

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESTUDIO PILOTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS
GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DEL CAMAL METROPOLITANO DE QUITO
MEDIANTE VERMICOMPOSTAJE.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA AMBIENTAL

YESSENIA BELÉN LLUMIQUINGA PAUCAR
yesenia1204@hotmail.com

FLAVIO DAVID PARRA PADILLA
flavin2015@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ANA LUCÍA BALAREZO. PhD.
ana.balarezo@epn.edu.ec

QUITO, mayo 2018

DECLARACIÓN

Nosotros, Yesenia Belén Llumiquinga Paucar, Flavio David Parra Padilla, declaramos que el estudio presente es de nuestra autoría y que no ha sido previamente presentado para ninguna obtención de un trabajo de titulación o calificación profesional; y que hemos consultado las respectivas fuentes bibliográficas que se incluyen en este trabajo.

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

Yesenia Belén Llumiquinga Paucar

Flavio David Parra Padilla

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente estudio fue desarrollado por Yesenia Belén Llumiquinga Paucar y Flavio David Parra Padilla, bajo mi supervisión.

Ing, Ana Lucía Balarezo, PhD
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS GENERALES

Agradecemos a la Escuela Politécnica Nacional, que ha sido el lugar donde nos hemos formado como profesionales de calidad gracias a la valiosa formación académica que se imparte en esta prestigiosa Universidad.

A la Doctora Ana Lucía Balarezo, por su apoyo en la realización de este proyecto porque gracias a su guía hemos logrado alcanzar un objetivo más en nuestras vidas, además gracias también por ser una voz de aliento cuando se presentaron inconvenientes durante este tiempo.

A todos los profesores que nos impartieron sus conocimientos y enseñanzas más allá de los temas que envolvían la carrera, gracias por ser parte de nuestra formación.

A la EPMRQ, por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones, en especial a la Ing. Grace Jácome por su buena voluntad y predisponibilidad de ayudarnos con lo necesario para la realización de este estudio.

A los señores Fernando Díaz y Diego Medina que con su experiencia en el tema de agronomía nos brindaron ayuda técnica permitiéndonos resolver muchos inconvenientes en la fase experimental de este estudio.

A los miembros de LDIA de la EPN: Carito, Maximo, Andrea, Gabriela y Dianita por la ayuda prestada en la medición de parámetros y su amabilidad mientras estuvimos a lado suyo.

A Leandro R. por su apoyo incondicional mientras estuvimos cursando por varios problemas durante un tiempo. También, Andre Lopéz que nos ayudó mucho para que este proyecto iniciara.

Belén Llumiquinga – Flavio Parra

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Flavio Parra y Silvana Padilla, que con su amor y paciencia forjaron en mí muchos sueños y confianza para poder seguir mi camino hacia la excelencia. Los agradecimientos son poco para todo lo que yo les debo.

A mis hermanos Felipe y Daniel por siempre ser un apoyo y hacerme olvidar de los problemas. La vida no sería igual sin ustedes.

A mi tía abuela Olga Pepinós, mi tío Emilio Parra y al Capitán de Corbeta Paúl Corella Parra, que físicamente ya no están presentes, pero espiritualmente aún siguen conmigo, en donde estén sé que les alegra este logro mío.

A mi familia materna y paterna, por siempre creer en mí.

A mis amigos los Novatos: Dennys, Esteban, Fabo, Fernando, Gabriel, Darío, Mauricio, Francisco, Sebastián, Cristina y Raquel, por hacer que mi tiempo en la universidad sea más llevadero. A mis amigos que hice jugando fútbol en la universidad y a mis amigos que me apoyaron durante momentos difíciles en especial a Mateo, Eduardo, Ronny, Bladi, Mosco, Chili, Lichita, Mafer, Neshat y Joselyn.

A Alyson que le considero como la hermana que me dio la vida, gracias por apoyarme en los momentos malos y con tu ayuda pude superarme en todo momento. Eres muy especial en mi vida.

A Génesis que durante mucho tiempo me enseñó el valor de los sueños y la manera de cómo alcanzarlos, por su cariño y enseñarme grandes lecciones de vida.

Flavio Parra

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Pedro y Janeth por su infaltable apoyo en cada paso dado hasta llegar a este momento, porque en su afán de apoyar mis sueños fueron capaces de mantener este proyecto en marcha mientras a mí se me hacía imposible.

A mi hermanita Alisson que con su alegría permitió hacer de esta etapa algo más llevadero y con menos tensión.

A mis abuelitos y mi familia en general por siempre estar pendiente de mí y dispuestos a ayudarme incondicionalmente.

A todas las personas que al darme su valioso tiempo me ayudaron a completar este proyecto, especialmente a Andrea Mosquera, Gaby Taco, Diana Romero y Karen Martínez que supieron darme una mano cuando más lo necesite.

A mi amigo y compañero de tesis Flavio quien ha atravesado junto a mí y a veces solo, varios desafíos durante este proceso, gracias por ser ese gran complemento para trabajar.

A Israel porque sin importar la falta de tiempo o las tantas ocupaciones que se presentaron siempre estuvo dispuesto a ser mi mano derecha y mi cómplice, por convertirte en ayudante de laboratorio, de muestreo e incluso en chofer de ser necesario solo por verme llegar aquí.

A todos mis amigos Lizz, Vane, Wendy, Abraham, Joha, Adry, Majo y todos los que faltan por hacer cada día universitario lleno de aventuras y cariño.

A Dios y a la vida por ponerme siempre en el momento exacto para que toda la magia suceda.

Belén Llumiquinga

DEDICATORIA

A mis padres, los mayores hacedores de sueños, mis héroes, mi inspiración.

A mi hermanita, el regalo más grande y hermoso que la vida y mis padres me han dado.

A mis abuelitos, una fuente de sabiduría, los forjadores de mi maravillosa familia.

A mi familia, la más linda e incondicional del mundo.

A Israel un ángel en la tierra.

Belén Llumiquinga

DEDICATORIA

A mis padres, mi mayor tesoro en la vida.

A mis hermanos, sin ellos nada sería igual.

A mis primas Erika, Maita y Jenny por ser las mujeres que siempre están presentes en la vida mía y de mis hermanos.

A Camila, Daniela y Sofía por ser las niñas más hermosas que tienen mis ojos.

Flavio Parra

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS GENERALES	III
AGRADECIMIENTOS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS	XV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVIII
CAPITULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5 ANTECEDENTES	7
CAPÍTULO 2	9
2.1 LAS AGUAS RESIDUALES.....	9
2.1.1 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES	9

2.1.2 GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN EL FAENAMIENTO.....	10
2.1.3 CARACTERÍSTICAS Y PROBLEMÁTICAS DE AGUAS RESIDUALES	10
2.2 LODOS RESIDUALES	12
2.2.1 ORIGEN Y TIPOS DE LODOS RESIDUALES.....	13
2.2.2 GENERACIÓN DE LODOS EN LA PTAR DE LA EPMRQ	13
2.3 TRATAMIENTOS PARA LODOS RESIDUALES	14
2.3.1 ESTABILIZACIÓN.....	15
2.3.2 ESPESAMIENTO.....	15
2.3.3 ACONDICIONAMIENTO.....	16
2.3.4 DESHIDRATACIÓN	17
2.3.5 TRATAMIENTO TÉRMICO.....	17
2.4 LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (<i>EISENIA FOETIDA</i>).....	18
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA LOMBRIZ <i>EISENIA FOÉTIDA</i>	19
2.4.1 CONDICIONES DE HABITAT PARA LAS LOMBRICES DE TIERRA.....	19
2.4.2 SISTEMA DIGESTIVO.....	20
2.4.3 SISTEMA REPRODUCTOR	20
2.4.4 SISTEMA RESPIRATORIO	21
2.5 NOM-004-SEMARNAT-2002 Y REAL DECRETO 506/2013	21
2.6 LOS BIOSÓLIDOS.....	24
2.6.1 BIOSÓLIDOS EN LA AGRICULTURA.....	25
2.7 VERMICOMPOSTAJE	25
2.7.1 FASES DEL VERMICOMPOSTAJE	26
2.7.2 PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS	28
2.7.3 SUSTRATOS COMPLEMENTARIOS PARA EL BIOPROCESO	28
2.7.4 CAMBIOS GENERADOS DURANTE EL BIOPROCESO	30
2.7.5 NUTRIENTES	31

2.7.6 INCONVENIENTES EN EL BIOPROCESO	36
CAPÍTULO 3	37
3.1 RECOLECCIÓN DE LODOS	37
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS	39
3.3 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS COMPLEMENTARIOS.....	41
3.3.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS	42
3.4 AREA DE EXPERIMENTACIÓN.....	42
3.4.1 PREPARACIÓN PRELIMINAR DEL ÁREA	43
3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE VERMICOMPOSTAJE.....	43
3.5.1 CONSTRUCCIÓN DE CAMAS	43
3.5.2 OBTENCIÓN DE LOMBRICES.....	44
3.5.3 PREPARACIÓN DE LAS CAMAS	45
3.6 MONITOREO DE LAS CAMAS.....	47
3.7 PARÁMETROS ANALIZADOS EN EL PROCESO DE VERMIESTABILIZACIÓN	48
3.7.1 PARAMETROS FÍSICOS.....	48
3.7.2 PARÁMETROS QUÍMICOS.....	49
3.7.3 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS.....	51
3.8 OBTENCION DE MUESTRAS	51
3.9 MUESTREO DE CAMAS	51
3.10 ANÁLISIS	53
3.11 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS	53
3.11.1 COEFICIENTE DE VARIACIÓN	53
3.11.2 MATRIZ DE DECISIONES.....	54
CAPÍTULO 4	55
4.1 PARÁMETROS DE CONTROL Y MONITOREO	55
4.1.1 HUMEDAD.....	55

4.1.2 TEMPERATURA.....	56
4.1.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO.....	57
4.1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	58
4.2 PARÁMETROS DE ESTABILIZACIÓN.....	59
4.2.1 CURVA DE ESTABILIZACIÓN	59
4.2.2 COLIFORMES FECALES.....	61
4.2.3 HUEVOS DE HELMINTOS.....	61
4.3 ELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO.....	62
4.3.1 MACRONUTRIENTES EN EL BIOPROCESO	62
4.3.1 MICRONUTRIENTES EN EL BIOPROCESO.....	64
4.3.2 RELACIÓN DE CARBONO Y NITROGENO EN EL BIOPROCESO	65
4.3.3 MATRIZ DE DECISIÓN	66
4.4 COMPARACIÓN CON COMPOST COMERCIAL.....	67
CONCLUSIONES RECOMENDACIONES.....	70
5.1 CONCLUSIONES	70
5.2 RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: PARÁMETROS DE CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES	11
TABLA 2.2: PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES.	14
TABLA 2.3: CARACTERÍSTICAS DE LA LOMBRIZ <i>EISENIA FOÉTIDA</i>	19
TABLA 2.4: CONDICIONES DE HABITAT PARA LA <i>EISENIA FOÉTIDA</i>	20
TABLA 2.5: CARACTERÍSTICAS NECESARIAS DE VERMICOMPOST PARA USO EN LA AGRICULTURA	22
TABLA 2.6: LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE PARA PATÓGENOS Y PARÁSITOS EN LODOS Y BIOSÓLIDOS	22
TABLA 2.7: LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS	23
TABLA 2.8: APROVECHAMIENTO DE LOS TIPOS DE BIOSÓLIDOS	24
TABLA 2.9: APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS	24
TABLA 2.10: CARACTERÍSTICAS Y BENEFICIOS DEL PROCESO DE VERMICOMPOST	26
TABLA 2.11: PRODUCCIÓN ANUAL DE VERMICOMPOST	28
TABLA 2.12: MACRONUTRIENTES EN EL SUELO	33
TABLA 2.13: MICRONUTRIENTES EN EL SUELO	34
TABLA 2.14: RELACIÓN ENTRE C/N EN PRODUCTOS MINERALIZADOS	35
TABLA 2.15: INCONVENIENTES DURANTE EL BIOPROCESO DE VERMICOMPOSTAJE	36
TABLA 3.1. CAMPAÑA DE MUESTREO DEL LODO RESIDUAL	38
TABLA 3.2: CARACTERIZACIÓN DEL LODO	40

TABLA 3.3: COMPARACIÓN CON LOS LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA PATÓGENOS Y PARASITOS EN LODOS Y BIOSOLIDOS	41
TABLA 3.4: CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE SUSTRATOS	42
TABLA 3.5: PROPORCIÓN LODO-SUSTRATO EN CADA TRATAMIENTO	45
TABLA 3.6: PARÁMETROS FÍSICOS DEL BIOPROCESO	48
TABLA 3.7: PARÁMETROS QUÍMICOS EN EL BIOPROCESO	50
TABLA 3.8: PARÁMETROS BIOLÓGICOS EN EL BIOPROCESO	51
TABLA 3.9: INTERVALOS DE CONFIANZA DE ACUERDO CON EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN.	53
TABLA 4.1: OBSERVACIONES DE LAS CARACTERISTICAS FÍSICAS DURANTE EL BIOPROCESO	58
TABLA 4.2: EFICIENCIA DE LA ESTABILIZACIÓN	60
TABLA 4.3: ANÁLISIS DE <i>COLIFORMES FECALES</i> DURANTE EL BIOPROCESO	61
TABLA 4.4: ANÁLISIS DE HUEVOS DE HELMINTOS DURANTE EL BIOPROCESO	62
TABLA 4.5: MACRONUTRIENTES DURANTE EL BIOPROCESO	63
TABLA 4.6: INCREMENTO DE MACRONUTRIENTES EN EL BIOPROCESO	63
TABLA 4.7: CONTROL Y MONITOREO DE MICRONUTRIENTES	64
TABLA 4.8: ANÁLISIS FINAL DE MICRONUTRIENTES	65
TABLA 4.9: RELACIÓN C/N DURANTE EL BIOPROCESO	66
TABLA 4.10: DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA TOMA DE DESICIONES	67
TABLA 4.11: DECISIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO DEL BIOPROCESO	67
TABLA 4.12: COMPARACIÓN DE BIOABONO COMERCIAL VS VERMICOMPOST DEL TRATAMIENTO 2	68

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: FORMAS EN LAS QUE ESTÁ PRESENTE AL AGUA EN LOS LODOS RESIDUALES.....	16
FIGURA 2.2: CICLO BIOLÓGICO DE LA <i>EISENIA FOËTIDA</i>	18
FIGURA 2.3: ETAPAS DEL VERMICOMPOSTAJE.....	27
FIGURA 2.4: DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES A CAMBIOS DE pH.....	31
FIGURA 3.1: MAPA DE LA EPMRQ-EP.....	37
FIGURA 3.2: MEDIDAS DEL ÁREA DE EXPERIMENTACIÓN.....	43
FIGURA 3.3: CAJAS DE MADERA PERFORADAS PARA PREPARACION DE LAS CAMAS.....	44
FIGURA 3.4: LOMBRICES RECOLECTADAS PARA REALIZAR COMPOSTAJE.....	45
FIGURA 3.5: DISEÑO EXPERIMENTAL DEL BIOPROCESO.....	46
FIGURA 3.6: UBICACIÓN DE LAS CAMAS EN EL ÁREA SELECCIONADA.....	46
FIGURA 3.7: TERMO-HIGRÓMETRO Y PAPEL DE pH.....	47
FIGURA 3.8: PLANTILLA DE CONTROL DEL BIOPROCESO *.....	48
FIGURA 3.9: PUNTOS DE MUESTREO DE CAMAS.....	52
FIGURA 4.1: VALORES DE HUMEDAD DURANTE EL BIOPROCESO.....	55
FIGURA 4.2: VALORES DE TEMPERATURA DURANTE EL BIOPROCESO.....	56
FIGURA 4.3: VALORES DE pH EN EL BIOPROCESO.....	57
FIGURA 4.4: CURVA DE DIGESTIÓN DE VERMICOMPOSTAJE.....	59

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: TOMA DE MUESTRAS.....	79
ANEXO 2: MUESTRAS PARA ANÁLISIS EN EL LABORATORIO	80
ANEXO 3: CÁLCULO SEMANAL DE LA RELACIÓN SV/ST	81
ANEXO 4: VALORES SEMANALES DE SV/ST.....	82
ANEXO 5: VALORES DE POTASIO	83
ANEXO 6: VALORES DE NITROGENO TOTAL KJELDAHL.....	84
ANEXO 7: VALORES DE FÓSFORO	85
ANEXO 8: VALORES DE NITRATOS.....	86
ANEXO 9: VALORES DE NITRITOS	87
ANEXO 10: VALORES DE FOSFATOS.....	88
ANEXO 11: VALORES DE COBRE	89
ANEXO 12: VALORES DE HIERRO	90
ANEXO 13: VALORES DE ZINC.....	91
ANEXO 14: VALORES DE LA RELACIÓN C/N	92
ANEXO 15: VALORES DE MATERIA ORGÁNICA Y CARBONO.....	93
ANEXO 16: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 1 EN EL BIOPROCESO	94
ANEXO 17: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 2 EN EL BIOPROCESO	95
ANEXO 18: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 3 EN EL BIOPROCESO	96
ANEXO 19: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 4 EN EL BIOPROCESO	97
ANEXO 20: ANÁLISIS DE SÓLIDOS VOLÁTILES	98
ANEXO 21: MUESTRA PARA SER PESADA.....	98
ANEXO 22: DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS	99
ANEXO 23: MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD	99
ANEXO 24: DILUCIÓN DE LA MUESTRA.....	100

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo estudiar la estabilización de los lodos generados en el tratamiento biológico de las aguas residuales del faenamiento de animales de la EPMRQ, mediante el bioproceso denominado vermicompostaje.

Se inició con el muestreo y análisis físicos, químicos y microbiológicos del lodo, determinándose el requerimiento de un sustrato adicional que aporte con nutrientes para el bioproceso; de los datos de porcentaje de nitrógeno reportados en laboratorio, se seleccionaron césped y aserrín como sustratos complementarios a investigar. Seguidamente, se estableció el diseño experimental a estudiar, determinando dos tratamientos por sustrato, con relaciones 1:1 y 1:3, de lodo-sustrato, respectivamente; y 2 réplicas de cada tratamiento.

Posteriormente, se construyeron en madera un total de 12 biorreactores, los cuales fueron iniciados colocando una capa de suelo, sustrato y lodo e igual peso de anélidos (*Esenia foetida*) en todos los casos. Los biorreactores fueron monitoreados semanalmente por humedad, temperatura y pH; el control fue realizado a las semanas 6 y 15, determinando macro y micronutrientes, C/N, C *fecales* y Huevos de Helmintos. Además, que el porcentaje de SV/ST se midió semanalmente para saber cuando la mezcla lodo-sustrato estuviese estabilizado, considerando que se encuentra digerido cuando tiene valores inferiores al 30 %.

Para la selección del Tratamiento de mayor bioestabilización, se utilizó tanto la curva de estabilización registrada como las normativas NOM-004-2002-SEMARNAT y El Real Decreto 506/2013, resultando el Tratamiento 2 (1:3; lodo-césped) como óptimo pues alcanzó 99,18% en remoción de coliformes fecales, valor de menor a 1 en huevos de helminto y es el único que cumple con la normativa de contenido de Nitrógeno de 1,27 [%]. Adicionalmente la relación C/N inicialmente del lodo fue 52.73 y durante el proceso en la mezcla con el sustrato césped se midió un valor de 39.39, para el final del bioproceso

se alcanzo un valor de 7,86 considerada como muy buena. El producto del tratamiento 2 fue comparado con un bioabono orgánico comercial llamado AVISANA, mostrando mejores características en macro y micronutrientes, y relación C/N, excepto en N.

PALABRAS CLAVES: Lodo residual, sustrato, vermicompostaje, biorreactores, macronutrientes, micronutrientes, relación C/N.

ABSTRACT

The objective of the present research is to stabilize the residual sludge generated in the biological treatment of the slaughterhouse at the EPMRQ-EP, by vermicomposting.

The project started with the physical, chemical, and microbiological sampling and analysis of the sludge. It was determined the requirement of an additional substrate that contributes with carbonaceous material for the bioprocess from the % carbon data reported in the laboratory. The complementary substrates to be investigated were turf and sawdust. Then, the experimental design to be studied was established with two treatments per substrate, with 1: 1 and 1: 3 relations of mud-substrate respectively, and 2 replicas of each treatment.

Subsequently, a total of 12 bioreactors were built using wood, which were initiated by placing a layer of soil, substrate, and mud. Also, it was added an equal weight of annelids (*Esenia foetida*) in all cases. The bioreactors were monitored weekly for humidity, temperature and pH; The control was performed at weeks 6 and 15, determining macro and micronutrients, C / N, fecal coliforms, and Helminth eggs.

In order to select the greater Bio-stabilization Treatment both the registered stabilization curve and the regulations NOM-004-2002-SEMARNAT and Royal Decree 506/2013 were used, The result selected as optimal was the treatment 2 (1: 3; mud-grass) as it reached 99.18% in removal of fecal coliforms, value of less than 1 in helminth eggs and is the only one that complies with the Nitrogen content regulation of 1.27 [%]. In addition, the C / N ratio reached 7.86, considered as very good. The product of treatment 2 was compared with a commercial organic bio-fertilizer called AVISANA., Showing better characteristics in macro and micronutrients, and C / N ratio, except in N

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las PTARs ya sean municipales o industriales, producen cierta cantidad de lodos debido a los procesos biológicos debido al crecimiento bacteriano. Estos lodos causan problemas tanto técnicos como económicos, ambientales y en la salud humana, ya que se los dispone sin tratamiento previo en rellenos sanitarios, terrenos adyacentes a las PTAR, botaderos a cielo abierto y causes de agua. Dichos residuos contienen materia orgánica contaminante e inestable, sobre todo por su alto contenido en patógenos (Gladys, Pati, Humberto, & Rene, 2012), a su vez se pueden generar malos olores que causan molestias a los habitantes de sus alrededores.

