....                           | 64  |
| Tabla 10. Datos de pH .....                                            | 65  |
| Tabla 11. Datos promedio de humedad .....                              | 66  |
| Tabla 12. Variación de volumen.....                                    | 66  |
| Tabla 13. Variación de volumen.....                                    | 67  |
| Tabla 14. Datos de temperatura mes de octubre.....                     | 91  |
| Tabla 15. Datos de temperatura mes de noviembre .....                  | 92  |
| Tabla 16. Datos de temperatura mes de diciembre .....                  | 92  |
| Tabla 17. Datos de temperatura mes de diciembre .....                  | 93  |
| Tabla 18. Datos de temperatura mes de febrero .....                    | 93  |
| Tabla 19. Datos de PH mes de octubre .....                             | 95  |
| Tabla 20. Datos de PH mes de noviembre .....                           | 95  |
| Tabla 21. Datos de PH mes de diciembre .....                           | 96  |
| Tabla 22. Datos de PH mes de enero.....                                | 97  |
| Tabla 23. Datos de PH mes de febrero.....                              | 97  |
| Tabla 24. Semana 1.....                                                | 98  |
| Tabla 25. Semana 2.....                                                | 98  |
| Tabla 26. Semana 3.....                                                | 98  |
| Tabla 27. Semana 4.....                                                | 98  |
| Tabla 28. Semana 1.....                                                | 99  |
| Tabla 29. Semana 2.....                                                | 99  |
| Tabla 30. Semana 3.....                                                | 99  |
| Tabla 31. Semana 4.....                                                | 99  |
| Tabla 32. Semana 5.....                                                | 99  |
| Tabla 33. Semana 1.....                                                | 100 |
| Tabla 34. Semana 2.....                                                | 100 |
| Tabla 35. Semana 3.....                                                | 100 |
| Tabla 36. Semana 4.....                                                | 100 |
| Tabla 37. Semana 1.....                                                | 101 |
| Tabla 38. Semana 2.....                                                | 101 |
| Tabla 39. Semana 1.....                                                | 101 |
| Tabla 40. Semana 2.....                                                | 101 |
| Tabla 41. Semana 1.....                                                | 102 |
| Tabla 42. Semana 1, toma 2.....                                        | 102 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 43. Semana 2.....                                           | 102 |
| Tabla 44. Resultados laboratorio 1 pila con cascara de huevo..... | 103 |
| Tabla 45. Resultados laboratorio 1 pila con caña .....            | 103 |
| Tabla 46. Resultados laboratorio 1 pila con cascara de pasto..... | 104 |
| Tabla 47. Resultados laboratorio 2 pila con cascara de huevo..... | 104 |
| Tabla 48. Resultados laboratorio 2 pila con caña .....            | 105 |
| Tabla 49. Resultados laboratorio 2 pila con pasto .....           | 105 |
| Tabla 50. Valores de patógenos muestra natural .....              | 106 |

## LISTA DE IMÁGENES

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| imagen 1. Ubicación Campus Universidad Santo Tomas Tunja .....           | 54 |
| Imagen 2. Ubicación PTAR Salitre Bogotá .....                            | 55 |
| Imagen 3. Dimensiones planteadas para el proceso .....                   | 57 |
| Imagen 4. Preparación del sitio de tratamiento .....                     | 59 |
| Imagen 5. Elaboración de pilas.....                                      | 60 |
| Imagen 6. Diseño final de pilas de biosolido con soporte y enmienda..... | 60 |
| Imagen 7. Multiparametro medición de pH .....                            | 61 |
| Imagen 8. Multiparametro medición de temperatura.....                    | 61 |
| Imagen 9. Materiales para determinar humedad .....                       | 62 |
| Imagen 10.Realización de volteos .....                                   | 62 |

## LISTA DE GRAFICAS

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Grafica 1. Promedio temperatura.....                                       | 64 |
| Grafica 2. Promedio de pH .....                                            | 65 |
| Grafica 3. Promedio humedad .....                                          | 66 |
| Grafica 4. Variación de volumen. ....                                      | 68 |
| Grafica 5. Valores de Temperatura y Humedad.....                           | 69 |
| Grafica 6. Contenido de coliformes totales .....                           | 71 |
| Grafica 7. Contenido de coliformes fecales .....                           | 71 |
| Grafica 8. Contenido de salmonella.....                                    | 72 |
| Grafica 9. Remoción de microorganismos patógenos .....                     | 73 |
| Grafica 10. Contenido de coliformes fecales y totales final Vs normas..... | 74 |
| Grafica 11. Contenido de Salmonella Vs normas .....                        | 74 |
| Grafica 12. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas .....    | 76 |
| Grafica 13. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas .....    | 77 |
| Grafica 14. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas .....    | 78 |

## RESUMEN

En la presente investigación se analiza el compostaje como alternativa para el manejo y disposición de los biosólidos, con el cual se busca mejorar las características físicas y microbiológicas del biosólido, con el fin de que se pueda clasificar como un compost de uso agrícola.

El compostaje es un proceso en el que se regula el contenido microbiológico de materia orgánica por medio del control de variables físicas tales como pH, humedad y temperatura, este control se hace periódicamente, con el fin de establecer cambios que presente el material y verificar que los valores estén dentro de los rangos establecidos por la norma, de no ser así adoptar las soluciones que se adapten mejor a la situación.

El estudio se llevara a cabo teniendo como materia prima biosólido producido por la planta de tratamiento de agua residual PTAR EL SALITRE de Bogotá, siendo este el resultado final de la deshidratación de lodo cloacal. El proceso de tratamiento de la PTAR EL SALITRE es convencional, pasando por el cribado, la sedimentación, tratamiento químico asistido de lodos y la deshidratación, obteniendo finalmente materia biofísica con altos contenidos de humedad conocida como biosólido.

Dentro de la planta se hacen los análisis correspondientes para determinar el grado de peligrosidad con el que el biosólido es producido, según los parámetros establecidos por la norma 503 de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de Estados Unidos y recientemente por el decreto 1287 del 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en Colombia, los resultados arrojados muestran que el biosólido es de clase B, el cual no permite usar en lugares públicos donde se puedan tener contacto directo con el material, ya que tiene altos contenidos de patógenos.

Con el fin de estabilizar el contenido microbiológico al interior del biosólido y garantizar un material que pueda ser empelado para agricultura y rehabilitación de suelos (biosólido clase A), se elaboraron tres pilas con igual cantidad de material base (biosólido) al que se le adiciono un material de soporte (caña, pasto, cascara de huevo) y enmienda (aserrín, viruta), con variación de proporciones en cada pila, garantizando dimensiones de metro cúbico ( $1\text{m}^3$ ) de material.

El proceso de análisis y desarrollo abarca un periodo de 6 meses en los cuales se toman datos de pH y temperatura diariamente y humedad semanalmente, con el análisis de dichas variables se establece la periodicidad con la que se hacen volteos para equilibrar las cargas microbiológicas en el interior y exterior de la pila. Los análisis microbiológicos de patógenos se realizan en los últimos dos meses de estudio, para establecer el cambio generado durante el proceso, considerando los

cuatros meses posteriores como un tiempo adecuado en el que el material se estabiliza.

El análisis del comportamiento de las variables físicas estudiadas (pH, humedad y temperatura) muestra una correlación directa en la que se establece que durante unos rangos determinados se comportan de manera más adecuada, mostrando que el pH tiene resultados más favorables cuando la temperatura varía entre los 35 y 45°C. Así mismo en la temperatura se observan mejores resultados cuando el contenido de humedad esta entre 45 y 60%.

En el proceso se da una reducción de volumen entre el 40 y 50% a causa de la disminución excesiva de humedad considerando que el biosolido trae un contenido de agua alto, ocasionando que el proceso se comporte de maneras no esperadas, haciendo necesario implementar más material para estabilizar y lograr culminar con buenos resultados. La reducción de patógenos es constante dentro del proceso, el cual disminuyó en un millón la cantidad presente al comienzo.

Aunque todas las pilas presentan disminución de patógenos la pila que cumple con los propósitos planteados fue la pila con material de soporte cascara de huevo en relación 1:0.3:0.7 (biosolido: soporte: enmienda).

**Palabras claves:** biosolido, compostaje, microbiológicas, temperatura, pH, humedad.

## ABSTRACT

The research discusses some alternatives for the management and disposal of biosolids produced by wastewater treatment plants. Based on the theoretical review, the best alternative was chosen in terms of cost-benefit ratio and profit-time.

Composting is a process in which the microbial content of organic matter is regulated by controlling physical variables such as pH, humidity and temperature. This control is periodically performed to identify changes in the material, ensuring an appropriate behavior and analyzing the problem to generate solutions to address the situation.

The study was carried out starting with biosolids as raw material produced by the wastewater treatment plant (WWTP) El Saltire in Bogota. This material is the result of the sewage sludge dehydration. The treatment process in the plant is conventional through screening, sedimentation, chemical assisted treatment sludge and dehydration, finally getting biophysical matter with high content of moisture, what is known as biosolids.

Inside the plant the corresponding analyzes are done to determine the hazardous degree to which the sewage sludge is produced, according to the parameters of the regulation 503 of the Environmental Protection Agency (EPA) of the United States and recently by the "Decreto 1287, 2014 of the Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en Colombia". The results show that it this biosolid is class "B" which is not allowed to be used in public places where people might have direct contact with this.

In order to stabilize the microbiological content within the sewage sludge and to ensure a material that might be used for agriculture and soil remediation (biosolids class A), three piles with equal amount of base material (biosolids) and a support material was added and an amendment with different proportions in each pile, ensuring dimensions that result in the total use of one cubic meter (1m<sup>3</sup>) of material. The process of the analysis and development last for a period of six months in which different data was weekly collected such as pH, temperature and humidity. With these the mixing frequency was established to balance the microbiological loads inside and outside the piles. The microbiological analysis was performed in the last two months of the study to establish the change generated

during the process, considering four months after as the more suitable time to stabilize the material.

The behavior of the physical variables studied (pH, humidity and temperature) shows a direct correlation in which it is stated that during specified ranges behave more appropriately, considering investigations already carried out, showing that the pH has results more favorable when the temperature varies between 35 and 45 ° C, also in temperature better results are observed when the moisture content is between 45 and 60%.

Process occurs in a volume reduction between 30 and 40% due to excessive lowering of moisture whereas the biosolids brings a high water content, causing the process behaves in unexpected ways, by implementing more materials to stabilize and achieve good results culminate in the pathogen reduction process was constant within reaching up to one million reduce the amount present in the beginning.

Although all cells had decreased bacterial pathogens that met the proposals made was the one that had material shell egg holder in relation third (1/3) of biosolids and amendment material combination sawdust and shavings in ratio of 50% to the volume of biosolids.

Keywords: biosolids, composting, microbiological, temperature, pH, moisture.

## INTRODUCCION

Actualmente en el mundo la producción de biosólido va en crecimiento, lo cual hace más visible la inadecuada disposición final que tienen estos recursos, ya que son dispuestos de manera incorrecta en los terrenos y en las fuentes hídricas más cercanas a las PTAR, lo que conlleva a una contaminación ambiental, estos residuos son producidos luego del tratamiento de las aguas residuales, por ello presentan altas concentraciones de patógenos, los cuales generan enfermedades que afectan la calidad de vida de los seres humanos e intervienen en el crecimiento de vegetación en terrenos.

El biosólido se produce en plantas que tratan grandes cantidades de agua con poblaciones atendidas altas, el producto resultante es una materia biofísica con gran contenido de humedad, que dependiendo de su procedencia llegan a tener grandes contenidos de metales pesados y patógenos y al disponerlos de manera empírica sobre terrenos dañan la vegetación existente y causan erosión en los suelos. Además de contener elementos dañinos y peligrosos, por provenir de fuentes con contenidos de materia orgánica se están estudiando posibilidades y soluciones que aprovechen este material, utilizándolo como ayudante en el crecimiento de plantas, reforestación y rehabilitación de suelos entre otros.

De acuerdo con el estudio realizado en Bariloche Argentina sobre el compostaje de biosólidos se implementó la planta de tratamiento para biosólido hace 14, en la que se producen actualmente 3000 m<sup>3</sup> de biosólido al año, este material es comercializado en las zonas aledañas como abono orgánico para cultivos<sup>1</sup>. Esta investigación es un referente para la el estudio, completándolo con la regulación colombiana aprobada en julio de 2014<sup>2</sup>.

La materia prima que se utiliza proviene de la planta de tratamiento de aguas residuales el salitre Bogotá que atiende una población de dos millones 2'000.000 de personas con predominancia de agua doméstica lo que favorece el proceso puesto que el biosólido producido tiene contenidos nutritivos altos y bajo contenido de metales pesados. La producción total de biosólido en base humedad es de aproximadamente 160 ton/mes( 90 ton/mes en base seca), hasta el año 2011 se disponía como cobertura de celda diaria en el relleno sanitario doña Juana pero al colapsar, este se empezó a disponer en un predio aledaño propio del acueducto de Bogotá, quien maneja la ptar.

---

<sup>1</sup> MAZZARINO María Julia, SATTI Patricia, LAOS Francisca, ROSELLI Lucía. 2012. Compostaje de biosólidos. Bariloche : Orientación Gráfica Editora, 2012. p.99-106.

<sup>2</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. 2014. criterios sobre el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Bogotá : Diario Oficial No. 49.208 de , 2014.

El compostaje es una de las alternativas más utilizadas en investigaciones académicas para la estabilización del biosólido cuya principal función es eliminar microorganismos patógenos, por medio del aumento de la temperatura producto del ambiente natural. Para acelerar el proceso y para hacerlo más productivos se emplean soportes, que aumentan la cantidad de nutrientes y colaboran con la aireación, se hacen volteos periódicos para que la temperatura aumente uniformemente en toda la pila, ya que esta actúa en función inversa de la humedad estos son factores que se deben conservar constantes entre sí para asegurar un proceso óptimo.

Esta investigación se enfoca en el análisis del proceso de compostaje de biosólidos por pilas de volteo. Donde se estudian tres pilas en la etapa inicial, a las cuales se les incorpora un material de enmienda (cáscara de huevo, caña, pasto) y de soporte (aserrín, viruta) los cuales se implementaron con el fin de acelerar el proceso.

Durante todo el proceso se determinan las propiedades físicas (temperatura, pH, humedad) las cuales se verifican diariamente para determinar si el material está estable y posteriormente se llevan a cabo los análisis microbiológicos (salmonella, E-Coli, coliformes totales) para determinar la reducción de patógenos.

Finalmente como resultado se obtiene el análisis de las variaciones de las características físicas y microbiológicas del biosólido, con las cuales se determina con que material de soporte hay una mayor eliminación de patógenos.

## **1. PROBLEMA DE INVESTIGACION**

### **1.1 DESCRIPCION DE LA PROBLEMÁTICA**

La evolución de la sociedad y el constante crecimiento poblacional conlleva al uso inadecuado del agua, haciendo que cada día aumenten sus niveles de contaminación, debido a que allí se disponen una gran cantidad de contaminantes generados por las actividades industriales y domésticas.

Para el tratamiento de efluentes residuales se hace indispensable el desarrollo de tecnologías y procesos que permitan su depuración, con el fin de mejorar sus características antes del vertimiento en los cuerpos de agua, minimizando los posibles impactos ambientales y sociales. La operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), consiste básicamente en remover contaminantes orgánicos biodegradables, generando lodos y residuos sólidos que deben ser dispuestos en forma adecuada.

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) EL SALITRE Bogotá, es una de las mejores en cuanto a características de tratamiento a nivel nacional ya que es una de las más grandes, como lo menciona el informe hecho por la empresa de acueducto y alcantarillado<sup>3</sup> la PTAR EL SALITRE tiene un proceso primario de remoción por cribado o colado y sedimentación, para posteriormente tratar los lodos con un sistema secundario donde se reducen patógenos y metales pesados presentes hasta casi un 80% por medio de lagunas aerobias, para luego verter las aguas de manera directa al río Bogotá, quedando el residuo sólido (biosólido).

La PTAR EL SALITRE está diseñada para tratar un caudal medio de 4 m<sup>3</sup>/s, con lo cual se genera gran producción de lodos cloacales, al tratarlos y deshidratarlos se generan alrededor de 160 toneladas de biosólido en base húmeda puesto que este es el producto sólido que resulta luego de separar el agua contenida en el lodo cloacal.

Los lodos cloacales producidos en las PTAR tienen su respectivo tratamiento, a diferencia de los biosólidos que no tienen un tratamiento ni una adecuada disposición final esto conlleva a una contaminación ambiental y daños en la salud pública produciendo enfermedades como: gastroenteritis, diarreas, dolores de cabeza y deficiencias inmunológicas.

---

<sup>3</sup> EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO. DESCRIPCION DE LA PTAR SALITRE Y RECOPIACION DE LOS PRINCIPALES ASPECTOS OPERATIVOS. INFORME GENERAL. BOGOTÁ; 2007

Como dice Daguer<sup>4</sup> la cantidad de biosólido que se produce en Colombia es muy alta alcanzando valores de hasta 274 ton/d en base húmeda y sin tener un procedimiento de uso adecuado, se disponen de manera errónea sobre suelos, en rellenos sanitarios o en cuerpos de agua.

Con el fin de establecer posibles soluciones para el uso y disposición de biosólido se hace un análisis de las alternativas que se han utilizado y de las cuales investigaciones anteriores han hecho uso, estableciendo una en la cual las relaciones: beneficio-tiempo y beneficio-costos sean mayores, teniendo especial cuidado con el producto final obtenido en relación con la afectación ambiental.

Con base en el análisis y los resultados que obtenidos con las alternativas de disposición actuales, Se toma para el desarrollo del proyecto la técnica de compostaje por pilas de volteo, teniendo en cuenta los parámetros aconsejados por los referentes nacionales e internacionales los cuales son en su mayoría pruebas teóricas.

Hoy por hoy no se conoce de ninguna PTAR a nivel nacional que disponga el biosólido con alguna de las alternativas analizadas, por lo tanto se toma como referente principal la planta de manejo de biosólido de Bariloche, Argentina, que entro en funcionamiento desde el año 1997 y estabiliza el biosólido por medio del compostaje por pilas para posteriormente comercialízalo, produciendo alrededor de 3000  $m^3$ /año de material sin tamizar.

## **1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

**1.2.1 Pregunta general.** ¿Qué influencia tienen los parámetros físicos (pH, humedad y temperatura) en la reducción de microorganismos patógenos (Coliformes fecales, Coliformes totales y salmonella)?

### **1.2.2 Preguntas específicas**

- ¿Es posible reducir el contenido de microorganismos patógenos presente en el biosólido a través del compostaje por pilas de volteo?
- ¿Cuál es el comportamiento de las variables físicas y microbiológicas cuando se usan cantidades de biosólido menores a las utilizadas por otros autores?
- ¿Qué influencia tienen las variables físicas (pH, humedad y temperatura) en el comportamiento microbiológico de las pilas de biosólido?

---

<sup>4</sup> DÁGUER, G. P. Gestión De Biosólidos En Colombia. Sociedad, Ambiente Y Futuro ACODAL., 2013 p. 7.

- ¿Por qué es necesaria la adición de materiales de soporte o enmienda en el proceso de compostaje?
- ¿Cuáles son las ventajas que ofrece el compostaje por pilas de volteo con respecto a otras formas de tratamiento?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El deber de los ingenieros civiles es velar por la protección ambiental en la mayor cantidad de aspectos posibles, es por esto que la contaminación generada por el vertido indebido de biosólidos en áreas en las que no se tiene control es preocupante por lo tanto se desarrollan varias formas para reducir el daño que ocasiona, teniendo en cuenta aspectos propios de la zona como: economía, maquinaria, ubicación y demás recursos en general.

La contaminación ambiental generada a causa de la producción de lodos cloacales y biosólidos crea la necesidad de implementar una mitigación, se plantea el desarrollo de un método para la reducción microbiológica del material producto del tratamiento de aguas residuales, para poder eliminar la mayor cantidad de patógenos y contaminantes, con el fin de producir un material estable que tenga un uso provechoso evitando su disposición inadecuada.

La presente investigación usara como referentes: la norma EPA 40 CFR-503 de estados unidos y el decreto 1287 aprobado recientemente el 10 julio de 2014 por el ministerio de vivienda ciudad y territorio de Colombia, donde se establecen las regulaciones para el control de contenido químico y microbiológico para su aprovechamiento, generando una clasificación del biosólido, encontrando dos clases A y B, cuya diferencia radica en la exposición que puede llegar a tener cada tipo en donde la clase B no puede tener contacto directo con seres vivos.

Sabiendo cuales son las técnicas para la disposición de biosólido que generen un beneficio, la selección de un método para la investigación tuvo en cuenta el alcance del proyecto y las ventajas en parámetros como calidad del producto y tiempo de producción.

Entre las técnicas de tratamiento más destacadas según la revisión teórica, se encuentran:

- El compostaje el cual se puede hacer de tres formas diferentes: por pilas de volteo, por pilas estáticas y por pilas aireadas automáticamente.

- La incineración en la que se reduce el material por medio de temperaturas elevadas en presencia de exceso de aire generando cenizas.
- Disposición en rellenos sanitarios que ocupa espacio y acortan su vida útil.
- Disposición directa en terrenos, potenciando posibles daños en el suelo y subsuelo como erosión o desecación
- Vertido en cuerpos hídricos aledaños, contaminando el agua que se utiliza para consumo y para riego.

Teniendo en cuenta que factores son los que intervienen en cada proceso y conociendo las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas descritas, se decidió implementar la técnica de compostaje por pilas de volteo, siendo efectiva por los resultados en la reducción de microorganismos patógenos, y a su vez porque es una técnica muy económica puesto que no necesita una fuente de energía externa, para su desarrollo utiliza energía directamente proveniente del ambiente, disponiendo las pilas al aire libre, por otra parte garantiza rápidos resultados en corto tiempo oscilando entre 4 y 5 meses dependiendo de los contaminantes que se encuentren en el proceso de caracterización, además la mayor ventaja que tiene esta técnica es que proporciona un producto viable empleado en el tratamiento de suelos dañados y en la agricultura utilizándolo como fertilizante por el contenido de nutrientes como nitrógeno y fósforo y su alto contenido de materia orgánica.

El compostaje de biosólidos por pilas de volteo es una técnica ya utilizada en estudios académicos a nivel nacional teniendo registros importantes de en ciudades como Medellín, Bogotá y Cali e internacionalmente en países como Argentina, España, México, EEUU y Europa; siendo Argentina la única en la que se conoce una planta funcional que se dedica únicamente al manejo de biosólido, produciendo y comercializando alrededor de  $3000 \text{ m}^3/\text{año}$ .

La investigación se lleva a cabo en la ciudad de Tunja, en donde la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) está en proceso con planes de puesta en marcha en los próximos meses, en la cual no se conoce aún un plan de manejo para el biosólido, es por esto que la investigación toma la materia prima de la PTAR EL SALITRE de la ciudad de Bogotá, y así generar una posible solución al manejo de biosólido que también se pueda aplicar en cualquier ciudad y que en un futuro no se convierta en un problema y al contrario se convierta en una ventaja.

## **1.4 OBJETIVOS**

**1.4.1 General.** Evaluar la viabilidad del compostaje en la reducción de microorganismos patógenos (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella), analizando la variación de las características físicas (pH, humedad y temperatura) y adicionando al biosólido diferentes materiales de enmienda (cáscara de huevo, caña de maíz y poda de pasto), con dimensiones diferentes a las registradas en investigaciones hechas por otros autores.

### **1.4.2 Específicos.**

- Realizar un estudio del proceso de compostaje de biosólido, definiendo los porcentajes de los materiales de enmienda y soporte para mejorar las características que posibiliten el uso beneficioso del compost.
- Determinar el contenido de patógenos (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella) que trae el biosólido proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) el salitre Bogotá, mezclado con el material de soporte
- Realizar un diagnóstico del proceso de compostaje de biosólidos definiendo rangos óptimos para las variables físicas (pH, temperatura y humedad) y microbiológicas (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella).
- Comparar el comportamiento de las variables físicas (pH, temperatura y humedad) y microbiológicas (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella) cuando se utilizan dimensiones menores a las usadas por otros autores.
- Comparar las variables físicas (pH, temperatura y humedad) y microbiológicas (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella) del compost, con respecto a las regulaciones planteadas en la norma EPA 40 CFR-503 de estados unidos y el decreto 1287 de Colombia.
- Determinar que material presenta los mejores resultados para el cumplimiento de los rangos de pH, temperatura, humedad y contenido de patógenos (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella) durante el proceso de compostaje.

