

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS
DEL RELLENO SANITARIO DE AGUA CHICA DEL MUNICIPIO DE VILLAZÓN
MEDIANTE MICROORGANISMOS DE MONTAÑA**

Por:

Josselin Rubí Ustarez Bustamante

**Modalidad de graduación: Proyecto de Grado Investigación Aplicada presentado a
consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como
requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química**

Diciembre 2023

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A Dios quien me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado y guiarme en todo momento en su camino de amor y esperanza, por darme fuerzas cada día y haberme permitido llegar hasta este punto rodeada de personas maravillosas.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	2
1. <i>Antecedentes</i>	2
<i>Contexto Internacional de Residuos Sólidos</i>	3
<i>Contexto en Latino América de los Residuos Sólidos</i>	4
<i>Contexto Nacional de los Residuos Sólidos</i>	5
1.2. <i>Objetivos</i>	7
1.2.1. Objetivo general.....	7
1.2.2. Objetivos específicos.....	7
1.3. <i>Justificación</i>	7
1.3.1. Justificación tecnológica.....	7
1.3.2. Justificación económica.....	8
1.3.3. Justificación ambiental.....	8
1.3.4. Justificación social.....	8
CAPÍTULO II	10
2. Marco teórico	10
2.1. <i>Características Generales de los Residuos Orgánicos</i>	10
2.1.1. Residuos Orgánicos	10
2.1.1.1. Origen de los Residuos Orgánicos.....	10
2.1.1.2. Composición de los Residuos Orgánicos	12
2.1.1.3. Propiedades Físicas de los Residuos Orgánicos.....	14
2.1.1.4. Propiedades Químicas de los Residuos Orgánicos	15
2.1.1.5. Impacto Ambiental de los Residuos Orgánicos	15
2.1.2. Tratamiento de Residuos Orgánicos	18

2.2.	<i>Compostaje</i>	20
2.2.1.	Proceso de compostaje.	20
2.2.2.	Etapas del Compostaje	24
2.2.3.	Factores que Influyen en el Proceso de Compostaje	26
2.2.3.1.	Relación C/N	26
2.2.3.2.	Contenido de Nutrientes (Nitrógeno. Fósforo y Potasio)	27
2.2.3.3.	Temperatura	28
2.2.3.4.	Concentración de Iones Hidrogeno (pH)	29
2.2.3.5.	Salinidad (Conductividad Eléctrica C.E.)	30
2.2.3.6.	Aireación.....	31
2.2.3.7.	Humedad	31
2.2.4.	Monitoreo del proceso de compostaje	33
2.2.5.	Criterios y test para indicar el grado de madures del compost.....	34
1.	Test de tipo físico.....	34
2.	Test de tipo químico.	35
2.2.6.	Aditivos para el Proceso de Compostaje.....	35
2.2.6.1.	Microorganismos de Montaña	36
2.2.6.2.	Principales fuentes de Microorganismos de Montaña.	39
2.2.6.3.	Microorganismos de Montaña en medio Solido	40
2.2.6.4.	Microorganismos de Montaña en medio Líquido	42
2.3.	<i>Sistemas y técnicas para el compostaje</i>	43
2.3.1.	Sistemas abiertos	44
2.3.1.1.	Pilas estáticas con aireación pasiva	44
2.3.1.2.	Pilas estáticas con aireación forzada	45
2.3.1.3.	Pilas con volteo	46
2.3.1.4.	Combinación del sistema de pilas de aireación forzada y de volteo	47

2.3.2.	Sistemas cerrados.....	47
2.3.2.1.	Reactores verticales	48
2.3.2.2.	Reactores horizontales	48
2.3.3.	Selección del sistema para el proceso de compostaje.....	48
2.3.3.1.	Sistemas de estudio para la obtención de compost.	49
2.3.3.2.	Matriz de enfrentamiento para la selección del proceso de compostaje.	51
2.3.3.3.	Evaluación de alternativas para el proceso de compostaje.....	52
2.4.	<i>Área de Implementación del Proyecto</i>	53
2.4.1.	Ubicación geográfica	53
2.4.2.	Límites territoriales	54
2.4.3.	Altitudes.....	54
2.4.4.	Temperatura y Precipitación	54
2.4.5.	Viento	55
CAPÍTULO III	56
3. Parte experimental	56
3.1.	<i>Proceso Tecnológico Experimental</i>	56
3.1.1.	Diagrama de Bloques de los Residuos Solidos.....	56
3.1.1.1.	Desarrollo del Proceso de los Residuos Solidos.....	57
3.1.2.	Diagrama de Bloques del Compostaje	59
3.1.2.1.	Desarrollo del Proceso de Compostaje	60
3.1.3.	Diagrama de Bloques de los Microorganismos de Montaña.	69
3.1.3.1.	Desarrollo del proceso de los Microorganismos de Montaña	69
3.3.1.	Equipos y Materiales	72
3.4.	<i>Diseño Estadístico de Experimentos</i>	74
3.4.1.	Diseño aleatorizado.....	74