Por esta razón se toma en cuenta los lodos provenientes de la PTAR de la Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito (EPMRQ), que brindan servicio de faenamiento de cabezas de ganado a la población. En el año 2015 la (EMPRQ) faenó alrededor de 159.224 cabezas de ganado (EMPRESA PUBLICA METROPOLITANA DE RASTRO QUITO , 2017).

En el proceso de faenamiento se requiere la utilización de grandes cantidades de agua. Los efluentes del proceso de faenamiento entran a la PTAR con un caudal aproximado de 15-18 L/s. El tratamiento origina lodos provenientes del biorreactor y del tratamiento físico químico, cuyo contenido presenta una elevada cantidad de materia orgánica que puede ser aprovechada. En la actualidad se utiliza un tanque aerobio para la estabilización de los lodos generados. Sin embargo, se buscan otras alternativas de estabilización que puedan generar valor agregado a este tipo de desecho.

Dentro de las alternativas de estabilización de lodos para su correcta reutilización o disposición se encuentran varias técnicas convencionales como: el compostaje, digestor aerobio, digestor anaerobio entre otras los cuales dependiendo de su manejo tienen importantes diferencias en sus costos de inversión y manejo.

Teniendo en cuenta el uso adecuado de fertilizantes como otro desafío para países agrícolas. Se encuentra que para el año 2015 más de 17.000 agricultores del país solicitaron la compra de fertilizantes y fungicidas, por lo que se importó 28.000 toneladas de fertilizante procedentes de China (Unidad Nacional de Almacenamiento EP, 2016), los datos muestran que se necesita 1.5 sacos de urea ciclo/mes o 2 sacos de muriato de potasio ciclo/mes y como otra alternativa 0.5 sacos de DAP ciclo/mes, durante el año en 12 ciclos según el plan desarrollado por el MAGAP.

Debido a lo mencionado se propone realizar una prueba a nivel piloto para la estabilización de los lodos generados en el tratamiento biológico de la PTAR del camal Metropolitano de Quito, los cuales son causantes de impactos negativos al ambiente, al igual que los fertilizantes químicos ocupados en el agro. Para la experimentación se utilizará el lodo generado en el tratamiento biológico, pues es el más aprovechable por su mayor cantidad de materia orgánica y su potencial de revalorización económica y ambiental (Gladys, Pati, Humberto, & Rene, 2012), también debido a que en este proceso no se han agregado aún agentes coagulantes que cambian la composición del lodo y pueden ser perjudiciales para obtener un abono de calidad. El tratamiento se realizará mediante la aplicación de la técnica de vermicompostaje, la cual es un tipo de estabilización de materia orgánica, considerada por varios investigadores como la mejor alternativa frente a otros tratamientos biológicos (Compost Guy, 2007). Este proceso utiliza las reacciones enzimáticas de las lombrices rojas californianas para convertir los lodos residuales de la planta de tratamiento de la EMPRQ en biosólidos o lodos estables que sirven de bioabono para el uso de los agricultores.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La presente experimentación permitirá obtener información a lo largo del proceso de estabilización de lodos. Dentro de esta información se encuentran datos sobre la reducción de patógenos al finalizar el proceso comparándolos con los datos de la caracterización inicial, por otra parte, se obtendrán también datos sobre la producción de macro y micro nutrientes, toda esta información permitirá establecer diferentes eficiencias del proceso de estabilización que podrán compararse con las eficiencias de otros tratamientos. Además, se podrá establecer relaciones entre el porcentaje de lodo a tratar con la cantidad de lombrices inoculadas, dependiendo del control de las condiciones de temperatura, humedad y pH, que envuelvan el hábitat de las lombrices donde estas puedan desarrollar su ciclo biológico. Adicionalmente se podrá identificar el tiempo que requieren las lombrices para biodegradar cierta cantidad de lodos residuales complementados con el sustrato orgánico (césped y aserrín). Así también se definirá cual puede ser el sustrato óptimo para el hábitat de las lombrices y que a su vez provea una relación C/N que permita producir abono orgánico de calidad.

En el bioproceso de vermicompostaje se realizará la degradación de la materia orgánica contenida en los lodos residuales mediante la aceleración de su oxidación inducida por un proceso enzimático de las lombrices de tierra rojas californianas y microorganismos presentes en la tierra que ayudarán a la estabilización (Nogales,2010). Las lombrices se encargan de fraccionar el sustrato orgánico estimulando la actividad microbiana, de forma que el residuo orgánico se transforma rápidamente en un sustrato humificador cuya textura y tamaño de partícula son mucho más finas que las de los compostos tradicionales (Dominguéz, Lazcano, & Brandóm, 2010).

De acuerdo con la metodología aplicada se empleará el adiconamiento de dos sustratos complementarios a diferentes concentraciones en peso, que beneficiarán en el incremento de nutrientes para el bioproceso, donde se podrá analizar la eficiencia de estabilización al final del este, para determinar cuál fue la mejor alternativa de tratamiento. Esto será teniendo en cuenta la cantidad de nutrientes presentes y la disminución de la materia orgánica inestable.

El proceso se evaluará para determinar las condiciones de nutrientes que pueden brindar al suelo y saber qué beneficios agronómicos tiene comparado con un fertilizante químico comercial, (Nagavallema, Wani, Lacroix, Padmaja, Vineela, Rao, Sahrawat, 2006). Se espera estabilizar el 85% de la materia orgánica y realizar el proceso en menor tiempo, a su vez se tienen beneficios que no se encuentran en el compost tradicional como: mayor carga nutritiva, la conservación del nitrógeno debido a que el bioproceso se realiza a temperatura ambiente y la humedad alta no es un condicionante.

El avance de la agricultura y las necesidades de la humanidad por una alta demanda de alimentos ha generado que se incremente el uso de fertilizantes de origen químico ocasionando erosión y contaminación del suelo y a su vez causando la pérdida de su fertilidad (Hernandez, Ojeda, López, & Arras, 2010), por esta razón se plantea la utilización de un bioabono que fortifique las condiciones naturales del suelo y aumente su fertilidad.

Para esto se propone el tratamiento de los lodos residuales del tratamiento biológico de la PTAR del camal de Quito, mediante una técnica que produce bioabono y puede usarse en la industria agrícola. De esta forma los agricultores podrían verse beneficiados pues el abono que se desea producir no erosiona el suelo, de lo contrario es un abono sostenible ya que preserva los recursos naturales, mejora las condiciones del suelo y lo mantiene en equilibrio para el desarrollo de la biota (Dominguez, Lazcano, & Brandóm, 2010). Además, el uso de vermicompostaje puede ser una alternativa viable de

tratamiento ya que disminuye costos en transporte, maquinaria para volteos, trabajo de operarios, entre otros factores que son necesarios al realizar el compostaje tradicional por lo que se podrían ahorrar costos en la producción. A su vez se podría producir bioabono de lombrices por los mismos agricultores, generando un ahorro en la compra de fertilizantes artificiales o naturales con el lodo biológico de la PTAR de la EPMRQ.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Estabilizar los lodos residuales obtenidos del tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales del camal metropolitano de Quito, adicionando diferentes alternativas de sustrato complementario rico en carbono y nitrógeno, que favorezca el vermicompostaje para la producción de un bioabono sostenible.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el lodo residual crudo, mediante análisis físico-químico y biológico, para determinar la existencia de sustancias y organismos que contenga la muestra patrón y pueda inhibir a los organismos presentes en el bioproceso.
 - Construir un sistema piloto de acuerdo con las dimensiones óptimas, para que los lodos puedan ser estabilizados en un tiempo determinado, de acuerdo a la cantidad de lombrices y calidad del sustrato complementario.
 - Determinar las condiciones óptimas de vermicompostaje mediante la integración de varias alternativas de composición de biosólidos-sustrato, tierra de bosque y población de lombrices rojas californianas para que se pueda cumplir con la estabilización de materia orgánica.
-

- Analizar los cambios a lo largo del bioproceso de los parámetros físico-químico y biológicos de las diferentes alternativas propuestas, para comprobar si el lodo estabilizado es lo suficientemente apto para ser utilizado en el agro.
- Comparar la cantidad de nutrientes de las diferentes alternativas biosólidos-sustrato, con respecto a un fertilizante comercial, para la identificación del bioabono que ofrezca un mejor beneficio a las condiciones del suelo.

1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

En este proyecto de titulación técnico-experimental, se realizó un estudio a nivel piloto, de estabilización de los lodos residuales generados en la PTAR de la EPMRQ ubicada en la parroquia Turubamba de Monjas, Cdla La Ecuatoriana, en el cantón Quito, provincia de Pichincha. Los biosólidos fueron estabilizados a través de vermicompostaje, para ser convertido en un bioabono que puede ser utilizado en la agricultura como un acondicionante del suelo, mediante la técnica de vermicompostaje.

Para desarrollar el bioproceso se plantearán cuatro alternativas los cuales contarán con dos repeticiones teniendo un total de tres camas de vermicompostaje por cada tratamiento. Los tratamientos contarán con una adición de material extra al lodo que resultará en una mezcla lodo-sustrato. Los sustratos complementarios tentativos para la mezcla serán tres; aserrín, césped de poda y hojarasca de eucalipto, estos fueron propuestos de acuerdo con la facilidad de su obtención, sin embargo, se realizará su caracterización para determinar propiedades, que permitirán seleccionar los dos más adecuados para la experimentación. De esta forma los cuatro tratamientos diferirán en la cantidad de lodo y la cantidad de sustrato que tenga cada uno.

Se tiene en cuenta también que la muestra inicial de lodo crudo será caracterizada, mediante análisis físico-químicos y microbiológicos, con ayuda

de la Norma Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 e información bibliográfica, que permitirán establecer las condiciones iniciales del lodo, y también determinar si existe alguna característica que puedan inhibir el ciclo biológico de las lombrices rojas californianas.

Se plantea un tiempo de estabilización y producción de vermicompost de 15 semanas, mientras transcurra este tiempo se realizará el control semanal in-situ de la humedad, temperatura y pH. A partir de la tercera semana se realizarán análisis semanales de sólidos volátiles y totales con el fin de obtener la curva de digestión del lodo residual. Al llegar a la mitad del bioproceso aproximadamente la semana sexta; se colectarán muestras de cada cama para realizar análisis de sólidos volátiles y totales y de determinación de macro y micronutrientes.

Cumplido el tiempo establecido se colectarán las últimas muestras para realizar análisis químicos, físicos y biológicos finales que proporcionarán datos que serán tratados para verificar el cumplimiento de estándares establecidos en la normativa (NOM-004-SEMARNAR-2002) y Real decreto 506/2013. Posteriormente mediante análisis estadísticos y cálculos matemáticos se determinarán las eficiencias y diferencias de los cuatro tratamientos, al estabilizar la materia orgánica, disminuir patógenos y producir nutrientes. Para finalmente en un análisis global seleccionar cual ha sido el tratamiento que produjo el vermicompost más beneficioso para el suelo agrícola y si este puede competir a nivel de composición química con un vermicompost comercial.

1.5 ANTECEDENTES

La Empresa Pública Municipal de Rastro Quito (EPMRQ), se encarga del brindar el servicio de faenamiento de ganado bovino, ovino y porcino, comercialización de cárnicos, para tener la seguridad alimentaria de sus productos.

La empresa en sus diferentes etapas del faenamiento produce aguas residuales y sin una gestión adecuada generan malos olores y condiciones sanitarias insalubres. La PTAR es de tipo biológico que está conformado por un tanque de digestión aerobia para la estabilización de los lodos generados en el tratamiento biológico. La EPMRQ procesa la sangre libre de patógenos para elaborar harina con una alta cantidad de proteínas que es utilizado como alimento para consumo animal y la bilis son enviados al exterior para el uso de elaboración de farmacéuticas y cosméticos (EMPRESA PUBLICA METROPOLITANA DE RASTRO QUITO , 2017).

En el faenamiento se generan residuos orgánicos que pueden ser patológicos y no patológicos, dependiendo de su composición se produce harinas o se los calcina (Mendoza M., 2016). Los cárnicos son ocupados para la producción de harinas debido a que los higados tienen patologías, cartilagos y prepucios de animales, mientras que animales que contengan enfermedades, visceras descompuestas y patas son incinerados.

La PTAR de la EPMRQ tiene como objetivo reducir la carga contaminante de los desechos líquidos que son vertidos hacia el Machangara. La PTAR está constituida por un cribado, tanque homogeneizador, tanque aireador o reactor biológico, tanque físico químico y tanque sedimentador, filtros de grava, fosa para lodos activados (Mendoza M. , 2016).

En el Ecuador la gestión de lodos residuales provenientes de los procesos físico-químicos y biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales es escaso, por esta razón se establece la alternativa de vermicompostaje para el tratamiento adecuado de los biosólidos, así como un beneficio para los agricultores al obtener un bioabono que puede ser producido por ellos mismos y que mejore las condiciones nutritivas del suelo

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 LAS AGUAS RESIDUALES.

Las aguas residuales son aquellas que han cambiado sus características originales por actividades humanas e industriales; por su calidad requieren depuración antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo receptor o descargadas al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

Las aguas residuales son transportadas por el alcantarillado o vertido a un cuerpo receptor de agua, pueden generar malos olores y atracción de vectores cuando estas se evaporan, debido a que no son adecuadamente gestionados. Además, contaminan los cuerpos de agua con los que llegan a mezclarse ocasionando diversos tipos de enfermedades en la población (CONAGUA, 2013).

2.1.1 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales tienen una composición variada dependiendo del uso como pueden ser: municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos (Rodríguez & Durán de Bazua, 2009).

- **Aguas residuales domésticas o aguas negras:** consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidrosanitarias de la edificación, también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares (Blazquez & Montero, 2010).

- **Aguas residuales industriales:** proceden de los procesos productivos en fábricas y establecimientos industriales; su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales (OEFA, 2014).

- **Aguas residuales agrícolas:** procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Las aguas urbanas que se utilizan en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo (Espigares García & Pérez López, 2003).
- **Aguas residuales municipales:** son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (OEFA, 2014).

Las aguas residuales de la EPMRQ son de tipo industrial del faenamiento de animales; están compuestos de contenidos gastrointestinales, excrementos de animales, sangre, grasas, vísceras, excretas de ganado y entre otros (EMPRESA PUBLICA METROPOLITANA DE RASTRO QUITO , 2017).

2.1.2 GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN EL FAENAMIENTO

El tratamiento de las aguas residuales del faenamiento tiene como meta remover los contaminantes que se encuentran presentes, al fin de cumplir con la normativa, evitar daños al ambiente y a la salud humana (García, 2006).

En el tratamiento de aguas residuales se producen por lo general dos tipos de lodos. Las características del tratamiento, que se realiza al agua residual, indicarán que tipo del lodo residual se genera. (Limón, 2013).

2.1.3 CARACTERÍSTICAS Y PROBLEMÁTICAS DE AGUAS RESIDUALES

En la Tabla 2.1, se muestra los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que caracterizan a las aguas residuales y los problemas ambientales que causan a la población y a los ecosistemas en los que se vierten.

TABLA 2.1: PARÁMETROS DE CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES

PARÁMETRO		PROBLEMÁTICA
Partículas en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> • SSV • SSF 	Los sólidos suspendidos pueden causar que las partículas precipiten formando lodos, llegando a generar condiciones anaeróbicas y disminuir la capacidad de absorción del suelo.
Sustancias orgánicas biodegradables	<ul style="list-style-type: none"> • DQO • DBO 	Cuando estas sustancias orgánicas llegan a degradarse en algún medio, pueden dar lugar a la disminución considerable del oxígeno disuelto del medio y la aparición de condiciones anaerobias.
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Coliformes totales</i> • <i>Coliformes fecales</i> 	Los microorganismos patógenos son los causantes de varias enfermedades, ya que contienen virus, bacterias y parásitos, que pueden afectar a la salud de las personas
Nutrientes	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrógeno • Fósforo • Potasio 	Los nutrientes son fundamentales para el desarrollo de las plantas. Si se tiene estos nutrientes presentes en un medio acuático puede generar eutrofización y contaminar aguas subterráneas.
Acidez	pH	El pH afecta la solubilidad de los metales y la alcalinidad en los suelos.
Alcalinidad		

PARÁMETRO		PROBLEMÁTICA
Micronutrientes	<ul style="list-style-type: none"> • Cadmio • Molibdeno • Zinc • Níquel • Hierro • Entre otros más. 	Los micronutrientes en altas cantidades se acumulan en el ambiente y pueden llegar a ser tóxicos para el ecosistema, por esta razón es primordial conocer si existe presencia de metales en agua o lodos residuales porque pueden llegar a ser ingeridos por las personas debido a la bioacumulación en plantas y animales.
Compuestos disueltos	<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos disueltos • Conductividad • Cationes (Na, B, Mg, Ca) 	La salinidad en altas concentraciones puede llegar a inhibir ciertos cultivos, ya que el sodio, boro y los cloruros son tóxicos para ciertas plantas. El sodio afecta a la permeabilidad del suelo.

Fuente: (Torres, 2005)

2.2 LODOS RESIDUALES

Los lodos residuales son sólidos con humedad variable; se generan en las operaciones unitarias de las plantas depuradoras; se consideran lodos residuales a aquellos que no han tenido un adecuado tratamiento previo de estabilización (SEMARNAT, 2002).

Los lodos residuales por sus propiedades pueden ser aprovechados como abono orgánico, biogas, biol y fuente de energía alternativa, otorgándoles valor agregado con características asimilables al ambiente. El producto del tratamiento debe cumplir con límites máximos permisibles en la normativa.

2.2.1 ORIGEN Y TIPOS DE LODOS RESIDUALES

Los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales dependen del tipo de la PTAR y el grado de eficiencia (Limón, 2013). En los diferentes procesos de tratamiento el lodo residual suele tener una consistencia semi-sólida con un contenido de biosólidos entre el 0.25 y el 12% en peso (Hammeken & Romero, 2005). De acuerdo con esta conceptualización tenemos tres tipos de lodos que se describirán a continuación:

- **Lodos primarios:** se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables, de origen inorgánico y orgánico (Limón, 2013).
- **Lodos secundarios:** son los lodos generados por el tratamiento secundario biológico, producto de la conversión de desechos solubles dentro del tratamiento. Consisten en lodos biológicos que están compuestos principalmente por materia orgánica (Valencia, 2008).
- **Lodo químico:** son los que se generan en un tratamiento que utiliza netamente compuestos químicos para permitir la sedimentación de sólidos suspendidos (Barrios, 2009).

2.2.2 GENERACIÓN DE LODOS EN LA PTAR DE LA EPMRQ

En el tratamiento preliminar de las aguas residuales se utiliza una etapa de cribado o tamizaje, con el objetivo de remover sólidos como: vísceras, grasas, rumen y restos de piel de los animales, ingresados en el faenamiento, que pueden dañar las bombas, tuberías y otros elementos hidráulicos en la PTAR (EMPRESA PUBLICA METROPOLITANA DE RASTRO QUITO , 2017).

Posteriormente el caudal es dirigido hacia dos tanques de homogenización para que todo el volumen de agua adquiera las mismas características. Luego el flujo es dirigido al reactor aerobio, donde se producen lodos, provenientes del tratamiento secundario microbiológico. Parte del lodo residual es retornado al

reactor, ya que tienen una alta carga microbiológica que ayudará a degradar nuevamente las aguas provenientes del faenamiento. En el tratamiento microbiológico de la PTAR de la Empresa Pública Municipal de Rastro Quito, se generan una 15 m³ cada semana, siendo una cantidad considerable de lodos residuales que podrían ser estabilizados para producir bioabono. (Mendoza M. , 2016).

En el presente, los lodos residuales provenientes de la PTAR en conjunto con excretas y contenido ruminal son tratados mediante la técnica de compostaje, en la actualidad se obtienen buenos resultados pensando en un futuro en empezar a comercializar este bioabono (EMPRESA PUBLICA METROPOLITANA DE RASTRO QUITO , 2017).

2.3 TRATAMIENTOS PARA LODOS RESIDUALES

Los lodos residuales poseen una alta cantidad de contaminantes como se ha mencionado anteriormente, por lo que se requiere un tratamiento previo para mitigar la problemática que éstos generan.

Para facilitar la remoción del componente líquido que contiene los lodos se utilizan algunos procesos unitarios descritos en la Tabla 2.2.

TABLA 2.2: PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS	REMOCIÓN DE AGUA
Estabilización	<ul style="list-style-type: none"> • Espesamiento • Acondicionamiento • Deshidratación • Tratamiento térmico

Fuente: (Valencia, 2008)

2.3.1 ESTABILIZACIÓN

La estabilización de los lodos residuales busca principalmente reducir la cantidad de patógenos, eliminar malos olores y vectores (Valencia, 2008), así como también reducir la humedad y en general la materia orgánica inestable para dar una disposición final correcta.

Los tratamientos para este fin son: la reducción biológica del contenido de sólidos volátiles; la oxidación química de la materia volátil; la adición de compuestos químicos para inhibir a los patógenos, tratamientos físicos y la aplicación de tecnologías térmicas para desinfección de lodos residuales (Hammeken & Romero, 2005).