## **2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE**

Con el fin de establecer y definir que variables son necesarias tener en cuenta para el proceso del compostaje, se hace una recopilación de información teórica, estableciendo el proceso realizado en la planta de tratamiento de biosólido de argentina como la principal guía para esta investigación. Además se hace una breve reseña de investigaciones hechas a nivel nacional para tener una idea más clara de la viabilidad del proceso.

### **2.1 GESTION DE BIOSOLIDOS EN COLOMBIA<sup>5</sup>**

En la actualidad, las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Colombia generan 274 toneladas de biosólidos al día (94 toneladas base seca). El 97% de esta producción es generada por tres plantas: El Salitre (Bogotá), Cañaveralajo (Cali) y San Fernando (Medellín). Las cuales se han preocupado de alguna manera por reducir los daños ambientales causados por la disposición desarrollando proceso de reusó o reutilización tales como aplicación en las estructuras como árido ligero o como suplemento en la elaboración de ladrillos y morteros.

Caracterizar los biosolidos es fundamental para una adecuada gestión. Dependiendo de su calidad, se da prelación a una u otra alternativa de aprovechamiento. El control de los biosólidos de las PTAR se basa en el análisis de parámetros físicos, químicos, agrológicos y microbiológicos. Tal como se observa en la tabla 1, los biosólidos de las grandes plantas del país presentan valores de humedad similares; por el contrario, la producción varía dependiendo del sistema de tratamiento de aguas residuales y del caudal afluente.

---

<sup>5</sup> DÁGUER, Op. Cit., p 5.

**Tabla 1. Características físicas ptar Colombia**

| Parámetro                                    | Biosolidos<br>PTAR el salitre<br>Datos Sep.<br>2000-Dic 2002 | PTAR San<br>Fernando<br>(Medellín) Datos<br>de 2005 | PTAR<br>Cañavalejo<br>(Cali) Datos de<br>2003 | PTAR Rio Frio<br>(Bucaramanga )<br>Datos de 2003 |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Humedad (%)                                  | 67                                                           | 68                                                  | 66                                            | 29                                               |
| Sequedad (%)                                 | 33                                                           | 32                                                  | 34                                            | 71                                               |
| Producción<br>Toneladas/día<br>(Base húmeda) | 130                                                          | 80                                                  | 60                                            | 2                                                |
| Producción<br>Toneladas/día<br>(Base seca)   | 43                                                           | 28                                                  | 20                                            | 1.4                                              |

FUENTE: Dáguer, Gestión de biosólidos en Colombia.

Con respecto a las características químicas, como se observa en la Tabla 2 las concentraciones de la totalidad de los metales pesados analizados en los biosólidos de Colombia se mantienen por debajo de los límites máximos permitidos por las principales regulaciones internacionales y en la mayoría de parámetros por debajo de las concentraciones promedio de metales pesados de los biosólidos de EEUU y la Unión Europea.

**Tabla 2 Características químicas biosolido y parámetros**

| Contaminante<br>Mg/Kg | Colombia | EEUU | Unión<br>Europea | NORMA EPA<br>40CFR- 503<br>PC-EQ<br>QUALITY | Límites<br>recomendados<br>Unión<br>Europea<br>86/278/CEE |
|-----------------------|----------|------|------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Arsénico              | 0.47     | 4.9  | Nd               | 41                                          | No regulado                                               |
| Cadmio                | 2.78     | 25   | 4                | 39                                          | 20-40                                                     |
| Cobre                 | 180      | 616  | 380              | 1500                                        | 1000-1750                                                 |
| Cromo                 | 849      | 178  | 145              | No regulado                                 | No regulado                                               |
| Mercurio              | 0.85     | 2.3  | 2.7              | 17                                          | 16-25                                                     |
| Níquel                | 65.4     | 71   | 44               | 420                                         | 300-400                                                   |
| plomo                 | 84       | 204  | 97               | 300                                         | 750-1200                                                  |

FUENTE: Bogota, empresa de acueducto y alcantarillado

Con respecto a las características microbiológicas, las concentraciones de coliformes fecales de los biosólidos de la mayoría de las PTAR de Colombia son las típicas de un biosolido de clase B; sin embargo, con respecto a los huevos de helminto, los biosolido de las PTAR San Fernando y El Salitre tienen características de clase A tal como se observa en la tabla 3; no obstante, no se cuenta con datos de huevos de helminto de los biosolido de las otras plantas del país.

**Tabla 3. Contaminación fecal biosolido Colombia**

| Indicador                         | Rango Colombia                        | NORMA EPA 40CFR-503                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes fecales (NPM/g)        | $1.5 \times 10^5$ - $5.1 \times 10^5$ | <2.000.000 Clase B<br><1000 Clase A |
| Huevos de helminto<br>(Huevos/4g) | <1                                    | <1 Clase B<br><1 Clase A            |

FUENTE: bogota, empresa de acueducto y alcantarillado

Los biosolido de Clase A, pueden ser usados sin ninguna restricción (cultivos de consumo directo). Los biosolido de clase B pueden ser usados en recuperación de suelos, plantaciones forestales, cultivos que no se consuman directamente y cobertura de rellenos sanitarios; sin embargo, las concentraciones de indicadores de contaminación fecal limitan su aprovechamiento por un tiempo en cultivos agrícolas de consumo directo como las hortalizas.

## **2.2 MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS<sup>6</sup>**

se exponen el comportamiento del biosolido producto de PTAR en Cali cuando se le adiciona un elemento alcalino, en la investigación se analiza la variación de la componentes físicos, químicos y microbiológicos, los materiales utilizados fueron cal viva e hidratada y dos tipos de cenizas, el análisis se realizó por 13 días en los cuales se tomaron datos de temperatura, pH, humedad, muestras para laboratorios químicos y microbiológicos, concluyendo que los mejores resultados fueron los reportados por la pila con adición de cal viva en donde se redujeron los contenidos patógenos totalmente, en cuanto a las variables físicas se descubre que con la adición de cal se aumenta sustancialmente la temperatura y el pH pero se disminuye la humedad.

Los rangos que se determinaron durante el proceso fueron de: temperatura entre 30 y 60°C en promedio, para la humedad los rangos que se toman son de entre 40 y 60%, el pH alcanzo valores de 12, las variables microbiológicas de análisis disminuyeron hasta quedar prácticamente nulo.

---

<sup>6</sup> TORRES, P., MADERA, C., y SILVA, J. Mejoramiento De La Calidad Microbiológica De Biosólidos Generados En Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas. En: EIA. Julio, 2009. no. 11, p. 21-37.

### **2.3 EXPERIENCIA PILOTO DE COMPOSTAJE DE BARROS PRIMARIOS CLOACALES DE MAR DEL PLATA<sup>7</sup>**

Analizan el comportamiento de las variables físicas, químicas y microbiológicas de biosólido producido en por PTAR en la ciudad de mar de plata argentina se hacen pilotos con la aplicación de biosólido en hileras de aproximadamente 10 m de ancho y adición de un material de enmienda y soporte (chips de poda) el proceso duro alrededor de 6 meses en los cuales se tomaron datos de pH, temperatura, humedad, contenido microbiológico y contenido de nutrientes al terminar el proceso los resultados muestran que el que mejor se comporta es el que tiene relación de soporte: biosólido 1:1 con chips de poda fresco.

Los rangos que se obtienen al finalizar el proceso en la ciudad de mar de plata son: para el pH manejo rango de entre 6.5 y 8, la humedad entre 70 y 40% en promedio, la temperatura entre 40 y 60°C, el contenido de patógenos se redujo hasta alcanzar los recomendados por la norma americana EPA 503.

### **2.4 VIABILIDAD DEL PROCESO DE COMPOSTAJE CON BIOSÓLIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE SAN MIGUEL DE ALLENDE<sup>8</sup>**

En México se desarrolló el estudio de lodos cloacales determinando que son aptos para ser compostados con el fin de reducir al máximo los componentes patógenos presentes, se utilizaron dos materiales para dar consistencia y manejabilidad como lo son el pasto que contribuye con la descomposición y aporta carbono y nitrógeno el segundo material es una piedra porosa que favorece el aireamiento con relación de uso 1:2:0.5 respectivamente, el proceso de compost fue al aire libre y adicionalmente se hizo una prueba con trozos de maleza para verificar su comportamiento, concluyendo:

- Las temperaturas varían entre 45 y 55°C con un máximo de 68°C lo que está dentro de los límites que da la norma americana EPA para compost.
- La humedad varía en relación al tiempo, disminuyendo ya que el material de soporte tienen una humedad diferente a la del lodo.
- El pH varía subiendo al comienzo del tratamiento y luego empieza a bajar hasta el punto en el que su variación es casi imperceptible, para el caso de

---

<sup>7</sup> PERALTA, E. et al. Experiencia Piloto de Compostaje de Barros Primarios Cloacales de Mar del Plata. 2000. Informe técnico.

<sup>8</sup> RAMIREZ, V.A. RODRIGUEZ, F.J. Viabilidad del proceso de compostaje con biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de San Miguel de Allende, México. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima, 2011. p. 665-669.

estudio de México se encuentran valores de pH al comienzo entre 7.44 y 8.10 y a los 14 y 21 días se encuentran entre 8.40 y 8.90.

- Se observó que la DQO<sub>5</sub> es removida eficiente mente en relación con la temperatura concluyendo que la mayor degradación de la materia es cuando se encuentra una temperatura más alta.
- La remoción de coliformes fecales es muy efectiva en el proceso de composta concluyendo que entre los 14 y 21 días ya se han removido la mayoría

Con base en los criterios mencionados por el artículo del ingeniero Ramírez se establecen los parámetros mínimos que debe cumplir un compost para considerarlo estable física y microbiológicamente, y dar una noción del comportamiento esperado durante el proceso de compostaje, lo que da un juicio para saber si el proceso está siendo bien elaborado o está ocurriendo algún tipo de alteración, para corregirlo antes de que cause un problema que afecte el proyecto.

## **2.5 VIABILIDAD TÉCNICA DE COMPOSTAJE A PARTIR DE BIOSOLIDO SECO PROVENIENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PTAR CAÑAVERALEJO CALI<sup>9</sup>**

Analiza las variables que intervienen en la elaboración de compostaje de biosolido producido por PTAR, para un tipo de compostaje definido como bocachi, en el cual se utilizan cantidades mínimas de biosolido para verificar si es capaz de estabilizarse o de mejorar sus condiciones en cortos tiempos. Al analizar los resultados y conclusiones se puede observar que en cuanto a temperatura presentan rangos entre 20 y 50°C, para el pH se aprecia que los resultados óptimos están en rangos de 7 y 8, en cuanto a humedades se concluye que los rangos que establecen son los impuestos por la literatura guía para la investigación puesto que para el proyecto que se realizó no se obtuvieron datos numéricos sino, datos de tipo cualitativo haciendo pruebas manuales, en cuanto al comportamiento de las variables microbiológicas solo uno de los 4 pilotos propuestos funciona para la reducción de coliformes fecales y totales teniendo en cuenta las disposiciones de las normas guía, los volteos fueron hechos cada dos días, con un tiempo de análisis de 13 días.

---

<sup>9</sup> VALENCIA, Judith Marcela. Estudio para la Viabilidad Técnica de Compostaje a partir de Biosolido seco Proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR. trabajo de grado, San Buenaventura: Universidad de Cali, Facultad de Administración Agroindustrial. 2012. 87 p.

## **2.6 FACTIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PTAR DEL MUNICIPIO DE CHINAVITA (BOYACÁ)<sup>10</sup>**

Se realizó en el municipio de Chinavita., Boyacá un estudio de factibilidad para el aprovechamiento y re-usó de biosolido producto de planta de tratamiento de agua residual (PTAR) para este caso se realiza la caracterización inicial del contenido químico y microbiológico, luego se analizan los diferentes tratamientos que se han utilizado para disposición, teniendo en cuenta tratamiento térmicos, compostaje, químicos, aerobios y anaerobios para la reducción de patógenos, el proyecto toma como referente la norma americana EPA 503 para las regulaciones de uso de acuerdo a la clasificación del lodo que se establece definiendo el destino de los lodos, los resultados finales arrojan que el biosolido producido es de clase B por su contenido de patógenos y metales pesados, y define el uso de tratamiento químico con cal para la reducción y que sea utilizable como clase A en agricultura.

## **2.7 COMPOSTAJE DE BIOSÓLIDOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES<sup>11</sup>**

Según el estudio realizado en la planta de tratamiento de cañaveralejo de la ciudad Cali Colombia, se analizaron variables físicas y químicas en el biosolido, implementado la técnica de compostaje por pilas de volteo, durante el proceso se tuvo un constante monitoreo del contenido de metales pesados, puesto que generan alta contaminación en el suelo causando desertificación y erosión.

Para la mitigación de los daños causados directamente en el suelo se propuso la incorporación de materiales de enmienda, como fueron aserrín, poda y cachaza, para darle soporte al material, ya que este aumenta la porosidad de la muestra y genera mayor aireación, a su vez permite el desarrollo de bacterias las cuales digieren la materia orgánica. Adicionalmente se incluyó un estabilizante químico de cal para disminuir la cantidad de metales pesados, olor, humedad y aumentar la temperatura interna.

Los resultados de esta investigación arrojaron resultados positivos en el uso de compost como remplazo parcial del abono químico en la producción agrícola, haciendo la implementación de estos en vegetales como: rábano y acelga, en donde se observó que sus propiedades de desarrollo aumentaron

---

<sup>10</sup> PEDRAZA, Martha Lucia. factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del unicipio de chinavita (Boyaca). Tesis de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales: Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias Contables Economicas y Administrativas, 2013. 74 p.

<sup>11</sup> VIDAL, A. P. et al. compostaje de biosolido de planta de tratamiento de agua residual. (2007). Cañaberalejo, Cali.

considerablemente, disminuyendo los costos de producción, todo esto con el fin de determinar que los mejores resultados se obtienen cuando el biosolido es combinado con algún material de soporte y enmienda que le aporte manejabilidad y estabilidad al compost.

Para la implementación del compostaje de biosolido de la PTAR Cañaveralejo de Cali, se define la necesidad de aportar materiales que le den manejabilidad y estabilidad al biosolido puesto que el material al natural es bastante húmedo y con tendencias a la compactación se escogen la cachaza y los residuos de poda como los mejores en cuanto a los resultados que arrojaron al finalizar el proceso analizando las variables físicas, orgánicas y microbiológicas, los rangos utilizados fueron: pH se tienen rangos de entre 6,5 y 8, la temperatura de 40°C a 60°C, se alcanzaron los resultados de estabilización microbiológica esperados, lo cual era lo primordial, en el caso de la humedad se observa que tiende a disminuir y que es mayor al iniciar el proceso, además de que se debe controlar a lo largo de la investigación manteniéndola en rangos entre 30 y 60%, reducción de volumen es alta entre el 50 y 70% del material inicial debido a la disminución de humedad.

## **2.8 FACTIBILIDAD DE DISPOSICION DE LOS BIOSOLIDOS GENERADOS EN LAS PTAR COMBINADAS.**<sup>12</sup>

En Medellín se realizó la prueba a la planta de tratamiento, realizando un compostaje en pilas de dimensiones de: 1.2 m de alto por 1.2 ancho y de 10m de largo con volteo manual, el área de compostaje se adecuó de manera tal que se impermeabilizara y se pudiera tener un manejo adecuado de los lixiviados con tuberías de 2" y pendientes de 1 y 2% haciendo 3 tipos diferentes de pilas con proporciones de biosolidos y material de soporte (equinaza) realizando volteo una vez por semana, se desarrolló un buen compost sin presencia de lixiviados, la temperatura alcanzo un valor máximo de 50 a 55°C hasta llegar a estabilizarse a la temperatura ambiente, una intensa y rápida degradación de la materia orgánica y mayor elevación de la temperatura, origino una disminución en los microorganismos patógenos, la humedad del comienzo fue de 40 a 65%, durante el proceso la humedad se disminuyó hasta el punto de secado, el comportamiento del pH fue en descenso, la relación C/N fue en aumento gracias al material de soporte

El compost obtenido fue efectivo con ciertas restricciones por el alto contenido de cromo que presento por lo tanto no se puede aplicar en zonas de cultivo pero se

---

<sup>12</sup> QUINCHIA, Adriana. y CARMONA, Dora. factibilidad de disposicion de los biosolidos generados en las PTAR combinadas. En: EIA. Agosto, 2004 Vol. 2, p. 89-108.

puede utilizar como recuperador de suelos en zonas mineras, áreas forestales y jardines.

## **2.9 DE RESIDUOS A RECURSOS: EL OTRO CAMINO DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS URBANOS. ESTUDIO DE CASO: COMPOSTAJE DE LODOS CLOACALES EN BARILOCHE, ARGENTINA.<sup>13</sup>**

En un estudio realizado en la ciudad de Bariloche argentina se determinaron las condiciones adecuadas para la elaboración de compost, implementando el biosólido como materia prima, teniendo en cuenta que su producción es bastante elevada, se optó por implementar una alternativa para disponerlos de tal manera que permitiera la reutilización y generación de productos beneficiosos.

El estudio eligió el compostaje por pilas de volteo, como alternativa de disposición puesto que genera un producto sin contaminantes y apto para la implementación en suelos y cultivos, colaborando en la rehabilitación del suelo y el fortalecimiento de las plantas por el contenido de nutrientes y materia orgánica, favoreciendo el crecimiento y la calidad de las plantas en menor tiempo, además de permitir la Biorremediación de terrenos erosionados y desérticos para ser empleados nuevamente en labores de agricultura, pastoreo y siembra de bosques.

Para el estudio se implementó biosólido de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR BARILOCHE, combinado con materiales de soporte como aserrín y viruta se determinaron las variables físicas y microbiológicas presentes en el material natural y se establecieron las etapas y los rangos de valores que se deben mantener así como la periodicidad de los volteos.

De acuerdo con la doctora Mazzarino autora de la investigación y directora de la puesta en marcha del proyecto en Bariloche se logra concluir que la implementación de biosólidos como material de compostaje, es viable desde el punto de vista técnico y factible desde el punto de vista económico, ya que este es un proceso sencillo y rápido, sin una gran inversión para su ejecución, obteniendo un producto rentable económicamente en el sector agrícola.

---

<sup>13</sup> MAZZARINO, Maria Julia. De residuos a recursos: el otro camino de los desechos orgánicos urbanos. Estudio de caso: compostaje de lodos cloacales en Bariloche, Argentina. Conferencia. IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil (4-6, septiembre: Boyaca, Colombia). Memorias.Tunja. . (2012). p. 1-14.

## **2.10 COMPOSTAJE DE BIOSÓLIDOS: 12 AÑOS DE LA PLANTA DE BARILOCHE<sup>14</sup>**

Un trabajo realizado en argentina en una planta que se dedica exclusivamente al tratamiento de biosolidos demuestra que el tratamiento por medio de compostaje es beneficioso ya que reduce los patógenos y olores en menos tiempo que otros procesos en esta planta se usan pilas de 10 a 15 m de longitud 3-4 m de ancho y 1,6m de altura con exposición al viento y sin sombreado se usa material de soporte de viruta o poda domiciliaria. Y aserrín, en el proceso se destacan dos etapas.

- Etapa termofilica: con temperaturas > 55°C durante 15 días y 5 volteos
- Zona de maduración: dura entre 2-3 meses con 1-2 volteos mensuales

Obteniendo un compost con calidad excepcional y sin restricciones de aplicación.

Sabiendo que el compostaje es un proceso biológico exotérmico convirtiendo la materia orgánica presente en los residuos hacia formas más estables como el humus, la cual es realizada por microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos que requieren de ciertas condiciones ambientales controladas que faciliten el incremento de la temperatura, que usualmente varían entre 55 - 60 °C para asegurar la destrucción de patógenos. El compostaje de biosólidos garantiza un producto con pH entre 6,5 y 8,0 unidades que favorece el crecimiento de las plantas, reduce la movilidad de metales pesados y puede ser usado benéficamente como acondicionador de suelos

---

<sup>14</sup>MAZZARINO, M. J. et al. Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche., 2009. argentina.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 AGUA RESIDUAL.

El término agua residual define un tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales, orina y otros elementos contaminantes perjudiciales para la salud, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales. Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación.

A las aguas residuales también se les llama aguas servidas, fecales o cloacales. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; y cloacales porque son transportadas mediante cloacas, nombre que se le da habitualmente al colector, están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno.<sup>15</sup>

**3.1.1 Disposición final del agua residual.** El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reusó.

Éstas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o bien pueden ser recogidas y llevadas mediante una red de tuberías - y eventualmente bombas - a una planta de tratamiento municipal. A menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado.

Tratamiento de aguas residuales. Comienza por la separación física inicial de sólidos grandes (basura) de la corriente de aguas domésticas o industriales empleando un sistema de rejillas (mallas), aunque también pueden ser triturados esos materiales por equipo especial; posteriormente se aplica un desarenador (separación de sólidos pequeños) seguido de una sedimentación primaria que separe los sólidos suspendidos existentes en el agua residual. Para eliminar

---

<sup>15</sup> Romero Rojas, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. teoría y principios de diseño. Ed. Escuela colombiana de ingenieros. (2004).

**3.1.2 metales disueltos.** Se utilizan reacciones de precipitación, que se utilizan para eliminar plomo y fósforo principalmente. A continuación sigue la conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida por medio del proceso de sedimentación secundaria, el agua tratada puede experimentar procesos adicionales como desinfección, filtración, etc. El efluente final puede ser descargado o reintroducido de vuelta a un cuerpo de agua natural, como corrientes, ríos o bahías u otro ambiente tales como terreno superficial, subsuelo, entre otros. Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada.

**3.1.3 Tratamiento de lodos.** El lodo proveniente de la sedimentación y de los procesos de tratamiento biológico debe estabilizarse o tratarse antes de disponer de él o reutilizarlos. La necesidad de la estabilización o del tratamiento depende del tipo de disposición o reutilización y de las molestias potenciales debidas a los olores en el lugar.

**3.1.3.1 El lodo se procesa para:**

- Eliminar los olores desagradables
- Reducir o inhibir la putrefacción potencial
- Reducir el contenido de organismos patógenos.

**3.1.3.2 Las formas para el tratamiento de lodos incluyen:**

- La reducción biológica de los sólidos volátiles biodegradables
- La oxidación química de los sólidos volátiles.
- La adición de sustancias químicas para volver el lodo no biodegradable
- Calentamiento para desinfectar o esterilizar el lodo.<sup>16</sup>

## **3.2 DEFINICIÓN DE BIOSOLIDOS Y LODOS**

**3.2.1 Biosólido.** Los biosólidos son un producto originado después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patógenos, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores. Gracias a este proceso, el biosólido tiene aptitud para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de suelos degradados.

---

<sup>16</sup> Crites, ron; Tchobanoglous, George. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones .mc Graw Hill.

**3.2.2 Lodos:** Los lodos son generados en las plantas tratamientos de aguas residuales-PTAR que pueden ser empleados benéficamente después de ser sometidos a procesos de estabilización, como los procesos biológicos de digestión aerobia o anaerobia.

### **3.3 PRODUCCIÓN DE BIOSOLIDOS.**

Los biosolidos son producidos en masas grandes y son inevitables todas las plantas de tratamiento de aguas residuales los producen pero son muy pocas las que hacen un tratamiento adecuado ya sea por falta de recursos o por desconocimiento del tema, son muchos los preocupados por el manejo de los biosolidos que han desarrollado investigaciones para dar un reusó a lo que se cree que es un desperdicio de estas investigaciones se han encontrado que son diversos los usos que los biosolidos pueden tener tales como compostaje, biogás, o utilizando un tratamiento desde los lodos acuosos con el uso de plantas que puedan consumir los patógenos que contienen, pudiéndose convertir en una fuente extra de recursos económicos.