3.4.2.	Modelo lineal.....	75
3.4.3.	Diseño Experimental.....	75
3.5.	<i>Descripción de la Materia Prima (Residuos Orgánicos)</i>	77
3.5.1.	Propiedades físicas.....	78
3.5.2.	Propiedades químicas.....	79
3.6.	<i>Descripción del Producto (Compost)</i>	80
CAPÍTULO IV.....		83
4.	Análisis y discusión de resultados.....	83
4.1.	<i>Resultados del análisis de la materia prima.....</i>	<i>83</i>
4.2.	<i>Resultados del análisis de los microorganismos de montaña.....</i>	<i>84</i>
4.3.	<i>Resultados del compost.....</i>	<i>85</i>
4.4.	<i>Rendimiento de compost.....</i>	<i>85</i>
4.5.	<i>Análisis de varianza.....</i>	<i>87</i>
4.5.1.	Factor de corrección (C).....	87
4.5.2.	Suma de cuadrados totales (SCT).....	87
4.5.3.	Suma de cuadrados de los tratamientos (SCV).....	88
4.5.4.	Suma de cuadrados del error (SCE).....	88
4.5.5.	Grados de libertad (gl).....	88
4.5.6.	Cuadrados medios (CM).....	89
4.5.7.	F calculada (Fc).....	89
4.5.8.	Resultados del Análisis de Varianza.....	90
4.5.9.	Prueba de tukey.....	90
4.6.	<i>Control de los parámetros en el proceso de compostaje al diagrama.....</i>	<i>92</i>
4.6.1.	Control de temperatura.....	92

4.6.1.1.	Temperatura máxima.....	92
4.6.1.2.	Temperatura promedio.....	93
4.6.2.	Control del pH en los tratamientos.....	94
4.6.2.1.	pH máximo.....	94
4.6.2.2.	pH promedio.....	95
4.6.3.	Control de la Humedad.....	96
4.6.3.1.	Humedad máxima.....	96
4.7.	<i>Balance de materia</i>	98
4.7.1.	Balance de materia de los Microorganismos de Montaña.....	98
4.7.1.1.	Balance del tamizado.....	98
4.7.1.2.	Balance de materia de los Microorganismos de Montaña Sólidos.....	99
4.7.1.3.	Balance de materia de la activación de Microorganismos de Montaña líquidos.....	100
4.7.2.	Balance de materia del proceso de compostaje.....	102
4.7.2.1.	Balance de los residuos orgánicos.....	102
4.7.2.2.	Balance de materia para el Tratamiento I.....	103
4.7.2.3.	Balance de materia para el Tratamiento II.....	104
4.7.2.4.	Balance de materia para el Tratamiento III.....	106
4.7.2.5.	Balance de materia para el Testigo.....	107
CAPÍTULO V.....		110
5.	Costos del proyecto de investigación.....	110
5.1.	<i>Determinación de costos de producción</i>	110
5.1.1.	Detalle del costo para la elaboración de microorganismos de montaña.....	110
5.1.2.	Detalle del costo de materiales.....	110
5.1.3.	Detalle del costo de análisis de laboratorio de los microorganismos de montaña.....	111
5.1.4.	Detalle del costo de análisis de laboratorio del compost.....	112

5.1.5. Detalle del costo de otros servicios	112
5.1.6. Detalle de los costos totales	112
CAPÍTULO VI.....	113
6. Conclusiones y recomendaciones	113
6.1. <i>Conclusiones</i>	113
6.2. <i>Recomendaciones</i>	114

ANEXOS

Anexo 1 Análisis Físicoquímico de los Microorganismos de Montaña Líquidos	121
Anexo 2 Análisis del compost	122
Anexo 3 Tabla de Distribución de F 5% de probabilidad de Error	123
Anexo 4 Tabla de Distribución Valores Críticos para la Prueba de Tukey 5% Probabilidad de Error	124
Anexo 5 Recolección de Hojarascas.....	125
Anexo 6 Inocuo de Microorganismos de Montaña.....	125
Anexo 7 Mezcla de los componentes para la elaboración de los microorganismos de montaña en medio solido.....	126
Anexo 8 Control de los Parámetros de los Microorganismos de Montaña en Medio Solido.....	126
Anexo 9 Microorganismos de Montaña en Medio Líquido.....	126
Anexo 10 Disposición final de los Residuos Sólidos	127
Anexo 11 Delimitación del Área de las Pilas de Compostaje	127
Anexo 12 Formación de las Pilas de Compostaje	128
Anexo 13 Pilas de Compostaje con sus Carteles de Identificación.....	128
Anexo 14 Método del Cuarteo.....	129
Anexo 15 Análisis estadístico.....	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Nutrientes de los Residuos Orgánicos	14
Tabla 2-2 Relación C/N de Residuos Orgánicos	15
Tabla 2-3 Parámetros de la Relación C/N.....	26