Los métodos que se aplican para la estabilización son:

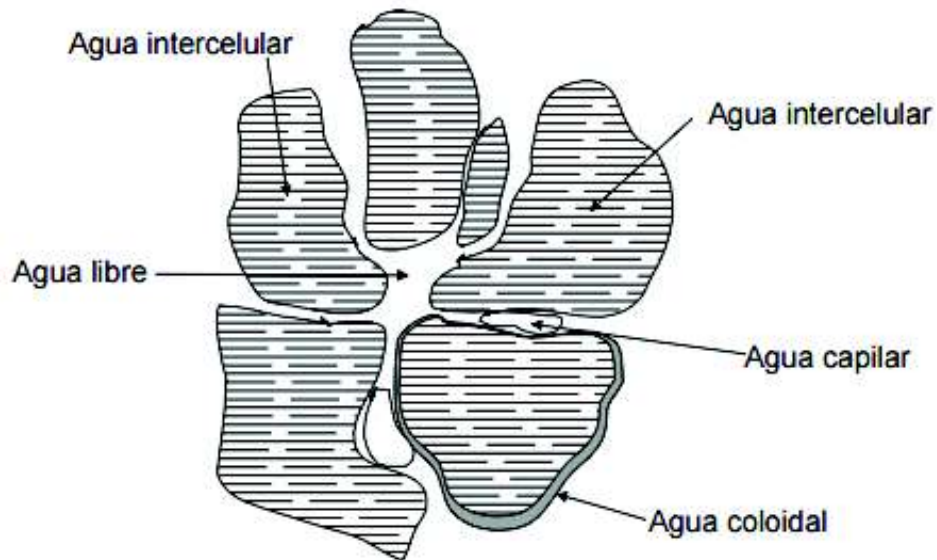
- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia
- Procesos físico-químicos
- Composteo
- Vermicomposteo

2.3.2 ESPESAMIENTO

Este proceso unitario tiene como objetivo separar las fases sólida y líquida presentes en los lodos residuales, para aumentar la concentración de la fase sólida en el lodo, eliminando el volumen de agua (Valencia, 2008). La fase líquida esta presente en los espacios coloidales, intercelular, capilar y libre como se puede observar en la FIGURA 2.1.

La disminución del volumen de agua es favorable para los procesos que se van a realizar posteriormente como: la digestión, la deshidratación y secado. En estos procesos se reduce la carga orgánica, la cantidad de reactivos para su acondicionamiento y el calor que se demanda para el digestor (Suárez & Jácome, 2007).

FIGURA 2.1: FORMAS EN LAS QUE ESTÁ PRESENTE AL AGUA EN LOS LODOS RESIDUALES.



Fuente: (Suárez & Jácome, 2007)

Existen diferentes tipos de espesamiento mencionados a continuación:

- Espesamiento por gravedad
- Espesamiento por flotación
- Centrifugación
- Filtros

2.3.3 ACONDICIONAMIENTO

El acondicionamiento dependerá de la cantidad de humedad presente en el lodo, ya que el objetivo es separar la parte sólida de la líquida, debido a que los procesos posteriores pueden tener eficiencias bajas (Torres, 2005). Por lo que el acondicionamiento previo al lodo favorecerá las condiciones de deshidratación.

El acondicionamiento modifica la estructura de la relación agua-sólido para liberar el líquido e incrementar la velocidad de escape del agua desde la matriz del lodo (Valencia, 2008).

Existen varias técnicas para brindar un acondicionamiento a los lodos residuales, y son los siguientes:

- Tratamiento químico (cloruro férrico, cal, alúmina y polímeros orgánicos)
- Tratamiento térmico
- Congelamiento
- Elutriación

2.3.4 DESHIDRATACIÓN

Para eliminar en su totalidad el agua presente en los lodos residuales es necesario aplicar procesos unitarios de espesado, deshidratación y secado.

En el proceso de espesado se logra separar el agua intersticial del componente sólido, mientras con el proceso de deshidratación se elimina el agua capilar y de adhesión por medio de fuerzas mecánicas de centrifugación y filtros (Torres, 2005). Para poder complementar la eliminación del agua de adsorción y de constitución en su totalidad se requiere aplicar energía térmica (Valencia, 2008).

2.3.5 TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico es un proceso en el que el lodo es sometido por periodos cortos de tiempo a temperaturas de hasta 260 °C.

Gracias a las altas temperaturas que alcanza este proceso el agua contenida en los lodos residuales es eliminada, permitiendo la deshidratación adecuada sin ocupar compuestos químicos (Morales, 2005).

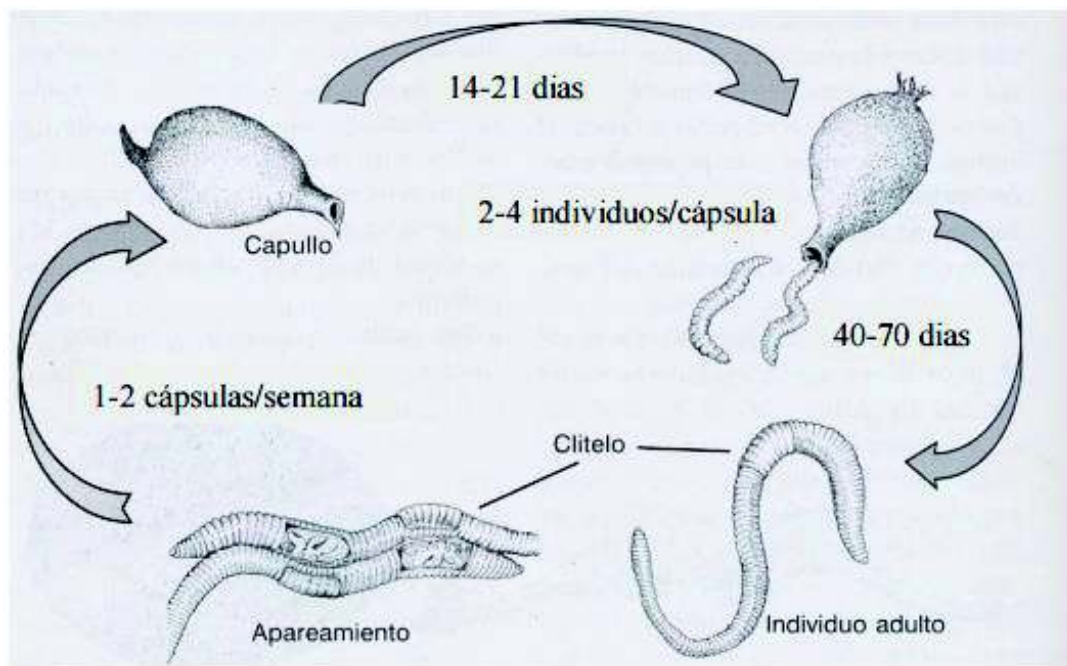
El objetivo del tratamiento térmico es calentar a los lodos residuales con el fin de cambiar la estructura de la materia, mediante este proceso los lodos pueden ser llevados hasta la incineración (Valencia, 2008).

2.4 LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*EISENIA FOETIDA*)

Es una lombriz de tierra utilizada principalmente para generar vermicomposto con alto contenido de nutrientes. Su ciclo biológico es corto y su capacidad de reproducción es alta, como se indica en la FIGURA 2.2. Se debe tener en cuenta que su organismo necesita condiciones óptimas de hábitat para que puedan realizar sus funciones (Saavedra, 2007).

Otros usos de la lombriz de tierra son: carnada para la pesca, alimento para animales domésticos (gallinas, cerdos y vacas), transformación ecológica de materiales biodegradables producidos por la industria y poblaciones urbanas e industrias farmacéuticas (Pineda, 2006).

FIGURA 2.2: CICLO BIOLÓGICO DE LA *EISENIA FOETIDA*



Fuente: (Saavedra, 2007)

La lombriz avanza excavando en el terreno a medida que come, depositando sus excretas y aumentando la fertilidad del suelo, incluso más que al utilizar fertilizantes artificiales (Pineda, 2006).

2.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA LOMBRIZ *EISENIA FOÉTIDA*

Las lombrices rojas californianas poseen características fisiológicas para adaptarse a cualquier medio con las condiciones del hábitat correctas para el desarrollo de su ciclo vital, las cuales se muestra en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3: CARACTERÍSTICAS DE LA LOMBRIZ *EISENIA FOÉTIDA*

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Color	Rojo oscuro
Respiración	Cutánea
Medidas	Largo: 6 – 12 cm Diámetro: 3 – 6 mm
Peso (adulta)	0,24 - 1.4 gramos (80 – 90% agua)
Daños en su fisiología	Fotosensible
Periodo de vida	90 – 100 días
Reproducción	330 lombrices al año
Producción de nutrientes luego de ingerir el sustrato.	5 veces más nitrógeno 7 veces más fósforo 5 - 11 veces más potasio 2 veces más calcio

Fuente: (Martínez, 2007); (Saavedra, 2007)

2.4.1 CONDICIONES DE HABITAT PARA LAS LOMBRICES DE TIERRA

Las condiciones ideales de hábitat para que las lombrices pueden cumplir su ciclo biológico con mayor productividad se presentan en la Tabla 2.4. Los principales parámetros que se debe controlar son la temperatura y humedad, ya que están directamente relacionado al sistema respiratorio de las lombrices, debido a que las lombrices tienen respiración cutánea (Pineda, 2006).

TABLA 2.4: CONDICIONES DE HABITAT PARA LA *EISENIA FOÉTIDA*

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO	RANGO GENERAL
pH	7,5	5 – 8,4
Humedad	85%	50 – 90%
Temperatura	25 °C	10 – 35 °C
Relación C/N	10 – 15	20 – 35

Fuente: (Martínez, 2007), (Pineda, 2006).

2.4.2 SISTEMA DIGESTIVO

Es importante mencionar que las lombrices de tierra se alimentan de sustratos orgánicos en especial si éste contiene alta cantidad de microorganismos (Martínez, 2007).

Las lombrices estabilizan la materia orgánica, de acuerdo con las siguientes condiciones:

- En un hábitat óptimo, un número de 3500 lombrices logran descomponer hasta 1 Kg de residuos orgánicos domésticos (Naturaland, 2017).
- Pueden producir un bioabono en 60 días con dimensiones de 1 m² y 20 cm de profundidad (Naturaland, 2017).
- Una lombriz en condiciones óptimas puede producir bioabono en un día la cantidad del 50% y hasta el 100% de su peso (Naturaland, 2017).

2.4.3 SISTEMA REPRODUCTOR

Las lombrices presentan ambos sexos (hermafroditas), sin embargo, no tienen la capacidad de auto fecundarse por lo que está obligada a intercambiar esperma con otras lombrices para poder fecundar sus óvulos (Mejía, 2004).

Luego de la fecundación proceden a liberar cápsulas o también llamados cocones, que contienen los huevos, que eclosionan de tres a cinco semanas liberando de dos a cuatro lombrices por cápsula (Martínez, 2007).

2.4.4 SISTEMA RESPIRATORIO

Las lombrices poseen una respiración cutánea, ya que, al no poseer sistema circulatorio, la sangre circula por vasos capilares que se ubican junto a la cutícula húmeda de la pared del cuerpo lo que favorece la absorción de oxígeno (Martínez, 2007).

2.5 NOM-004-SEMARNAT-2002 y REAL DECRETO 506/2013

La NOM-004-SEMARNAT-2002 vigente en México tiene como objetivo la protección ambiental en el ámbito del cumplimiento de los límites permisibles para el control de lodos residuales y biosólidos. Esta normativa se considera para el presente estudio debido a que los procesos de tratamiento en la industria de rastro son similares en Ecuador y México.

Para el aprovechamiento de los biosólidos se debe cumplir con el Reglamento de la NOM-004-SEMARNAT-2002 descrito a continuación:

- Los productores de biosólidos tienen que controlar la atracción de vectores.
 - Según la normativa mexicana los biosólidos deberán ser clasificados según:
 - **El tipo:** contenido de metales pesados y pueden ser: excelente y bueno.
 - **La clase:** contenido de patógenos y parásitos pueden ser: A, B y C.
 - Se debe cumplir con los límites máximos permisibles de metales pesados y de patógenos como se presenta en las Tabla 2.6, TABLA 2.7
-

Además, para que el vermicomposto del presente estudio sea considerado como un abono orgánico N/P/K según el Real Decreto 506/2013, debe cumplir con los valores presentes en la TABLA 2.5.

TABLA 2.5: CARACTERÍSTICAS NECESARIAS DE VERMICOMPOST PARA USO EN LA AGRICULTURA

PARÁMETROS	VALORES
Materia orgánica	> 30 % en peso
Humedad máxima	< al 40%
C/N	< 10
Nitrogeno total	> 1%
SV/ST	< 30%
Fosfóro total	> 1%
Potasio total	> 1%

Fuente: (REAL DECRETO 506/2013, 2013)

TABLA 2.6: LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE PARA PATÓGENOS Y PARÁSITOS EN LODOS Y BIOSÓLIDOS

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	<i>Coliformes fecales</i> [NMP/g] en base seca	<i>Salmonella spp.</i> [NMP/g] en base seca	[Huevos de helmintos/g] en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2'000.000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: (SEMARNAT, 2002)

TABLA 2.7: LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSÓLIDOS

CONTAMINANTE	EXELENTE [mg/Kg]	BUENO [mg/Kg]
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Fuente: (SEMARNAT, 2002)

Según la normativa se dispone:

- Los lugares para la disposición final de lodos residuales y biosólidos serán los que autorice la autoridad competente, teniendo en cuenta la normativa vigente en la materia.
- Los lodos y biosólidos que cumplan los límites permisibles pueden ser almacenados hasta dos años. El lugar en el que se almacenen debe tener las condiciones necesarias para que no existan infiltraciones y contar con un sistema de gestión de lixiviados.

Según el tipo de biosólidos se describe para que es útil y su aprovechamiento como se indica en la Tabla 2.8.

TABLA 2.8: APROVECHAMIENTO DE LOS TIPOS DE BIOSÓLIDOS

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto directo a las personas durante su aplicación. • Aprovechamientos de la clase B y C.
EXELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto directo a personas durante su aplicación. • Aprovechamientos de la clase C.
EXELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales. • Mejoramiento de suelos. • Usos agrícolas.

Fuente: (SEMARNAT, 2002)

2.6 LOS BIOSÓLIDOS

Los biosólidos son lodos residuales que han sido tratados mediante un proceso de estabilización, que por su alta cantidad en nutrientes pueden ser aprovechados en la agricultura (SEMARNAT, 2002), además, como energía, obtención de biogás (Castañeda, 2012), pero también poseen compuestos que pueden afectar a los cultivos, ecosistemas y personas. La Tabla 2.9 muestra las limitaciones en el aprovechamiento de los biosólidos dependiendo de su tipo y clase.

TABLA 2.9: APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS

TIPO	CLASE	USO
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Urbanos con contacto público
Excelente o Bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Urbanos sin contacto público
Excelente o Bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoramiento de suelos • Agrícola • Forestal

Fuente: (NOM-004-SEMARNAT-2002) (SEMARNAT, 2002)

En el suelo los biosólidos con fines agrícolas deben ser controlados por un ente fiscalizador que analice las plantas y productos vegetales. Se debe cumplir con las condiciones fitosanitarias de la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de Calidad del Agro.

Su alto contenido de micronutrientes y macronutrientes es indispensable para el crecimiento de las plantas y cultivos (Tesauro, 2013), además por su alto poder calorífico los biosólidos se utilizan para el desarrollo de energías alternativas de combustión (Castañeda, 2012).

2.6.1 BIOSÓLIDOS EN LA AGRICULTURA

Los biosólidos como un producto de aprovechamiento permiten que el suelo mejore la textura, la estructura y la capacidad de absorber agua. Esto facilita que las raíces aumentan su tamaño haciendo que las plantas incrementen la resistividad al estrés hídrico (Limón, 2013). Además, el suelo se torna más fértil gracias al aporte de macronutrientes (N, P, K) y micronutrientes (Fe, S, Mo, Al, Ca, Mg y Zn) de forma prolongada. (Castañeda & López, 2012).

Los nutrientes que aportan los biosólidos a las plantas son menos solubles en agua, comparados con fertilizantes inorgánicos, lo que disminuye la posibilidad de que se lixivien hacia aguas subterráneas o sean transportados hacia aguas superficiales (Dágner, 2003).

2.7 VERMICOMPOSTAJE

Es una técnica de estabilización, degradación y biooxidación enzimática, que se aplica a la materia orgánica, realizado por las lombrices en conjunto con microorganismos, generando un bioabono llamado vermicomposto. Este proceso depende de la humedad óptima de 85% y no requiere de equipos de aireación debido a que los anélidos durante su movimiento crean orificios en el suelo o sustrato lo que facilita el ingreso de aire (Saavedra, 2007). Previamente se debe reducir la humedad del lodo para tener un hábitat adecuado para las lombrices,

mediante secado con radiación solar. La técnica de lombricomposteo acelera la descomposición de la materia orgánica transformándola en una sustancia fertilizante y generadora de humus con alto valor nutritivo para el crecimiento de las plantas (Aranda, 2013).

Las características y beneficios del vermicompost que mejoran la fertilidad en el suelo se describen en la Tabla 2.10.

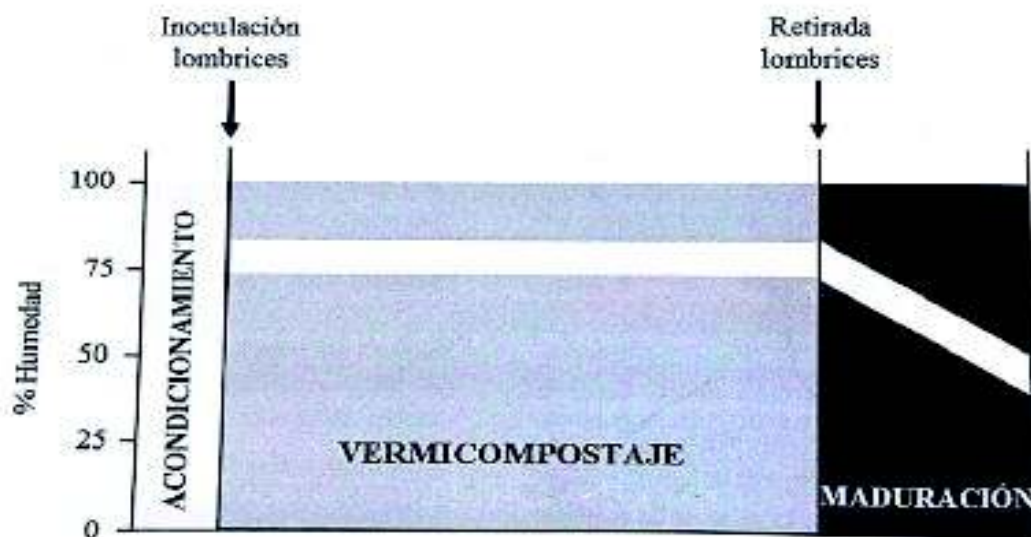
TABLA 2.10: CARACTERISTICAS Y BENEFICIOS DEL PROCESO DE VERMICOMPOST

CARACTERISTICAS	BENEFICIO
<ul style="list-style-type: none"> • Bioabono sin olor. • Composición de nutrientes equilibrada • Alta concentración de microorganismos degradadores. • No contiene fertilizantes químicos. • Estructura firme. • Compostaje realizado en frío (temperaturas menores a 50°). • Materia orgánica estable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora la capacidad de absorción de agua y de nutrientes. • La relación de N/P/K es más alta en el suelo. • Mejora la relación carbono/nitrógeno (C/N menor a 20). • Disminución de lixiviados. • Disminución de patógenos y hongos. • Plantas sanas y resistentes a plagas. • Mejora la adsorción, descomposición y transporte de plaguicidas

Fuente: (Naturaland, 2017); (Díaz, 2002); (Nogales, 2010)

2.7.1 FASES DEL VERMICOMPOSTAJE

Existen tres diferentes etapas donde las lombrices y los microorganismos interactúan conjuntamente para poder degradar la materia orgánica, como se observa en la FIGURA 2.3.

FIGURA 2.3: ETAPAS DEL VERMICOMPOSTAJE

Fuente: (Camiletti, 2016)

En la fase de acondicionamiento los sustratos elegidos para el vermicompostaje deben cumplir con las condiciones óptimas mencionadas en la Tabla 2.4, para que las lombrices consuman el alimento e incrementen la cantidad de microorganismos (Camiletti, 2016). Se recomienda precompostar el sustrato si éste tiene origen animal y contiene una alta cantidad de patógenos (Pineda, 2006).

En la fase de vermicompostaje las lombrices realizan la degradación, humificación y mineralización de la materia orgánica para la producción de un bioabono (Saavedra, 2007). Las condiciones que sistematizan esta fase son la densidad poblacional, la elección del sustrato y las condiciones de temperatura, pH y humedad (Camiletti, 2016)

En la fase de maduración las lombrices deben ser retiradas del vermicompostador para poder ser utilizadas en la siguiente producción de vermicompost, además el sustrato tiende a humificarse, polimerizarse y por esta razón los porcentajes de humedad se deben reducir dejando de regar el sustrato en las últimas 2 semanas para que los nutrientes no se lixivien durante el transporte (Camiletti, 2016).

2.7.2 PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

El vermicomposto es utilizado como abono orgánico para mejorar las condiciones nutritivas del suelo, mejorando la cantidad y calidad de los vegetales, frutas, flores (Pineda, 2006).

La Tabla 2.11, muestra la cantidad de proteína, bioabono en peso y la cantidad de lombrices que se desarrollan durante el bioproceso.

TABLA 2.11: PRODUCCIÓN ANUAL DE VERMICOMPOST

DESCRIPCIÓN	0 meses	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Generación	inicial	primera	segunda	tercera	cuarta
Población	1000	10.000	100.000	1.000.000	10.000.000
Peso [Kg]	1	10	100	1.000	10.000
Alimento [Kg/día]	1	10	100	1.000	10.000
Bioabono [Kg/día]	0.6	6	60	600	6.000
Proteína [Kg/día]	0.04	0.4	4	40	400

Fuente: (Díaz, 2002).

2.7.3 SUSTRATOS COMPLEMENTARIOS PARA EL BIOPROCESO

Los sustratos que se agregan al bioproceso de vermicompost son indispensables para mejorar las características de la mezcla lodo-sustrato y dotan de carbono que es deficiente en los lodos, además se requiere que los sustratos tengan contenidos altos de humedad y una relación C/N favorable para el suelo (Agro Waste, 2017).