La gestión de los biosólidos producidos en una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en su diseño y operación. En la PTAR El Salitre se implementó un tratamiento de lodos que permite obtener un producto estabilizado y deshidratado.<sup>17</sup>

### **3.4 CLASIFICACIÓN DEL BIOSOLIDO:**

**3.4.1 Clase A:** Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales o la densidad de Salmonella es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales. La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 gramos de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 gramos de sólidos totales.

Un biosolido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> VELEZ Juan Alberto. Los biosolidos: ¿una solución o un problema? Producción limpia. Vol.2, No.2. (dic.2007). p.68-126

<sup>18</sup> ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (194) a Plain English Guide to the USEPA CFR 40 Part 503 Biosolids Rule.

**3.4.2 Clase B.** Con una densidad de coliformes fecales inferior a  $2 \times 10^6$  NMP por gramo de sólidos totales o  $2 \times 10^6$  UFC por gramo de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola.

Además, la citada regla que rige el uso y eliminación de biosólidos establece límites cuantitativos relativos al contenido de metales presentes en ellos, normas de reducción de agentes patógenos, restricciones a los sitios de aplicación, condicionantes y supervisión de recolección de cultivos tratados, mantenimiento de registros y requerimientos de presentación de informes sobre biosólidos aplicados a la tierra, así como disposiciones similares para los que se desechan en rellenos sanitarios. Los biosólidos que se incineran tienen que satisfacer las normas relativas al contenido de metales y las disposiciones sobre emisiones que liberan al medio ambiente, incluidas las disposiciones de la Leyes de Aire Limpio<sup>19</sup>.

### **3.5 MANEJO Y GESTIÓN.**

Desde el inicio de la operación de la PTAR El Salitre, y hasta el mes de Junio de 2007, el biosólido generado fue aprovechado como abono en la cobertura de las celdas clausuradas del Relleno Sanitario Doña Juana, mejorando el crecimiento, desarrollo y resistencia del pasto cultivado. Actualmente, el biosólido se utiliza en la conformación de la cobertura vegetal del Predio El Corzo, en donde se requiere iniciar las actividades de cierre y clausura.

### **3.6 APROVECHAMIENTO Y USOS DEL BIOSOLIDO.**

- Jardinería (viveros) y agricultura.
- Áreas con bosques degradados sujetos a recuperación
- Recuperación de áreas que fueron sometidas a la pérdida de los horizontes superficiales debido a la minería o producción de ladrillos, construcciones u obras de infraestructuras.
- Mejoramiento de pasturas en suelos degradados, erosionados y desgastados por el uso indiscriminado de mono cultivos y por la tala indiscriminada de árboles y arbustos.
- Silvicultura y floricultura.
- Como fuente de materia orgánica de suelos erosionados.
- Adecuación y mantenimiento de zonas verdes.
- Elaboración de abonos o enmiendas

---

<sup>19</sup> Ibíd. p. 194

- Cobertura diaria y rehabilitación de rellenos sanitarios.
- Mejoramiento de capa vegetal en zonas con problemas de erosión.
- Biorremediación de suelos contaminados

### 3.7 ALTERNATIVAS PARA LA DISPOSICIÓN

La gestión ambiental debe entenderse como un conjunto de operaciones encaminadas a dar a los residuos producidos el destino global más adecuado desde el punto de vista medioambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costo de tratamiento, posibilidades de recuperación, comercialización y normas jurídicas.

Las técnicas que existen para el tratamiento y eliminación de residuos asimilables a urbanos son: el vertido controlado, la incineración y el compostaje. La eliminación de residuos peligrosos contempla el vertido al mar y el movimiento transfronterizo de los mismos, para depositarlos en zonas degradadas.

**3.7.1 Incineración.** La incineración es una alternativa que muchas empresas han encontrado para poder reducir la cantidad de lodos que han acumulado. Esta tiene por objetivo tanto la reducción, como la recuperación de la energía que se obtiene de los biosólidos. Dejando de lado el biogás que actualmente ya es recuperado por empresas como Aguas Andinas, la incineración y co-incineración es una alternativa para producir energía debido al poder calorífico de los biosólidos (con un promedio de 2.700 k/cal a una sequedad del 70%). Esta opción plantea distintas alternativas entre las que destacan la construcción de un incinerador específicamente para los biosólidos que puede ser administrado por la empresa de tratamientos de agua, una co-incineración en algún horno de alguna industria distinta (por ejemplo, cementos) o co-incineración en una planta termoeléctrica.

Sin embargo, la incineración de biosólidos puede ser una práctica ambientalmente poco amigable, debido a que ciertos metales Pesados no se pueden eliminar mediante la incineración y que éstos pueden transformarse en sustancias más tóxicas.

**3.7.2 Vertederos.** El vertido de biosolido cuando no se aplica ninguna de las técnicas mencionadas se hace por lo general directamente sobre cuerpos hídricos o suelos posiblemente erosionados y en mal estado como posible ayuda para la recuperación de estas zonas.

**3.7.3 Rellenos sanitarios.** Los lodos digeridos o estabilizados, pero secos, pueden ser llevados a rellenos sanitarios para disposición o como cobertura ya sea diaria o final. En caso de contener cantidades excesivas de metales y tóxicos se entierran en sitios especiales. Cuando los lodos van sin tratamiento se usan monorrellenos, cubriéndolos diariamente con suelo tal y como se hace en los rellenos sanitarios para desechos domésticos.

**3.7.4 Compostaje.** El compostaje de lodos cloacales como opción de tratamiento es bastante considerado en investigaciones académicas, debido a las ventajas que trae sobre todo al medio ambiente y a la salud pública generando un humus que fortalezca las propiedades de los suelos y fortalecer el crecimiento de las plantas por su alto contenido de nutrientes tales como fósforo y nitrógeno. Para el correcto tratamiento de los lodos cloacales como material de compostaje se deben tener en cuenta unos parámetros establecidos tales como la temperatura para evitar que los patógenos y bacterias presentes se sobre desarrollen y causen un daño peor.

### **3.8 COMPOSTAJE**

En términos generales el compostaje se puede definir como una técnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de degradación de la materia orgánica. La degradación es consecuencia de la actividad de microorganismos que crecen y se reproducen en los materiales orgánicos en descomposición. La consecuencia final de estas actividades vitales es la transformación de los materiales orgánicos originales en otras formas químicas. Los productos finales de esta degradación dependerán de los tipos de metabolismos y de los grupos fisiológicos que hayan intervenido. Es por estas razones que los controles que se pueden ejercer, siempre estarán enfocados a favorecer el predominio de determinados metabolismos y en consecuencia a determinados grupos fisiológicos<sup>20</sup>.

**3.8.1 Generalidades del compostaje.** El compostaje trae como resultado un producto conocido como compost, el cual al ser aplicado en el suelo, aporta nutrientes directamente asimilables por las plantas, mejorando las condiciones de este, gracias al aporte material orgánico mineralizado.

El compost se clasifica como un acondicionador de suelos más que como un abono, para ser clasificado como abono tendría que tener niveles elevados de

---

<sup>20</sup> MANUAL PARA LA ELABORACION DE COMPOST BASES CONCEPTUALES Y PROCEDIMIENTOS, Ing. Daniel Szterm

nitrógeno, potasio y fósforo. El compost aporta estos elementos y otros, entregándolos lentamente pero en forma sostenida, aumentando la disponibilidad de estos en el suelo. El compost cumple con un rol trascendente al corregir y mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos.

En una pila de material en compostaje, si bien se dan procesos de fermentación en determinadas etapas y bajo ciertas condiciones, lo deseable es que prevalezcan los metabolismos respiratorios de tipo aerobio tratando de mitigar los procesos fermentativos y las respiraciones anaerobias, ya que los productos finales de este tipo de metabolismo no son adecuados para su aplicación agronómica y conducen a la pérdida de nutrientes<sup>21</sup>.

### 3.8.2 Técnicas de compostaje por pilas:

- **compostaje en pilas estáticas:** Se forman pilas, en un bote o caja metálica grande (mínimo 1 m<sup>3</sup>, máximo 1.5 m<sup>3</sup>) con tapa, colocando una capa gruesa (aproximadamente 6 cm) de aserrín o tierra y se deja sin movimiento, se vierte ahí todos los desechos orgánicos y se cubren con otra capa de tierra, para que se mantenga la humedad se rocía con un poco de agua que resulta indispensable y se espolvorea con cal para evitar malos olores. Termina ventilándose naturalmente por un proceso de convección térmica natural. En este procedimiento no se tiene temperatura, los procesos son los naturales a temperatura ambiente.
- **Compostaje en pilas estáticas aireadas:** Consiste en airear de manera forzada la materia que se está compostando. La pila se construye sobre una red de tuberías, donde se suministra o extrae aire frecuentemente para proporcionar un medio aeróbico. Esta técnica es conocida también como técnica activa o caliente: se controla la temperatura para permitir el desarrollo de las bacterias más activas, matar la mayoría de patógenos y gérmenes, y así producir compost útil de forma rápida.
- **Compostaje en pilas de volteo:** Este sistema de compostaje es el más utilizado, y se realiza mediante un volteo manual o mecánico. En este método se amontona el material, se mezcla y voltea periódicamente, evitando así la compactación y entregando oxígeno al sistema.

---

<sup>21</sup> SZTERN, I. D. (s.f.). manual para la elaboracion de compost bases conceptuales y procedimientos

### 3.8.3 Etapas del proceso de compostaje

- **Fase de descomposición:** Depende totalmente del tipo de material a tratar y de las características del sistema a aplicar. Puede dividirse en tres etapas: una inicial mesofílica durante la cual diversas familias de microorganismos inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento de la temperatura y en la que el pH desciende debido a la formación de ácidos orgánicos. La etapa termofílica en la que van apareciendo los microorganismos termofílicos y en la que la temperatura supera los 40°C. Si se alcanza los 60°C los hongos se inactivan y la descomposición es llevada a cabo por actinomicetos y bacterias formadoras de esporas.

Las sustancias fácilmente degradables, como azúcares, grasa, almidón y proteínas, son rápidamente consumidos y la mayoría de patógenos humanos y vegetales son destruidos; el pH se va alcalinizando al liberar amoníaco las proteínas; a su vez la celulosa y ligninas son parcialmente alteradas. En la tercera etapa, la temperatura empieza a disminuir, hongos termofílicos re invaden el material a compostar y la celulosa y hemicelulosa siguen sufriendo cierta transformación. Estas tres etapas duran de unas pocas semanas a varios meses dependiendo del material a compostar y de las condiciones de trabajo.

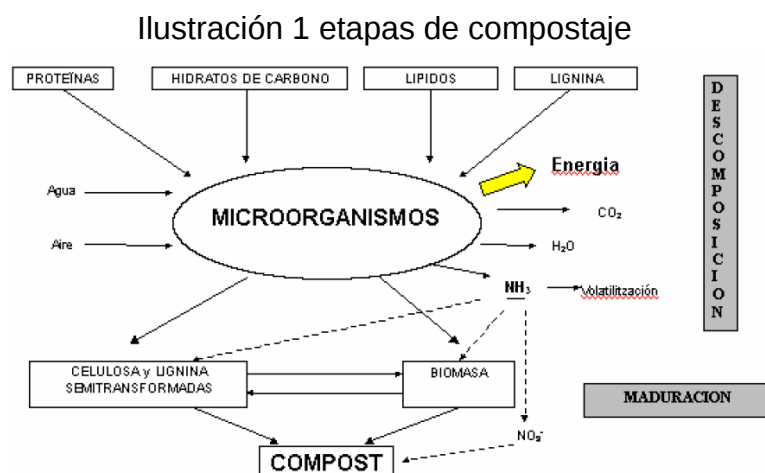
La fase de descomposición es la más exigente del proceso y el no realizarla en condiciones adecuadas condiciona la continuación del proceso, la aparición de problemas de lixiviados y malos olores, además de influir en la calidad del producto final<sup>22</sup>

- **Fase de maduración:** Depende del tipo de material que se ha tratado, pero su duración y las condiciones en que se deba llevar a cabo dependerán mucho del destino final del producto (en particular en el caso de fabricación de substratos) y como se hayan desarrollado las etapas anteriores. Requiere de pocas semanas a varios meses; en ella se genera mucho menos calor y el pH se mantiene ligeramente alcalino. En esta fase los microorganismos mesófilos, al igual que diversos tipos de microfauna colonizan el compost medio maduro. Se genera una intensa competición por los alimentos, formación de antibióticos y aparición de antagonismos; obteniéndose al final un producto, más o menos estable, según la duración de la última fase.<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> MAZZARINO. Julia. Compostaje de biosólidos: 12 años plata de Bariloche. Bariloche: Orientación Grafica Editora, 2012. P.99-106

<sup>23</sup> Ibíd. p.8



Fuente: planta de compostaje 12 años (Dra. María Julia Mazzarino)

### 3.8.4 Parámetros físicos de compostaje de biosólidos por pilas de volteo

- **Tiempo.** El tiempo necesario para compostar depende de la humedad, aireación, tipo de material y la regularidad con que se muevan las pilas de compost, teniendo en cuenta cada uno de los parámetros anteriores el tiempo promedio para obtener compost es de aproximadamente 4 meses.<sup>24</sup>
- **Temperaturas.** Es un factor de equilibrio ecológico, de fácil monitoreo, y refleja la eficiencia del proceso, a temperaturas muy altas la eliminación de patógenos es más eficaz, por ello se recomienda mantener la muestra en temperaturas superiores a 40°C.
- **Humedad.** El contenido de humedad de los desechos orgánicos crudos es muy variable. La humedad idónea para una biodegradación con franco predominio de la respiración aeróbica, se sitúa en el orden del 15 al 35 % (del 40 – 60% si se puede mantener una buena aireación). Humedades superiores a las indicadas provocarían un desplazamiento del aire entre las partículas de la materia orgánica, con lo que el medio se volvería anaerobio<sup>25</sup>.

<sup>24</sup> CAJICA. Ángel. ingeniería de aguas residuales. España: Mercalf y Eddy. 2004. P. 104.

<sup>25</sup> Ibid.p. 68

Tabla 4 rangos de humedad óptimos para el compostaje

| RANGO DE HUMEDAD (%) | DESCRIPCIÓN           | REFERENCIAS     |
|----------------------|-----------------------|-----------------|
| 50-60                | Compostaje en general | Sanepar,1997    |
| 45-55                | Compostaje de RSU     | Sanepar,1997    |
| 45-65                | Proceso de compostaje | Kutter,G 1995   |
| 50-80                | Aceptable             | Eweis, J.B 1999 |
| 60                   | Optimo                | Eweis, J.B 1999 |
| 45-50                | Mínimo                | López, P 2002   |
| 60-85                | Máximo                | López, P 2002   |
| 40-60                | Idóneo                | Szterm, D 1999  |

Fuente: Sarria y Rodríguez

- **PH.** Influye en el proceso debido a su acción sobre los microorganismos. En general los hongos toleran un margen de pH entre 5 y 8 unidades, mientras que las bacterias tienen menor capacidad de tolerancia, entre 6 y 7.5 unidades.

Un pH cercano al neutro (pH 6,5 -7,5 ligeramente ácido o ligeramente alcalino) asegura un desarrollo favorable de la gran mayoría de los grupos fisiológicos. Valores por debajo de 5,5 y por encima de 8 inhiben el crecimiento, haciendo precipitar nutrientes del medio<sup>26</sup>

Un pH entre 6,5 y 8 favorece el crecimiento de plantas y reduce la movilidad de metales pesados, viable para ser usado como acondicionador de suelo.

### 3.8.5 Parámetros microbiológicos de compostaje de biosólidos por pilas de volteo

- **Salmonella.** Esta bacteria es una de las que más causan enfermedades principalmente gastrointestinales, aunque también se puede presentar fiebre tifoidea la cual sólo afectan al hombre, existen más de 2.200 genotipos diferentes de salmonella y todos son patógenos. Entre 1.980 y 1.996, ocurrieron en los Estados Unidos cinco brotes de salmonelosis de origen hídrico con cerca de 2.000 casos asociados.
- **Coliformes totales.** El grupo coliformes se define como todas las bacterias Gram negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35 a

<sup>26</sup> SZTERN, I. D. (s.f.). manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos .

37°C, produciendo ácido y gas en 24 horas, aerobias o anaerobias facultativas, son oxidas negativa, no forman esporas y presentan actividad enzimática de la B-galactosidasa<sup>27</sup>.

- **E-Coli.** Es una bacteria Gramnegativo, típica de la familia Enterobacteriaceae, se caracteriza por respirar anaeróbicamente, es decir, en ausencia de oxígeno, en el interior del intestino y aeróbicamente, con presencia de oxígeno, en el exterior.<sup>28</sup> Se trata de bacterias de rápido crecimiento y amplia distribución en el suelo, el agua, vegetales y gran variedad de animales<sup>28</sup>.

Ésta es una de las bacterias que más atacan al hombre aproximadamente 11 de las especies de E. Coli son las causantes de la diarrea sangrante en niños, habita en el intestino de animales y del ser humano y proviene principalmente de la materia fecal por medio de la cual se dispersa y contamina el agua, el suelo y los alimentos.

Es adquirida comúnmente, por medio de la ingesta de alimentos y agua contaminados y perjudica principalmente a niños ancianos, a los niños pero aún tienen el sistema inmune inmaduro y en el caso de los ancianos porque su organismo está más deteriorado<sup>29</sup>.

### 3.9 NORMATIVIDAD ACERCA DEL BIOSOLIDO

#### 3.9.1 Decreto 1287

El decreto 1287<sup>30</sup> establece las regulaciones y los parámetros que se deben tener en cuenta para la estabilización de biosolidos producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, dando los valores máximos permisibles que deben aplacar para variables físicas y microbiológicas. A su vez concluye en las partes que se debe y puede dispones ya tratado que para esta investigación se llegara a obtener biosolidos clase A los cuales según este decreto tiene los siguientes usos:

---

<sup>27</sup> MARCELA LOZANO, A. C. (s.f.). Validación el método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando agar Chromocult. Trabajo presentado para optar al título de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. . Bogotá.

<sup>28</sup> VALERIA SOUZA, M. R. (s.f.). Historia natural, ecología y evolución de la patogenicidad en Escherichia Coli. Universidad Nacional Autónoma. México.

<sup>29</sup> ALVAREZ, A. L. (2001). Escherichia Coli: Mecanismos de Patogenicidad. Universidad Autónoma2. MEXICO.

<sup>30</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, DIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterio s para el uso de los biosolidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Bogotá D.C.: El ministerio. 2014. 15 p.

- En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.
- Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.
- En agricultura.
- Los mismos usos de la Categoría B. Tabla 5

Tabla 5 parámetros microbiológicos del compost

| CRITERIO        | VARIABLE           | UNIDAD DE MEDIDA                                                   | CATEGORIA DE BIOSOLIDO valor Max permisible |
|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| MICROBIOLOGICOS | Coliformes fecales | Unidades formadoras de colonias UFC/g de biosolido base seca       | <1,00 E (+3)                                |
|                 | salmonella         | Unidades formadoras de colonias UFC/ en 25g de biosolido base seca | Ausencia                                    |

Fuente: Decreto 12 87

**3.9.2 EPA 2003 Norma 40 CFR parte 503.** En esta se establece las regulaciones y parámetros requeridos por los norteamericanos de los valores admitidos de patógenos y control de la temperatura para que tenga uso beneficioso<sup>31</sup>.

- **de lodos cloacales Clase A.**

**Alternativa 1.** O bien la densidad de coliformes fecales en el lodo de depuradora ser inferior a 1.000 Número Más Probable por gramo de sólidos totales (base de peso seco), o de la densidad de Salmonella sp. Bacterias en el lodo de aguas residuales deberá ser inferior a tres número más probable por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco) en el momento de los lodos de depuradora se utiliza y de la cesión; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalar en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado.

- Cuando el porcentaje de sólidos de los lodos residuales es del siete por ciento o superior, la temperatura de los lodos residuales será de 50 grados centígrados o más alto; el período de tiempo será de 20 minutos o más; y el período de tiempo y temperatura se determinará mediante una ecuación, excepto cuando pequeñas partículas de los lodos de depuradora se calientan por cualquiera calentado gases o un líquido inmiscible.

<sup>31</sup> ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (194) a Plain English Guide to the USEPA CFR 40 Part 503 Biosolids Rule.

- Cuando el porcentaje de sólidos de los lodos de aguas residuales es el siete por ciento o superior y pequeñas partículas de lodos de aguas residuales son calentados por cualquiera calentó gases o un líquido inmiscible, la temperatura de los lodos de aguas residuales será de 50 grados Celsius o superior; el plazo será de 15 segundos o más tiempo; y el período de tiempo y temperatura se determinará mediante la ecuación.
- Cuando el porcentaje de sólidos de los lodos residuales es menos de siete por ciento y el período de tiempo es de al menos 15 segundos, pero menos de 30 minutos, la temperatura y el periodo de tiempo se determinará mediante la ecuación.
- Cuando el porcentaje de sólidos de los lodos residuales es menos de siete por ciento; la temperatura de los lodos de aguas residuales es de 50 grados Celsius o superior; y el período de tiempo es de 30 minutos o más, el período de tiempo y temperatura se determinará mediante una ecuación.

**Alternativa 2.** O bien la densidad de coliformes fecales en el lodo de depuradora ser inferior a 1.000 Número Más Probable por gramo de sólidos totales (base de peso seco), o de la densidad de Salmonella sp. Bacterias en el lodo de aguas residuales deberá ser inferior a tres número más probable por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco) en el momento de los lodos de depuradora se utiliza y de la cesión; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalar en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado.

- El pH del lodo de aguas residuales que se utiliza y de la cesión se elevará por encima de 12 y permanecerá por encima de 12 por 72 horas.
- La temperatura de los lodos de aguas residuales debe ser superior a 52 grados Celsius durante 12 horas o más durante el período en que el pH de los lodos de aguas residuales está por encima de 12.
- Al final del período de 72 horas durante el cual el pH de los lodos de aguas residuales está por encima de 12, el lodo de aguas residuales será secó al aire para lograr un porcentaje de sólidos en el lodo de aguas residuales mayor que 50 por ciento.

**Alternativa 3.** O bien la densidad de coliformes fecales en el lodo de depuradora ser inferior a 1.000 Número Más Probable por gramo de sólidos totales (base de peso seco), o de la densidad de Salmonella sp. Bacterias en los lodos de depuradora deberá ser inferior a tres número más probable por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco) en el momento de los lodos de depuradora se utiliza y de la cesión; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalar en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el

momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado

- El lodo de aguas residuales deberá ser analizada antes de patógenos tratamiento para determinar si el lodo de aguas residuales contiene virus entéricos.
- Cuando la densidad de los virus entéricos en los lodos de aguas residuales antes del tratamiento patógeno es menos de un formadoras de placa unitario por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco), el lodo de aguas residuales es de Clase A con respecto a los virus entéricos hasta la siguiente episodio de monitoreo para los lodos de depuradora.
- Cuando la densidad de los virus entéricos en los lodos de aguas residuales antes de patógenos tratamiento es igual o mayor que uno formadoras de placa unitario por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco), el lodo de aguas residuales es de Clase A con respecto a entérico virus cuando la densidad de los virus entéricos en los lodos de aguas residuales después del tratamiento patógeno es menos de un formadoras de placa unitario por cuatro gramos de sólidos totales (base de peso seco) y cuando los valores o rangos de valores para los parámetros de funcionamiento para el proceso de tratamiento de patógenos que produce el lodo de aguas residuales que cumpla con el requisito entérica densidad virus están documentados.
- Después de la reducción de virus entéricos en el párrafo (a) (5) (ii) (C) de esta sección se demuestra por el proceso de tratamiento de patógenos, los lodos de aguas residuales sigue siendo Clase A con respecto a los virus entéricos, cuando los valores de los parámetros de funcionamiento proceso de tratamiento de patógenos son consistentes con los valores o rangos de valores documentados en el párrafo (a) (5) (ii) (C) de esta sección.
- El lodo de aguas residuales deberá ser analizada antes de patógenos tratamiento para determinar si el lodo de aguas residuales contiene huevos de
  - helmintos viables.
- Cuando la densidad de huevos de helmintos viables en el lodo de aguas residuales antes del tratamiento patógeno es menos del uno por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco), el lodo de aguas residuales es de Clase A con respecto a los huevos de helmintos viable hasta la próxima monitoreo episodio de los lodos de depuradora.
- Cuando la densidad de huevos de helmintos viables en el lodo de aguas residuales antes del tratamiento patógeno es igual o mayor que uno por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco), el lodo de aguas residuales es de Clase A con respecto a los óvulos viables de helmintos cuando la densidad de huevos de helmintos viables en el lodo de aguas residuales después del tratamiento patógeno es menos del uno por cuatro gramos de sólidos totales (base de peso seco) y cuando los valores o rangos de valores para los parámetros de funcionamiento para el proceso de tratamiento patógeno que produce el lodo de

aguas residuales que cumple con el requisito viable densidad huevos de helmintos están documentados.