La elección del sustrato debe ser de acuerdo con las características físicas-químicas, debido a que estas podrían cambiar las condiciones de pH y temperatura (Vermicam, 2017). Dependiendo de la elección del sustrato se

encuentran microorganismos que apresuran la degradación de la materia orgánica inestable (Pineda, 2006).

2.7.3.1 TIPOS DE SUSTRATOS

Los sustratos que son más usados son los de excretas de animales debido a que se considera un residuo que puede ser rehusado y aumenta la concentración de macronutrientes al vermicompostaje (Díaz, 2002), además existen sustratos con buena relación C/N como: pulpas de las frutas y el aserrín. A continuación, se describen las características de los sustratos.

- **Vacaza:** Estiércol obtenido de las vacas.
 - Es importante precompostar la vacaza debido a que tiene materia orgánica inestable hasta alcanzar un pH básico conveniente para las lombrices.
 - Se debe tener en cuenta las condiciones de temperatura, humedad y pH.
 - Se debe regar con agua continuamente controlando la humedad.
 - Para equilibrar el pH es recomendable utilizar cal.

 - **Pulpa:** Desecho orgánico de la producción de café comercial.
 - Debido a que contiene polímeros (lignina, celulosa, ácido cafeico y clorogénico), imposibilita el uso inmediato como alimento para las lombrices.
 - La fermentación permite liberar varios compuestos que no pueden ser asimilables por las lombrices.

 - **Aserrín:** Polvo grueso, desecho producido del corte de la madera.
 - Se recomienda fracturar el tamaño de las partículas para que las lombrices puedan ingerir de forma más fácil y rápida.
 - Tener en cuenta el origen de la madera ya que, depende de esto su descomposición.
-

2.7.4 CAMBIOS GENERADOS DURANTE EL BIOPROCESO

En el bioproceso tanto las lombrices y microorganismos trabajan estrechamente., los microorganismos son parte del alimento de las lombrices y paralelamente las lombrices fragmentan la materia orgánica haciéndola asimilable para los microorganismos aumentando la actividad microbiana (Nogales, 2010). Mientras el proceso se realiza el sustrato, empieza a disminuir su granulometría para mineralizarse, los valores de carbono orgánico decrecen, dependiendo del sustrato, el tiempo de descomposición y la cantidad de lombrices (Saavedra, 2007).

Mediante las reacciones enzimáticas y las excretas de mucus de la lombriz generan compuestos que son fácilmente asimilables por los microorganismos (Fernández, 2011). Mientras tanto la materia orgánica se humifica, mineraliza y se estabiliza en la fase final del bioproceso (Saavedra, 2007).

Debido a la mineralización de la materia orgánica la cantidad de nutrientes aumenta, principalmente en compuestos como el fósforo, calcio, magnesio y varios micronutrientes. Además, el bioproceso permite que los compuestos químicos se vuelvan solubles y puedan ser asimilados por las plantas (Nogales, 2010).

Hay pérdida de nitrógeno asimilable por las plantas, cuando existe una alta cantidad de nitrógeno disponible que los microorganismos consumen y desnitrifican (Fernández, 2011). Por el contrario, un sustrato pobre en nitrógeno aumentará este compuesto en el producto final debido a los procesos de fijación del nitrógeno atmosférico por parte de los microorganismos y a la disgregación de las lombrices muertas (Saavedra, 2007); (Nogales, 2010).

El potasio puede disiparse debido a la solubilidad de este, cuando existe drenaje de agua, por lo que se recomienda que la humedad sea la adecuada para evitar la pérdida de nutrientes (Mendoza, 2010).

2.7.5 NUTRIENTES

Los nutrientes son elementos químicos fundamentales para el desarrollo de las plantas que son aportados por los abonos. Sin tomar en cuenta los nutrientes como el hidrogeno, oxígeno y el carbono que son provenientes del agua y el aire para ser asimilados por la vegetación (Ministerio de la presidencia de España, 2013).

Dependiendo de la variación del pH del suelo los diferentes macronutrientes y micronutrientes se encuentran disponibles para las plantas como se indica en la FIGURA 2.4.

FIGURA 2.4: DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES A CAMBIOS DE pH.



Fuente: (Rodríguez & Flórez, 2004).

La cantidad de nutrientes provenientes de los abonos orgánicos aumentan la capacidad de producción de biota y mejora las condiciones del suelo. Los nutrientes en cantidad y calidad dependen de la técnica ocupada para estabilizar la materia orgánica como es el composto, abonos verdes, vermicomposto y residuos de plantaciones (SAGARPA, 2018).

La diversidad de elementos esenciales y acción de los microorganismos es importante en la oxidación y reducción para que exista una mayor cantidad de macronutrientes y micronutrientes.

2.7.5.1 MACRONUTRIENTES

Los macronutrientes son compuestos que se encuentran en mayor cantidad y forman parte del tejido de las plantas en cantidades superiores a 0.1% (Rodríguez & Flórez, 2004). Se consideran macronutrientes al nitrógeno, fósforo y potasio, que juntos representan el 75% de nutrientes en las plantas (World Agroforestry Center, 2017).

Los macronutrientes a lo largo del tiempo son transportados del suelo hacia la vegetación, por lo que su cantidad puede llegar a disminuir y tener valores bajos para las necesidades de las nuevas cosechas.

Los macronutrientes se encuentran disponibles en diferentes compuestos químicos en el suelo (FAO & Asociación Internacional de Fertilizantes, 2002), en la TABLA 2.12, se identifica a los compuestos y la función que cumplen para el desarrollo de las plantas.

La disponibilidad y presencia de los macronutrientes también dependen del tipo de suelo, pudiendo tener diferente textura, humedad, infiltración y entre otras características del suelo (Martínez, 2007). Se puede tener diferentes características dependiendo del tipo de suelo como:

- **Arcilloso:** alta retención de nutrientes, debido al escaso lavado de nitrógeno y potasio, además de, mayor fijación de fosfatos.
 - **Arenoso:** baja retención de nutrientes, a causa de una gran posibilidad de que el nitrógeno y potasio puedan ser transportados en los lixiviados.
-

TABLA 2.12: MACRONUTRIENTES EN EL SUELO

ELEMENTO	FUNCIÓN	COMPUESTO ASIMILABLE
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la masa seca, para el crecimiento del tallo. • Cumple los procesos metabólicos de las plantas. • La cantidad es causa del desarrollo de las hojas, flores, frutos en la planta. • Exceso causa una retardación en los frutos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitratos (NO₃)⁻ • Amonio (NH₄)⁺
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Trasmisión de energía, para la generación de la fotosíntesis. • Mejora la resistencia a temperaturas bajas. • Aumenta la eficiencia en el consumo de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fosfatos (PO₄)³⁻
Potasio	<ul style="list-style-type: none"> • Activa el sistema enzimático de las plantas. • Sintetiza carbohidratos y proteínas para el desarrollo de las plantas. • Aumenta la tolerancia a estrés hídrico, salinidad, temperaturas bajas y enfermedades. • Beneficia a la calidad de los frutos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Óxido de potasio (K₂O)

Fuente: (FAO & Asociación Internacional de Fertilizantes, 2002); (Rodríguez & Flórez, 2004); (World Agroforestry Center, 2017).

2.7.5.2 MICRONUTRIENTES

Se denominan micronutrientes ya que se los requiere en menores cantidades, y a su vez son necesarios para el desarrollo de las plantas. Estos pueden ser sustituidos por otros compuestos (FAO & Asociación Internacional de Fertilizantes, 2002).

Son elementos considerados como metales, por esta razón las cantidades de este tipo de nutrientes deben ser pequeñas para poder ser asimilados por las plantas, caso contrario podría ser tóxico (World Agroforestry Center, 2017). A continuación, en la TABLA 2.13 se presenta las funciones de los diferentes macronutrientes.

TABLA 2.13: MICRONUTRIENTES EN EL SUELO

ELEMENTO	FUNCIÓN
Magnesio	<ul style="list-style-type: none"> • Está presente principalmente en la clorofila, pigmento que cumple como aceptador de la energía solar. • Procesos enzimáticos para el traspaso de energía.
Azufre	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de proteínas y clorofila.
Calcio	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de las raíces y hojas. • Activa algunos sistemas enzimáticos.
Manganeso	<ul style="list-style-type: none"> • Ayuda a que las plantas puedan generar flores.
Hierro	<ul style="list-style-type: none"> • Regula el pH dentro de la planta.
Zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Genera condiciones óptimas de crecimiento para las hojas y el tallo
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> • Actividad a los peróxidos. • Principal componente en la forma de los frutos.

Fuente: (Prochnow, Moraes, & Stipp, 2009), (Rodríguez & Flórez, 2004), (FAO & Asociación Internacional de Fertilizantes, 2002).

2.7.5.3 RELACIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO

La relación entre C/N en el suelo se traduce en la velocidad con la que los microorganismos descomponen la materia orgánica y los niveles de nitrógeno presentes en el suelo (Flores, 2010). Mientras menor sea el valor de la relación, mayor será el valor de mineralización de la materia orgánica y por lo tanto la calidad de las plantas será mejor (FAO & Asociación Internacional de Fertilizantes, 2002), como se muestra en la TABLA 2.14 los valores y la calidad de la relación C/N.

Teniendo en cuenta que se pueden tener diferentes valores en esta relación, se interpreta que cuando la relación tiene valores altos hay mucha energía y valores mínimos de nitrógeno que es ocupado por los microorganismos dejando cantidades mínimas de nitrógeno disponibles en el suelo. Cuando la relación C/N es baja se entiende que existen valores altos de nitrógeno y energía insuficiente, así los microorganismos son los que primero reciben el nitrógeno y dejan grandes cantidades para las plantas (Román, Martínez, & Pantoja, 2013).

TABLA 2.14: RELACIÓN ENTRE C/N EN PRODUCTOS MINERALIZADOS

C/N	CALIDAD
< 8	Muy buena
8-12	Buena
12-15	Mediana
15-20	Deficiente
20-30	Mala
> 30	Muy mala

Fuente: (Román, Martínez, & Pantoja, 2013)

Dependiendo de los valores que va tomando la relación C/N durante el bioproceso, los valores entre 9-10 se puede considerar que la materia orgánica permanece estable (Flores, 2010).

2.7.6 INCONVENIENTES EN EL BIOPROCESO

Durante el bioproceso de vermicompostaje se puede producir varios problemas debido a las condiciones que necesitan las lombrices para degradar la materia orgánica. Al mismo tiempo al sustrato que se va degradando puede atraer vectores que pueden amenazar para el proceso debido a que también pueden consumir el alimento de las lombrices. La Tabla 2.15, se presenta una posible solución a estos inconvenientes

TABLA 2.15: INCONVENIENTES DURANTE EL BIOPROCESO DE VERMICOMPOSTAJE

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN
La degradación no sucede y la temperatura es baja	Bajos niveles de nitrógeno o humedad, debido a la existencia de mucha aireación	Aumentar más sustrato y hermetizar el vermicompostador con un plástico o tela.
Mal olor	Humedad alta y existe un proceso anaerobio por concentraciones bajas de oxígeno	Regar el vermicompostador o añadir un sustrato que tenga altos niveles de humedad.
Presencia de mosquitos	Altos porcentajes de humedad y debido a que el sustrato se encuentra a la intemperie	Cubrir el vermicompostador con un material que permita la salida de humedad.
Disminución de la población de lombrices	Presencia de sustrato que las lombrices no pueden digerir, además que las condiciones de pH, humedad y temperatura en el bioproceso no son los adecuados.	Retirar el sustrato y cambiarlo por un sustrato que sea asimilable por las lombrices. Para solucionar el pH se puede introducir bicarbonato de calcio para hacerlo más alcalino.

Fuente: (De Santos & Urquiaga, 2013), (Agro Waste, 2017), (Amigos de la Tierra, 2017)

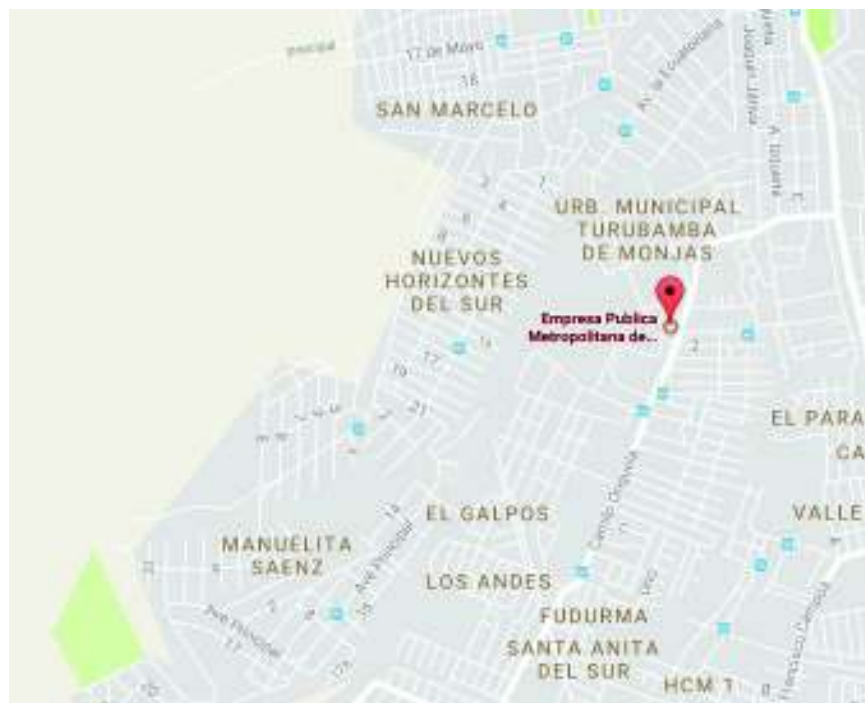
CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 RECOLECCIÓN DE LODOS

Los lodos se obtuvieron de la PTAR de la EPMRQ, ubicada en la parroquia Turubamba de Monjas, Cda. La Ecuatoriana, provincia de Pichincha. Coordenadas: Longitud = -0.318770, Latitud= -78.563875. La FIGURA 3.1 muestra la localización de la EPMRQ.

FIGURA 3.1: MAPA DE LA EPMRQ-EP



Fuente: (Google maps, 2017)

La campaña de muestreo se realizó en mayo de 2017; la muestra fue extraída desde el tanque de lodos que descarga el clarificador luego del tratamiento biológico de agua residual. Para extraer los lodos el ANEXO 1. Muestra que se utilizó una pala y un balde de 5 litros.

La Tabla 3.1 muestra el registro de los detalles de la campaña de muestreo de lodos.

TABLA 3.1. CAMPAÑA DE MUESTREO DEL LODO RESIDUAL

MUESTRA	VOLUMEN (L)	ESPECIFICACIONES	LABORATORIO DE DESTINO
1	1	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra preservada en hielo. • Determinación de <i>Coliformes Fecales</i> y huevos de helminto. 	Centro de servicios Ambientales y Químicos de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (CESAQ-PUCE)
2	2	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra preservada en hielo • Determinación de macro y micronutrientes, nitrógeno total, materia orgánica, densidad aparente, humedad. 	De suelos, plantas y aguas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
3	1	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra preservada en hielo • Determinación de pH, conductividad, sólidos volátiles y sólidos totales. 	Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional.
4	120	Sin preservar, transportada directamente al lugar de experimentación	Área destinada para el procedimiento experimental de vermicompostaje.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LODOS

Los distintos ensayos para determinar los parámetros físico-químicos y microbiológicos del lodo residual fueron realizados en los laboratorios mencionados en la Tabla 3.1,

La TABLA 3.2 presenta el método de determinación y resultado obtenido para cada uno de los parámetros. Dentro de las características físicas uno de los parámetros más importantes es el contenido de humedad ya que este dificulta o facilita el manejo del lodo y su proceso de estabilización (Valencia, 2008). Adicionalmente este dato permite acondicionar el hábitat de las lombrices, para lograr un óptimo bioproceso.

La apariencia, estado físico, color y olor del lodo son parámetros organolépticos que fueron determinados por observación directa. Los valores obtenidos fueron comparados con aquellos obtenidos al finalizar el bioproceso.

La relación (SV/ST) permite establecer el grado de estabilización de la materia orgánica, muy importante para validar el tiempo que requiere la estabilización.

De la caracterización química del lodo crudo se obtuvo información sobre la cantidad de macro y micronutrientes disponibles para el bioproceso y determinar la necesidad de añadir sustratos. Esta información se utilizó para analizar el cambio en la composición al finalizar la experimentación, y establecer la calidad final del abono.

La caracterización microbiológica del lodo incluyó la determinación de *Coliformes fecales* y huevos de helminto por ser los patógenos más representativos (Valencia, 2008). Se excluyó el análisis de *salmonella* ya que el departamento Veterinario de EMRAQ-EP ejerce acción profesional en el Matadero Metropolitano con exámenes Ante mortem y Post mortem verificando la salubridad de los animales y sus productos de acuerdo con leyes y reglamentos ecuatorianos vigentes.

TABLA 3.2: CARACTERIZACIÓN DEL LODO

PARÁMETRO	MÉTODO ANALITICO	UNIDAD	VALOR
Apariencia	Organoléptico	-	Pastosa
Color	Organoléptico	-	Marrón verdoso
Olor	Organoléptico	-	Desagradable
Densidad	Relación peso/volumen	g/ml	0.394
Conductividad	Conductivimétrico	uSm	0.4 (30:100)
Humedad	Gravimétrico	%	81.35
pH	Potenciométrico	-	6.32
Materia orgánica	Calcinación	%	74.54
SV/ST	Calcinación	-	98.54
C/N	División	-	52.73
Nitrógeno total	Kjeldahl	%	0.82
Fósforo	Foto colorimétrico	%	0.16
Potasio	Espectrofotometría óptica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES)	%	0.01
Calcio	ICP-OES	%	0.15
Magnesio	ICP-OES	%	0.01
Azufre	Turbidimétrico	%	0.15
Boro	ICP-OES	mg/Kg	0.025
Zinc	ICP-OES	mg/Kg	126.39
Cobre	ICP-OES	mg/Kg	24.87
Hierro	ICP-OES	mg/Kg	1463.7
Nitratos	Espectrofotométrico	mg/Kg	0.01
<i>Coliformes fecales</i>	NOM-004-SEMARNAT – 2002	NMP/g	1500000
Huevos de Helmintos	Sedimentación	Helmintos/g	8

La caracterización química no incluyó la determinación de metales pesados debido al origen de las aguas residuales, esto es del faenamiento de animales y no tiene contacto con fuentes de este tipo de compuestos.

La Tabla 3.3 muestra la comparación con los límites máximos permisibles de *coliformes fecales* y huevos de helminto establecidos en la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002

TABLA 3.3: COMPARACIÓN CON LOS LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA PATOGENOS Y PARASITOS EN LODOS Y BIOSOLIDOS

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	LIMITES NOM-004-SEMARNAT-2002	CLASE
<i>Coliformes fecales</i>	NMP/g	1'500.000	2'000.000	C
Huevos de Helmintos	Huevos/g	8	Menor a 1	B

Debido a los resultados de *coliformes fecales* el lodo puede ser clasificado en clase C y de acuerdo con los resultados de contenido de huevos de helminto el lodo puede clasificarse en clase B. Es decir, no se puede tener contacto directo con estos.

3.3 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS COMPLEMENTARIOS.

Con el fin de mejorar la composición del lodo a estabilizar mediante vermicompostaje al lodo crudo se le añadió sustratos en diferentes proporciones. El césped se recolectó del área próxima al sitio de experimentación; fue podado cuando tenía 15 días de brote; se colocó la muestra en una bolsa y se almacenó 2 días hasta transportarlo al INIAP para su caracterización química.

El aserrín se recolectó de la empresa MODUMADERA S.A. ubicada en el sector de Guajalo, de la ciudad Quito (Nicolás de Rocha S34-262 y Río Cade). Se colocó en una bolsa y se almacenó 2 días hasta transportarlo al INIAP para su caracterización química.

La hojarasca se recolectó del Parque Metropolitano Guangúiltagua, ubicado en el Norte de Quito, se colocó en una bolsa durante 2 días hasta ser transportada al INIAP para su caracterización química.

3.3.1 MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Las muestras de sustratos fueron caracterizadas en los laboratorios del INIAP. Los parámetros analizados fueron: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, a través de los métodos descritos en la TABLA 3.2. Adicionalmente se determinó la relación C/N de las muestras. La Tabla 3.4 muestra los valores reportados:

TABLA 3.4: CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE SUSTRATOS

PARÁMETRO	SUSTRATOS		
	CESPED (%)	ASERRÍN (%)	HOJARASCA (%)
Nitrógeno orgánico	7,13	6,36	1,59
Fosforo	0,57	0,02	0,03
Potasio	3,51	0,10	0,44
Calcio	0,60	0,20	1,54
Magnesio	0,31	0,04	0,17
Molibdeno	88,5	98,6	95,9
C/N	7,2	8,99	34,97

Se observa que el césped presenta altos contenidos de Nitrógeno (N), Fosforo (P) y Potasio (K) respecto al aserrín y hojarasca de eucalipto.

Por otro lado, el eucalipto fue excluido por la alelopatía negativa de esta especie sobre el crecimiento y germinación de otras especies (Ballester, A, 1982).

El césped y el aserrín fueron recolectados con las mismas características de la muestra recolectada para la caracterización química inicial.

3.4 AREA DE EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se desarrolló en una finca Ubicada en el cantón Rumiñahui, parroquia Fajardo, coordenadas: Longitud = -0.33824405, Latitud = -78.47242944.

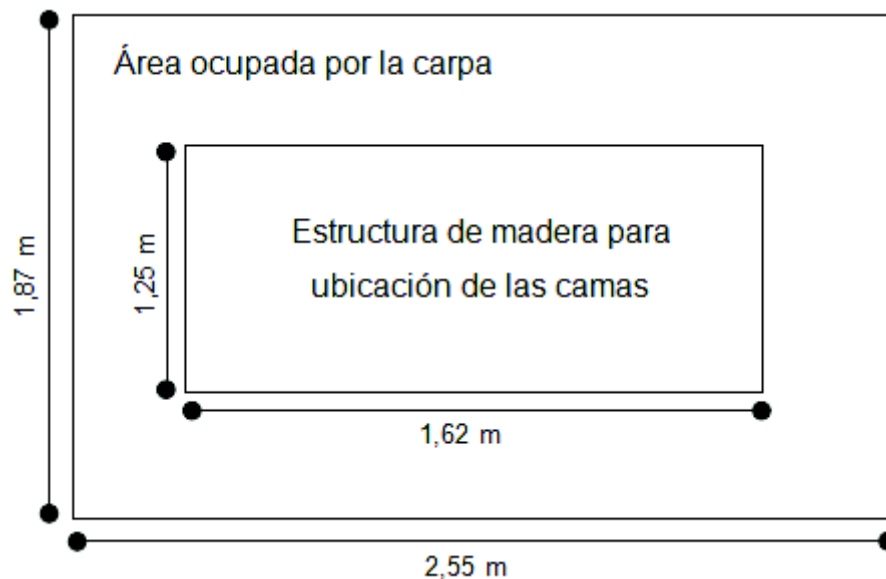
La temperatura ambiente promedio durante el periodo de experimentación fue de 20° C y precipitación de aproximadamente 60 mm/mes.

3.4.1 PREPARACIÓN PRELIMINAR DEL ÁREA

El espacio de experimentación cubrió un área abierta de 2,55 x 1,87 m² con techo plástico. Los bioensayos (camas de vermicompostaje) se ubicaron sobre una estructura de madera de 1,62 x 1,25 m², la cual evito el contacto con roedores y otras especies depredadoras que representan un peligro para las lombrices.

La FIGURA 3.2 muestra las áreas y su distribución.

FIGURA 3.2: MEDIDAS DEL ÁREA DE EXPERIMENTACIÓN



3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE VERMICOMPOSTAJE.

3.5.1 CONSTRUCCIÓN DE CAMAS

Las camas fueron construidas de madera triplex de 15 mm de espesor, con forma ligeramente rectangular de 30 x 20 x 40 cm³. Se perforaron pequeños orificios en

la base de las cajas para facilitar el drenaje y la aireación. La FIGURA 3.3 muestra el fondo de las cajas.

Se construyeron 13 cajas en total para los cuatro tratamientos con dos réplicas de cada uno y una caja para la muestra patrón.

FIGURA 3.3: CAJAS DE MADERA PERFORADAS PARA PREPARACION DE LAS CAMAS



3.5.2 OBTENCIÓN DE LOMBRICES

Las lombrices se extrajeron del suelo de la misma localidad donde se realizó la experimentación, en este lugar se ha dedicado durante un año y medio un espacio amplio para la realización de vermicompost con desechos domésticos, por lo que la población de la lombriz *Eisenia Foétida* (californiana) es numerosa y se logró cosechar 12 lb de lombrices incluido el peso del suelo que las contenía, esto para colocar 1 lb en cada caja, como se muestra en la FIGURA 3.4.

FIGURA 3.4: LOMBRICES RECOLECTADAS PARA REALIZAR COMPOSTAJE

3.5.3 PREPARACIÓN DE LAS CAMAS

Las camas de vermicompostaje fueron preparadas colocando en cada caja una capa de tierra propia del área. Posteriormente se agregó 1 libra de lombrices maduras recogidas en el área, finalmente se colocó la mezcla lodo-sustrato de acuerdo con las proporciones establecidas para cada tratamiento, las cuales se especifican en la Tabla 3.5.

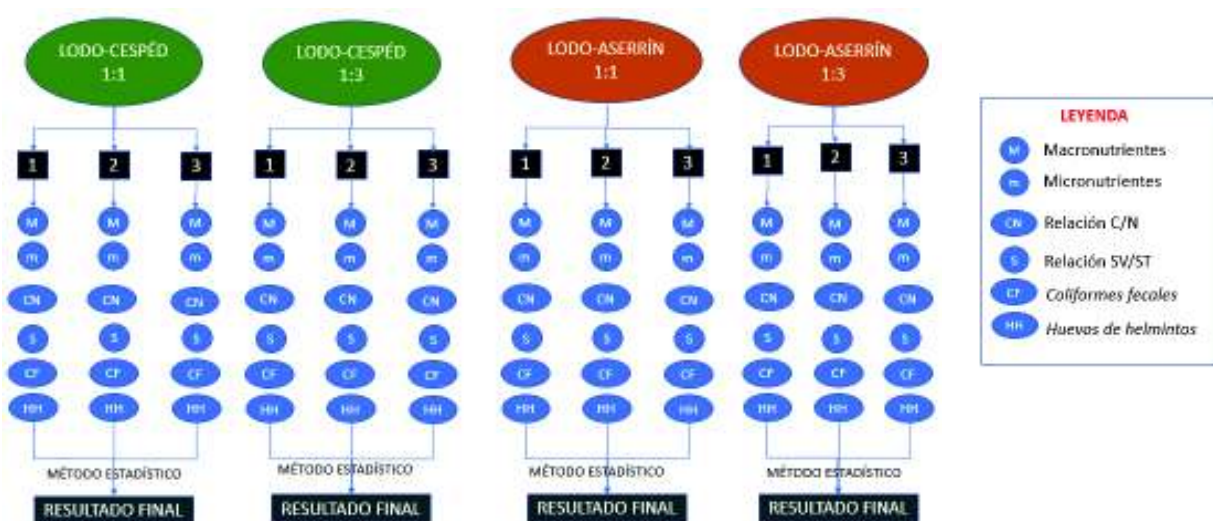
TABLA 3.5: PROPORCIÓN LODO-SUSTRATO EN CADA TRATAMIENTO

TRATAMIENTO	PROPORCIÓN LODO-SUSTRATO	LODO [Kg]	CÉSPED [Kg]	ASERRÍN [Kg]
1	1:1	1.5	1.5	-
2	3:1	2.25	0.75	-
3	1:1	1.5	-	1.5
4	3:1	2.25	-	0.75

Debido a que la humedad del lodo es aproximadamente del 81.35% no fue necesario añadir agua para mantener la humedad necesaria que faciliten los bioprocesos. Una vez listas las camas la superficie se cubrió con una malla oscura para evitar el paso de la luz y el ingreso de roedores y aves. A día cero del

bioproceso se registró la humedad, temperatura y pH inicial de las 13 camas, resultando en condiciones aptas para el desarrollo de las lombrices y el proceso de estabilización. La FIGURA 3.6 presenta una vista del sitio de experimentación.

FIGURA 3.5: DISEÑO EXPERIMENTAL DEL BIOPROCESO



La FIGURA 3.5 muestra el diseño experimental durante el bioproceso, en el que se desarrolló cuatro tipos de tratamiento como se indica en la Tabla 3.5, cada uno con 3 camas para obtener resultados más precisos de los diferentes parámetros. Además, se aplicó un método estadístico para resumir los resultados de cada tratamiento a un solo valor para poder ser comparados y así escoger la mejor alternativa.

FIGURA 3.6: UBICACIÓN DE LAS CAMAS EN EL ÁREA SELECCIONADA



La cama con la muestra patrón filtró por los orificios una parte del lodo. Adicionalmente debido a la radiación solar el lodo se deshidrato por completo a las pocas semanas. Por lo tanto, no existía suficiente cantidad de lodo para recolectar las muestras necesarias a lo largo de la experimentación. Esto causo que se tome la decisión de descartar el análisis de la muestra patrón durante el bioproceso.

3.6 MONITOREO DE LAS CAMAS

Durante las 15 semanas que tomo la experimentación, se monitorearon las camas una vez por semana, con el fin de mantener y verificar las condiciones óptimas para el desarrollo de la vermiestabilización; Se registraron valores de pH, temperatura y humedad.

El pH, se determinó en solución acuosa 1:5 mediante papel tornasol. La temperatura y humedad se registró en termo-higrómetro digital. La FIGURA 3.7 muestra los materiales utilizados para la medición de los para la medición de pH, humedad y temperatura.

Las camas fueron observadas diariamente para verificar el estado de salud de las lombrices, olor y presencia de vectores

FIGURA 3.7: TERMO-HIGRÓMETRO Y PAPEL DE pH



La FIGURA 3.8 muestra el formato de registro semanal del pH, temperatura y humedad, para cada uno de los tratamientos durante la fase experimental.

FIGURA 3.8: PLANTILLA DE CONTROL DEL BIOPROCESO *

PLANTILLA DE CONTROL DEL PROCESO																		
Parametr	Lechos	Dia	sem 1	sem 2	sem 3	sem 4	sem 5	sem 6	sem 7	sem 8	sem 9	sem 10	sem 11	sem 12	sem 13	sem 14	sem 15	OBSERV
Temperatura (°C)	T1																	
	R1 T1																	
	R2 T1																	
	T2																	
	R1 T2																	
	R2 T2																	
	T3																	
	R1 T3																	
	R2 T3																	
	T4																	
	R1 T4																	
	R2 T4																	
	PATRÓN																	
	ph	T1																
R1 T1																		
R2 T1																		
T2																		
R1 T2																		
R2 T2																		
T3																		
R1 T3																		
R2 T3																		
T4																		
R1 T4																		
R2 T4																		
PATRÓN																		
Humedad (%)		T1																
	R1 T1																	
	R2 T1																	
	T2																	
	R1 T2																	
	R2 T2																	
	T3																	
	R1 T3																	
	R2 T3																	
	T4																	
	R1 T4																	
	R2 T4																	
	PATRÓN																	

3.7 PARÁMETROS ANALIZADOS EN EL PROCESO DE VERMIESTABILIZACIÓN

3.7.1 PARAMETROS FÍSICOS

TABLA 3.6: PARÁMETROS FÍSICOS DEL BIOPROCESO

PARÁMETRO FÍSICO	MÉTODO DE ANÁLISIS
Color	Observación
Apariencia	Observación
Humedad	Higrómetro
Sólidos totales	Deshidratación
Sólidos volátiles	Calcinación
Materia orgánica	Calcinación
Temperatura	Termómetro

La TABLA 3.6 muestra los parámetros físicos que se controlaron en el bioproceso para mantener las condiciones del hábitat de las lombrices que facilitan la estabilización de los lodos.

La humedad fue controlada para mantenerla en aproximadamente 70 – 80%, mediante irrigación con agua, al igual que la temperatura se verificó que se encuentre entre 18 – 24 °C

La apariencia, color y olor son parámetros que se determinaron mediante observación para verificar que la mezcla lodo-sustrato este lo más suelta posible y pueda ser digerida por las lombrices, también para verificar la disminución del olor desagradable hasta llegar a ser similar al de la tierra húmeda. Adicionalmente, el cambio en el color de la mezcla permitió observar la transformación del lodo crudo en abono orgánico siendo este un color pardo negruzco (UNIVERSITARIA EDITORIAL, 2007).

Otros de los parámetros físicos más importantes es la relación del contenido de sólidos volátiles sobre sólidos totales. Esta relación junto con el análisis de *coliformes fecales*, controla la estabilización del lodo residual. La relación de sólidos fue obtenida a partir de los procesos de deshidratación y calcinación. Estos parámetros se midieron a partir de la tercera semana, una vez cada semana.

La materia orgánica es un parámetro primordial para el control de la estabilización del lodo. La obtención de este parámetro se realizó mediante calcinación, que destruye toda la materia orgánica en el suelo o sedimento.

3.7.2 PARÁMETROS QUÍMICOS

La TABLA 3.7 muestra los métodos y parámetros químicos analizados periódicamente, durante las 15 semanas del bioproceso, excepto la relación C/N que se determinó solo en la semana 15. Para comparar con los valores iniciales de C/N del lodo y sustratos iniciales.

TABLA 3.7: PARÁMETROS QUÍMICOS EN EL BIOPROCESO

PARÁMETRO QUÍMICO	MÉTODO DE ANÁLISIS
Nitritos	Espectrofotométrico – Hatch
Nitratos	Espectrofotométrico – Hatch
Nitrógeno total	Kjeldahl
Zinc	Espectrofotométrico – Hatch
Fosforo	Espectrofotométrico – Hatch
Potasio	Espectrofotométrico – Hatch
Hierro	Espectrofotométrico – Hatch
Cobre	Espectrofotométrico – Hatch
pH	Potenciómetro
C/N	Método de Jackson

La relación C/N se calculó en función del porcentaje de materia orgánica, la constante de Jackson y el porcentaje de nitrógeno total.

El análisis de parámetros como (Zn, N, P, K, Fe, Cu), permitirá determinar la composición química del compost producido por las lombrices al digerir la mezcla lodo-sustrato, dando lugar a comparaciones con la composición química de otras materias orgánicas empleadas como abono para fertilizar.

También, se busca obtener información para verificar, la cantidad de macronutrientes primarios (N, P, K) y micronutrientes secundarios imprescindibles para las plantas y animales en bajas concentraciones que de alcanzar ciertos niveles llegaría a ser tóxicos (Cu, Zn). Por último, la cantidad de nitritos y nitratos se determinarán para comparación con estándares establecidos bajo normativa.

Para la obtención de la cantidad de fosforo presente en cada muestra del producto final se utilizó un factor de conversión de 0.4364 según la (FAO & Asociación Internacional de Fertilizantes, 2002).

3.7.3 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

Las *coliformes fecales* y huevos de helminto son parámetros que se identificaron en la caracterización del lodo, permitiendo establecer el estado inicial del este, siguiendo los términos que se indica en la TABLA 3.8.

Por lo que al finalizar la vermiestabilización se realizaron nuevamente los ensayos de laboratorio para analizar las variaciones en estos parámetros.

TABLA 3.8: PARÁMETROS BIOLÓGICOS EN EL BIOPROCESO

PARÁMETRO BIOLÓGICO	MÉTODO DE ANÁLISIS
<i>Coliformes fecales</i>	NOM-004-SEMANAT-2002
Huevos de helmintos	Recuento NOM-004-SEMANAT-2002

3.8 OBTENCION DE MUESTRAS

Como antecedente para tomar las muestras se tiene la exclusión del muestreo de la cama patrón debido al estado completamente seco del lodo y la poca cantidad de este.

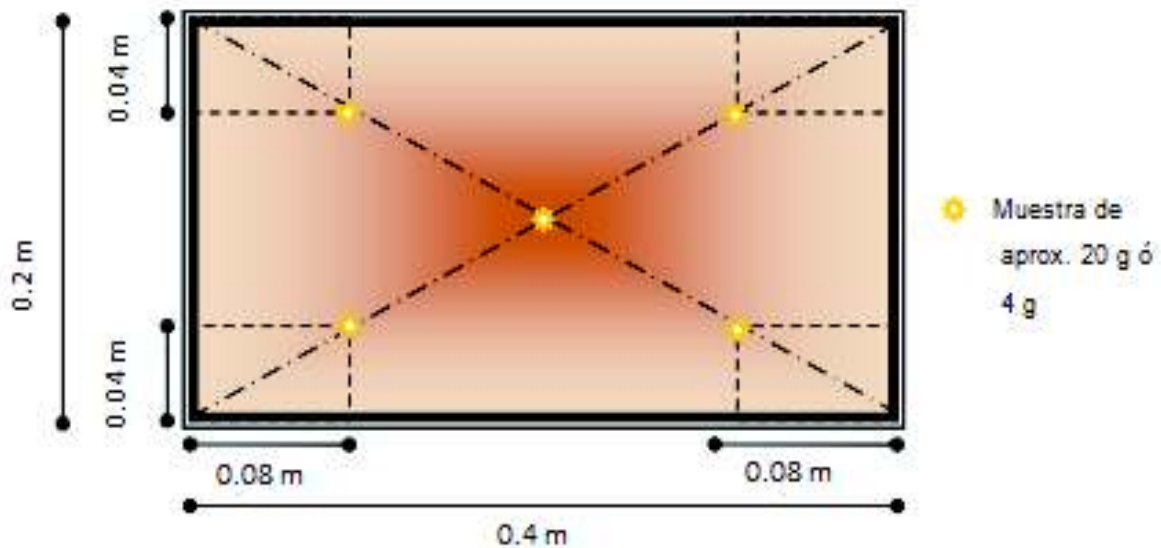
Para obtener los resultados del procedimiento se realizaron análisis de sólidos a partir de la tercera semana del proceso de vermiestabilización. Los análisis de macronutrientes y micronutrientes se realizaron en la semana 6 y 15.

3.9 MUESTREO DE CAMAS

De cada cama se tomaron 5 submuestras para obtener una muestra compuesta por cada cama. Las muestras se tomaron de la siguiente forma; 4 de ellas a 8 cm y 4 cm de cada vértice de la caja en sentido longitudinal y una muestra más del centro de la caja (Valencia, 2008). Las muestras se recogieron a una profundidad aproximada de 12 cm.

La FIGURA 3.9 muestra los puntos de la cama donde se recolectaron las submuestras.

FIGURA 3.9: PUNTOS DE MUESTREO DE CAMAS



El muestreo de las camas se realizó una vez por semana a partir de la tercera semana.

Semanalmente se recolectaron de cada cama 20 gramos a partir de 5 submuestras de 4 gramos ubicadas sistemáticamente. A excepción de la sexta y quinceava semana donde las muestras compuestas fueron de 100 gramos a partir de submuestras de 20 gramos.

Las muestras de 20 gramos se destinaron para determinación de sólidos y las muestras de 100g para determinación de macro y micro nutrientes además de sólidos.

Las muestras de la última campaña de muestreo se usaron de la siguiente forma: 12 fueron transportadas al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la EPN para realizar análisis de *coliformes fecales*, nitritos, nitratos, Zn, P, K, Fe, Cu, pH, cantidad de materia orgánica, conductividad, solidos totales y solidos volátiles.

Las 24 muestras restantes se transportaron hacia el laboratorio ALS Corplab para determinación de huevos de helminto y nitrógeno total.

3.10 ANÁLISIS

3.11 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

Debido a las repeticiones realizadas de cada tratamiento se recolectaron datos de cada parámetro analizado por cada cama de vermiestabilización, es decir se recolectaron 3 datos de cada parámetro para cada tratamiento. Se realizó el cálculo del promedio de los tres datos obtenidos para cada parámetro con el fin de obtener un solo dato para su análisis. El criterio que se tomó en cuenta para validar la utilización del promedio fue el coeficiente de variación.

3.11.1 COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Es una medida de dispersión resultado del cociente entre la desviación estándar y el promedio. Este indicador permitirá calificar la confiabilidad de las estimaciones de las variables que serán analizadas en la experimentación (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2008). La Tabla 3.9 muestra el nivel de confiabilidad de los datos recolectados de acuerdo con el porcentaje del coeficiente de variación.

TABLA 3.9: INTERVALOS DE CONFIANZA DE ACUERDO CON EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN.

COEFICIENTE DE VARIACIÓN	PRECISIÓN
Hasta el 7%	Precisa
Entre 8% y el 14%	Precisión aceptable
Entre el 15% y el 20%	Precisión regular.
Mayor del 20%	Poco precisa, utilizarla solo con fines descriptivos.

Fuente: (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2008)

3.11.2 MATRIZ DE DECISIONES

La selección de la mejor alternativa de tratamiento se realizó mediante una matriz de decisiones que tomó en cuenta seis parámetros para valorar; estos son: macronutrientes, micronutrientes, relación C/N, remoción en la digestión, remoción de huevos de helminto y disminución de *coliformes fecales*.

En el caso de micronutrientes se designaron valores del 1 al 4, siendo el 4 el de mejor calidad y 1 el de baja calidad, de acuerdo con los valores óptimos de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Se realizó la ponderación de los datos de cada parámetro para otorgar un valor de 1 al resultado que más se acerque al óptimo de acuerdo a la normativa.

La alternativa con el promedio más cercano a 1 se seleccionó como la mejor.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PARÁMETROS DE CONTROL Y MONITOREO

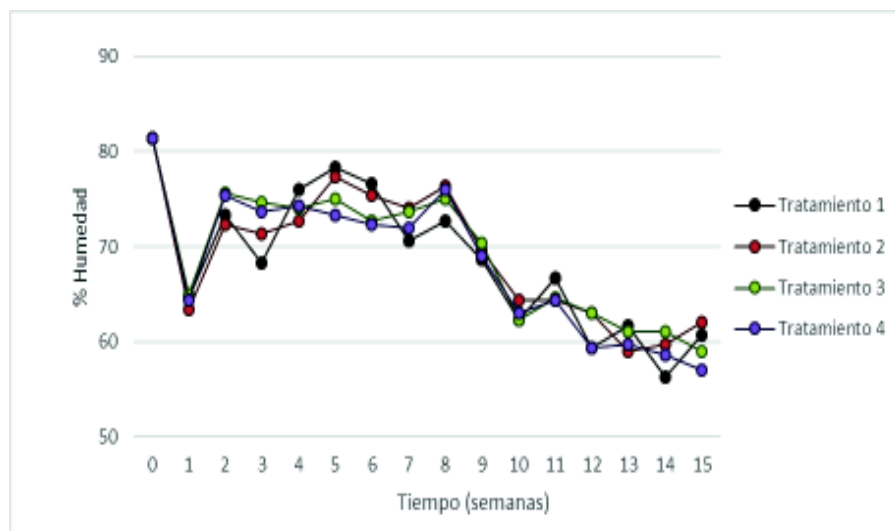
4.1.1 HUMEDAD

La FIGURA 4.1, muestra los valores de humedad registrados en las camas durante las 15 semanas del bioproceso. En la semana uno la humedad baja más del 10%, por lo que se procedió a colocar agua en todas las camas para alcanzar valores de humedad entre 70 y 90%.

A partir de la semana once se añadió una menor cantidad de agua en las camas para mantenerla sobre el mínimo valor aceptable entre 50 y 70%.