- Después de la reducción de huevos de helmintos viables en el párrafo (a) (5) (iii) (C) de esta sección se demuestra por el proceso de tratamiento de patógenos, los lodos de aguas residuales sigue siendo Clase A con respecto a los huevos de helmintos viables cuando el valores para los parámetros de operación del proceso de tratamiento de patógenos son consistentes con los valores o rangos de valores documentados en el párrafo (a) (5) (iii) (C) de esta sección.

**Alternativa 4.** O bien la densidad de coliformes fecales en el lodo de depuradora ser inferior a 1.000 Número Más Probable por gramo de sólidos totales (base de peso seco), o de la densidad de Salmonella sp. Bacterias en el lodo de aguas residuales deberá ser inferior a tres número más probable por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco) en el momento de los lodos de depuradora se utiliza y de la cesión; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalar en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado.

- La densidad de los virus entéricos en los lodos de aguas residuales deberá ser inferior a un formadoras de placa unitario por cuatro gramos de sólidos totales (base de peso seco) en el momento del lodo de aguas residuales se utiliza o desecharse; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalar en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado para cumplir con los requisitos en el 503.10 (b), (c), (e) o (f) , a menos que se especifique lo contrario por la autoridad de permisos.
- La densidad de huevos de helmintos viables en el lodo de aguas residuales deberá ser inferior a uno por cuatro gramos de sólidos totales (base de peso seco) en el momento del lodo de aguas residuales se utiliza o desecharse; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalar en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado para cumplir con los requisitos en el 503.10 (b), (c), (e) o (f) , a menos que se especifique lo contrario por la autoridad de permisos.

**Alternativa 5.** O bien la densidad de coliformes fecales en el lodo de depuradora ser inferior a 1.000 Número Más Probable por gramo de sólidos totales (base de peso seco), o de la densidad de Salmonella, sp. bacterias en el lodo de aguas residuales deberá ser inferior a tres número más probable por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco) en el momento de los lodos de depuradora se utiliza y de la cesión; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalado en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado para cumplir con los requisitos en 503.10 (b), (c), (e) o (f) .

- los lodos de aguas residuales que se utiliza y de la cesión deberá ser tratado a uno de los procesos para reducir aún más patógenos descritos en el apéndice B de esta parte.

**Alternativa 6.** O bien la densidad de coliformes fecales en el lodo de depuradora ser inferior a 1.000 Número Más Probable por gramo de sólidos totales (base de peso seco), o de la densidad de Salmonella, sp. bacterias en el lodo de aguas residuales deberá ser inferior a tres número más probable por cuatro gramos de sólidos totales (peso seco) en el momento de los lodos de depuradora se utiliza y de la cesión; en el momento de los lodos de depuradora se prepara para la venta o regalado en una bolsa u otro recipiente para su aplicación a la tierra; o en el momento del fango cloacal o material derivado de los lodos de depuradora está preparado para cumplir con los requisitos en §503.10 (b), (c), (e) o (f) .

- los lodos de aguas residuales que se utiliza y de la cesión deberá ser tratado en un proceso que es equivalente a un proceso para reducir aún más patógenos, según lo determinado por la autoridad de permisos.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE VARIABLES

#### 4.1.1 Variables independientes:

**Porcentaje de biosólido.** Para la investigación se utiliza biosólido producido por la PTAR EL SALITRE de Bogotá, con porcentajes definidos en cada pila  $0.5m^3$  (pila con cascara de huevo),  $0.35m^3$  (pila con caña de maíz) y  $0.35m^3$  (pila con poda de pasto)

**Cantidad de material de enmienda.** Cada pila contiene un material diferente (cascara de huevo, caña de maíz y poda de pasto).

**Cantidad de material de soporte.** Se maneja el mismo material de soporte (mezcla de aserrín y viruta) en las mismas cantidades para cada pila.

#### 4.1.2 Variables dependientes:

**PH.** Para cada pila se mide diariamente con el uso del multiparametro.

**Temperatura.** Para cada pila se mide diariamente con el uso del multiparametro

**Humedad.** Se mide semanalmente tomando muestras de cada pila y procediendo de acuerdo a la norma I.N.V.E-122-07 para determinar el contenido de agua haciendo la diferencia entre partículas humedad y partículas secas.

**Contenido de patógenos.** De acuerdo con los resultados dados por ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA escogido para el desarrollo y análisis de muestras de material.

#### 4.1.3 Variables intervinientes

Condiciones ambientales, cantidad de Volteos, reducción de volumen.

## 4.2 ADECUACIÓN DEL ÁREA DE DISPOSICIÓN.

La zona de disposición en donde se desarrolla el proceso de compostaje está localizada en las instalaciones de la universidad santo tomas seccional Tunja sede campus AV universitaria calle 48 No. 1-235 este Tunja - Boyacá, se contó con el apoyo de las directivas institucionales quienes permitieron el uso de una zona en la cual no se pudiera producir daño o que personas ajenas a la investigación tuvieran contacto con el material por su grado de toxicidad.

**Imagen 1. Ubicación Campus Universidad Santo Tomas Tunja**



Fuente. Google earth

Hubo necesidad de retirar manualmente la capa vegetal de la zona con herramienta menor, para evitar posibles alteraciones del proceso, luego se hizo un tipo de drenaje por medio de zanjas hechas manualmente con picas para controlar el curso de agua en época de lluvias y control de lixiviados, la zona se impermeabilizo de tal manera que el material no tuviera contacto con el suelo ni que hubiera intrusión de aguas lluvias, además se puso cinta amarilla alrededor de la zona indicando que era zona de peligro evitando que las personas alteraran la investigación. Para la adecuación de la cubierta se instaló plástico calibre 7, el cual permite el paso de luz solar, garantiza el efecto invernadero y favorece la digestión de la muestra.

## 4.3 RECOLECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

**4.3.1 Biosólido.** El biosólido fue proporcionado por la planta de tratamiento de aguas residuales el salitre de Bogotá, la cual genera 160 toneladas diarias de biosólido.

**Imagen 2. Ubicación PTAR Salitre Bogotá**



Fuente. Google earth

- **Inspección de la zona de recolección.** Se recorrió la PTAR con el fin de identificar el proceso de tratamiento de las aguas residuales, posteriormente se
- **identificación del lugar para el muestreo.** el cual fue en las bandas transportadoras donde se finaliza con tratamiento de los lodos, y son dispuesto en plátanos para ser transportados a los terrenos de disposición de la PTAR.
- **Recolección desde pandas transportadoras.** El muestreo fue de forma mecánica, se ubicó una cargadora con la caneca de 500 litros en la banda transportadora para evitar perdida del material y el contacto directo con la muestra
- **Equipos de recolección.** Se utilizaron canecas de 500 litros con cierre ergonómico que evitan derrames o filtraciones, a su vez se usó un cargador para ubicar las canecas al final de la banda transportadora para evitar el derrame del material.
- **Tipo de recolección.** Es de tipo aleatorio en la banda transportadora con el fin de evitar alteraciones en el biosólido.

**4.3.2 Caña.** El lugar de recolección fue en la vereda caños del municipio de Paipa Boyacá, recolectado en costales para su posterior transportado a ciudad de Tunja.

**4.3.3 Pasto.** Este material se dispuso de la universidad santo tomas Tunja campus, fue recolectado en bolsas.

**4.3.4 Cascara de huevo.** La recolección se hizo en el municipio de Jenesano, en el cual se recolectaron las cascara de huevo diariamente que se generaban en los restaurantes y casas, por un tiempo aproximado de 20 días en los cuales se obtuvo el porcentaje requerido.

**4.3.5 Viruta y Aserrín.** Fue recolectado en la carpintería del barrio Cooservicios de la ciudad de Tunja, depositado en lonas para evitar derrames en el transporte.

## 4.4 CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA

**4.4.1 Biosolido.** El biosolido de la PTAR el salitre Bogotá se clasifica de clase B debido al contenido de metales pesados y patógenos.

El biosolido se monitorea periódicamente, con el fin de verificar el comportamiento y sus características físicas, químicas y microbiológicas. Mensualmente se analizan<sup>32</sup>.

Tabla 9. Concentración microbiológica Datos 2005-2007<sup>33</sup>

| Parámetro                            | Promedio*       |
|--------------------------------------|-----------------|
| Coliformes fecales (UFC/g Base Seca) | <b>6,88E+05</b> |
| Fagos somáticos (PFP/4g Base Seca)   | <b>2,43E+06</b> |
| Salmonella (NMP/4g Base Seca)        | <b>0,80</b>     |

Fuente. Acueducto Bogotá

Tabla 10. Concentración microbiológica Datos 2014

| ENSAYO                        | EXPRESIÓN  | VALOR OBTENIDO     | VALOR MAX. COLOMBIA | VALOR MAX. EPA | MÉTODO                         |
|-------------------------------|------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------------------|
| <b>Coliformes totales (A)</b> | NMP/100 mL | 20x10 <sup>6</sup> | 1,00 E(+3)          | <1000          | SM 9221 B                      |
| <b>Coliformes fecales (A)</b> | NMP/100 mL | 36x10 <sup>5</sup> | 1,00 E(+3)          | <1000          | SM 9221 B, E                   |
| <b>Salmonella</b>             | NMP/100 mL | 35                 | Ausencia            | Ausencia       | Enriq/Siembr a medio Selectivo |

FUENTE. Autores

## 4.5 DISEÑO EXPERIMENTO

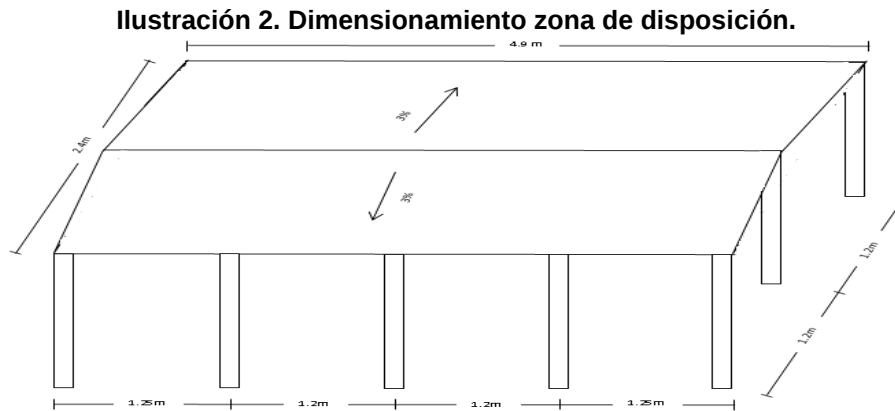
Con base en las teorías expuestas por diferentes autores que se recopilan en la revisión teórica se opta por utilizar materiales de enmienda y soporte<sup>34</sup> para darle estabilidad y manejabilidad al biosolido, se opta por tomar el material de soporte constante en las tres pilas y variar el material de enmienda utilizando así 3 materiales diferentes.

<sup>32</sup> ACUEDUCTO DE BOGOTA. 2000. Guia conceptual sobre la PTAR salitre. Bogota : s.n., 2000. p.10.

<sup>33</sup> Ibíd. p. 11.

<sup>34</sup> VIDAL, A. P. et al. compostaje de biosolido de planta de tratamiento de agua residual. (2007). Cañaberalajo, Cali.

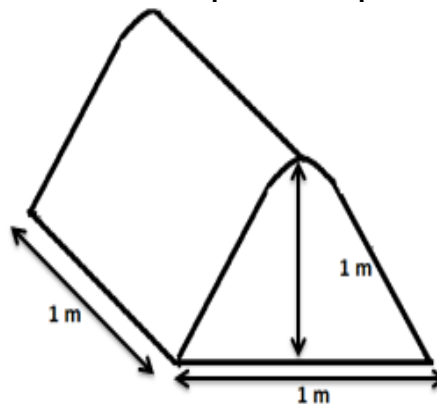
**4.5.1 Lugar de disposición y tratamiento.** El material debe estar totalmente aislado del ambiente con el fin de tener un control máximo de las variables físicas y evitar la interferencia de acciones ambientales y vectores ajenos al proyecto, para tal caso se hizo un recubrimiento con plástico semi-transparente calibre 35 y estacas de madera, simulando un invernadero, con espaciamientos de 1.2m entre pilas, obteniendo un área total de  $11.76 \text{ m}^2$  como se muestra en la Ilustración 2, para tratar las tres pilas que dan en total de  $3 \text{ m}^3$  de material para la investigación.



Fuente: Autores

**4.5.2 Dimensiones iniciales.** Puesto que la materia prima no se encuentra tan cerca a la zona que se adecua para la disposición y tratamiento del material, y la logística que hay que utilizar para el manejo y transporte de biosólidos es bastante dispendiosa se opta por utilizar dimensiones a las menores utilizadas por los referentes teóricos que fácilmente compostaban de  $300\text{-}400 \text{ m}^3$ <sup>35</sup>, obteniendo así dimensiones de  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$  para tener un volumen total inicial de  $1 \text{ m}^3$  por pila.

**Imagen 3. Dimensiones planteadas para el proceso**



Fuente: Autores

<sup>35</sup> MAZZARINO, M. J. et al. Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche., 2009. argentina.

**4.5.3 Materiales de enmienda y soporte.** Como lo menciona Vidal<sup>36</sup>, al utilizar materiales de soporte y enmienda en el compostaje de biosólidos se favorece la aireación y el contenido de nutrientes presente. Para la esta investigación se toman como material de soporte una mezcla igual entre aserrín y viruta de madera y para materiales de enmienda se escogen poda de pasto, caña de maíz y cascara de huevo, las proporciones se describen en la Tabla 6.

**Tabla 6 cantidades de material de soporte y enmienda**

| Pila                | Relación<br>Biosólido:soporte:en<br>mienda | Volumen de hilera ( $m^3$ ) |                     |                             |       |
|---------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-------|
|                     |                                            | Parte de<br>Biosólido       | Parte de<br>soporte | Parte<br>de<br>enmie<br>nda | Total |
| Cascara de<br>huevo | 1:0.3:0.7                                  | 0.5                         | 0.35                | 0.15                        | 1     |
| Caña de<br>maíz     | 1:1:0.8                                    | 0.35                        | 0.35                | 0.3                         | 1     |
| Poda de<br>pasto    | 1:10.8                                     | 0,35                        | 0.35                | 0.3                         | 1     |

Fuente: Autores

**4.5.4 Toma de datos y muestras.** Según lo descrito por la doctora Mazzarino<sup>37</sup> se tienen en cuenta durante el proceso la toma de datos de variables físicas (pH, temperatura y humedad) y variables microbiológicas (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella), la periodicidad de muestreo se describe en la Tabla 7

**Tabla 7 periodicidad y métodos para la toma de datos y muestras**

| Variable           | Periodicidad de toma           | Método para la toma           |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Temperatura        | Diario                         | Manual con multiparametro     |
| pH                 | Diario                         | Manual con multiparametro     |
| humedad            | Semanal                        | I.N.V.E-122-07                |
| Volumen            | Semanal                        | Manual con cinta métrica      |
| Volteos            | Dependiente de la fase         | Manual                        |
| Coliformes fecales | Mensual en etapa de maduración | SM 9221 B, E                  |
| Coliformes totales | Mensual en etapa de maduración | SM 9221 B                     |
| Salmonella         | Mensual en etapa de maduración | Enriq/siembra medio selectivo |

Fuente: Autores

<sup>36</sup> VIDAL, A. P. et al. compostaje de biosólido de planta de tratamiento de agua residual. (2007). Cañaberalaje, Cali.

<sup>37</sup> MAZZARINO, M. J. et al. Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche., 2009. argentina.

**4.5.5 Preparación de sitio de tratamiento** El proceso de preparación de la zona en la que se adecuo el biosolido se hace de manera manual con herramientas menores (picas y azadones), retirando la capa vegetal presente y garantizando la pendiente necesaria para el control de lixiviados, la zona de disposición fue en las instalaciones de la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, teniendo especial cuidado con que estuviera retirada del edificio de tal manera que nadie ajeno a la investigación tuviera contacto con el material, además se recubrió la zona con cinta amarilla especificando peligro.

Se elaboran zanjas de conducción al redor de la estructura con respecto a las pendientes propias del terreno, para tener control de lixiviados y escorrentía producto de aguas lluvias, luego se elabora la estructura para cubrir las pilas utilizando estacas de madera y plástico semi-transparente simulando un invernadero.

**Imagen 4. Preparación del sitio de tratamiento**



Fuente: Autores

#### **4.5.6 Elaboración de pilas**

Se dispone plástico de tal manera que la tierra quede completamente aislada de las pilas y evitar la instrucción de pasto, se procede a desocupar el material de las canecas plásticas provenientes de la PTAR EL SALITRE y combinarlos con los materiales de enmienda y soporte en las cantidades especificadas en la Tabla 6.

**Imagen 5. Elaboración de pilas**



Fuente: Autores

**Imagen 6. Diseño final de pilas de biosólido con soporte y enmienda**

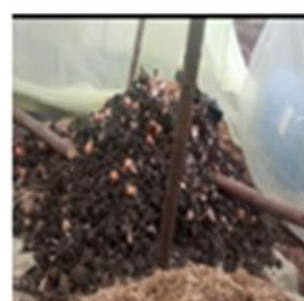
**PILA CON CAÑA  
DE MAÍZ**



**PILA CON PODA DE  
PASTO**



**PILA CON  
CASCARA DE  
HUEVO**



Fuente: Autores

#### **4.5.7 Toma de datos variables físicas**

- **pH.** La toma de datos de pH se realizó con el multiparametro que arroja datos exactos en tiempo real, el multiparametro cuenta con dos sensores que son capaces de medir pH, temperatura y conductividad.

Los sensores del multiparametro se introducen directamente en la pila hasta calcular el centro aproximadamente para saber cuáles son las condiciones que se tienen en el interior puesto que en el exterior estarían alteradas por las condiciones ambiente.

Imagen 7. Multiparametro medición de pH



Fuente: Autores

- **Temperatura.** La toma de datos de temperatura se realizan con el multiparametro al igual el pH se hace al interior de la pila introduciendo los sensores en el centro de cada una

Imagen 8. Multiparametro medición de temperatura



Fuente: Autores

- **Humedad.** Para determinar humedad se sacaban muestras cada semana y se procedía de acuerdo a la norma I.N.V.E-122-07 para determinar el contenido de agua del material comparando el peso húmedo y peso seco del mismo, este procedimiento se realizaba en las instalaciones del laboratorio de la Universidad Santo Tomas seccional Tunja.

**Imagen 9. Materiales para determinar humedad**



Fuente: Autores

- **Medición de volumen.** La medición de volumen se realizaba para determinar la reducción que ocurre semana a semana y establecer la solución para evitar que el proceso se altere, esta medición se realiza manual mente con cinta métrica tomando mediciones de alto, ancho y largo.
- **Volteos.** Los volteos son realizados de acuerdo a la fase por la que este atravesando el material en el proceso de compostaje tal como lo definen los referentes teóricos tomados para la investigación de Planta de Tratamiento de Biosolido de argentina<sup>38</sup> y el procedimiento hecho para la PTAR DE CAÑABERALEJO<sup>39</sup>, escogiendo que en la etapa termofilica se realiza volteo dos veces a la semana y en la fase de maduración cada semana o cada dos semanas dependiendo del comportamiento de las variables físicas.

**Imagen 10. Realización de volteos**



Fuente: Autores

<sup>38</sup>MAZZARINO, M. J. et al. Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche., 2009. argentina.

<sup>39</sup> VIDAL, A. P. et al. compostaje de biosolido de planta de tratamiento de agua residual. (2007). Cañaberales, Cali.

**4.5.8 Toma de muestras y análisis microbiológico.** La toma de muestras se hace manualmente siguiendo las pautas descritas por la Semanart 2002<sup>40</sup> en donde se describe el método para el muestreo de lodos y biosólidos, ya que la Universidad no cuenta con los materiales necesarios para la elaboración de estos laboratorios se recurre a una empresa externa que ofrezca confiabilidad en los resultados, escogiendo a ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA, en el que se realizaron 6 laboratorios en total en las fechas descritas en la Tabla 8. Los resultados de los análisis son entregados a los ocho días de la recepción.

**Tabla 8. Realización de laboratorios**

| Secuencia y numeración                            | Fechas de realización de laboratorios |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Laboratorio 1 muestra 1 pila con caña de maíz     | 19-dic-14                             |
| Laboratorio 2 muestra 2 pila con caña de maíz     | 20-ene-15                             |
| Laboratorio 3 muestra 1 pila con cascara de huevo | 19-dic-14                             |
| Laboratorio 4 muestra 2 pila con cascara de huevo | 20-ene-15                             |
| Laboratorio 5 muestra 1 pila con poda de pasto    | 19-dic-14                             |
| Laboratorio 6 muestra 2 pila con poda de pasto    | 20-ene-15                             |

Fuente: Autores

<sup>40</sup> MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES.NOM-004-(2002) por el cual se dan especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de lodos y biosólidos. Diario Oficial. México. D.C. 2002., p. 1-44

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZACION DE LAS VARIABLES FÍSICAS

**5.1.1 Temperatura.** La temperatura es uno de los parámetros que se debe mantener dentro de unos rangos establecidos por el decreto 1287 de Colombia y la norma americana EPA. Este parámetro se midió diariamente en todo el proceso iniciando en el mes de septiembre y finalizando en el mes de febrero, datos que se obtuvieron con el Multiparametro que arrojó valores en tiempo real, como se especifica mes a mes en el **Anexo 1**.

Se especifica a continuación en la Tabla 9 el promedio de temperatura para los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero.

**Tabla 9. Datos prom de tem**

| datos temperatura promedios |       |      |       |
|-----------------------------|-------|------|-------|
| mes                         | Pasto | caña | Huevo |
| Sep.                        | 34    | 32   | 31    |
| Oct.                        | 37    | 37   | 33    |
| Nov.                        | 39    | 40   | 37    |
| Dic.                        | 33    | 34   | 34    |
| Ene.                        | 28    | 28   | 29    |
| Feb.                        | 27    | 27   | 31    |

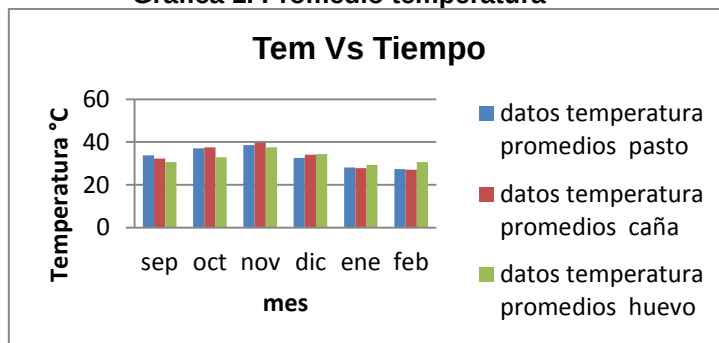
Fuente: Autores

La temperatura se mantiene en los cinco primeros meses, septiembre, octubre, noviembre y diciembre; con variaciones mínimas, ya que esta variable se tiene en control diario, para alcanzar los rangos predeterminados por las normas 1287 de 2014 de Colombia y la norma americana EPA 503, la cual debe estar en 40°C.

De acuerdo con los datos promedio arrojados se verifica una disminución notable de la temperatura en los dos últimos meses, enero y febrero; a causa de las reducciones de volumen que presentaron las pilas, ya que la humedad bajo y el contenido de agua disminuyó, lo que produjo valores de temperatura de 28°C.

Las temperaturas más bajas se presentaron en la pila con material de soporte cascara de huevo, ya que este material generó en todo el proceso bajos contenidos de humedad, esto se da por las propiedades de la cascara de huevo, la cual absorbe el agua del biosólido y reseca la muestra.

**Grafica 1. Promedio temperatura**



Al final del proceso se presentan temperaturas muy bajas, esto a causa de la favorable remoción de patógenos, puesto que estos en su proceso de reproducción para la eliminación generan calor dentro de la pila, y en el momento de su muerte las temperaturas disminuyen ya que el proceso de estabilización ha finalizado.

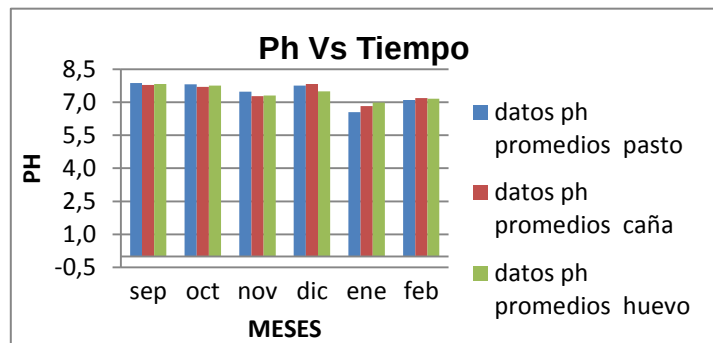
**5.1.2 pH.** El pH se midió diariamente en todo el proceso iniciando en el mes de septiembre y finalizando en el mes de febrero, datos que se obtuvieron con el Multiparametro que arrojó valores en tiempo real, como se especifica mes a mes en el **Anexo 2**.

De acuerdo con los promedios mensuales, Tabla 10, se verifica que el material de soporte no tuvo influencia en los cambios que presenta el pH, ya que en todo el proceso, en las tres pilas la variación fue mínima, como se ve en la Grafica 2.

**Tabla 10. Datos de pH**

| Valores promedio PH |       |      |       |
|---------------------|-------|------|-------|
| mes                 | Pasto | caña | Huevo |
| Sep.                | 7,9   | 7,8  | 7,8   |
| Oct.                | 7,8   | 7,7  | 7,8   |
| Nov.                | 7,5   | 7,3  | 7,3   |
| Dic.                | 7,8   | 7,8  | 7,5   |
| Ene.                | 7,5   | 7,8  | 7,0   |
| Feb.                | 7,1   | 7,2  | 7,2   |

**Grafica 2. Promedio de pH**



Fuente: Autores

**5.1.3 Humedad.** La toma de datos de humedad se hizo semanalmente (ver anexo 3) siguiendo el procedimiento planteado por el I.N.V.E-122-07<sup>41</sup>.

En la Tabla 11 se muestran los promedios de humedad de cada mes para todo el proceso de compostaje. La humedad en la pila con soporte pasto está en un rango de (29%-57%), la pila con soporte caña (34%-65%) y pila con caña (30%-67%).

La humedad se está regulando gradualmente para mantenerla en los rangos esperados de 40%-60%, y así garantizar el aumento de la temperatura, ya que están directamente relacionadas.

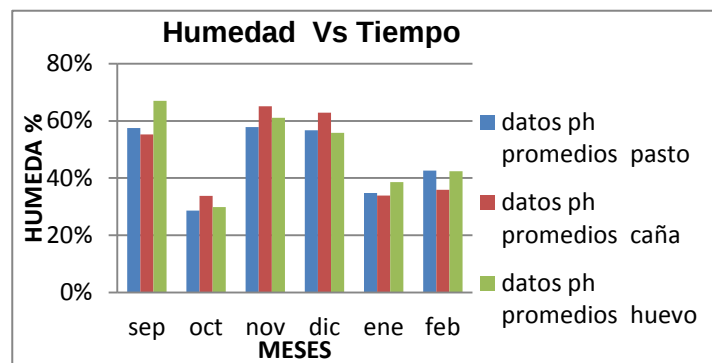
<sup>41</sup>COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. I.N.V...E-122 (2007). Pla cual se dan las pautas para la determinación en laboratorio del contenida de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. Colombia. 2007. P. 1-8

**Tabla 11. Datos promedio de humedad**

| datos humedad promedios |       |      |       |
|-------------------------|-------|------|-------|
| mes                     | pasto | caña | Huevo |
| Sep.                    | 57%   | 55%  | 67%   |
| Oct.                    | 29%   | 34%  | 30%   |
| Nov.                    | 58%   | 65%  | 61%   |
| Dic.                    | 57%   | 63%  | 56%   |
| Ene.                    | 35%   | 34%  | 39%   |
| Feb.                    | 43%   | 36%  | 42%   |

Fuente: Autores

**Grafica 3. Promedio humedad**



**5.1.4 Variación de volumen.** El volumen de la pila es muy importante a lo largo del proceso porque por lo general tiende a disminuir por la pérdida de humedad que se presenta, es por eso que se realizan mediciones periódicas para controlar la cantidad de masa crítica y garantizar así que el proceso se pueda llevar a cabo bajo condiciones adecuadas.

En la Tabla 12 se muestra una de las reducciones que presentaron las pilas durante todo el proceso de compostaje.

**Tabla 12. Variación de volumen**

| DIMENSIONES INICIALES                                                                                          | REDUCCIÓN DE VOLUMEN                                                                                                            |                                                                         |                                                                           |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                |                                                                                                                                 |                                                                         |                                                                           |  |
| <b>Pila de biosolido</b>                                                                                       | <b>Pila de biosolido+ huevo</b>                                                                                                 | <b>Pila de biosolido+ caña</b>                                          | <b>Pila de biosolido+ pasto</b>                                           |  |
| <b>Se inició con unas dimensiones de pila de biosolido de 1mx1mx1m para un volumen total de 1m<sup>3</sup></b> | Se redujo el volumen a causa de la baja humedad obteniendo dimensiones especificadas a continuación para cada una de las pilas: |                                                                         |                                                                           |  |
|                                                                                                                | Largo:0,9m,alto:0,9m y ancho :0,8m para volumen de 0,648 m <sup>3</sup>                                                         | Largo:0,95m,alto: 1m y ancho :0,7m para volumen de 0,665 m <sup>3</sup> | Largo:1m,alto:0,95m y ancho : 0,95m para volumen de 0,9025 m <sup>3</sup> |  |

Fuente: autores

Durante el proceso de compostaje se analiza la reducción de volumen que se presenta, haciendo mediciones semanales de las dimensiones de cada pila como

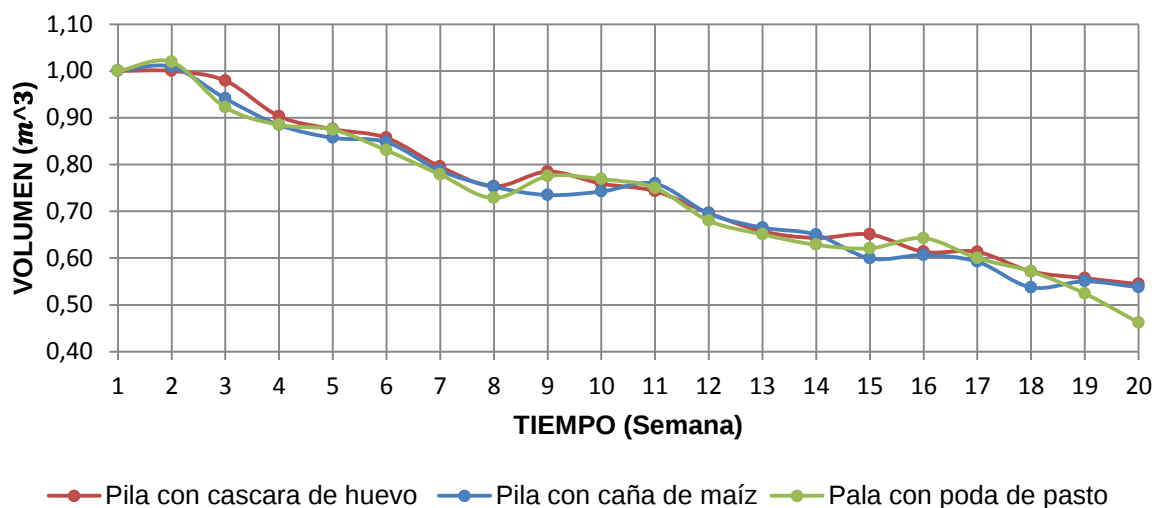
lo son alto, ancho y largo así como se muestra en la Tabla 13 , la reducción de las dimensiones fue constante durante el proceso puesto que cada semana bajaban.

**Tabla 13. Variación de volumen.**

|        | Pila con cascara de huevo |           |          |                           | Pila con caña de maíz |           |          |                           | Pala con poda de pasto |           |          |                           |
|--------|---------------------------|-----------|----------|---------------------------|-----------------------|-----------|----------|---------------------------|------------------------|-----------|----------|---------------------------|
| Semana | Ancho (m)                 | Largo (m) | Alto (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Ancho (m)             | Largo (m) | Alto (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Ancho (m)              | Largo (m) | Alto (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ) |
| 1      | 1                         | 1         | 1        | 1                         | 1                     | 1         | 1        | 1                         | 1                      | 1         | 1        | 1                         |
| 2      | 1                         | 1         | 1        | 1                         | 0,97                  | 1         | 1,04     | 1,01                      | 1,03                   | 0,97      | 1,02     | 1,02                      |
| 3      | 0,98                      | 1,03      | 0,97     | 0,98                      | 0,98                  | 0,99      | 0,97     | 0,94                      | 0,97                   | 0,97      | 0,98     | 0,92                      |
| 4      | 0,96                      | 0,97      | 0,97     | 0,90                      | 0,96                  | 0,97      | 0,95     | 0,88                      | 0,95                   | 0,96      | 0,97     | 0,88                      |
| 5      | 0,96                      | 0,95      | 0,96     | 0,88                      | 0,97                  | 0,95      | 0,93     | 0,86                      | 0,92                   | 0,97      | 0,98     | 0,87                      |
| 6      | 0,95                      | 0,93      | 0,97     | 0,86                      | 0,95                  | 0,97      | 0,92     | 0,85                      | 0,92                   | 0,95      | 0,95     | 0,83                      |
| 7      | 0,91                      | 0,92      | 0,95     | 0,80                      | 0,93                  | 0,94      | 0,9      | 0,79                      | 0,9                    | 0,93      | 0,93     | 0,78                      |
| 8      | 0,9                       | 0,9       | 0,93     | 0,75                      | 0,93                  | 0,93      | 0,87     | 0,75                      | 0,87                   | 0,93      | 0,9      | 0,73                      |
| 9      | 0,97                      | 0,87      | 0,93     | 0,78                      | 0,95                  | 0,91      | 0,85     | 0,73                      | 0,85                   | 0,94      | 0,97     | 0,78                      |
|        | Pila con cascara de huevo |           |          |                           | Pila con caña de maíz |           |          |                           | Pala con poda de pasto |           |          |                           |
| Semana | Ancho (m)                 | Largo (m) | Alto (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Ancho (m)             | Largo (m) | Alto (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Ancho (m)              | Largo (m) | Alto (m) | Volumen (m <sup>3</sup> ) |
| 10     | 0,95                      | 0,85      | 0,94     | 0,76                      | 0,94                  | 0,94      | 0,84     | 0,74                      | 0,87                   | 0,93      | 0,95     | 0,77                      |
| 11     | 0,94                      | 0,85      | 0,93     | 0,74                      | 0,94                  | 0,95      | 0,85     | 0,76                      | 0,84                   | 0,93      | 0,96     | 0,75                      |
| 12     | 0,9                       | 0,85      | 0,91     | 0,70                      | 0,92                  | 0,91      | 0,83     | 0,69                      | 0,83                   | 0,91      | 0,9      | 0,68                      |
| 13     | 0,87                      | 0,83      | 0,91     | 0,66                      | 0,87                  | 0,91      | 0,84     | 0,67                      | 0,86                   | 0,89      | 0,85     | 0,65                      |
| 14     | 0,86                      | 0,84      | 0,89     | 0,64                      | 0,88                  | 0,89      | 0,83     | 0,65                      | 0,84                   | 0,88      | 0,85     | 0,63                      |
| 15     | 0,88                      | 0,84      | 0,88     | 0,65                      | 0,84                  | 0,87      | 0,82     | 0,60                      | 0,82                   | 0,87      | 0,87     | 0,62                      |
| 16     | 0,85                      | 0,82      | 0,88     | 0,61                      | 0,83                  | 0,88      | 0,83     | 0,61                      | 0,83                   | 0,89      | 0,87     | 0,64                      |
| 17     | 0,83                      | 0,83      | 0,89     | 0,61                      | 0,82                  | 0,87      | 0,83     | 0,59                      | 0,83                   | 0,85      | 0,85     | 0,60                      |
| 18     | 0,81                      | 0,83      | 0,85     | 0,57                      | 0,79                  | 0,85      | 0,8      | 0,54                      | 0,82                   | 0,86      | 0,81     | 0,57                      |
| 19     | 0,79                      | 0,82      | 0,86     | 0,56                      | 0,79                  | 0,86      | 0,81     | 0,55                      | 0,8                    | 0,84      | 0,78     | 0,52                      |
| 20     | 0,8                       | 0,81      | 0,84     | 0,54                      | 0,81                  | 0,84      | 0,79     | 0,54                      | 0,75                   | 0,8       | 0,77     | 0,46                      |

Fuente: Autores

**Grafica 4. Variación de volumen.**

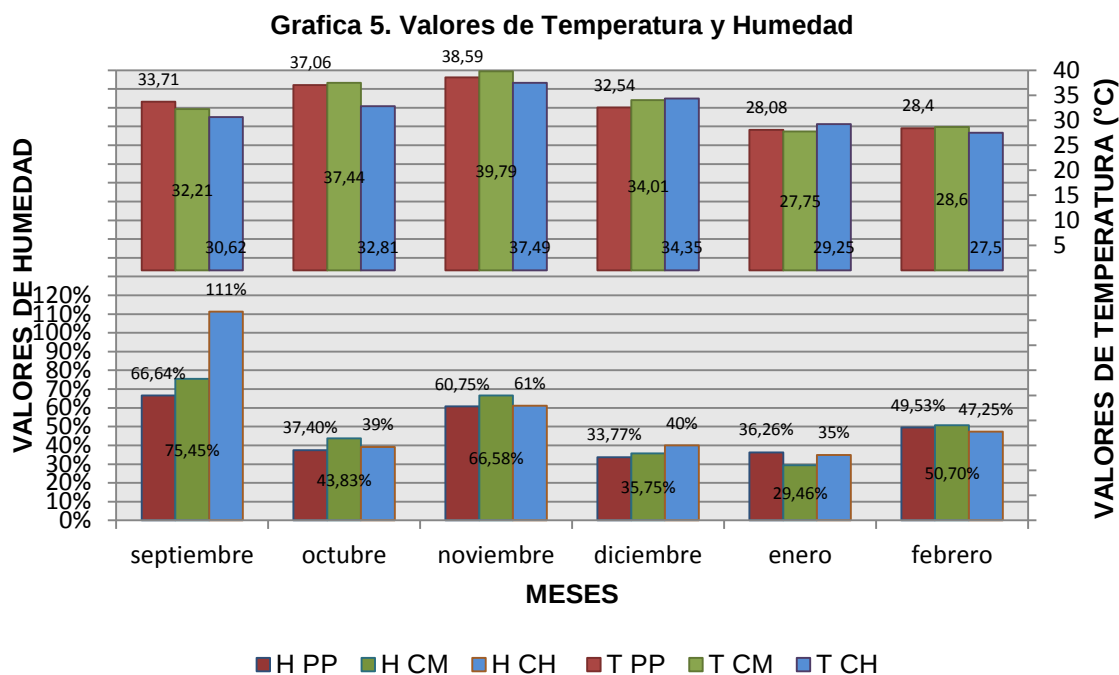


Fuente: Autores

Se verifica según los datos tomados en todo el proceso de compostaje, que la humedad se debe mantener en un rango estable para que la temperatura se comporte de manera adecuada, encontrando los mejores resultados de temperatura entre (30-40°C) cuando la humedad se conserva en rangos de 40 a 60%.

En las primeras semanas del mes de septiembre la temperatura se mantuvo alta mientras la humedad bajaba, esto se presentó debido a la degradación de los materiales de soporte, provocando que la actividad microbiana y la temperatura aumentaran.

**5.1.5 Relación de temperatura y humedad, promedios mensuales.** En la Grafica 5 se observa la variación obtenida para temperatura y humedad en cada una de las pilas, el pH no se toma en cuenta puesto que su comportamiento es similar para las tres pilas (pila con cascara de huevo, pila con poda de pasto y pila con caña de maíz), por lo tanto no aporta una tendencia de comportamientos que se relacione con las demás variables físicas (temperatura y humedad). En los anexos 1, 2 y 3 se muestran los datos registrados durante el proceso de compostaje mes a mes para temperatura, pH y humedad.



Fuente: Autores

### CONVENCIONES:

T=Temperatura

H=Humedad

PP= Poda de Pasto

CM= Caña de maíz

CH= Cascara de Huevo

En la Grafica 5 se observó que el comportamiento es muy parecido en las tres pilas (pila con cascara de huevo, pila con caña de maíz y pila con poda de pasto),

Los valores de temperatura más altos se presentaron en el mes de noviembre, para este mes se obtuvieron valores de humedad superiores al 60%, mientras que los valores más bajos de temperatura se registraron en los meses de septiembre, enero y febrero en donde los datos de humedad fueron los máximos y mínimos respectivamente estando por encima del 65% y por debajo del 40%, entre enero y febrero se observa un ascenso de la humedad pero un descenso en la temperatura lo que no concuerda con lo establecido anteriormente, esto se presenta por la disminución de volumen que para estos meses fue del 60% respecto al inicial.

Cuando la humedad se manejó entre el rango de 40 y 65% se lograron las temperaturas más altas, en los casos en los que la humedad es mayor o menor al rango dicho, la temperatura tiende a disminuir. Los valores más acertados los

presento la pila con caña de maíz, presentando las temperaturas más altas y los rangos de humedad más cercanos al óptimo, mientras que los valores más bajos de temperatura y rangos de humedad los presento la pila con cascara de huevo, la pila con poda de pasto aunque presento valores cercanos a los registrados para la pila con caña de maíz no los supera.

## 5.2 VARIABLES MICROBIOLÓGICAS

Los análisis de muestras fueron hechos por ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA (**ver anexo 4**), la toma y entrega de se realiza por los autores de la investigación siguiendo la Semanart 2002<sup>42</sup> en las fechas de 19 diciembre de 2014 y 20 de enero de 2015, los resultados son entregados por el laboratorio 8 días hábiles luego de la recepción certificados por la firma de un microbiólogo y el IDEAM

Durante el proceso de compostaje se realizaron 2 pruebas de laboratorio para cada pila, siendo así que cada una de las pilas tiene dos valores de contenido de microorganismos hechas en diciembre y enero, estos valores se compararon con los suministrados en septiembre por las PTAR EL SALITRE (**ver anexo 5**), con el fin de determinar la reducción de patógenos, estableciendo el contenido de coliformes totales, coliformes fecales y salmonella como lo define el decreto 1287<sup>43</sup>, en donde se regula las variables microbiológicas y el contenido presente para la caracterización de biosólido.

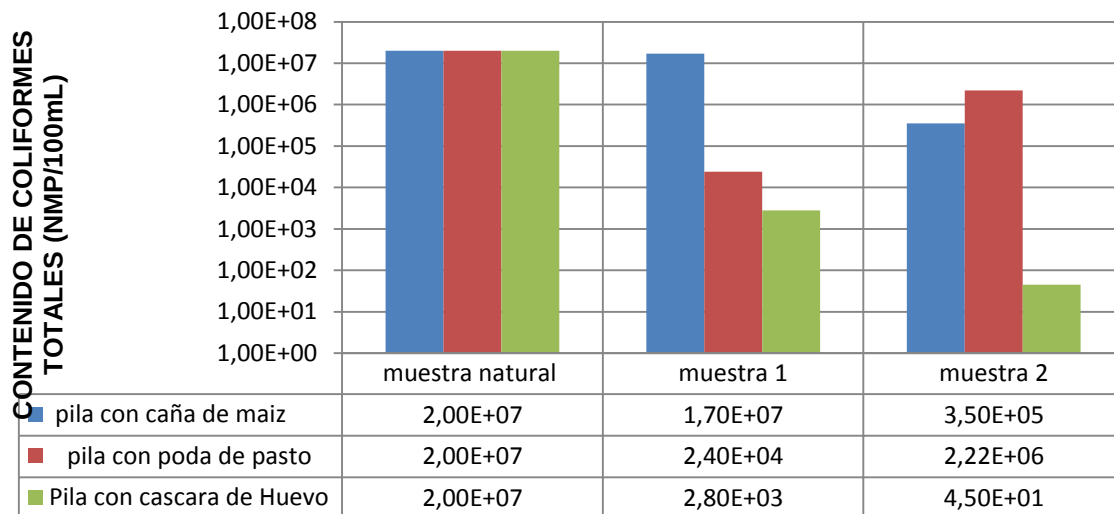
**5.2.1 Coliformes totales.** La pila que mejor se comportó en cuanto a eliminación de coliformes totales, fue la pila con cascara de huevo, ya que los resultados arrojados por ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA; estuvieron dentro de los rangos permisibles de remoción según el decreto 1287 que lo clasifica como compost de clase A apto para ser utilizado en agricultura, la pila con soporte de caña de maíz aunque también presento reducción de coliformes fecales no alcanzo los valores establecidos y la pila con soporte de pasto en el proceso fue la que peor se comportó ya que de las dos muestras analizadas, presento un aumento en su contenido de coliformes totales.

---

<sup>42</sup> Op. Cit., Semanart-(2002) p. 34

<sup>43</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, DIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287. (10, julio, 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Bogotá D.C.: El ministerio. 2014. 15 p.

**Grafica 6. Contenido de coliformes totales**

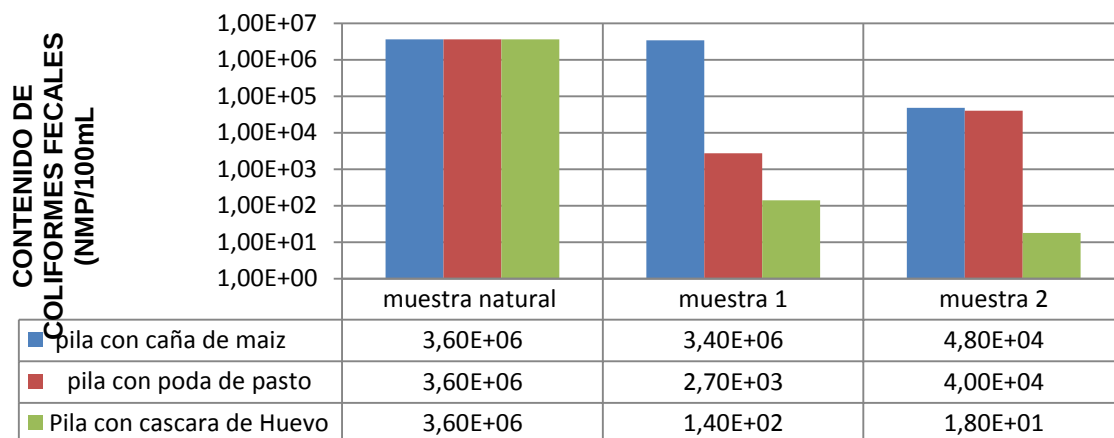


Fuente: Autores

En la Grafica 6 se observa la reducción de coliformes fecales en cada una de las pilas, teniendo en cuenta los dos análisis realizados, donde se verifica el comportamiento de remoción.

**5.2.2 Coliformes fecales.** al igual que con el contenido de coliformes totales, la pila con soporte de cascara de huevo fue la que presento los mejores resultados en cuanto a contenido de coliformes fecales, llegando a comportarse dentro de los rangos máximos permisibles establecidos por el decreto 1287.