El objetivo fue disminuir paulatinamente la humedad hasta llegar al porcentaje en el cual las lombrices comienzan a movilizarse a lugares más húmedos dejando solo el humus que produjeron.

FIGURA 4.1: VALORES DE HUMEDAD DURANTE EL BIOPROCESO



El promedio de la cantidad de humedad en todos los tratamientos se encuentra dentro de los rangos establecidos para el desarrollo de las lombrices y la producción de vermicomposto, 50 - 90% de humedad (Martínez, 2007).

Durante el tiempo de experimentación debido a las características físicas del aserrín a las camas con los tratamientos 3 y 4 se les añadía una mayor cantidad de agua para obtener humedades similares a las que tenían las camas para los tratamientos 1 y 2. De esta forma de acuerdo con la FIGURA 4.1 también se pudo verificar que el aserrín tiene mayor capacidad para retener humedad.

4.1.2 TEMPERATURA

La temperatura dentro del proceso de vermicompostaje se mantuvo dentro del rango de 13 - 22 °C como se observa en la FIGURA 4.2. Según (Pineda, 2009), la lombriz de tierra (*Eisenia Foétida*) tolera temperaturas entre 10 – 35 °C, siendo el óptimo de 25°C

FIGURA 4.2: VALORES DE TEMPERATURA DURANTE EL BIOPROCESO



Las temperaturas en los tratamientos variaron en función de la temperatura ambiental en el sitio, pero los valores más bajos se registraron en la 3^{era} y 8^{va} semana con la misma tendencia en todos los tratamientos.

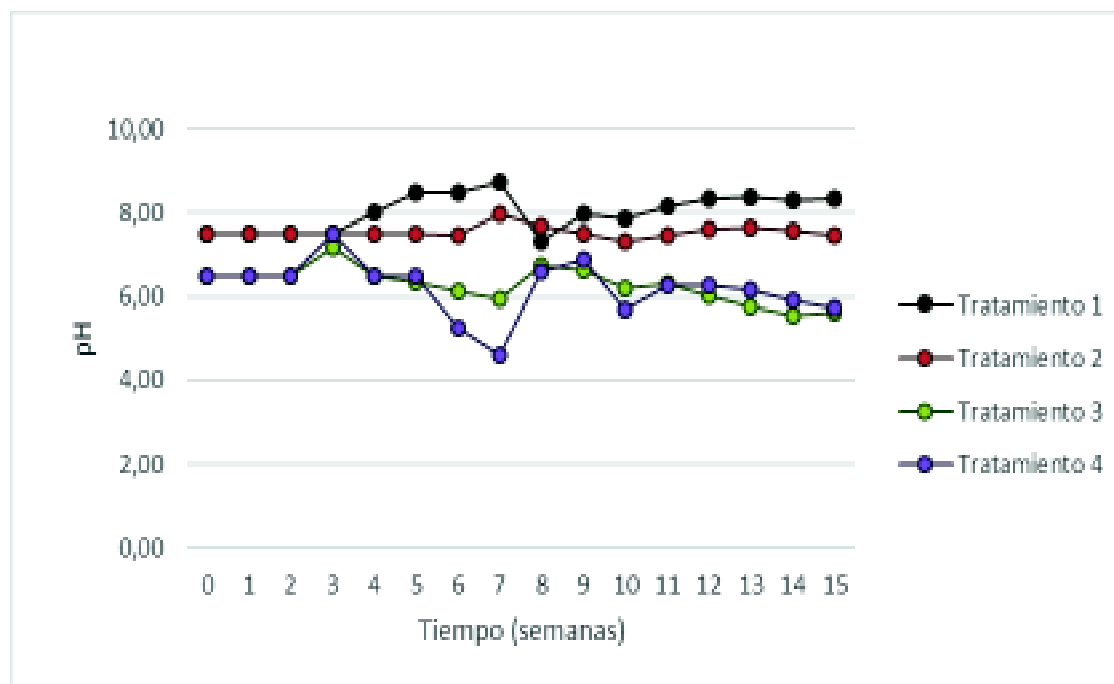
4.1.3 POTENCIAL DE HIDRÓGENO

En las tres primeras semanas del bioproceso el pH se mantuvo en el rango de 6 – 7, variando notablemente a partir de la 4^{ta} semana en donde se presentó mayor alcalinidad en los tratamientos 1 y 2. Contrario a los tratamientos 3 y 4 los cuales comenzaron a adquirir pH ácido.

A la semana 7 los tratamientos 3 y 4 alcanzaron valores de pH entre 4 – 6; para evitar el daño a las lombrices se procedió a colocar cal, para que el pH sea neutro en el sustrato. Durante el control de pH en la semana 8 se verificó que los valores tenían rangos tolerables para el desarrollo de las lombrices (Martínez, 2007). A partir de la semana 11 los tratamientos 1 y 2 el pH, se estabiliza en valores de 8,3 y 7,6, respectivamente.

Por lo contrario, en los tratamientos 3 y 4 el pH se comienza a estabilizar en la semana 13 alcanzando valores alrededor de 5,5 y 5,8 respectivamente. La FIGURA 4.3, indica las tendencias del pH durante el bioproceso para los diferentes tratamientos del bioproceso.

FIGURA 4.3: VALORES DE pH EN EL BIOPROCESO



4.1.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La calidad del producto de las lombrices se verificó el color y textura en cada cama semanalmente mediante observación, además de la percepción del olor.

La TABLA 4.1, presenta un resumen de las observaciones a lo largo de las quince semanas de experimentación. Los ANEXO 16, ANEXO 17, ANEXO 18 y ANEXO 19, muestran un seguimiento fotográfico de tales observaciones.

TABLA 4.1: OBSERVACIONES DE LAS CARACTERISTICAS FÍSICAS DURANTE EL BIOPROCESO

TRATAMIENTO	SEMANA 0-5	SEMANA 6-10	SEMANA 11-15
1	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón verdoso. • Consistencia pastosa. • Disminución de mal olor • Lombrices en estado larvario 	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón verdoso • Consistencia sólida. • No se percibe mal olor. • estado bueno de lombrices ocultas en las partes más profundas. • El césped añadido se ha consumido en su mayoría. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución en la humedad. • Color negro cuando está húmedo. • Granulometría suelta. • Se observa la disminución de lombrices.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón verdoso. • Consistencia pastosa. • Disminución de mal olor. • Lombrices en estado larvario. 	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón oscuro verdoso. • Consistencia sólida. • Disminución de mal olor. • Buen estado de lombrices adultas y larvas • El césped se ha consumido en su mayoría. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución en la humedad. • Color negro cuando en humedad. • Granulometría suelta. • Disminución de cantidad de lombrices
3	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón claro • Se forman pequeños agregados de color marrón oscuro • mal olor es bajo. • Lombrices adultas, se visualizan pocas larvas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón claro • Mayor cantidad de agregados marrón oscuro. • No se percibe mal olor. • Disminución de cantidad de lombrices 	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón • Granulometría fina. • No se percibe mal olor. • Disminución de cantidad de lombrices.

TRATAMIENTO	SEMANA 0-5	SEMANA 6-10	SEMANA 11-15
4	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón oscuro con pequeños agregados más oscuro. • Mal olor leve. • Lombrices pequeñas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón oscuro en su mayoría. • No se percibe mal olor. • Sustrato suelto. • Disminución de cantidad de lombrices 	<ul style="list-style-type: none"> • Color marrón oscuro. • Granulometría fina. • No se percibe mal olor. • Disminución de cantidad de lombrices.

4.2 PARÁMETROS DE ESTABILIZACIÓN

4.2.1 CURVA DE ESTABILIZACIÓN

La curva de estabilización es basada en la relación de sólidos volátiles y sólidos totales a través del tiempo durante quince semanas. En la FIGURA 4.4, se indica los cuatro tipos de tratamiento anteriormente mencionados en la Tabla 3.5 y su progreso de estabilización de la materia orgánica mediante el bioproceso enzimático de las lombrices.

FIGURA 4.4: CURVA DE DIGESTIÓN DE VERMICOMPOSTAJE



Se considera que la materia orgánica alcanza el estado de digestión cuando la relación SV/ST es menor al 30%, por esta razón el tratamiento 1 y tratamiento 2, a los cuales se les adiciono el sustrato césped se digesto a la semana 8. Las lombrices de tierra mostraron una mejor adaptación al medio césped-lodo porque las características de este sustrato se acercan más a los niveles óptimos para el desarrollo del bioproceso.

Adicionalmente, se interpreto que los tratamientos que se encontraban con pH neutro entre 7.3 – 8.5 contenían mayor cantidad de macronutrientes iniciales. Los tratamientos realizados de vermicompost con césped obtuvieron valores de estabilización final de 7.5% y 9.8% como se indica en el ANEXO 4.

Para las alternativas lodo-aserrín se pudo observar que tardan más en alcanzar el estado de digestión debido a que el aserrín es proveniente del pino el cual contiene ligninas de pino que son de mayor dificultad para la asimilación digestiva por parte de las lombrices de tierra; el tratamiento 3 se mineraliza en la semana 12, mientras que el tratamiento 4 en la semana 14. Los resultados concuerdan con los valores de pH acidos entre 4.5 - 6.5, que resultan en reducción de la actividad biológica de los anélidos, descrita en la TABLA 4.1. Los valores de estabilización final de 12% para el tratamiento 3 y 23% para el tratamiento 4.

Debido a que cada tratamiento obtuvo resultados diferentes en la Tabla 4.2, se describe el porcentaje de eficiencia que alcanzo cada alternativa comparando los valores de la relación SV/ST calculados entre la semana 0 y la semana 15.

TABLA 4.2: EFICIENCIA DE LA ESTABILIZACIÓN

SUSTRATO	TRATAMIENTO	PORCENTAJE DE DIGESTIÓN
Césped	1-(1:1)	86,04
	2-(1:3)	85,41
Aserrín	3-(1:1)	82,10
	4-(1:3)	79,38

4.2.2 COLIFORMES FECALES

Los *coliformes fecales* son considerados un parámetro de seguridad biológica que de acuerdo la NOM-004-SEMARNAT-2002, es un bioindicador de materia orgánica fecal que contiene patógenos. Este parámetro es de importancia porque limita el contacto directo de las personas con el bioabono y los patógenos que se acumulan en las plantas y frutos. La Tabla 4.3 muestra la categoría en la que se encuentran los diferentes tratamientos según la normativa utilizada.

TABLA 4.3: ANÁLISIS DE COLIFORMES FECALES DURANTE EL BIOPROCESO

SUSTRATO	TRATAMIENTO	VALOR INICIAL [NMP]	VALOR FINAL [NMP]	CLASE DE BIOSÓLIDO	PORCENTAJE DE EFICIENCIA
Césped	1-(1:1)	1'500.000	13.666,67	C	99,09 %
	2-(1:3)	1'500.000	12.333,33	C	99,18 %
Aserrín	3-(1:1)	1'500.000	12.333,33	C	99,18 %
	4-(1:3)	1'500.000	13.666,67	C	99,09 %

La presencia reducida de *Coliformes Fecales* en el bioabono ofrece un grado alto de bioseguridad en el producto. Según la NOM-004-SEMARNAT-2002, LA CALIDAD DE biosólidos resultantes de los tratamientos 1, 2,3 y 4, estudiados es de tipo C, aunque los valores no hayan alcanzado al tipo A o B, se considera que en la técnica de vermicompostaje remueve los *Coliformes Fecales* en el orden del 99%.

4.2.3 HUEVOS DE HELMINTOS

El análisis de huevos de helmintos que fue realizado para la caracterización inicial en el laboratorio CESAQ – PUCE y los análisis finales al cabo de 15 semanas en el laboratorio ALS Corplab, según la NOM-004-SEMARNAT-2002, cumple con los valores para considerar a todos los tratamientos en la clase A. Por lo tanto, el

producto de los cuatro tratamientos puede ser manipulado por las personas. A continuación, se indica en la Tabla 4.4 los valores obtenidos para este análisis.

Los huevos de helmintos inicialmente para todos los tratamientos fueron de 8 [Huevos/g] y al finalizar el bioproceso para todos los tratamientos se obtuvo valores inferiores a 1 [Huevos/g], logrando un alto porcentaje de remoción para este parámetro biológico.

TABLA 4.4: ANÁLISIS DE HUEVOS DE HELMINTOS DURANTE EL BIOPROCESO

SUSTRATO	TRATAMIENTO	VALOR INICIAL [Helmintos/g]	VALOR FINAL Helmintos/g]	CLASE DE BIOSÓLIDO
Césped	1-(1:1)	8	Menor a 1	A
	2-(1:3)	8	Menor a 1	A
Aserrín	3-(1:1)	8	Menor a 1	A
	4-(1:3)	8	Menor a 1	A

4.3 ELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO

4.3.1 MACRONUTRIENTES EN EL BIOPROCESO

En el presente estudio se analizó los macronutrientes a las tres semanas de experimentación para el control y monitoreo del vermicompost, también se realizó un análisis final a la semana quince para determinar las características del bioabono generado, en el que se midió las cantidades de nitrógeno, potasio y fósforo, de los diferentes tratamientos.

En la Tabla 4.5, se presenta un resumen de los datos analizados presentes en el ANEXO 5, ANEXO 6 y ANEXO 7, además se muestra los porcentajes de macronutrientes durante el bioproceso.

TABLA 4.5: MACRONUTRIENTES DURANTE EL BIOPROCESO

FASES		CONTROL Y MONITOREO			ANÁLISIS FINAL		
SUSTRATO	TRATAMIENTO	N [%]	P [%]	K [%]	N [%]	P [%]	K [%]
CÉSPED	1-(1:1)	0,29	0,47	1,20	0,89	1,51	3,06
	2-(1:3)	0,76	0,42	1,56	1,27	1,96	2,73
ASERRÍN	3-(1:1)	0,20	0,21	0,96	0,62	1,08	1,85
	4-(1:3)	0,28	0,27	0,87	0,74	0,89	2,20

Según el Real decreto 506/2013 para que un bioabono sea considerado de buena calidad los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio deben tener como mínimo 1%.

En niveles de nitrógeno el tratamiento 2 es el único que logro cumplir con la normativa teniendo un valor de 1,27 [%], además el valor de fósforo obtenido es: tratamiento 1: 1,51 [%]; tratamiento 2: 1,96 [%] y tratamiento 3: 1,08 [%] cumpliendo con la normativa. Por último, los valores de potasio en todos los tratamientos cumplen con la normativa teniendo: tratamiento 1: 3,06 [%], tratamiento 2: 2,73 [%], tratamiento 3: 1,85 [%] y tratamiento 4: 2,20 [%].

Mediante los resultados obtenidos se escoge al tratamiento 2 como la alternativa que tiene las mejores características a nivel de macronutrientes, se puede observar que en el tratamiento 3 existe un mayor porcentaje de potasio, que también es alto en el tratamiento 2. Los porcentajes de nitrógeno y fósforo son los más altos en el tratamiento 2.

Además, se calculó el incremento de macronutrientes desde la semana tres hasta la décimo quinta donde terminó el bioproceso, como se presenta en la Tabla 4.6.

TABLA 4.6: INCREMENTO DE MACRONUTRIENTES EN EL BIOPROCESO

FASES		DESARROLLO		
SUSTRATO	TRATAMIENTO	NITROGENO	FÓSFORO	POTASIO
CÉSPED	1-(1:1)	3	3	3
	2-(1:3)	2	5	2
ASERRÍN	3-(1:1)	3	5	2
	4-(1:3)	3	3	3

Mediante el bioproceso de vermicompostaje se obtuvo que los valores de nitrógeno se triplicaron comparando con los análisis iniciales, además las cantidades de fósforo se quintuplicaron y en otros casos se triplicaron. Por último, los valores de potasio se duplicaron y triplicaron en los diferentes tratamientos.

Los resultados se deben al proceso enzimático de las lombrices y la manera en la que se adaptaron a su hábitat. En la FIGURA 2.4, se observa que el tratamiento 2 y tratamiento 3 mantienen un pH entre 6,5 – 7.5 durante el bioproceso, por esta razón el bioproceso es favorable en condiciones básicas.

4.3.1 MICRONUTRIENTES EN EL BIOPROCESO

Durante el vermicompostaje para el control y monitoreo en los cuatro tratamientos se analizaron los micronutrientes a la tercera semana, determinado las concentraciones de nitritos, nitratos, fosfatos, cobre, hierro y zinc. En la Tabla 4.7, se observa un resumen de los datos obtenidos y descritos en el ANEXO 8, ANEXO 9, ANEXO 10, ANEXO 11, ANEXO 12 y ANEXO 13.

TABLA 4.7: CONTROL Y MONITOREO DE MICRONUTRIENTES

FASES		CONTROL Y MONITOREO					
SUSTRATO	TRATAMIENTO	(NO ₃) ⁻¹ [mg/Kg]	(NO ₂) ⁻¹ [mg/Kg]	(PO ₄) ⁻³ [mg/Kg]	Cu [mg/Kg]	Fe [mg/Kg]	Zn [mg/Kg]
CÉSPED	1-(1:1)	1850	32	10840	765	785	12765
	2-(1:3)	1600	25	9510	343	555	12415
ASERRÍN	3-(1:1)	967	10	4900	120	133	11387
	4-(1:3)	1067	18	6143	297	223	14020

En el análisis del control y monitoreo se observa que la cantidad de nitratos, fosfatos, cobre, hierro y zinc es baja para ser considerado como un bioabono según la NOM-004-SEMARNAT-2002. Sin embargo, al finalizar el proceso de vermicompostaje las concentraciones de nutrientes se incrementaron como se indican en la Tabla 4.8.

Según el Real decreto 506/2013 TABLA 2.13, los niveles de nitratos, nitritos y fosfatos son los adecuados para brindar nutrientes a las plantas. Además, las cantidades de cobre para que se considere un abono de excelencia es de 1500 mg/Kg según la normativa aplicada. Siendo las concentraciones de cobre en el tratamiento 1: 1325 [mg/Kg] y el tratamiento 2: 1095 [mg/Kg], se considera que el sustrato compuesto por césped tiene las cantidades de cobre que más se acercan a lo establecido. Además, se debe tener en cuenta que de acuerdo con la FIGURA 2.4, la asimilación máxima de cobre por parte de las plantas está entre pH de 5,5 - 6,5. Este rango es el que mantiene el tratamiento 1, por lo cual llega a tener el valor más alto de cobre.

TABLA 4.8: ANÁLISIS FINAL DE MICRONUTRIENTES

FASES		ANÁLISIS FINAL					
SUSTRATO	TRATAMIENTO	(NO ₃) ⁻¹ [mg/Kg]	(NO ₂) ⁻¹ [mg/Kg]	(PO ₄) ⁻³ [mg/Kg]	Cu [mg/Kg]	Fe [mg/Kg]	Zn [mg/Kg]
CÉSPED	1-(1:1)	3600	22	34650	1325	2245	2300
	2-(1:3)	3250	28	44800	1095	3650	2890
ASERRÍN	3-(1:1)	1750	4	24700	855	1410	4745
	4-(1:3)	2300	3	20350	980	1645	5220

Según la normativa ocupada el valor óptimo de la concentración de Zinc es 2800 [mg/Kg]. El tratamiento 1: 2300 [mg/Kg], se considera el mejor resultado debido a que se prefieren valores menores al óptimo que mayores a esté, como es el caso del tratamiento 2: 2890 [mg/Kg], que también tiene un valor aceptable considerado como excelente para dotar de zinc a las plantas. Además, el tratamiento 3 y tratamiento 4, son considerados como buenos ya que tienen valores inferiores a 7500 [mg/Kg] como indica la normativa ocupada.

4.3.2 RELACIÓN DE CARBONO Y NITROGENO EN EL BIOPROCESO

La relación de C/N es gran importancia para determinar la calidad del bioabono generado, ya que interpreta la velocidad de descomposición de la materia orgánica lo que se traduce en la existencia de una alta carga microbiana en el

suelo. Lo cual ayuda a la mineralización de la materia orgánica inestable y a la obtención de los valores de nitrógeno óptimos para el desarrollo de las plantas.

A continuación, en la TABLA 4.9, se muestran el análisis final con los valores promedios del ANEXO 14, obtenidos en la décimo quinta semana del bioproceso.

TABLA 4.9: RELACIÓN C/N DURANTE EL BIOPROCESO

FASES		ANÁLISIS CONTROL Y MONITOREO	ANÁLISIS FINAL	CALIDAD
SUSTRATO	TRATAMIENTO	C/N	C/N	C/N
CÉSPED	1-(1:1)	33,42	10,44	Buena
	2-(1:3)	39,29	7,86	Muy Buena
ASERRÍN	3-(1:1)	92,98	20,00	Deficiente
	4-(1:3)	63,81	20,24	Deficiente

El tratamiento 2 es el que tiene mejor relación C/N, ya que tiene valores inferiores a 10, lo que se considera de muy buena calidad según la TABLA 2.14. Por lo tanto, se considera a este tratamiento como la mejor alternativa.

El producto del tratamiento 2 se considera también un bioabono de buena calidad para las plantas. Por último, el tratamiento 3 y 4 tienen valores cercanos a 20, considerándolos de mala calidad y siendo contraproducente para el desarrollo de las plantas.

4.3.3 MATRIZ DE DECISIÓN

Para seleccionar el tratamiento que generó mejores resultados se aplicó una matriz de decisión como se explica en la metodología. Para la toma de decisiones se interpretan los parámetros importantes para la producción de un bioabono de alta calidad, sugiriendo un promedio de los valores de dichos parámetros. En la TABLA 4.10, se muestra los valores que se obtuvo en los diferentes tratamientos.

TABLA 4.10: DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

FASES		PARÁMETROS							
SUSTRATO	TRATAMIENTO	Macronutrientes [%]			Micronutrientes [mg/Kg]	C/N	Eficiencia [%]		
		N	P	K			Estabilización	HH	CF
CÉSPED	1-(1:1)	0,89	1,51	3,06	3	10,44	89,66	100	99,09
	2-(1:3)	1,27	1,96	2,73	4	7,86	89,19	100	99,18
ASERRÍN	3-(1:1)	0,62	1,08	1,85	2	20,00	86,73	100	99,18
	4-(1:3)	0,74	0,89	2,20	1	20,24	84,72	100	99,09

Para la toma de la mejor decisión se ponderan los resultados de los diferentes parámetros teniendo en consideración los valores óptimos en cada resultado. Posteriormente se calculó el promedio de todos los parámetros en los diferentes tratamientos como se indica en la TABLA 4.11.

TABLA 4.11: DECISIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO DEL BIOPROCESO

FASES		PARÁMETROS								
SUSTRATO	TRATAMIENTO	Macronutrientes [%]			Micronutrientes [mg/Kg]	C/N	Eficiencia [%]			PROMEDIO
		N	P	K			Estabilización	HH	CF	
CÉSPED	1-(1:1)	0,70	0,77	1,00	0,75	0,75	1,00	1	1,00	0,92
	2-(1:3)	1,00	1,00	0,89	1,00	1,00	0,99	1	1,00	0,98
ASERRÍN	3-(1:1)	0,49	0,55	0,60	0,50	0,39	0,97	1	1,00	0,74
	4-(1:3)	0,58	0,45	0,72	0,25	0,39	0,94	1	1,00	0,72

Para la selección de la alternativa más eficiente se consideran los valores cercanos a 1, es decir la alternativa del sustrato césped ya que en ambos tratamientos se generaron los mejores resultados. El tratamiento 2 resultó ser la mejor alternativa de vermicompostaje, obteniendo los valores óptimos para producir el bioabono de mejor calidad.

4.4 COMPARACIÓN CON COMPOST COMERCIAL

La comparación se realizó entre un bioabono desarrollado a base de materia orgánica que se encuentra actualmente en el mercado de Ecuador y el mejor tratamiento de la presente investigación, escogido mediante la matriz de

decisiones. El bioabono con el que se realizó la comparación es producido a base de estiércol de ganado vacuno llamado Avisana.

El bioabono Avisana es de origen animal y un fertilizante mineral sólido, basado en la técnica de compost tradicional con la utilización de microorganismos liofilizados y nitrificantes. Este bioabono es netamente natural sin agregados humificantes para el aumento de nutrientes.

A continuación, se presenta en la TABLA 4.12, la caracterización del abono Avisana y Vermicompost producido en el tratamiento 2.

TABLA 4.12: COMPARACIÓN DE BIOABONO COMERCIAL VS VERMICOMPOST DEL TRATAMIENTO 2

PARÁMETRO	VALORES		COMPARACIÓN
	Avisana	Vermicompost	Vermicompost/Avisana
C [%]	18,57	9,74	0,52
N-total [%]	2,24	1,27	0,57
C/N	8,13	7,86	-
Nitratos [mg/kg]	5320	3250	0,61
P [%]	0,12	1,96	16,29
K [%]	0,79	2,73	3,46
Fe [mg/kg]	3571	3650	1,02
Zn [mg/kg]	919	2890	3,14
Cu [mg/kg]	387	1095	2,83
pH	6	7,55	-

En la comparación entre el bioabono Avisana y el Vermicompost del tratamiento 2 se puede observar la variabilidad de los diferentes parámetros importantes en un abono orgánico en la TABLA 4.12. El análisis de la comparación se describe a continuación:

- El porcentaje de carbono relacionado con la materia orgánica, mediante la técnica de vermicompost alcanza solo hasta la mitad de C [%] del bioabono comercial.
- En el porcentaje de Nitrógeno se alcanza la mitad del valor del vermicompost del tratamiento 2 comparado con el abono de Avisana.

- Teniendo en cuenta la relación C/N, se tiene que el vermicompost del tratamiento 2 tiene un valor inferior al del abono comercial, esto es favorable ya que tiene un valor inferior a 8.
 - A nivel de nitratos el vermicompost del tratamiento 2 tiene la mitad comparado con el abono Avisana. Esto se debe que en la producción del abono comercial se agregan microorganismos que favorecen al proceso de nitrificación del suelo.
 - En el vermicompost de tratamiento 2 el porcentaje de fósforo tiene 16 veces más que el abono orgánico comercial.
 - A nivel de potasio se tiene 3,5 veces más en el vermicompost del tratamiento 2 siendo comparado con el abono Avisana.
 - A nivel de micronutrientes (Fe, Cu, Zn), se tiene una mayor concentración en el tratamiento 2 que en el bioabono Avisana.
 - Los valores de micronutrientes en el vermicompost del tratamiento 2 se acercan más a los valores óptimos, contrario al abono comercial Avisana, según la NOM-004-SEMARNAT-2002.
 - El pH en el tratamiento 2 alcanza mayor neutralidad que el pH del abono orgánico Avisana.
-

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los lodos residuales producidos en el tratamiento biológico en la PTAR de la EPMRQ, fueron tratados mediante la técnica de vermicompostaje para estabilizarlos. Por medio de esta técnica los cuatro tratamientos planteados se digestaron en distintos tiempos y al finalizar el bioproceso los tratamientos se vermiestabilizaron a nivel microbiológico llegando a transformarse en un biosólido de clase C, según la NOM-004-SEMARNAT-2002.
 - La caracterización inicial del lodo residual se tiene que los valores de macronutrientes y micronutrientes son bajos para considerarlos como un bioabono según el Real Decreto 506/2013 y NOM-004-SEMARNAT-2002, respectivamente. Los *coliformes fecales* y huevos de helmintos tienen valores que sobrepasan los límites permisibles, por lo tanto, requiere un tratamiento previo a su disposición. La caracterización permitió determinar el porcentaje de la relación SV/ST: 98,54, el cual supera el valor de 30, porcentaje que indica que los lodos residuales no se encuentran digestados.
 - Los sustratos agregados al lodo en la vermiestabilización mostraron mayor contenido de macronutrientes en el césped (NPK: 7.13-0.57-3.51), comparado al aserrín (NPK: 6.36-0.02-0.10), enriqueciendo la mezcla lodo-sustrato. Adicionalmente, la relación C/N en el césped fue 17.2 considerando un mejor valor para el bioproceso comparado con el de aserrín 143.29.
 - Las características químicas de la mezcla lodo-césped permitieron digerir en menor tiempo, 8 semanas, comparado con la mezcla que contenía aserrín, a la cual le tomó más tiempo digerirse en 12 semanas.
 - El vermicompost del tratamiento 2 que tiene una proporción de lodo – césped (3:1), posee la mayor cantidad de macronutrientes (NPK: 1.27- 1.96
-

- 2.73), al igual que la cantidad de micronutrientes considerado de tipo excelente según la NOM-SEMARNAT-2002. Además, la relación C/N: 7.86 que alcanzó al finalizar el proceso es un indicador de buena calidad del producto. Esto también permitió la mineralización de la materia orgánica y la vermiestabilización de la mezcla con mayor rapidez.

- Las condiciones de humedad, pH y temperatura durante el bioproceso se mantuvieron dentro de los rangos aceptables para el desarrollo del ciclo vital de la población de las lombrices rojas californianas. Sin embargo, se puede concluir que el tratamiento 2 por haber sido seleccionado como la mejor alternativa, es el que mantuvo las mejores condiciones. Llegando a tener valores promedio de T: 17.68 [°C]; Humedad: 72% y pH: 7.55.
 - El vermicompost del tratamiento 2, presento cambios importantes en su composición a lo largo de las 15 semanas del bioproceso. Al finalizar el lombricomposteo el nitrógeno se duplico, el fósforo y el potasio llegaron a triplicarse y se dio también un aumento considerable en cuanto a micronutrientes. Por lo tanto, éste incremento alcanzo los valores establecidos para considerar un vermicompost de calidad según las normativas utilizada para la presente investigación.
 - La eficiencia de digestión del tratamiento 2 fue de 85,41% y la eficiencia de remoción de patógenos de 99.18%. La relación de SV/ST alcanzo un valor 14.37 %. al finalizar el bioproceso, considerándolo apto para utilizarlo como fertilizante en el suelo.
 - Avisana es un tipo de abono de origen animal en el mercado, con el cual se comparó el vermicompost del tratamiento 2. El producto del tratamiento 2 alcanzó valores de fósforo y potasio de hasta 16 y 4 veces más altos que el contenido en el abono Avisana, respectivamente. Se tiene un alto contenido a nivel de micronutrientes, llegando a tener valores cercanos a los establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002. Además, presenta también una mejor relación C/N comparada con el bioabono comercial, además el pH del tratamiento 2 se acerca más al neutro, lo que se traduce en una mejor absorción de macronutrientes por parte de las plantas. Se debe tener en cuenta que el valor de nitrógeno fue mayor en el abono Avisana llegando a duplicar al del vermicompostaje del tratamiento 2, lo
-

que se concluye que es causado por de la utilización de bacterias humificantes y nitrificantes.

5.2 RECOMENDACIONES

- Dentro de la construcción de las camas de vermicompostaje se recomienda la realización de un pequeño sistema de recolección de lixiviados para su posterior análisis químico, a fin de determinar si existen cantidades importantes de nutrientes que se percolan.
 - Para la adición de sustratos al lodo residual se recomienda analizar más opciones como los residuos domésticos, los cuales se producen en gran cantidad y de acuerdo con su procedencia pueden aportar distintos tipos de nutrientes a la mezcla lodo-sustrato.
 - Usar de equipos portátiles para el control y monitoreo del pH, temperatura, conductividad, de esta manera obtener datos más precisos.
 - Durante la vermiestabilización se recomienda tener control de la incidencia se la radiación solar puede reducir la humedad, ya que es un parámetro crítico en el desarrollo del ciclo vital de las lombrices.
 - Realizar estudios de los cambios físico - químicos que se puedan generar en el suelo cultivable al añadir el vermicompost producido bajo la metodología del presente estudio, así como también estudios sobre el desarrollo de las plantaciones que han sido cultivadas en suelos enriquecidos con este bioabono.
 - Debido a las propiedades y características que alcanzó el vermicompost producido, se recomienda su aplicación en suelos pobres o erosionados para observar los beneficios.
 - Realizar un análisis financiero para la producción de vermicompost a gran escala, teniendo en cuenta la información de este estudio.
 - Mediante los estudios presentes en el país se recomienda elaborar una normativa para la gestión de lodos residuales para el Ecuador.
-

BIBLIOGRAFÍA

1. Agro Waste. (05 de Septiembre de 2017). *Vermicompostaje*. Obtenido de Productos y Subproductos:
<http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/campus/doc/htmls/sostenibilidad/vermicompostaje.pdf>
 2. Amigos de la Tierra. (11 de Septiembre de 2017). *Manual básico para hacer compost*. Obtenido de Problemas durante el vermicompost:
www.tierra.org
 3. Andrade, R. (2013). *Determinación del contenido de materia orgánica*. Santo Domingo: ESPE.
 4. Aranda, E. (2013). *Una alternativa para el tratamiento de la basura orgánica*. México: Red de información ambiental del estado de Veracruz.
 5. Barrios, J. (2009). *Aspectos generales del manejo de lodos*. México: CONAGUA.
 6. Blazquez, P., & Montero, M. (2010). *Reutilización de agua en Bahía Blanca Plata tercera cuenca*. Cordoba: edUTecNe.
 7. Boletín Agrario. (29 de Junio de 2017). *Biosólido*. Obtenido de <https://boletinagrario.com/ap-6,biosolido,1571.html>
 8. Camiletti, J. (2016). *Estudio de vermicompostaje de compost de residuos orgánicos de distinta naturaleza*. Orihuela: Universidad Miguel Hernandez.
 9. Castañeda, H., & López, R. (2012). *Los biosólidos, una oportunidad a la agricultura*. Jalisco: Gobierno de Jalisco.
 10. Checa, E. R. (2015). *Empresa Pública Metropolitana de Ratro Quito*. Obtenido de http://www.epmrq.gob.ec/images/lotaip/informes/informe_gestion_2015.pdf
 11. Compost Guy. (28 de Septiembre de 2007). *Compost Guy*. Obtenido de Vermicomposting vs Composting:
<http://www.compostguy.com/composting/hot-composting-vs-vermicomposting/>
 12. CONAGUA. (2013). *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizadas en Japón*. México: SEMARNAT.
 13. Dáguer, G. (2003). Gestión de biosólidos en Colombia. *ACODAL*, 7.
-

14. De Santos, S., & Urquiaga, R. (2013). *Compostaje y Vermicompostaje doméstico*. Madrid: CENEAM.
 15. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2008). *Estimación e interpretación del coeficiente de variación*. Colombia: DAME.
 16. Díaz, E. (2002). *Lombricultura una alternativa de producción para emprendedores y productores del agro*. Nicaragua: ADEX.
 17. Domínguez, J., Lazcano, C., & Brandóm, M. (2010). Influencia del vermicompost en el crecimiento de las plantas. Aportes para la elaboración de un concepto objetivo. *Scielo*.
 18. EMPRESA PUBLICA METROPOLITANA DE RASTRO QUITO . (28 de Enero de 2017). *Servicio de faneamiento*. Obtenido de Estadísticas anuales:
<http://www.epmrq.gob.ec/index.php/servicios/faenamamiento/faenamamiento-bovinos>
 19. Espigares García, M., & Pérez López, J. (2003). Composición de Aguas Residuales. *EDAR*.
 20. FAO, & Asociación Internacional de Fertilizantes. (2002). *LOS FERTILIZANTES Y SU USO*. FAO.
 21. Fenucci, J. L. (1988). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO*.
 22. Fernández, M. (2011). *Aplicación de la tecnología del vermicompostaje para la valorización agronomica de residuos y destrios de cultivos de invernadero*. Granada: Universidad de Granada.
 23. Flores, J. (2010). *Agricultura ecológica manual y guía didáctica*. ESpaña: Instituto de restauración y medio ambiente.
 24. G. M., P. M., H. S., & R. V. (2012). *Comportamiento de la lombriz roja (Eisenia spp.) en sistemas de vermicompostaje de residuos orgánicos*. Bolivia: Unidad Académica Campesina Carmen Pampa.
 25. García, N. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*. México: Universidad de Quintana Roo.
 26. Gestión Calidad Consulting. (2016). *Tratamiento de residuos*. España.
 27. Hammeken, A., & Romero, E. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*. México: Universidad de las Américas Puebla.
-

28. Hernandez, O., Ojeda, D., López, J., & Arras, A. (2010). *Abonos orgánicos y sus efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo*. Chihuahua: Tecnociencia.
 29. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2016). Instructivo para la producción de Compost Domiciliario. Argentina. Obtenido de <http://www.inti.gob.ar/compostajedomiciliario/pdf/formatodigital.pdf>
 30. Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* Guadalajara: Academia de Ingeniería México.
 31. Martínez, C. (2007). Lombricultura. *Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural pesca y alimentación*.
 32. Mendoza, D. (2010). *Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
 33. Mendoza, M. (2016). *Informe de gestión anual*. Quito: EPMRQ.
 34. Ministerio de la presidencia de España. (2013). *Real Decreto 506*. España: BOE.
 35. Morales, P. (2005). *Digestión Anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento*. México: UDLAP.
 36. Naturaland. (24 de Agosto de 2017). *Vermicompost*. Obtenido de Abono de alta calidad para mejorar la calidad del suelo: http://www.naturaland.de/images/SP/Productores/06_2011_Vermikompost_Homepage_ES.pdf
 37. NMX-FF-109-SCFI-2007. (2007). *HUMUS DE LOMBRIZ (LOMBRICOMPOSTA)- ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA*. Jalisco: AMEXL.
 38. Nogales, R. (2010). *Vermicompostaje en el reciclado de residuos agroindustriales*. Granada: Estación experimental del Zaidín.
 39. OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Perú: OEFA.
 40. Oropeza, N. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*. México: Universidad de Quintana Roo.
-

41. Pacheco, J., Pat, R., & Cabrera, A. (2006). *Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con la relación al agua subterránea y su relación con los seres vivos*. México: Reingeniería revista académica.
 42. Pineda, J. (2006). *Lombricultura*. Honduras: Instituto Hondureño.
 43. Prochnow, L., Moraes, M., & Stipp, S. (2009). *Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos*. Argentina: IPNI.
 44. REAL DECRETO 506/2013. (2013). *Boletín oficial de Estado de productos fertilizantes*. Madrid: Mundi-Prensa.
 45. Rodríguez, J., & Durán de Bazua, C. (2009). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnol.*
 46. Rodríguez, M., & Flórez, V. (2004). *Elementos esenciales y beneficiosos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
 47. Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR: Experiencias en América Latina*. Chile: FAO.
 48. Romero, M., Colín, A., Sanchez, E., & Ortiz, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *SciELO*.
 49. Saavedra, M. (2007). *Biodegradación de Arperujo utilizando hongos del género Pleurotus y anélidos de la especie Eisenia Foétida*. Granada: Universidad de Granada.
 50. SAGARPA. (22 de Abril de 2018). *Abonos orgánicos*. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Abonos%20organicos.pdf>
 51. SEMARNAT. (2002). *Norma oficial mexicana. Protección ambiental. Lodos y biosólidos*. México: Secretaria de medio ambiente y recursos naturales.
 52. Suárez, J., & Jácome, A. (2007). *Espesamiento de fangos de estaciones depuradoras de aguas residuales*. España: Universidad de Coruña. Obtenido de ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Segundo_Curso/Tratamientos_Avanzados_del_Agua/Master___FANGOS___ESPESAMIENTO_DE_FANGOS_DE_EDAR.pdf
 53. Tesauro. (2013). Biosólidos. *Boletín agrario*. Obtenido de Biosólido.
-

54. Torres, E. (2005). *Reutilización de aguas y lodos residuales*. Latinoamérica: PAHO.
 55. Unidad Nacional de Almacenamiento EP. (2016). 28.000 toneladas de fertilizantes llegarán al país para beneficio de agricultores. *MAGAP*.
 56. UNIVERSITARIA EDITORIAL. (2007). *Lombricultura: Desarrollo sostenible*. La Habana: ProQuest Ebook Central.
 57. Valencia, N. (2008). *Secado solar de lodos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
 58. Vermicam. (06 de Septiembre de 2017). *Gobierno de Canarias*. Obtenido de Gestión ecológica de residuos orgánicos: Manual de vermicompostaje: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/campus/doc/htmls/sostenibilidad/ManualVermicompostaje.pdf>
 59. World Agroforestry Center. (08 de Diciembre de 2017). *Los nutrientes en las plantas*. Obtenido de <http://www.worldagroforestry.org/NurseryManuals/CommunityESP/LosNutrientes.pdf>
-

ANEXOS

ANEXO 1: TOMA DE MUESTRAS



ANEXO 2: MUESTRAS PARA ANÁLISIS EN EL LABORATORIO

MUESTRA	FOTOGRAFÍA
MUESTRA DE LODO RESIDUAL	
MUESTRA PARA ANÁLISIS PARA EL INIAP	
MUESTRA PARA COLIFORMES FECALIS	
MUESTRA DE LODO PARA LA MEZCLA	

ANEXO 3: CÁLCULO SEMANAL DE LA RELACIÓN SV/ST

ID	SEXTA SEMANA				SEPTIMA SEMANA				OCTAVA SEMANA				NOVENA SEMANA																								
	P1 [g]	P2 [g]	ST [g]	SV/ST [%]	P0 [g]	P1 [g]	P2 [g]	ST [g]	SV/ST [%]	VOLUMEN [ml]	P0 [g]	P1 [g]	P2 [g]	ST [g]	SV/ST [%]	VOLUMEN [ml]	P0 [g]	P1 [g]	P2 [g]	ST [g]	SV/ST [%]	VOLUMEN [ml]	P0 [g]	P1 [g]	P2 [g]	ST [g]	SV/ST [%]	VOLUMEN [ml]									
403	33780	33597	0,01192	0,00458	38,536	32,300	33,484	31,085	0,02960	0,00998	33,725	32,549	33,854	33,408	0,03264	0,01115	34,161	34,433	35,596	35,414	0,02907	0,00455	15,652	40	34,433	35,596	35,414	0,02907	0,00455	15,652	40	34,433	35,596	35,414	0,02907	0,00455	15,652
405	31881	31733	0,00752	0,00296	39,319	32,499	32,761	32,660	0,00524	0,00203	38,832	35,157	35,511	35,375	0,00684	0,00340	38,383	38,868	40,207	39,947	0,03348	0,00649	19,985	40	38,868	40,207	39,947	0,03348	0,00649	19,985	40	38,868	40,207	39,947	0,03348	0,00649	19,985
410	34893	34402	0,02767	0,00983	35,528	33,507	34,323	34,044	0,01633	0,00558	34,158	31,350	32,871	32,310	0,03803	0,01403	36,892	36,027	37,120	36,916	0,02733	0,00511	18,692	40	36,027	37,120	36,916	0,02733	0,00511	18,692	40	36,027	37,120	36,916	0,02733	0,00511	18,692
450	34807	34453	0,01913	0,00707	36,950	33,850	34,528	34,316	0,01357	0,00425	31,790	33,821	34,742	34,412	0,02303	0,00825	35,852	34,713	35,537	35,382	0,02060	0,00389	18,883	40	34,713	35,537	35,382	0,02060	0,00389	18,883	40	34,713	35,537	35,382	0,02060	0,00389	18,883
452	31321	30,848	0,02540	0,00948	37,318	30,051	31,063	30,748	0,02024	0,00629	31,071	31,825	33,464	32,961	0,04098	0,01258	30,698	43,191	43,757	43,668	0,04417	0,00223	15,743	40	43,191	43,757	43,668	0,04417	0,00223	15,743	40	43,191	43,757	43,668	0,04417	0,00223	15,743
477	34007	33,777	0,01326	0,00577	43,468	33,477	34,103	33,866	0,01565	0,00592	37,818	29,536	31,580	30,971	0,05110	0,01522	29,783	35,286	36,406	36,191	0,02798	0,00537	19,191	40	35,286	36,406	36,191	0,02798	0,00537	19,191	40	35,286	36,406	36,191	0,02798	0,00537	19,191
487	35494	34,193	0,03015	0,02602	86,290	33,979	34,862	34,111	0,01766	0,01503	85,096	37,315	38,532	37,921	0,03042	0,01526	50,144	38,833	42,949	41,538	0,10291	0,03528	34,281	40	38,833	42,949	41,538	0,10291	0,03528	34,281	40	38,833	42,949	41,538	0,10291	0,03528	34,281
458	38875	37,637	0,02833	0,02475	87,344	37,457	38,619	37,683	0,02323	0,01871	80,553	34,589	35,721	35,142	0,02830	0,01448	51,144	28,268	31,942	30,624	0,09185	0,03296	35,882	40	28,268	31,942	30,624	0,09185	0,03296	35,882	40	28,268	31,942	30,624	0,09185	0,03296	35,882
441	30256	29,533	0,02039	0,01809	88,743	29,441	30,105	29,559	0,01662	0,01367	82,245	38,214	39,916	39,022	0,04257	0,02235	52,508	37,284	38,438	38,065	0,02885	0,00932	32,290	40	37,284	38,438	38,065	0,02885	0,00932	32,290	40	37,284	38,438	38,065	0,02885	0,00932	32,290
457	40,004	39,039	0,02485	0,01829	77,343	38,753	39,835	39,010	0,02165	0,01650	76,217	43,124	44,727	43,824	0,04008	0,02259	56,376	35,716	36,838	36,387	0,02805	0,01125	40,132	40	35,716	36,838	36,387	0,02805	0,01125	40,132	40	35,716	36,838	36,387	0,02805	0,01125	40,132
482	33208	32,286	0,02352	0,01843	78,366	32,028	33,355	32,458	0,02654	0,01793	67,546	36,456	37,951	37,113	0,03738	0,02095	56,050	36,345	36,753	36,556	0,01020	0,00489	48,272	40	36,345	36,753	36,556	0,01020	0,00489	48,272	40	36,345	36,753	36,556	0,01020	0,00489	48,272
441	37748	36,789	0,02215	0,01918	86,602	36,634	37,862	36,891	0,02454	0,01941	79,082	33,625	34,542	33,965	0,02290	0,01441	62,908	38,089	39,311	38,690	0,03055	0,01552	50,814	40	38,089	39,311	38,690	0,03055	0,01552	50,814	40	38,089	39,311	38,690	0,03055	0,01552	50,814