**Grafica 7. Contenido de coliformes fecales**

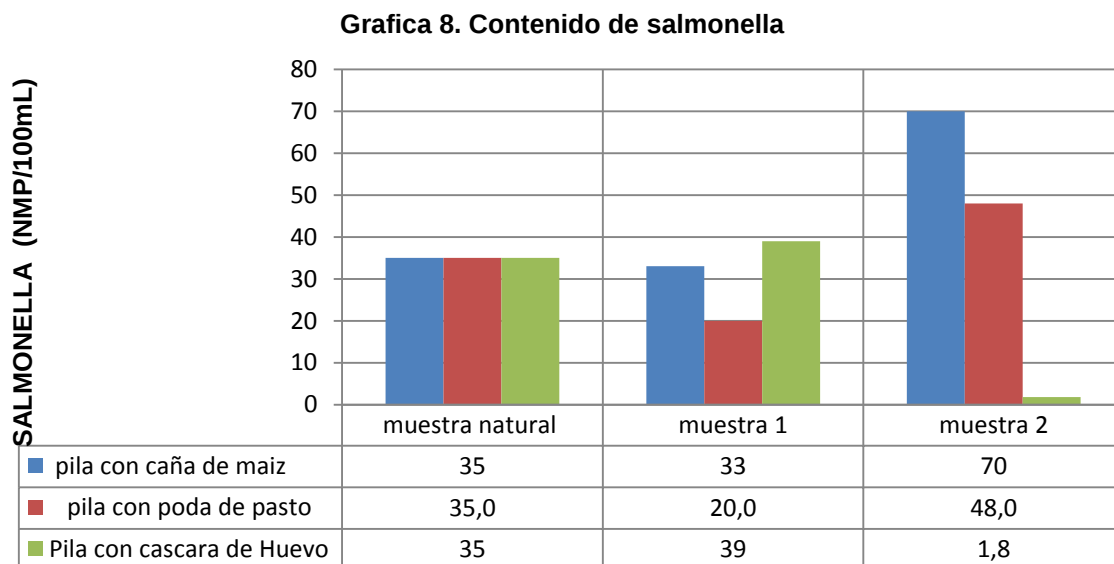


Fuente: Autores

En la Grafica 7 se observa la representación del comportamiento del contenido de coliformes fecales para cada pila durante el proceso de compostaje, el igual que

para el contenido de coliformes totales la pila con cascara de huevo fue la que mejor se comportó en cuanto a reducción de coliformes fecales llegando a cumplir con los valores máximos permisibles por el decreto 1287, la pila con caña de maíz también redujo en gran parte el contenido de microorganismos pero aun así no alcanza a cumplir con los valores regulados por el decreto, mientras que la pila con poda de pasto fue la que peores resultados mostro puesto que sus valores tendieron a aumentar no obstante no se redujo en comparación con el análisis de la muestra al natural.

**5.2.3 Salmonella.** Al igual que con el contenido de coliformes totales y fecales, la pila con soporte de cascara de huevo fue la que presento los mejores resultados en cuanto a contenido de salmonella, llegando a comportarse dentro de los rangos máximos permisibles establecidos por el decreto 1287.

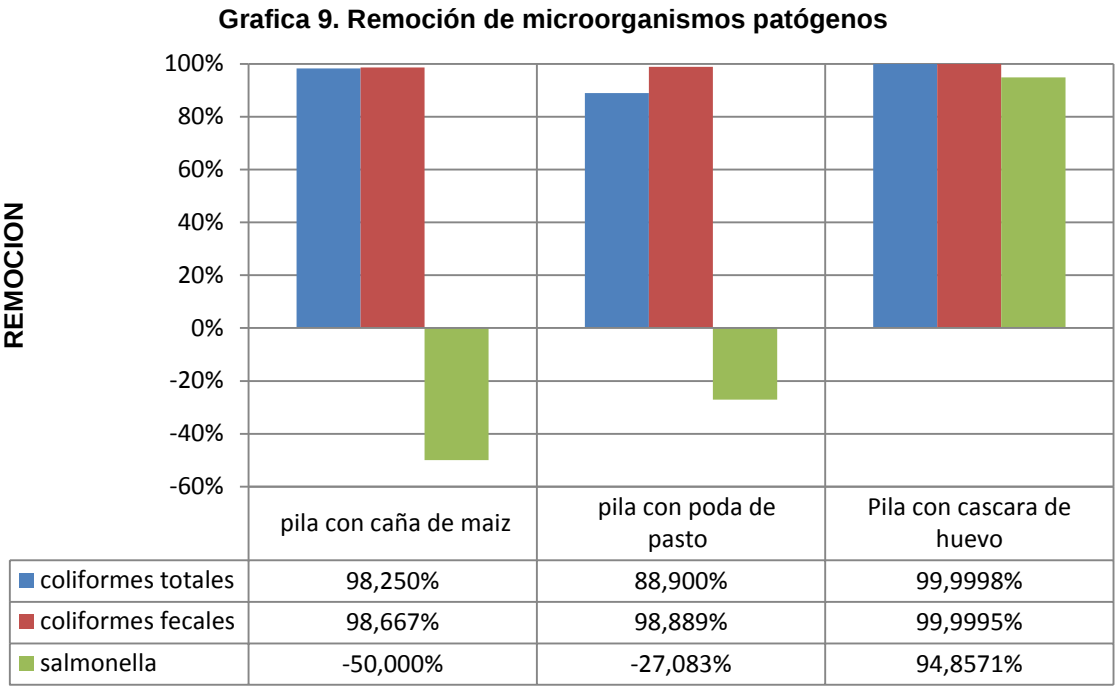


Fuente: Autores

En la Grafica 8, se observa la representación del comportamiento del contenido de salmonella durante el proceso de compostaje, esta es la variable microbiológica más difícil de controlar puesto que su eliminación se debe en gran medida a la temperatura con la que cuente el entorno en el que se encuentre, la pila con cascara de huevo fue la que mejor se comportó puesto que la reducción que presento al final del proceso concuerda con los máximos permisibles establecidos por el decreto 1287 , aunque en la muestra 1 tuvo una tendencia al aumento en la muestra 3 se disminuyó drásticamente. Las pilas con poda de pasto y caña de maíz se comporta de manera similar ya que en la muestra 1 tuvo una reducción y para la muestra 2 aumentan, ninguna de estas pilas cumple con los valores

máximos permisibles en el decreto 1287 aunque la pila con poda de pasto tuvo valores más bajos que los que presento la pila con caña de maíz.

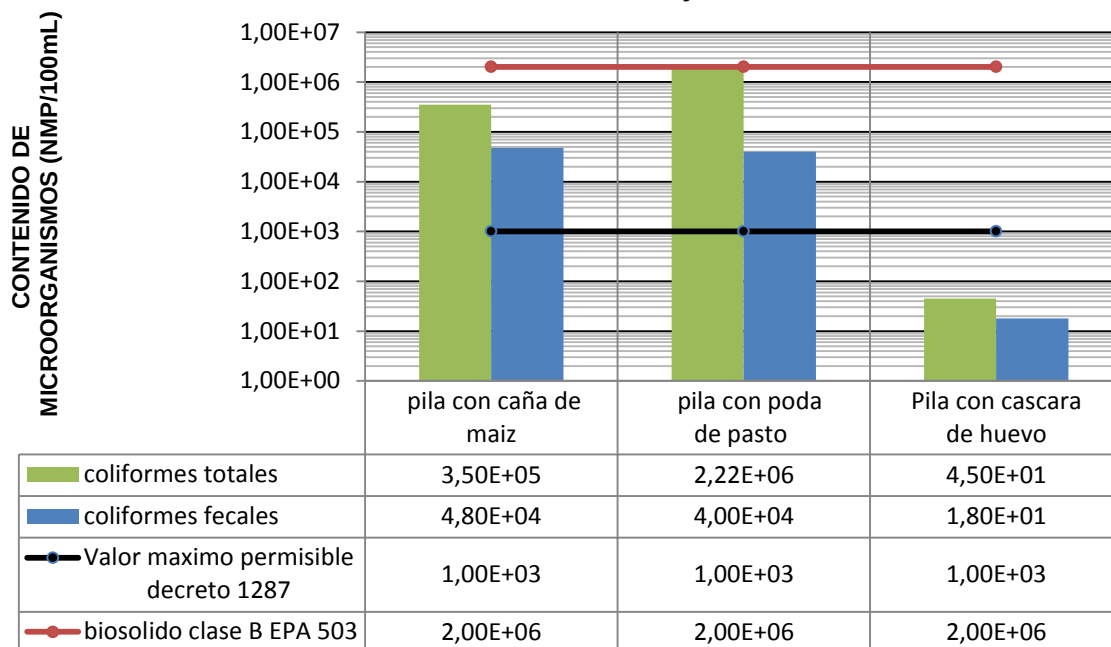
**5.2.4 Remoción de microorganismos.** La remoción de microorganismos se presenta con base en la comparación de los resultados aportados por ANALIZAR LABORATORIO FISICOQUIMICO LTDA (**ver anexo 4**) y LA PTAR EL SALITRE (**ver anexo 5**), es decir la reducción que presento entre la muestra de biosolido al natural y la muestra del compost obtenido.



Fuente: Autores

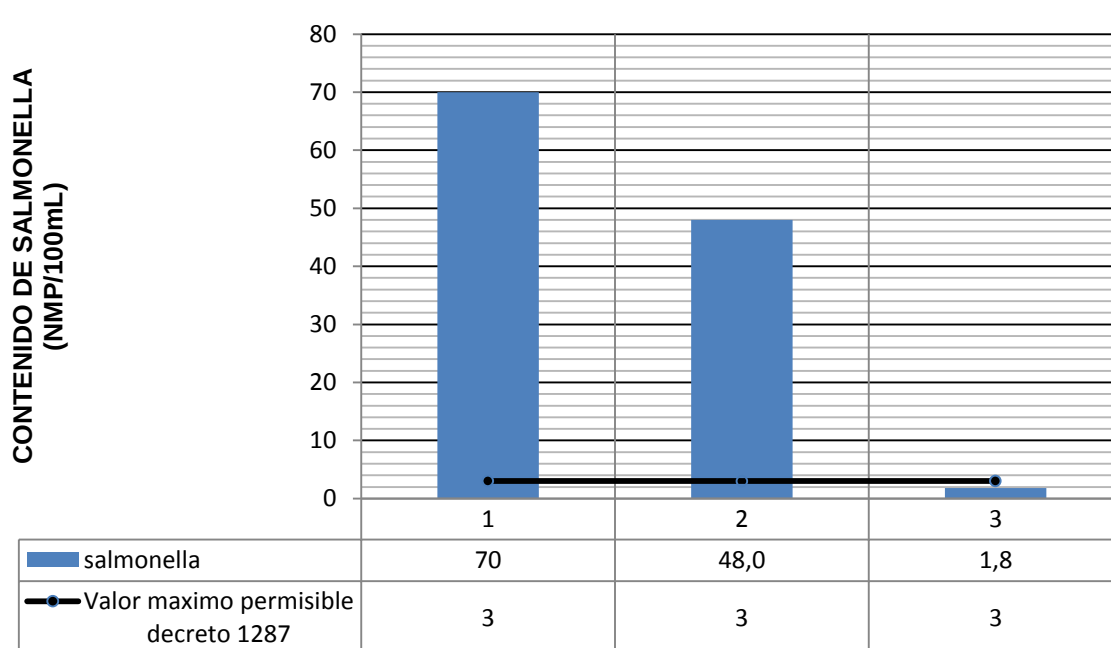
La Grafica 9 presenta la remoción final de microorganismos patógenos registrados en cada pila (pila con caña de maíz, pila con poda de pasto y pila con cascara de huevo) en forma estadística de acuerdo con los resultados presentados de cada muestra analizada, se pudo observar que la que mejores valores presento fue la pila con cascara de huevo que tuvo los porcentajes de remoción más altos llegando hasta el 99.999% en todas las variables microbiológicas, aunque las pilas con poda de pasto y caña de maíz también presentaron reducciones importantes no alcanzan a cumplir con los máximos permitidos por el decreto 1287 como se puede observar en la Grafica 10 y Grafica 11, la remoción de salmonella para estas dos pilas presento valores negativos lo que quiere decir que su contenido aumento.

**Grafica 10. Contenido de coliformes fecales y totales final Vs normas**



Fuente: Autores

**Grafica 11. Contenido de Salmonella Vs normas**



Fuente: Autores

En la Grafica 10 y la Grafica 11 se observan los valores de microorganismos patógenos registrados en la última muestra analizada y los rangos permitidos por el decreto 1287 para biosolido clase A y la norma americana EPA 503 para clase B, se define que la única pila que presenta valores óptimos para emplearlo como biosolido clase A es la que contenía soporte de cascara de huevo, posibilitando su uso como abono orgánico en cultivos, la pila con caña de maíz y poda pasto aunque se redujeron en determinados porcentajes no alcanzan los valores para clase A, sin embargo alcanzan los valores para clase B y aunque esto no posibilite el uso en la agricultura puede ser utilizado en otros casos como Biorremediación y control de erosión, solo aplicable a cierta distancia de las zonas urbanas como lo define el decreto 1287.

### 5.3 RELACIÓN ENTRE VARIABLES FÍSICAS Y MICROBIOLÓGICAS

Como lo dice Valencia<sup>44</sup> existe una relación entre las condiciones físicas (pH, humedad y temperatura) y el proceso de latencia, crecimiento y muerte de microorganismos, la relación establece unos parámetros en lo que los patógenos tienen un ambiente óptimo para su crecimiento con respecto a la temperatura, pH y humedad.

Para hacer un análisis del comportamiento de las variables físicas (pH, humedad y temperatura) respecto a las variables microbiológicas (coliformes totales, coliformes fecales y salmonella) se hizo un promedio de los datos registrados diariamente, estableciendo así un valor mensual, tomando los datos de los meses en los que se realizó análisis de laboratorio para luego compararlos con los resultados microbiológicos.

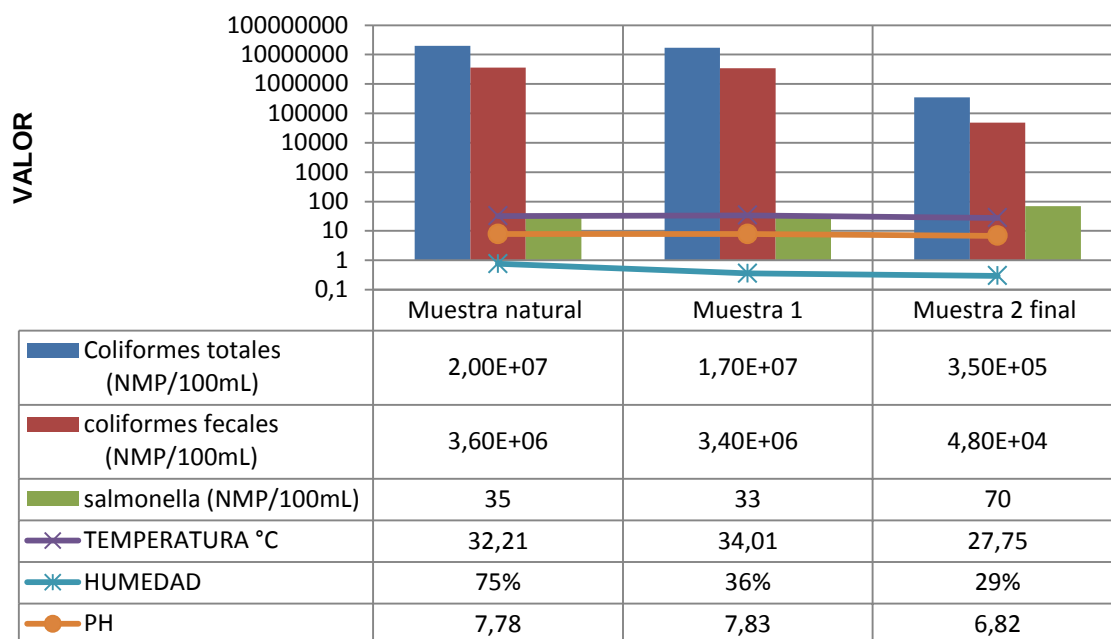
**5.3.1 Pila con caña de maíz.** En la Grafica 12 se muestran Los rangos de las variables físicas que presento la pila con soporte de caña, se observa que no concuerdan con los expuestos por Valencia, incluso los valores obtenidos son los propicios para el crecimiento de los microorganismos de estudio (coliformes totales, coliformes fecales y salmonella) estando entre 20 y 35°C para la temperatura, 6,5 y 8 para el pH y 30 y 40% para la humedad, pero aun así se observa la disminución de microorganismos patógenos, esto es por los materiales de soporte y enmienda utilizados, determinando que colaboran con la eliminación de microorganismos, ya que los valores que expuso Valencia son referentes a un proceso de compostaje normal sin adición de elementos.

---

<sup>44</sup> VALENCIA, Judith Marcela. Estudio para la Viabilidad Técnica de Compostaje a partir de Biosolido seco Proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR. trabajo de grado, San Buenaventura: Universidad de Cali, Facultad de Administración Agroindustrial. 2012. 87 p.

Se observa la relación que existe entre las variables físicas determinando que la humedad es de gran relevancia puesto que cuando esta se comporta fuera de los rangos óptimos (40-60%), ya sea por exceso o por ausencia la temperatura tiende a disminuir al igual que el pH, así mismo entre menor es la humedad el contenido de microorganismos tiende a disminuir.

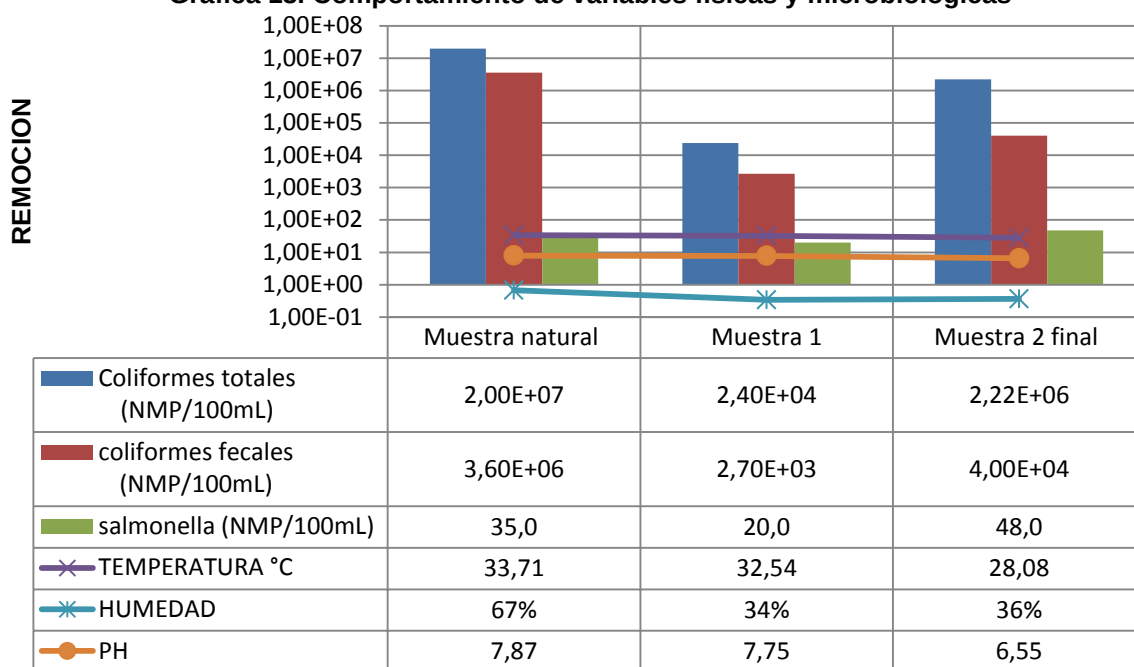
**Grafica 12. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas**



Fuente: Autores

**5.3.2 Pila con poda de pasto.** En la Grafica 13 se observan los datos obtenidos de las variables físicas y microbiológicas para la pila con poda de pasto en los meses en los que se obtuvieron resultados de análisis microbiológicos, los valores tampoco concuerdan con los de Valencia, pero a diferencia de la pila con caña de maíz el comportamiento del contenido de microorganismos no se reduce de forma constante sino, que disminuye entre la muestra de biosolido al natural y la muestra 1, y aumenta entre la muestra 1 y la muestra 2 (final), los valores de temperatura se encuentran entre 25 y 40°C, la humedad entre 35 y 60% y el pH entre 6,5 y 8, al igual que para la pila con poda de pasto la humedad es de gran relevancia teniendo la tendencia al mismo comportamiento, comprobando que entre la humedad y el contenido de microorganismo hay una relación directa.

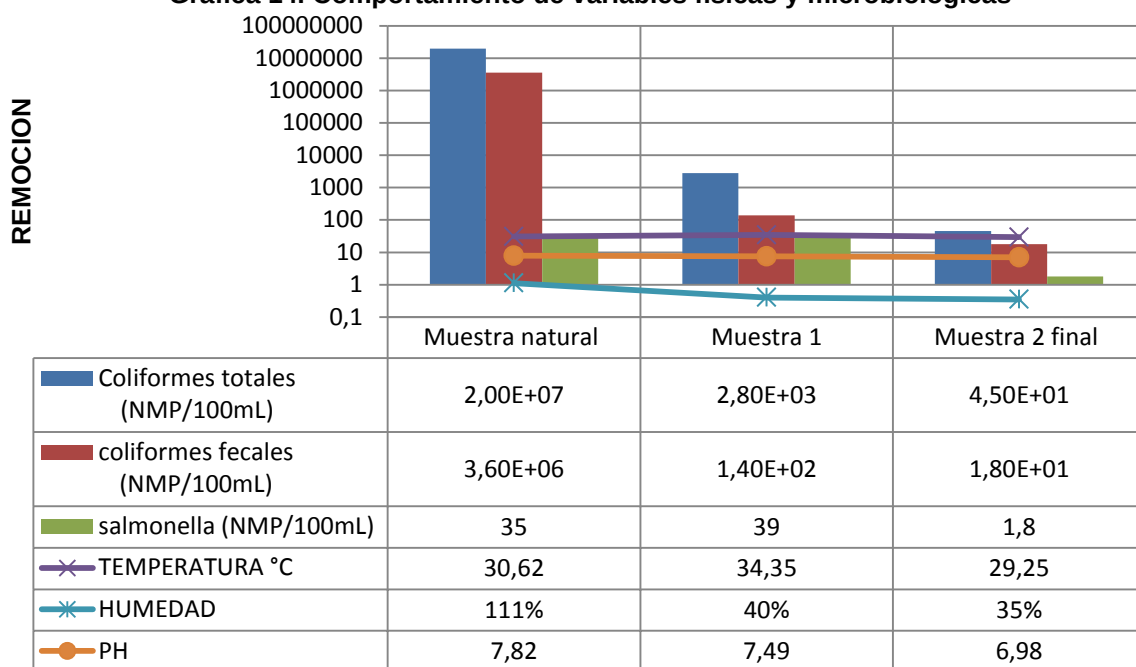
**Grafica 13. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas**



Fuente: Autores

**5.3.3 Pila con cascara de huevo.** En la Grafica 14 se presentan los datos obtenidos para la pila con cascara de huevo en los meses en los que se realizaron las pruebas de laboratorio, esta pila fue la que mejores resultados microbiológicos presento, teniendo el mayor porcentaje de remoción entre las tres pilas, los valores registrados para las variables físicas en los meses son parecidos a los presentados por las pilas de biosolido con poda de pasto y caña de maíz, la tendencia con respecto a las variables físicas sigue siendo la misma encontrando que con la reducción de humedad el contenido de patógenos tiende a disminuir y se observa que cuando está entre los rangos óptimos (40 a 60%) la temperatura aumenta.