ANEXO 4: VALORES SEMANALES DE SV/ST

SUSTRATO ALTERNATIVA		LODO-CÉSPED																
		PRIMERA ALTERNATIVA (1:1)					SEGUNDA ALTERNATIVA (1:3)					CUARTA ALTERNATIVA (1:3)						
TIEMPO (SEMANAS)	T1 [%]	T1R1 [%]	T1R2 [%]	PROMEDIO	Σ	COEF VAR (%)	T2 [%]	T2R1[%]	T2R2[%]	PROMEDIO	Σ	COEF VAR (%)	T4 [%]	T4R1 [%]	T4R2 [%]	PROMEDIO	Σ	COEF VAR (%)
0	98,54	98,54	98,54	98,54	0,00	0,00	98,54	98,54	98,54	98,54	0,00	0,00	98,54	98,54	98,54	98,54	0,00	0,00
3	85,70	86,14	84,24	85,36	0,99	1,16	84,95	85,14	88,21	86,10	1,83	2,13	105,15	105,66	109,78	106,86	2,54	2,38
4	69,94	70,53	68,00	69,49	1,32	1,90	68,95	69,20	73,30	70,48	2,44	3,46	95,88	96,56	102,05	98,17	3,38	3,45
6	38,44	39,32	35,53	37,76	1,98	5,25	36,95	37,32	43,47	39,25	3,66	9,33	77,34	78,37	86,60	80,77	5,08	6,28
7	33,72	38,83	34,16	35,57	2,83	7,96	31,29	31,07	37,82	33,39	3,83	11,48	76,22	67,55	79,08	74,28	6,01	8,09
8	34,16	38,38	36,89	36,48	2,14	5,87	35,85	30,70	29,78	32,11	3,27	10,19	56,38	56,05	62,91	58,44	3,87	6,62
9	15,65	19,38	18,69	17,91	1,99	11,09	18,88	15,74	19,19	17,94	1,91	10,64	40,13	48,27	50,81	46,41	5,58	12,03
12	13,94	16,85	13,26	14,68	1,91	13,00	13,35	13,02	10,92	12,43	1,32	10,61	35,75	33,93	33,93	34,53	1,05	3,04
15	14,22	13,77	13,27	13,75	0,48	3,45	15,17	13,59	14,36	14,37	0,79	5,48	19,45	20,35	21,14	20,31	0,85	4,16

SUSTRATO ALTERNATIVA		LODO-ASERRÍN																
		TERCERA ALTERNATIVA (1:1)					CUARTA ALTERNATIVA (1:3)					QUINTA ALTERNATIVA (1:3)						
TIEMPO(SEMANAS)	T3 [%]	T3R1 [%]	T3R2 [%]	PROMEDIO	Σ	COEF VAR (%)	T4 [%]	T4R1 [%]	T4R2 [%]	PROMEDIO	Σ	COEF VAR (%)	T5 [%]	T5R1 [%]	T5R2 [%]	PROMEDIO	Σ	COEF VAR (%)
0	98,54	98,54	98,54	98,54	0,00	0,00	98,54	98,54	98,54	98,54	0,00	0,00	98,54	98,54	98,54	98,54	0,00	0,00
3	109,62	110,15	110,85	110,21	0,62	0,56	105,15	105,66	109,78	106,86	2,54	2,38	105,15	105,66	109,78	106,86	2,54	2,38
4	101,85	102,55	103,48	102,62	0,82	0,80	95,88	96,56	102,05	98,17	3,38	3,45	95,88	96,56	102,05	98,17	3,38	3,45
6	86,29	87,34	88,74	87,46	1,23	1,41	77,34	78,37	86,60	80,77	5,08	6,28	77,34	78,37	86,60	80,77	5,08	6,28
7	85,10	80,55	82,24	82,63	2,30	2,78	76,22	67,55	79,08	74,28	6,01	8,09	76,22	67,55	79,08	74,28	6,01	8,09
8	50,14	51,14	52,51	51,27	1,19	2,31	56,38	56,05	62,91	58,44	3,87	6,62	56,38	56,05	62,91	58,44	3,87	6,62
9	34,28	35,88	32,29	34,15	1,80	5,27	40,13	48,27	50,81	46,41	5,58	12,03	40,13	48,27	50,81	46,41	5,58	12,03
12	19,74	18,68	16,34	18,25	1,74	9,52	35,75	33,93	33,93	34,53	1,05	3,04	35,75	33,93	33,93	34,53	1,05	3,04
15	16,96	18,33	17,62	17,64	0,68	3,88	19,45	20,35	21,14	20,31	0,85	4,16	19,45	20,35	21,14	20,31	0,85	4,16

ANEXO 5: VALORES DE POTASIO

FASE		CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)						ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)						
Muestra	K [mg/L]	K real [mg/L]	K real [mg/Kg]	% K20	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	K [mg/L]	K real [mg/L]	K real [mg/Kg]	% K20	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]
50 % CFSPED - LODO	T1	7,50	2250	11250	1,36	1,20	11,06	18,40	5520	27600	3,32	3,06	0,30	9,92
	T1R1	6,10	1830	9150	1,10			17,30	5190	25950	3,13			
	T1R2	6,40	1920	9600	1,16			15,10	4530	22650	2,73			
25 % CFSPED - LODO	T2	8,30	2490	12450	1,50	1,56	9,85	16,50	4950	24750	2,98	2,73	0,26	9,63
	T2R1	9,60	2880	14400	1,73			13,60	4080	20400	2,46			
	T2R2	8,00	2400	12000	1,45			15,30	4590	22950	2,76			
50 % ASERIN - LODO	T3	8,60	1720	8600	1,04	0,96	6,96	9,20	2760	13800	1,66	1,85	0,18	9,79
	T3R1	7,90	1580	7900	0,95			11,20	3360	16800	2,02			
	T3R2	7,50	1500	7500	0,90			10,30	3090	15450	1,86			
25 % ASERIN - LODO	T4	6,90	1380	6900	0,83	0,87	5,01	12,30	3690	18450	2,22	2,20	0,26	11,91
	T4R1	7,10	1420	7100	0,86			10,70	3210	16050	1,93			
	T4R2	7,60	1520	7600	0,92			13,60	4080	20400	2,46			

ANEXO 6: VALORES DE NITROGENO TOTAL KJELDAHL

FASE		ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)									
Muestra	NTK [mg/kg]	NTK [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	NTK [mg/kg]	NTK [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	
50 % - CESPED - LODO	T1	2985,15	0,30	0,29	0,01	4,98	9045,90	0,90	0,89	0,04	
	T1R1	3033,79	0,30				9193,30	0,92			
	T1R2	2760,75	0,28				8365,90	0,84			
25 % - CESPED - LODO	T2	6365,28	0,64	0,76	0,13	16,97	10608,80	1,06	1,27	0,22	
	T2R1	7535,16	0,75				12558,60	1,26			
	T2R2	8945,88	0,89				14909,80	1,49			
50 % - ASERRÍN - LODO	T3	2001,31	0,20	0,20	0,01	5,10	6254,10	0,63	0,62	0,03	
	T3R1	1888,80	0,19				5902,50	0,59			
	T3R2	2091,62	0,21				6536,30	0,65			
25 % - ASERRÍN - LODO	T4	3083,81	0,31	0,28	0,04	13,86	8115,30	0,81	0,74	0,10	
	T4R1	2369,45	0,24				6235,40	0,62			
	T4R2	3000,56	0,30				7896,20	0,79			

ANEXO 7: VALORES DE FÓSFORO

FASE		CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)					ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)				
Muestra	P [mg/Kg]	P [%]	PROMEDIO	Σ	Coef. Var [%]	P [mg/Kg]	P [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	
50 % CÉSPED - LODO	T1	4974,96	0,50	0,473	0,022	16757,76	1,68	1,512	0,174	11,527	
	T1R1	4660,752	0,47			15317,64	1,53				
	T1R2	4556,016	0,46			13288,38	1,33				
25 % CÉSPED - LODO	T2	4189,44	0,42	0,415	0,032	18197,88	1,82	1,955	0,126	6,435	
	T2R1	4444,734	0,44			19768,92	1,98				
	T2R2	3816,318	0,38			20685,36	2,07				
50 % ASERRÍN - LODO	T3	2133,996	0,21	0,214	0,020	10997,28	1,10	1,078	0,068	6,321	
	T3R1	1941,98	0,19			11324,58	1,13				
	T3R2	2339,104	0,23			10015,38	1,00				
25 % ASERRÍN - LODO	T4	2557,304	0,26	0,268	0,016	8837,1	0,88	0,888	0,046	5,177	
	T4R1	2862,784	0,29			8444,34	0,84				
	T4R2	2622,764	0,26			9360,78	0,94				

ANEXO 8: VALORES DE NITRATOS

FASE	CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)							ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)						
	(NO ₃) ⁻¹ [mg/L]	(NO ₃) ⁻¹ real [mg/L]	(NO ₃) ⁻¹ real [mg/Kg]	(NO ₃) ⁻¹ real [%]	PROMEDIO	Σ	Coef. Var [%]	(NO ₃) ⁻¹ [mg/L]	(NO ₃) ⁻¹ real [mg/L]	(NO ₃) ⁻¹ real [mg/Kg]	(NO ₃) ⁻¹ real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]
T1	1,4	420	2100	0,21				2,8	840	4200	0,42			
T1R1	1,1	330	1650	0,17	0,19	0,02	12,39	2,3	690	3450	0,345	0,36	0,05	15,02
T1R2	1,2	360	1800	0,18				2,1	630	3150	0,315			
T2	1,2	360	1800	0,18				2,5	750	3750	0,375			
T2R1	1,1	330	1650	0,17	0,16	0,02	14,32	2,1	630	3150	0,315	0,33	0,05	14,10
T2R2	0,9	270	1350	0,14				1,9	570	2850	0,285			
T3	1,1	220	1100	0,11				1,5	450	2250	0,225			
T3R1	0,9	180	900	0,09	0,10	0,01	11,95	0,9	270	1350	0,135	0,18	0,05	26,19
T3R2	0,9	180	900	0,09				1,1	330	1650	0,165			
T4	1,1	220	1100	0,11				1,4	420	2100	0,21			
T4R1	1,2	240	1200	0,12	0,11	0,02	14,32	1,5	450	2250	0,225	0,23	0,02	9,96
T4R2	0,9	180	900	0,09				1,7	510	2550	0,255			

ANEXO 9: VALORES DE NITRITOS

FASE	CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)						ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)							
	(NO ₂)-1 [mg/L]	(NO ₂)-1 real [mg/L]	(NO ₂)-1 real [mg/Kg]	(NO ₂)-1 real [%]	PROMEDI O	σ	Coef. Var [%]	(NO ₂)-1 [mg/L]	(NO ₂)-1 real [mg/L]	(NO ₂)-1 real [mg/Kg]	(NO ₂)-1 real [%]	PROMEDI O	σ	Coef. Var [%]
T1	0,023	6,9	34,5	0,0035	0,0032	0,0030	9,52	0,016	4,8	24	0,0024	0,0022	0,00023	10,66
T1R1	0,021	6,3	31,5	0,0032				0,013	3,9	19,5	0,0020			
T1R2	0,019	5,7	28,5	0,0029				0,014	4,2	21	0,0021			
T2	0,015	4,5	22,5	0,0023	0,0025	0,0023	9,35	0,019	5,7	28,5	0,0029	0,0028	0,00009	3,15
T2R1	0,016	4,8	24	0,0024				0,018	5,4	27	0,0027			
T2R2	0,018	5,4	27	0,0027				0,018	5,4	27	0,0027			
T3	0,010	2	10	0,0010	0,0010	0,0006	5,97	0,003	0,9	4,5	0,0005	0,0004	0,00009	21,65
T3R1	0,009	1,8	9	0,0009				0,002	0,6	3	0,0003			
T3R2	0,010	2	10	0,0010				0,003	0,9	4,5	0,0005			
T4	0,017	3,4	17	0,0017	0,0018	0,00021	11,78	0,003	0,9	4,5	0,0005	0,0003	0,00014	43,64
T4R1	0,020	4	20	0,0020				0,002	0,6	3	0,0003			
T4R2	0,016	3,2	16	0,0016				0,0012	0,36	1,8	0,0002			

ANEXO 10: VALORES DE FOSFATOS

FASE	CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)						ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)							
	P ₂ O ₅ [mg/L]	P ₂ O ₅ real [mg/L]	P ₂ O ₅ real [mg/Kg]	P ₂ O ₅ real [%]	PROMEDIO	Σ	Coef. Var [%]	P ₂ O ₅ [mg/L]	P ₂ O ₅ real [mg/L]	P ₂ O ₅ real [mg/Kg]	P ₂ O ₅ real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]
T1	7,6	2280	11400	1,14				25,6	7680	38400	3,84			
T1R1	7,12	2136	10680	1,07	1,08	0,05	4,61	23,4	7020	35100	3,51	3,47	0,40	11,53
T1R2	6,96	2088	10440	1,04				20,3	6090	30450	3,05			
T2	6,4	1920	9600	0,96				27,8	8340	41700	4,17			
T2R1	6,79	2037	10185	1,02	0,95	0,07	7,62	30,2	9060	45300	4,53	4,48	0,29	6,43
T2R2	5,83	1749	8745	0,87				31,6	9480	47400	4,74			
T3	4,89	978	4890	0,49				16,8	5040	25200	2,52			
T3R1	4,45	890	4450	0,45	0,49	0,05	9,29	17,3	5190	25950	2,60	2,47	0,16	6,32
T3R2	5,36	1072	5360	0,54				15,3	4590	22950	2,30			
T4	5,86	1172	5860	0,59				13,5	4050	20250	2,03			
T4R1	6,56	1312	6560	0,66	0,61	0,04	6,00	12,9	3870	19350	1,94	2,04	0,11	5,18
T4R2	6,01	1202	6010	0,60				14,3	4290	21450	2,15			

ANEXO 11: VALORES DE COBRE

FASE	CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)							ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)						
	Cu [mg/L]	Cu real [mg/L]	Cu real [mg/kg]	Cu real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	Cu [mg/L]	Cu Real [mg/L]	Cu Real [mg/Kg]	Cu Real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]
T1	0,54	162	810	0,081	0,077	0,007	8,55	0,89	267	1335	0,134	0,133	0,006	4,58
T1R1	0,46	138	690	0,069										
T1R2	0,53	159	795	0,080										
T2	0,33	66	330	0,033	0,034	0,001	3,36	0,77	231	1155	0,116	0,110	0,006	5,48
T2R1	0,35	70	350	0,035										
T2R2	0,35	70	350	0,035										
T3	0,13	26	130	0,013	0,012	0,002	14,43	0,59	177	885	0,089	0,086	0,003	3,51
T3R1	0,1	20	100	0,010										
T3R2	0,13	26	130	0,013										
T4	0,25	50	250	0,025	0,030	0,005	16,97	0,62	186	930	0,093	0,098	0,005	5,38
T4R1	0,35	70	350	0,035										
T4R2	0,29	58	290	0,029										

ANEXO 12: VALORES DE HIERRO

FASE	CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)							ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)						
	Fe [mg/L]	Fe real [mg/L]	Fe real [mg/Kg]	Fe real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	Fe [mg/L]	Fe real [mg/L]	Fe real [mg/Kg]	Fe real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]
T1	0,64	192	960	0,096	0,079	0,028	35,35	1,26	378	1890	0,189	0,225	0,033	14,58
T1R1	0,31	93	465	0,0465										
T1R2	0,62	186	930	0,093										
T2	0,38	114	570	0,057	0,056	0,003	4,68	2,71	813	4065	0,4065	0,365	0,062	16,93
T2R1	0,38	114	570	0,057										
T2R2	0,35	105	525	0,0525										
T3	0,14	28	140	0,014	0,013	0,001	8,66	0,98	294	1470	0,147	0,141	0,014	10,26
T3R1	0,12	24	120	0,012										
T3R2	0,14	28	140	0,014										
T4	0,22	44	220	0,022	0,022	0,001	2,59	1,06	318	1590	0,159	0,165	0,027	16,22
T4R1	0,22	44	220	0,022										
T4R2	0,23	46	230	0,023										













ANEXO 13: VALORES DE ZINC

FASE	CONTROL Y MONITOREO (SEMANA 6)						ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)							
	Zn [mg/L]	Zn real [mg/L]	Zn real [mg/Kg]	Zn real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	Zn [mg/L]	Zn real [mg/L]	Zn real [mg/Kg]	Zn real [%]	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]
T1	9,23	2769	13845	1,38				1,45	435	2175	0,2175			
T1R1	8,74	2622	13110	1,31	1,28	0,13	10,09	1,74	522	2610	0,261	0,23	0,03	11,75
T1R2	7,56	2268	11340	1,13				1,41	423	2115	0,2115			
T2	7,41	2223	11115	1,11				2,03	609	3045	0,3045			
T2R1	8,63	2589	12945	1,29	1,24	0,11	9,12	1,91	573	2865	0,2865	0,29	0,01	4,99
T2R2	8,79	2637	13185	1,32				1,84	552	2760	0,276			
T3	11,23	2246	11230	1,12				3,54	1062	5310	0,531			
T3R1	10,92	2184	10920	1,09	1,14	0,06	4,93	2,93	879	4395	0,4395	0,47	0,05	10,41
T3R2	12,01	2402	12010	1,20				3,02	906	4530	0,453			
T4	15,23	3046	15230	1,52				4,03	1209	6045	0,6045			
T4R1	14,76	2952	14760	1,48	1,40	0,17	12,16	3,45	1035	5175	0,5175	0,52	0,08	15,39
T4R2	12,07	2414	12070	1,21				2,96	888	4440	0,444			













ANEXO 14: VALORES DE LA RELACIÓN C/N

Muestra	ANÁLISIS FINAL (SEMANA 15)				
	Relación C/N	PROMEDIO	σ	Coef. Var [%]	
50 % CFSPED - 50 % LODO	T1	10,627	10,436	0,314	3,006
	T1R1	10,074			
	T1R2	10,606			
25% CFSPED - 75 % LODO	T2	9,776	7,855	1,704	21,698
	T2R1	7,266			
	T2R2	6,524			
50 % ASERRÍN - 50 % LODO	T3	18,947	19,997	1,785	8,928
	T3R1	22,059			
	T3R2	18,986			
25 % ASERRÍN - 75 % LODO	T4	17,257	20,240	3,291	16,262
	T4R1	23,771			
	T4R2	19,691			













ANEXO 16: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 1 EN EL BIOPROCESO

Tratamiento	Semana 0	Semana 5	Semana 10	Semana 15
T1				
T1R1				
T1R2				













ANEXO 17: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 2 EN EL BIOPROCESO

Tratamiento	Semana 0	Semana 5	Semana 10	Semana 15
T2				
T2R1				
T2R2				

ANEXO 18: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 3 EN EL BIOPROCESO

Tratamiento	Semana 0	Semana 5	Semana 10	Semana 15
T3				
T3R1				
T3R2				

ANEXO 19: EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO 4 EN EL BIOPROCESO

Tratamiento	Semana 0	Semana 5	Semana 10	Semana 15
T4				
T4R1				
T4R2				

ANEXO 20: ANÁLISIS DE SÓLIDOS VOLÁTILES**ANEXO 21: MUESTRA PARA SER PESADA**

ANEXO 22: DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS**ANEXO 23: MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD**

ANEXO 24: DILUCIÓN DE LA MUESTRA