**Grafica 14. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas**



Fuente: Autores

## 6. CONCLUSIONES

- De acuerdo con el análisis y tratamiento que realizó la planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre al biosólido, se determina que se clasifica según la EPA como clase B, ya que se ha reducido su concentración de metales pesados y patógenos, lo que favorece para su implementación en zonas que no vayan a tener contacto directo con las personas.
- Los resultados obtenidos en esta investigación, demostraron que el compostaje de biosólidos con implementación de material de soporte cascara de huevo, es una alternativa de uso beneficioso, ya que logra remover los patógenos y así clasificarlo según el decreto 1287 como clase A, lo que lo hace apto para usar en la agricultura.
- El compost que resulta del proceso de compostaje de biosólido con cascara de huevo es beneficioso para utilizarlo como enmiendas en procesos de reforestación y control de erosión y como fertilizantes en la agricultura, ya que las características físicas y microbiológicas lo clasifican como clase A.
- Los resultados de PH obtenidos en esta investigación muestran que se mantiene en los rangos aptos (6,5-8), para el uso en la agricultura según la NTC 5167<sup>45</sup>.
- Los volteos son esenciales durante el proceso de compostaje porque contribuyen con la aireación del material y evitan la compactación lo que favorece el comportamiento adecuado de las variables físicas (pH, temperatura y humedad).
- Los materiales de enmienda y soporte que se implementaron en la investigación aportaron a las pilas de biosólido minerales y favorecieron la aireación, lo cual ayudó a aumentar la cantidad de poros y evitó la compactación del material.
- Con el cambio de las dimensiones y cantidades de material para cada pila, las variables microbiológicas y físicas se comportan de manera diferente a las establecidas por otros autores, pero aun así se genera la disminución de patógenos.

---

<sup>45</sup> NORMA TECNICA COLOMBIANA. Productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelos. NTC-5167., 2011. 51 p.

- La frecuencia de volteos se analiza de acuerdo a la fase por la que esté atravesando el proceso de compostaje, hay que tener en cuenta el comportamiento de las variables de estudio y establecer la periodicidad con que se realicen, puesto que si no se hacen en el momento adecuado las variables se alteran afectando el proceso de estabilización.
- La pila con cascara de huevo arrojo valores apropiados en cuanto a contenido de microorganismos patógenos con respecto a los máximos permisibles por el decreto 1287, catalogando el compost resultante como clase A según la norma americana EPA título 40 parte 503, haciéndolo apto para el uso en la agricultura, definiendo que la elección de los materiales de enmienda y soporte y los porcentajes de mezcla fueron los apropiados.
- La pila con poda de pasto disminuyo el contenido de coliformes totales y fecales pero aumento el contenido de salmonella, no alcanzo los valores máximos permisibles por el decreto 1287, por lo tanto su uso es restringido.
- La pila con caña de maíz aumento el contenido de salmonella y disminuyo el contenido de coliformes fecales y totales, pero no alcanzo los parámetros establecidos por el decreto 1287 aunque es catalogado como biosolido clase B según la norma américa EPA título 40 parte 503 haciéndolo apto para uso con ciertas restricciones.
- La pila con soporte de caña presento los rangos más apropiados de variables físicas, encontrándose entre 30 y 60% (humedad), 30 y 47°C (temperatura) y 6,5 y 8 (pH).
- La pila con cascara de huevo presento los rangos de valores más bajos entre las tres pilas en el análisis, encontrándose rangos de temperatura entre 20 y 40°C, humedades entre 25 y 50% y pH entre 6 y 7,5.
- Las pilas con poda de pasto y caña de maíz no cumplieron con los valores máximos permisibles establecidos por el decreto 1287, pero cumplen con las regulaciones de la norma EPA título 40 parte 503 para utilizarlo como clase B.
- La temperatura cambia a causa de factores de adaptabilidad del material, haciéndola más baja en las primeras semanas del proceso de compostaje y presentando un alza en las semanas subsiguientes, así mismo es un valor muy cambiante por los factores climáticos externos.
- La humedad con la que llego el material era muy alta alcanzando valores de hasta el 150 %, lo que genero que las temperaturas no aumentaran y se mantuvieran en un promedio de 33°C en las primeras semanas de análisis.

- la temperatura se comporta de manera diferente en cada pila (pila con cascara de huevo, pila con caña de maíz y pila con poda de pasto) presentando variaciones considerables en periodos de tiempo corto.
- Se obtiene un compost estable en cuanto a olor y color siendo su olor parecido al de tierra mojada y casi imperceptible y su color café oscuro, estando entre los rangos necesarios para compostaje<sup>46</sup>.
- Las variables físicas son dependientes entre sí y afectan el contenido de patógenos, cuando la humedad se comporta fuera de unos rangos establecidos la temperatura, el pH, los coliformes totales, coliformes fecales y salmonella se alteran.
- Los resultados obtenidos a partir de esta investigación, demuestran que el compostaje de biosolido es factible, siempre y cuando se utilicen materiales de soporte y enmienda en cantidades adecuadas y se controle el tiempo de volteos, y las variables físicas. Estas variables son definitivas para la elaboración de un compost estable, los materiales y cantidades que cumplen con las especificaciones del decreto 1287 y la norma americana EPA título 40 parte 503 son  $0.5m^3$  de biosolido,  $0,35 m^3$  de soporte y  $0,15 m^3$  de enmienda.
- El compostaje de biosolido es factible, y se puede usar para uso beneficioso en cualquier PTAR con producción de biosolido, teniendo cuidado de conservar las proporciones y los materiales con los cuales la estabilización se logró completamente.
- La temperatura y la humedad tuvieron rangos de variación entre 27 y 40°C y 30 y 35% respectivamente, los valores más altos de temperaturas se presentan en el material con soporte de caña de maíz, mientras que la pila con cascara de huevo se presentaron los valores más bajos.
- La temperatura y la humedad son dependientes una de la otra, siendo la humedad de gran relevancia durante el proceso, puesto que cuando esta es muy alta la temperatura tiende a disminuir, igualmente si la humedad es muy baja la temperatura no aumenta de manera apropiada estableciendo que las mejores temperaturas se observan cuando el rango de humedades varía entre el 45 y 65%.

---

<sup>46</sup> VALENCIA, Judith Marcela. Estudio para la Viabilidad Técnica de Compostaje a partir de Biosolido seco Proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR. trabajo de grado, San Buenaventura: Universidad de Cali, Facultad de Administración Agroindustrial. 2012. 87 p.

## 7. RECOMENDACIONES

Utilizar otros materiales de enmienda y soporte, con el fin de determinar si es una variable representativa en cuanto a contenido de patógenos y cambio en las variables físicas.

Utilizar otras relaciones de mezcla de materiales (biosólido, enmienda y soporte), ya que a través de las diferentes experiencias se puede llegar a tener mejores resultados.

Tratar de hacer los volteos mecánicamente ya que esto garantiza con un solo movimiento una homogenización del material, haciendo que lo interno quede externo y viceversa.

Al momento de elaborar las pilas, generar la forma de volcán, que en lo posible tenga un largo mayor o igual a 1.5m para facilitar el volteo y garantizar las condiciones de reproducción y muerte de microorganismos.

Utilizar la protección adecuada para el manejo y manipulación del biosólido, ya que se trata de un producto con capacidad tóxica y contaminante.

Verificar que se cuente con los materiales y elementos necesarios para la elaboración del proceso y toma de datos.

Garantizar que el volumen mínimo de la pila sea mayor a o igual a  $1\text{ m}^3$  para evitar la alteración de variables.

Ser constantes en los tiempos de toma de datos, en los volteos y en la revisión de reducción de volumen, para prevenir márgenes de error en las muestras al realizar los análisis microbiológicos.

Aislar completamente la zona en la que se realiza el proceso de compostaje, evitando que vectores puedan alterar el proceso o que material externo como plantas, tierra o polvo afecten la calidad del material.

La humedad que trae el material de la planta es muy alta por lo tanto en el comienzo del proceso se deben realizar volteos con mayor frecuencia, hasta el punto en el que el material se estabilice.

El proceso de selección del material de enmienda y soporte así como las cantidades se debe hacer de acuerdo a las necesidades del proceso teniendo en cuenta parámetros tales como: contenido microbiológico, humedad, compactación, temperatura y pH.

La humedad es el único parámetro del cual se puede tener un control total, ya que este es el responsable principal de los cambios del pH y la temperatura, se debe tener especial cuidado, de tal manera que si la humedad es superior se regula con los volteos y si es inferior se puede adicionar un poco de agua teniendo cuidado de no estropear el proceso.

Llevar un control de datos constante y preciso con orden cronológico, puesto que permite controlar posibles cambios que afectan el material, y establecer soluciones y la falta de un dato puede variar los resultados del proceso.

Tener especial cuidado con la estructura que cubre el material puesto que si este tiene algún desperfecto o no funciona correctamente la lluvia y el viento pueden afectar las condiciones del proceso.

Si el material en determinado tiempo no cumple con las condiciones esperado se debe analizar nuevas posibilidades para mejorar el desarrollo del biosólido tales como disposición de una mayor cantidad, adición de materiales de enmienda o soporte y de ser necesario aditivos químicos para así cumplir con las expectativas esperadas

## 8. GLOSARIO

---

### A

**Aguas Residuales:** Desecho líquido proveniente de residencias, edificios, instituciones, fábricas o industrias.

---

### B

**Biosólido:** Desecho que queda después de la separación y tratamiento de las aguas residuales, también se define como biosólido a los lodos cloacales que pueden ser usados de manera beneficiosa, especialmente como una enmienda para el suelo.

---

### C

**Compostaje:** Biotécnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica.

**Compostaje aeróbico:** Se caracteriza por el comportamiento de los metabolismos respiratorios aerobios y eliminación de etapas mesotermicas con etapas termogenicas y con la participación de microorganismos mesófilos y termófilos respectivamente.

**Compostaje en pilas de volteo:** Este sistema de compostaje es el más utilizado, y se realiza mediante un volteo manual o mecánico. En este método se amontona el material, se mezcla y voltea periódicamente, evitando así la compactación y entregando oxígeno al sistema.

**Coliformes:** Su presencia indica que los alimentos podrían estar contaminados con heces fecales humanas o de animales. Los microbios que provocan enfermedades (patógenos) y que están presentes en las heces causan: diarrea, retortijones, náuseas, cefaleas u otros síntomas. Estos patógenos podrían representar un riesgo de salud muy importante para bebés, niños pequeños y personas con sistemas inmunológicos gravemente comprometidos.

---

## D

**Disposición final:** Procedimiento de eliminación mediante el depósito definitivo de lodos, con tratamiento previo. La aplicación de lodos al suelo no se considera disposición final.

---

## E

**E. coli:** Es un tipo de bacteria que normalmente vive en los intestinos de los humanos y los animales. La mayoría de las veces no causa ningún problema. Sin embargo, ciertos tipos (o cepas) de E. coli pueden ocasionar intoxicación alimentaria.

**Etapas de maduración:** Etapa en la cual se completa la estabilización de la materia orgánica, se reduce la actividad biológica y los compuestos fácilmente digeribles, generando un sustrato que contiene nutrientes y materia orgánica estable.

**Etapas de termofílica:** Etapa en la cual se manejan temperaturas de 45° y generalmente hasta 60°C durante la cual se produce la reducción de patógenos y de semillas de malezas.

---

## H

**Humedad:** Relación expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o “agua libre”, en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

---

## P

**Patógeno:** Es todo agente (o cualquier “ente” en otras áreas fuera de la biología) que puede producir enfermedad o daño a la biología de un huésped, sea este humano, animal o vegetal.

**PH:** (Potencial de Hidrogeno) es una medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia.

**PTAR:** Planta de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de aguas residuales (o agua residual domestica) incorpora proceso físicos, químicos y biológicos los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del uso humano cotidiano del agua.

-----L-----

**Lodo clase A:** Lodo sin restricciones sanitarias para la aplicación al suelo

**Lodo clase B:** Lodo apto para la aplicación a los suelos, con restricciones sanitarias de aplicación según el tipo y localización de los suelos.

**Lodo crudo:** Lodo proveniente de la etapa de decantación primaria.

**Lodo estabilizado:** Lodo con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios de acuerdo con lo establecido en el presente reglamento.

-----R-----

**Relleno sanitario:** Instalación para la disposición final de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud de la población y daño para el medio ambiente, en el cual los residuos son compactados en capas al mínimo volumen practicable.

-----S-----

**Salmonella:** En el género Salmonella se incluyen varias especies patógenas para el hombre y los animales. Se mueven por medio de unos flagelos peritricos. Aunque son facultativos, crecen bien en los medios ordinarios en presencia de oxígeno.

**Suelo degradado:** Aquel suelo que por exceso de acidez, niveles de erosión, deterioro de la cubierta vegetal o que por presentar otras limitaciones físicas, químicas o estructurales, no pueden ser utilizadas de modo sustentable en la producción agropecuaria.

---

## T

**Temperatura:** Magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.

**Tratamiento de aguas residuales:** Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes que pueden llevar las aguas residuales.

---

## U

**Uso beneficioso:** Se refiere a “aplicarlos en el suelo para aprovechar los nutrientes y materia orgánica que contienen” e implica usos agronómicos y similares (forestal, restauración, paisajismo, producción de abonos y enmiendas).

---

## V

**Viruta:** Es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral que se extrae mediante un cepillo u otras herramientas, tales como brocas, al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación, sobre madera o metales.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ, ANDRES LOPEZ. « Escherichia Coli: Mecanismos de Patogenicidad. Universidad Autónoma2.» MEXICO, 2001.

ALCANTARILLADO, E. D. (1997). descripcion de la ptar salitre y recopilacion de los principales aspectos operativos. bogota.

BASAURE, PATRICIO. manual de lombricultura. febrero de 2006. <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/15476.html> (último acceso: febrero de 2015).

BOGOTA, EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE. «gestion de subproductos .» BOGOTA, 2008.

BOTANICAL. botanical online. 2009. <http://www.botanical-online.com/cascaradehuevo.htm> (último acceso: febrero de 2015).

CAJIGAS, ANGEL. ingenieria de aguas residuales. españa : mercalf y eddy , 2004.

Dáguer, G. P. (s.f.). GESTIÓN DE BIOSÓLIDOS EN COLOMBIA. bogota: ACODAL Sociedad de Biosolidos en Colombia.

EPA, ENTIDAD DE PROTECCION AMBIENTAL. «titulo 40 parte 503, normas para la eliminacion de lodos residuales.» s.f.

FEDERATION, WATER ENVIROMENT. «water enviroment research .» 1998.

GIAN PAOLO, DAGUER. gestion de biosolidos en colombia . bogota: ACODAL Sociedad de Biosolidos en Colombia, s.f., 1-7.

LOZANO. Marcela. Validación el método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando agar Chromocult. Trabajo presentado para optar al título de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. . Bogotá.

LEONARDO POULSEN. «Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche,» argentina, 2009, 8.

MARCELA LOZANO, AURA CARRILLO. «Validación el método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando agar Chromocult. Trabajo presentado para optar al título de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. .» Bogotá, s.f.

MARIA JULIA MAZZARINO, PATRCIA SATTI, FRANCISCA LAOS, LUCIA ROSELLI, MARIA CREGO, ESTEBANKOWALJOW, HORACIO FERNANDEZ Y LEONARDO POULSEN. «Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche,» argentina, 2009, 8.

MAZZARINO, Maria Julia. De residuos a recursos: el otro camino de los desechos orgánicos urbanos. Estudio de caso: compostaje de lodos cloacales en Bariloche, Argentina. Conferencia. IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil (4-6, septiembre: Boyaca, Colombia). Memorias.Tunja. . (2012). p. 1-14.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. 2014. criterios sobre el uso de biosolidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Bogota : Diario Oficial No. 49.208 de , 2014.

OIT, ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO. «Convenio sobre el marco promocional para la seguridad y salud en el trabajo.» 2006.

PERALTA, E. et al. Experiencia Piloto de Compostaje de Barros Primarios Cloacales de Mar del Plata. 2000. Informe tecnico.

PEDRAZA, Martha Lucia. factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del unicipio de chinavita (Boyaca). Tesis de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales: Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias Contables Economicas y Administrativas, 2013. 74 p.

QUINCHIA, Adriana. y CARMONA, Dora. factibilidad de disposicion de los biosolidos generados en las PTAR combinadas. En: EIA. Agosto, 2004 Vol. 2, p. 89-108.

Romero Rojas, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Ed. Escuela colombiana de ingenieros. (2004).

RAMIREZ, V.A. RODRIGUEZ. F.J. Viabilidad del proceso de compostaje con biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de San Miguel de Allende, México. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima, 2011. p. 665-669.

SEIJO, G. (s.f.). reciclario.com. Recuperado el FEBRERO de 2015, de reciclario.com: <http://reciclario.com.ar/compostable/viruta-o-aserrin/>

SZTERN, ING DANIEL. «manual para la elaboracion de compost bases conceptuales y procedimientos .» s.f.

SEIJO, GABRIELA. reciclario.com. s.f. <http://reciclario.com.ar/compostable/viruta-o-aserrin/> (último acceso: FEBRERO de 2015).

TORRES, P., MADERA, C., y SILVA, J. Mejoramiento De La Calidad Microbiológica De Biosólidos Generados En Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas. En: EIA. Julio, 2009. no. 11, p. 21-37.

VALENCIA, Judith Marcela. Estudio para la Viabilida Tecnica de Compostaje a partir de Biosolido seco Proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR. trabajo de grado, San Buenaaventura: Universidad de Cali, Facultad de Administracion Agroindustrial. 2012. 87 p.

VELEZ Juan AlbertoALVAREZ, ANDRES LOPEZ. « Escherichia Coli: Mecanismos de Patogenicidad. Universidad Autónoma2.» MEXICO, 2001.

VIDAL, A. P. et al. compostaje de biosolido de planta de tratamiento de agua residual. (2007). Cañaberalejo, Cali.

VALERIA SOUZA, MARTHA ROCHA,LUISA SANDER y LUIS EGUIARTE. « Historia natural, ecología y evolución de la patogenicidad en Escherichia Coli.Universidad Nacional Autónoma.» México, s.f.

## 10. ANEXOS

### Anexo 1.

- **Temperatura mes de octubre**

Tabla 14 datos de temperatura mes de octubre

| FECHA         | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                    |                        |
|---------------|------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
|               |                  | Poda<br>de<br>Pasto | Caña<br>de<br>maíz | Cascara<br>de<br>Huevo |
|               |                  | TEMPERATURA (°C)    |                    |                        |
| 1 de OCTUBRE  | 20               | 37,8                | 46,8               | 39,5                   |
| 2 de OCTUBRE  | 21               | 39,5                | 42                 | 33,2                   |
| 3 de OCTUBRE  | 22               | 40,1                | 37,2               | 32,5                   |
| 6 de OCTUBRE  | 23               | 38,7                | 43                 | 36,6                   |
| 7 de OCTUBRE  | 24               | 40,5                | 42,3               | 39,5                   |
| 8 de OCTUBRE  | 25               | 37,8                | 38,4               | 31,3                   |
| 9 de OCTUBRE  | 26               | 44,8                | 38,8               | 31,5                   |
| 10 de OCTUBRE | 27               | 34,5                | 33                 | 31,5                   |
| 14 de OCTUBRE | 28               | 33                  | 33                 | 31,3                   |
| 15 de OCTUBRE | 29               | 31,5                | 30,3               | 33                     |
| 16 de OCTUBRE | 30               | 28,5                | 27,6               | 31,5                   |
| 17 de OCTUBRE | 31               | 29,8                | 38,3               | 29,3                   |
| 20 de OCTUBRE | 32               | 30,2                | 40,8               | 35,6                   |
| 21 de OCTUBRE | 33               | 37,8                | 39,8               | 30,9                   |
| 22 de OCTUBRE | 34               | 46,8                | 37,8               | 35,8                   |
| 23 de OCTUBRE | 35               | 39,5                | 39,4               | 30,5                   |
| 24 de OCTUBRE | 36               | 37,8                | 31,00              | 29,2                   |
| 27 de OCTUBRE | 37               | 38,4                | 34,5               | 27,8                   |
| PROM OCT      |                  | 37,1                | 37,4               | 32,8                   |

Fuente: Autores

- **Temperatura mes de noviembre**

Tabla 15 datos de temperatura mes de noviembre

| FECHA           | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                 |                        |
|-----------------|------------------|---------------------|-----------------|------------------------|
|                 |                  | Poda de<br>Pasto    | Caña de<br>maíz | Cascara<br>de<br>Huevo |
|                 |                  | TEMPERATURA (°C)    |                 |                        |
| 3 de NOVIEMBRE  | 42               | 37,8                | 46,8            | 39,5                   |
| 4 de NOVIEMBRE  | 43               | 39,5                | 42              | 33,2                   |
| 5 de NOVIEMBRE  | 44               | 40,1                | 37,2            | 32,5                   |
| 6 de NOVIEMBRE  | 45               | 38,7                | 43              | 36,6                   |
| 7 de NOVIEMBRE  | 46               | 40,5                | 42,3            | 39,5                   |
| 10 de NOVIEMBRE | 47               | 40,3                | 41,3            | 38,1                   |
| 11 de NOVIEMBRE | 48               | 36,5                | 40,2            | 39,2                   |
| 12 de NOVIEMBRE | 49               | 37,8                | 39,5            | 40,1                   |
| 13 de NOVIEMBRE | 50               | 32,5                | 36,6            | 39,5                   |
| 14 de NOVIEMBRE | 51               | 36,5                | 40,2            | 37,8                   |
| 17 de NOVIEMBRE | 52               | 40,2                | 41,3            | 32,5                   |
| 18 de NOVIEMBRE | 53               | 39,2                | 38,1            | 36,5                   |
| 19 de NOVIEMBRE | 54               | 38,7                | 32,1            | 37,2                   |
| 20 de NOVIEMBRE | 55               | 43                  | 40,2            | 39,2                   |
| 21 de NOVIEMBRE | 56               | 36,6                | 39,2            | 38,2                   |
| 24 de NOVIEMBRE | 57               | 39,5                | 36,6            | 40,2                   |
| PROM NOV        |                  | 38,5875             | 39,7875         | 37,4875                |

Fuente: Autores

- **Temperatura mes de diciembre**

Tabla 16 datos de temperatura mes de diciembre

| FECHA           | TIEMPO<br>O<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                 |                        |
|-----------------|-----------------------|---------------------|-----------------|------------------------|
|                 |                       | Poda de<br>Pasto    | Caña de<br>maíz | Cascara<br>de<br>Huevo |
|                 |                       | TEMPERATRA (°C)     |                 |                        |
| 1 de DICIEMBRE  | 54                    | 32,2                | 30,3            | 38,3                   |
| 2 de DICIEMBRE  | 55                    | 28,5                | 29,4            | 40,8                   |
| 3 de DICIEMBRE  | 56                    | 30,5                | 32,3            | 39,8                   |
| 4 de DICIEMBRE  | 57                    | 29,8                | 37,3            | 31,1                   |
| 5 de DICIEMBRE  | 58                    | 30,5                | 35,2            | 27                     |
| 8 de DICIEMBRE  | 59                    | 31,7                | 31,6            | 26,1                   |
| 9 de DICIEMBRE  | 60                    | 32,5                | 37,7            | 38,2                   |
| 10 de DICIEMBRE | 61                    | 29,1                | 37,7            | 37,6                   |
| 11 de DICIEMBRE | 62                    | 30,2                | 36,9            | 33,4                   |
| 12 de DICIEMBRE | 63                    | 38,5                | 30,5            | 32,1                   |
| 15 de DICIEMBRE | 64                    | 44,4                | 35,2            | 33,5                   |
| PROM DIC        |                       | 32,5                | 34,0            | 34,4                   |

Fuente: Autores

- **Temperatura mes de enero**

Tabla 17 datos de temperatura mes de diciembre

| FECHA       | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                 |                     |
|-------------|------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|             |                  | Poda de<br>Pasto    | Caña de<br>maíz | Cascara<br>de Huevo |
|             |                  | TEMPERATURA (°C)    |                 |                     |
| 19 de ENERO | 64               | 37,8                | 36,2            | 36,5                |
| 20 de ENERO | 65               | 39,5                | 34,5            | 37,3                |
| 21 de ENERO | 66               | 26,5                | 27,1            | 29,2                |
| 22 de ENERO | 67               | 25                  | 24,2            | 26,3                |
| 23 de ENERO | 68               | 24,8                | 26,5            | 25,8                |
| 28 de ENERO | 69               | 25,4                | 26              | 27,9                |
| 29 de ENERO | 70               | 23                  | 24              | 25                  |
| 30 de ENERO | 71               | 22,6                | 23,5            | 26                  |
| PROM ENE    |                  | 28,1                | 27,8            | 29,3                |

Fuente: Autores

- **temperatura mes de febrero**

Tabla 18 datos de temperatura mes de febrero

| FECHA         | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                 |                     |
|---------------|------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|               |                  | Poda de<br>Pasto    | Caña de<br>maíz | Cascara<br>de Huevo |
|               |                  | TEMPERATURA (°C)    |                 |                     |
| 2 de FEBRERO  | 72               | 24                  | 24,5            | 25,5                |
| 3 de FEBRERO  | 73               | 24,5                | 24,8            | 25                  |
| 4 de FEBRERO  | 74               | 25,3                | 24,9            | 24,7                |
| 5 de FEBRERO  | 75               | 22,5                | 24,1            | 33                  |
| 6 de FEBRERO  | 76               | 22,5                | 23,5            | 32,5                |
| 7 de FEBRERO  | 77               | 24,2                | 25,2            | 32,2                |
| 9 de FEBRERO  | 78               | 24,5                | 25              | 38,7                |
| 10 de FEBRERO | 79               | 24,3                | 24,2            | 29,7                |
| 11 de FEBRERO | 80               | 25                  | 27,3            | 32,8                |
| 12 de FEBRERO | 81               | 28,5                | 27              | 30,4                |
| 13 de FEBRERO | 82               | 29,3                | 27,2            | 28,5                |
| 16 de FEBRERO | 83               | 28                  | 28              | 28,9                |
| 17 de FEBRERO | 84               | 27,3                | 28,2            | 29                  |
| 18 de FEBRERO | 85               | 32,8                | 27,3            | 29,2                |
| 19 de FEBRERO | 86               | 27,8                | 28              | 29                  |
| 20 de FEBRERO | 87               | 28                  | 32              | 30                  |

| FECHA         | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE      |                         |                             |
|---------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|               |                  | <b>Poda de<br/>Pasto</b> | <b>Caña de<br/>maíz</b> | <b>Cascara<br/>de Huevo</b> |
|               |                  | TEMPERATURA (°C)         |                         |                             |
| 23 de FEBRERO | 88               | 28,5                     | 30                      | 31                          |
| 24 de FEBRERO | 89               | 33,5                     | 31,2                    | 32,5                        |
| 25 de FEBRERO | 90               | 40,1                     | 30,8                    | 38,1                        |
| PROM FEB      |                  | 27,4                     | 27,0                    | 30,6                        |

Fuente: Autores

## Anexo 2.

- **PH mes de octubre**

Tabla 19 datos de PH mes de octubre

| FECHA         | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE      |                         |                             |
|---------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|               |                  | <b>Poda de<br/>Pasto</b> | <b>Caña<br/>de maíz</b> | <b>Cascara<br/>de Huevo</b> |
|               |                  | PH                       |                         |                             |
| 1 de OCTUBRE  | 20               | 7,2                      | 7,09                    | 7,1                         |
| 2 de OCTUBRE  | 21               | 7,31                     | 7,04                    | 7,16                        |
| 3 de OCTUBRE  | 22               | 7,21                     | 7,3                     | 7,5                         |
| 6 de OCTUBRE  | 23               | 6,87                     | 6,7                     | 6,71                        |
| 7 de OCTUBRE  | 24               | 7,2                      | 7,5                     | 7,3                         |
| 8 de OCTUBRE  | 25               | 8,5                      | 8,5                     | 8,1                         |
| 9 de OCTUBRE  | 26               | 7,34                     | 7,53                    | 7,42                        |
| 10 de OCTUBRE | 27               | 8,3                      | 8,2                     | 8,16                        |
| 14 de OCTUBRE | 28               | 8,1                      | 8                       | 8,4                         |
| 15 de OCTUBRE | 29               | 8,6                      | 8,4                     | 8,25                        |
| 16 de OCTUBRE | 30               | 8,2                      | 8,4                     | 8,7                         |
| 17 de OCTUBRE | 31               | 8,36                     | 8,2                     | 8,3                         |
| 20 de OCTUBRE | 32               | 8,19                     | 8,5                     | 8,2                         |
| 21 de OCTUBRE | 33               | 8,5                      | 7,5                     | 8,1                         |
| 22 de OCTUBRE | 34               | 8,3                      | 7,59                    | 8                           |
| 23 de OCTUBRE | 35               | 8,1                      | 7,7                     | 7,9                         |
| 24 de OCTUBRE | 36               | 7,2                      | 7,31                    | 7,1                         |
| 27 de OCTUBRE | 37               | 7,09                     | 7,04                    | 7,16                        |
| PROM OCT      |                  | 7,8                      | 7,7                     | 7,8                         |

Fuente: Autores

- **PH mes de noviembre**

Tabla 20 datos de PH mes de noviembre

| FECHA          | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE      |                             |                             |
|----------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                |                  | <b>Poda de<br/>Pasto</b> | <b>Caña<br/>de<br/>maíz</b> | <b>Cascara<br/>de Huevo</b> |
|                |                  | PH                       |                             |                             |
| 3 de NOVIEMBRE | 38               | 7,2                      | 7,09                        | 7,1                         |
| 4 de NOVIEMBRE | 39               | 7,31                     | 7,04                        | 7,16                        |
| 5 de NOVIEMBRE | 40               | 7,21                     | 7,3                         | 7,5                         |
| 6 de NOVIEMBRE | 41               | 6,87                     | 6,7                         | 6,71                        |

| FECHA           | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                    |                     |
|-----------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                 |                  | Poda de<br>Pasto    | Caña<br>de<br>maíz | Cascara<br>de Huevo |
|                 |                  | PH                  |                    |                     |
| 7 de NOVIEMBRE  | 42               | 7,2                 | 7,5                | 7,3                 |
| 10 de NOVIEMBRE | 43               | 7,85                | 7,14               | 7,64                |
| 11 de NOVIEMBRE | 44               | 8,11                | 7,07               | 7,59                |
| 12 de NOVIEMBRE | 45               | 7,84                | 7,25               | 7,53                |
| 13 de NOVIEMBRE | 46               | 7,4                 | 7,31               | 7,3                 |
| 14 de NOVIEMBRE | 47               | 7,3                 | 7,5                | 7,1                 |
| 17 de NOVIEMBRE | 48               | 7,5                 | 7,49               | 7                   |
| 18 de NOVIEMBRE | 49               | 7,1                 | 7,48               | 7,7                 |
| 19 de NOVIEMBRE | 50               | 7,9                 | 7,11               | 7,1                 |
| 20 de NOVIEMBRE | 51               | 7,6                 | 7,53               | 7,03                |
| 21 de NOVIEMBRE | 52               | 7,5                 | 7,6                | 7,3                 |
| 24 de NOVIEMBRE | 53               | 7,8                 | 7,2                | 7,8                 |
| PROM NOV        |                  | 7,5                 | 7,3                | 7,3                 |

Fuente: Autores

- **PH mes de diciembre**

Tabla 21 datos de PH mes de diciembre

| FECHA           | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                    |                     |
|-----------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                 |                  | Poda de<br>Pasto    | Caña<br>de<br>maíz | Cascara<br>de Huevo |
|                 |                  | PH                  |                    |                     |
| 1 de DICIEMBRE  | 62               | 7,31                | 8,6                | 7,34                |
| 2 de DICIEMBRE  | 63               | 7,04                | 8,4                | 7,53                |
| 3 de DICIEMBRE  | 64               | 7,16                | 8,25               | 7,42                |
| 4 de DICIEMBRE  | 65               | 7,2                 | 8,5                | 7,2                 |
| 5 de DICIEMBRE  | 66               | 7,5                 | 7,5                | 7,09                |
| 8 de DICIEMBRE  | 67               | 7,3                 | 8,1                | 7,1                 |
| 9 de DICIEMBRE  | 68               | 8,3                 | 6,87               | 7,21                |
| 10 de DICIEMBRE | 69               | 8,2                 | 6,7                | 7,3                 |
| 11 de DICIEMBRE | 70               | 8,16                | 6,71               | 7,5                 |
| 12 de DICIEMBRE | 71               | 8,4                 | 8,2                | 8,5                 |
| 15 de DICIEMBRE | 72               | 8,7                 | 8,3                | 8,2                 |
| PROM dic        |                  | 7,75181818          | 7,83               | 7,49                |

Fuente: Autores

- **PH mes de enero**

Tabla 22 datos de PH mes de enero

| FECHA       | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                    |                     |
|-------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|             |                  | Poda de<br>Pasto    | Caña<br>de<br>maíz | Cascara<br>de Huevo |
|             |                  | PH                  |                    |                     |
| 19 de ENERO | 64               | 6,5                 | 7                  | 7,2                 |
| 20 de ENERO | 65               | 6,8                 | 6,9                | 7,1                 |
| 21 de ENERO | 66               | 6,4                 | 6,7                | 6,9                 |
| 22 de ENERO | 67               | 6,3                 | 6,6                | 6,7                 |
| 23 de ENERO | 68               | 6,8                 | 6,5                | 6,2                 |
| 26 de ENERO | 69               | 6,2                 | 6,9                | 7                   |
| 27 de ENERO | 70               | 6,5                 | 7                  | 7,18                |
| 28 de ENERO | 71               | 6,88                | 6,95               | 7,59                |
| PROM ENE    |                  | 6,5                 | 6,8                | 7,0                 |

Fuente: Autores

- **PH mes de febrero**

Tabla 23. Datos de PH mes de febrero

| FECHA         | TIEMPO<br>(días) | MATERIAL DE SOPORTE |                     |                  |
|---------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|
|               |                  | Poda de<br>Pasto    | Poda<br>de<br>Pasto | Poda de<br>Pasto |
|               |                  | PH                  |                     |                  |
| 2 de FEBRERO  | 73               | 7                   | 7,22                | 7,25             |
| 3 de FEBRERO  | 74               | 7,2                 | 7,4                 | 7,1              |
| 4 de FEBRERO  | 75               | 7,04                | 7,16                | 7,2              |
| 5 de FEBRERO  | 76               | 7,29                | 7,11                | 7,04             |
| 6 de FEBRERO  | 77               | 7                   | 7,01                | 7,2              |
| 7 de FEBRERO  | 78               | 7,5                 | 7,3                 | 7,3              |
| 9 de FEBRERO  | 79               | 7,2                 | 7,16                | 7,4              |
| 10 de FEBRERO | 80               | 6,97                | 7,01                | 6,98             |
| 11 de FEBRERO | 81               | 7,18                | 6,87                | 6,73             |
| PROM FEB      |                  | 7,2                 | 7,1                 | 7,1              |

Fuente: Autores

### Anexo 3.

- Mes septiembre

Tabla 24. Semana 1  
martes 03 de septiembre

|       | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |      |
|-------|--------------|------------|--------------|--------------|------|
| Pasto | 122,3        | 63         | 38,5         | 0,94126984   | 94%  |
| caña  | 149,2        | 63,2       | 38,8         | 1,36075949   | 136% |
| huevo | 193,2        | 56,1       | 38,1         | 2,44385027   | 244% |

Fuente: Autores

Tabla 25. Semana 2  
semana 10 de septiembre

|       | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
|-------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| Pasto | 150          | 78         | 191          | 0,92307692   | 92% |
| caña  | 100          | 61         | 118,4        | 0,63934426   | 64% |
| huevo | 170          | 89,8       | 30,6         | 0,89309577   | 89% |

Fuente: Autores

Tabla 26. Semana 3  
martes 16 de septiembre

|       | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
|-------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| Pasto | 122,3        | 63         | 38,5         | 0,94126984   | 94% |
| caña  | 94,4         | 58,3       | 37           | 0,61921098   | 62% |
| huevo | 137,9        | 78,8       | 39,2         | 0,75         | 75% |

Fuente: Autores

Tabla 27. Semana 4  
semana 24 de septiembre

|       | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
|-------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| Pasto | 640          | 482,6      | 191          | 0,32615002   | 33% |
| caña  | 840          | 600,5      | 118,4        | 0,3988343    | 40% |
| huevo | 1240         | 906,8      | 194,6        | 0,36744596   | 37% |

Fuente: Autores

- **Mes de octubre**

Tabla 28. Semana 1

| 01-oct   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| Pasto    | 75,3         | 57,4       | 36,4         | 0,31184669   | 31% |
| caña     | 64,5         | 46,7       | 37,2         | 0,38115632   | 38% |
| huevo    | 89,3         | 67,4       | 35,1         | 0,32492582   | 32% |

Fuente: Autores

Tabla 29. Semana 2

| 08-oct   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| Pasto    | 96,7         | 75         | 37,2         | 0,28933333   | 29% |
| caña     | 60,9         | 45,7       | 36,4         | 0,33260394   | 33% |
| huevo    | 75,8         | 58,8       | 35,1         | 0,28911565   | 29% |

Fuente: Autores

Tabla 30. Semana 3

| 15-oct   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 120,5        | 95,7       | 35,1         | 0,25914316   | 26% |
| caña     | 85,7         | 66         | 37,2         | 0,29848485   | 30% |
| huevo    | 94,7         | 73,9       | 36,4         | 0,28146143   | 28% |

Fuente: Autores

Tabla 31. Semana 4

| 22-oct   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 57,9         | 46,4       | 36,4         | 0,24784483   | 25% |
| caña     | 58,1         | 42,2       | 36,4         | 0,37677725   | 38% |
| huevo    | 65,8         | 52,8       | 37,6         | 0,24621212   | 25% |

Fuente: Autores

Tabla 32. Semana 5

| 29-oct   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 139          | 78,9       |              | 0,7617237    | 76% |
| caña     | 160,4        | 89         |              | 0,80224719   | 80% |
| huevo    | 110,5        | 60,8       |              | 0,81743421   | 82% |

Fuente: Autores

- **Mes de noviembre**

Tabla 33. Semana 1

| 05-nov   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 119          | 68,9       | 38,4         | 0,72714078   | 73% |
| caña     | 98,9         | 55,7       | 36,4         | 0,77558348   | 78% |
| huevo    | 93,6         | 52,9       | 35,6         | 0,76937618   | 77% |

Fuente: Autores

Tabla 34. Semana 2

| 12-nov   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| Pasto    | 98,7         | 58,6       | 37,2         | 0,68430034   | 68% |
| caña     | 75,2         | 44         | 36,4         | 0,70909091   | 71% |
| huevo    | 86,9         | 53,8       | 35,1         | 0,61524164   | 62% |

Fuente: Autores

Tabla 35. Semana 3

| 19-nov   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 95,5         | 60,5       | 35,1         | 0,5785124    | 58% |
| caña     | 90,5         | 55         | 37,2         | 0,64545455   | 65% |
| huevo    | 95,4         | 60,9       | 36,4         | 0,56650246   | 57% |

Fuente: Autores

Tabla 36. Semana 4

| 26-nov   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| Pasto    | 76,9         | 53,4       | 36,4         | 0,44007491   | 44% |
| caña     | 60,1         | 39,2       | 36,4         | 0,53316327   | 53% |
| huevo    | 75,8         | 50,8       | 37,6         | 0,49212598   | 49% |

Fuente: Autores

- **Mes de diciembre**

Tabla 37. Semana 1

| 02-dic   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| Pasto    | 145,3        | 106,7      | 38,4         | 0,36176195   | 36% |
| caña     | 95,6         | 69,1       | 36,4         | 0,38350217   | 38% |
| huevo    | 135,6        | 95,6       | 35,6         | 0,41841004   | 42% |

Fuente: Autores

Tabla 38. Semana 2

| 09-dic   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 97,6         | 74,3       | 37,2         | 0,31359354   | 31% |
| caña     | 100,4        | 75,4       | 36,4         | 0,33156499   | 33% |
| huevo    | 90,3         | 65,4       | 35,1         | 0,38073394   | 38% |

Fuente: Autores

- **Mes de enero**

Tabla 39. Semana 1

| 21-ene   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 95,3         | 69,7       | 38,4         | 0,36728838   | 37% |
| caña     | 103,4        | 79,4       | 36,4         | 0,302267     | 30% |
| huevo    | 150,8        | 110,9      | 35,6         | 0,35978359   | 36% |

Fuente: Autores

Tabla 40. Semana 2

| 28-ene   |              |            |              |              |     |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
| material | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto    | 100,9        | 74,3       | 37,2         | 0,35800808   | 36% |
| caña     | 75,8         | 58,9       | 36,4         | 0,28692699   | 29% |
| huevo    | 87,4         | 65,4       | 35,1         | 0,33639144   | 34% |

Fuente: Autores

- **Mes de febrero**

Tabla 41. Semana 1

| 02-feb |              |            |              |              |     |
|--------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
|        | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto  | 94,65        | 65         | 29,65        | 0,45615385   | 46% |
| caña   | 86           | 60         | 26           | 0,43333333   | 43% |
| huevo  | 85           | 53         | 32           | 0,60377358   | 60% |

Fuente: Autores

Tabla 42. Semana 1, toma 2

| 05-feb |              |            |              |              |     |
|--------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
|        | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto  | 72,5         | 49,5       | 32,9         | 0,46464646   | 46% |
| caña   | 64,5         | 47,5       | 29,6         | 0,35789474   | 36% |
| huevo  | 64           | 48         | 31,9         | 0,33333333   | 33% |

Fuente: Autores

Tabla 43. Semana 2

| 07-feb |              |            |              |              |     |
|--------|--------------|------------|--------------|--------------|-----|
|        | w húmedo (g) | w seco (g) | w platón (g) | % de humedad |     |
| pasto  | 90           | 57,5       | 32,5         | 0,56521739   | 57% |
| caña   | 96           | 55,5       | 40,5         | 0,72972973   | 73% |
| huevo  | 94           | 63,5       | 30,5         | 0,48031496   | 48% |

Fuente: Autores

#### Anexo 4.

- **Muestra 1**
- **Pila con cascara de huevo**

Tabla 44. Resultados laboratorio 1 pila con cascara de huevo

| Ensayo                    | Expresión     | Vlr<br>Obtenido | Vlr Max.<br>Acept.<br>Colombia | Valor Max.<br>Acept.<br>.Según<br>Decreto 1287<br>Del 10 De<br>Julio De<br>2014 | Vlr Max.<br>Aceptable<br>Según La<br>Epa | Método                              |
|---------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes<br>totales (A) | NMP/100<br>mL | 2,80E+03        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B                           |
| Coliformes<br>fecales (A) | NMP/100<br>mL | 1,40E+02        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B, E                        |
| Salmonella                | NMP/100<br>mL | 39              | N.E                            | Ausencia                                                                        |                                          | Enriq/Siembra<br>medio<br>Selectivo |

Fuente: laboratorio analizar LTDA modificado por autores  
 NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica

- **Pila con caña de maíz**

Tabla 45. Resultados laboratorio 1 pila con caña

| Ensayo                    | Expresión     | Vlr<br>Obtenido | Vlr Max.<br>Acept.<br>Colombia | Valor Max.<br>Acept.<br>.Según<br>Decreto 1287<br>Del 10 De<br>Julio De<br>2014 | Vlr Max.<br>Aceptable<br>Según La<br>Epa | Método                              |
|---------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes<br>totales (A) | NMP/100<br>mL | 1,70E+07        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B                           |
| Coliformes<br>fecales (A) | NMP/100<br>mL | 3,40E+06        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B, E                        |
| Salmonella                | NMP/100<br>mL | 33              | N.E                            | Ausencia                                                                        |                                          | Enriq/Siembra<br>medio<br>Selectivo |

Fuente: laboratorio analizar LTDA modificado por autores  
 NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica

- **Pila con poda de pasto**

Tabla 46. Resultados laboratorio 1 pila con cascara de pasto

| Ensayo                    | Expresión     | Vlr<br>Obtenido | Vlr Max.<br>Acept.<br>Colombia | Valor Max.<br>Acept.<br>.Según<br>Decreto<br>1287 Del 10<br>De Julio De<br>2014 | Vlr Max.<br>Aceptable<br>Según La<br>Epa | Método                              |
|---------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes<br>totales (A) | NMP/100<br>mL | 2,40E+04        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B                           |
| Coliformes<br>fecales (A) | NMP/100<br>mL | 2,70E+03        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B, E                        |
| Salmonella                | NMP/100<br>mL | 20              | N.E                            | Ausencia                                                                        |                                          | Enriq/Siembra<br>medio<br>Selectivo |

Fuente: laboratorio analizar LTDA modificado por autores  
NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica

- **Muestra 2**

- **Pila con cascara de huevo**

Tabla 47. Resultados laboratorio 2 pila con cascara de huevo

| Ensayo                    | Expresión     | Vlr<br>Obtenido | Vlr Max.<br>Acept.<br>Colombia | Valor Max.<br>Acept.<br>.Según<br>Decreto 1287<br>Del 10 De<br>Julio De<br>2014 | Vlr Max.<br>Aceptable<br>Según La<br>Epa | Método                              |
|---------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes<br>totales (A) | NMP/100<br>mL | 4,50E+01        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B                           |
| Coliformes<br>fecales (A) | NMP/100<br>mL | 1,80E+01        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B, E                        |
| Salmonella                | NMP/100<br>mL | 1,8             | N.E                            | Ausencia                                                                        |                                          | Enriq/Siembra<br>medio<br>Selectivo |

Fuente: laboratorio analizar LTDA modificado por autores  
NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica

- **Pila con caña de maíz**

Tabla 48. Resultados laboratorio 2 pila con caña

| Ensayo                    | Expresión     | Vlr<br>Obtenido | Vlr Max.<br>Acept.<br>Colombia | Valor Max.<br>Acept.<br>.Según<br>Decreto<br>1287 Del 10<br>De Julio De<br>2014 | Vlr Max.<br>Aceptable<br>Según La<br>Epa | Método                              |
|---------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes<br>totales (A) | NMP/100<br>mL | 3,50E+05        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B                           |
| Coliformes<br>fecales (A) | NMP/100<br>mL | 4,80E+04        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B, E                        |
| Salmonella                | NMP/100<br>mL | 70              | N.E                            | Ausencia                                                                        |                                          | Enriq/Siembra<br>medio<br>Selectivo |

Fuente: laboratorio analizar LTDA modificado por autores  
 NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica

- **Pila de pasto de pasto**

Tabla 49. Resultados laboratorio 2 pila con pasto

| Ensayo                    | Expresión     | Vlr<br>Obtenido | Vlr Max.<br>Acept.<br>Colombia | Valor Max.<br>Acept.<br>.Según<br>Decreto<br>1287 Del 10<br>De Julio De<br>2014 | Vlr Max.<br>Aceptable<br>Según La<br>Epa | Método                              |
|---------------------------|---------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Coliformes<br>totales (A) | NMP/100<br>mL | 2,22E+06        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B                           |
| Coliformes<br>fecales (A) | NMP/100<br>mL | 4,00E+04        | N.E                            | 1,00 E(+3)                                                                      | <1000                                    | SM 9221 B, E                        |
| Salmonella                | NMP/100<br>mL | 48              | N.E                            | Ausencia                                                                        |                                          | Enriq/Siembra<br>medio<br>Selectivo |

Fuente: laboratorio analizar LTDA modificado por autores  
 NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica

## Anexo 5.

**Tabla 50. Valores de patógenos muestra natural**

| Ensayo                        | Expresión  | Vlr Obtenido     | Vlr Max. Acept. Colombia | Valor Max. Acept. Según Decreto 1287 Del 10 De Julio De 2014 | Vlr Max. Aceptable Según La Epa | Método                        |
|-------------------------------|------------|------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| <b>Coliformes totales (A)</b> | NMP/100 mL | $20 \times 10^6$ | N.E                      | 1,00 E(+3)                                                   | <1000                           | SM 9221 B                     |
| <b>Coliformes fecales (A)</b> | NMP/100 mL | $36 \times 10^5$ | N.E                      | 1,00 E(+3)                                                   | <1000                           | SM 9221 B, E                  |
| <b>Salmonella</b>             | NMP/100 mL | 35               | N.E                      | Ausencia                                                     |                                 | Enriq/Siembra medio Selectivo |

Fuente: laboratorio PTAR EL SALITRE modificado por autores  
 NE= No Establecido (A)= Acreditado NA= No Aplica