Tabla 2-4 Contenido de N, P, K en el Compost.....	28
Tabla 2-5 Parámetros de Temperatura	29
Tabla 2-6 Parámetros de pH en el Compost	30
Tabla 2-7 Rango de Conductividad Eléctrica	31
Tabla 2-8 Parámetro de Humedad en el Compost	32
Tabla 2-9 Parámetros del Compostaje	33
Tabla 2-10 Microorganismos de Montaña Líquidos.....	43
Tabla 2-11 Métodos de Estudio para la Obtención de Compost.....	49
Tabla 2-12 Descripción de los factores para la selección del proceso de compostaje.....	51
Tabla 2-13 Matriz de Enfrentamiento para la Selección del Proceso de Compostaje	52
Tabla 2-14 Evaluación de Alternativas para el Proceso de Compostaje.....	53
Tabla 2-15 Datos Meteorológicos de la Temperatura.....	55
Tabla 2-16 Datos Metrológico de la Velocidad del Viento	55
Tabla 3-1 Equipos para el Compostaje	72
Tabla 3-2 Instrumentos para el Compostaje	73
Tabla 3-3 Materiales para el Compostaje	74
Tabla 4-1 Resultado del Análisis de la Materia Prima.....	83
Tabla 4-2 Resultado del Análisis Químico y Biológico de los Microorganismos de Montaña...	84
Tabla 4-3 Resultado del Análisis del Compost.....	85
Tabla 4-4 Rendimiento de los Tratamientos Aplicados.....	86
Tabla 4-5 Análisis de Varianza.....	90
Tabla- 4-6 Rendimiento por tratamiento.....	91
Tabla 4-7 Temperaturas Máximas de los Tratamientos.....	92

Tabla 4-8 Análisis de Varianza de la Temperatura Máxima	92
Tabla 4-9 Prueba de Tukey para la Temperatura Máxima de los Tratamientos	93
Tabla 4-10 Temperaturas Promedio de los Tratamientos	93
Tabla 4-11 Análisis de la Varianza de la Temperatura Promedio de los Tratamientos	93
Tabla 4-12 Prueba de Tukey de la Temperatura Promedio de los Tratamientos	94
Tabla 4-13 pH Máximo de los Tratamientos	95
Tabla 4-14 Análisis de Varianza del pH Máximo de los Tratamientos	95
Tabla 4-15 Prueba de Tukey del pH Máximo de los Tratamientos	95
Tabla 4-16 pH Promedio de los Tratamientos	96
Tabla 4-17 Humedad Máxima de los Tratamientos	97
Tabla 4-18 Análisis de Varianza de la Humedad máxima de los tratamientos	97
Tabla 4-19 Prueba de tukey de la Humedad Máxima de los Tratamientos	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Compostaje de Residuos Organicos.....	18
Figura 2-2 Digestión Anaeróbica.....	19
Figura 2-3 Lombrices Rojas Californianas	19
Figura 2-4 Proceso de Compostaje	21
Figura 2-5 Etapas del Compostaje	25
Figura 2-6 Estructura de la Pila Estática con Aireación Pasiva.....	45
Figura 2-7 Pilas Estáticas con Aireación Pasiva.....	45
Figura 2-8 Pilas Estáticas con Aireación Forzada	46
Figura 2-9 Pala Cargadora Volteando la Pila de Compost	47

Figura 2-10 Ubicación Geográfica	54
Figura 3-1 Diagrama de bloques de los Residuos Solidos.....	56
Figura 3-2 Diagrama de Bloques del Compostaje	60
Figura 3-3 Diagrama de bloques de los Microorganismos de Montaña	69
Figura 3-4 Croquis del Diseño Experimental	77
Figura 4-1 Comparación de Temperaturas Promedio de cada Tratamiento	94
Figura 4-2 Comparación de pH Promedio de los Tratamientos	96
Figura 4-3 Diagrama del Balance general para el Proceso de Compostaje a partir de Residuos Organicos	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1 Pesado de Residuos en la Bascula	61
Ilustración 3-2 Recepción de Residuos	61
Ilustración 3-3 Residuos proporcionado por la Aduana.....	61
Ilustración 3-4 Residuos del Municipio de Villazón.....	61
Ilustración 3-5 Selección Manual de los Residuos Orgánicos	62
Ilustración 3-6 Mezcla de Residuos Orgánicos con los M.M. y la Materia Seca	63
Ilustración 3-7 Formación de las Pilas de Compostaje	64
Ilustración 3-8 Mini Pala Cargadora Mezclando los Residuos Orgánicos.....	64
Ilustración 3-9 Volteo de las pilas de Compostaje	65
Ilustración 3-10 Termómetro Infrarrojo utilizado para el Control de Temperatura.....	66
Ilustración 3-11 Valiometro utilizado para el Control de humedad y pH.....	66
Ilustración 3-12 Prueba de Maduración	67

Ilustración 3-13 Cosecha del Compost.....	68
--	----

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 4-1 Factor de Corrección.....	87
Ecuación 4-2 Suma de cuadrados totales.....	87
Ecuación 4-3 Suma de cuadrado de los tratamientos.....	88
Ecuación 4-4 Suma de cuadrados del error.....	88
Ecuación 4-5 Grados de libertad.....	88
Ecuación 4-6 Suma de cuadrado.....	89
Ecuación 4-7 F calculada.....	89
Ecuación 4-8 Prueba de Tukey.....	90

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

M.O.	Materia orgánica
M.S.	Materia seca
RS	Residuos Sólidos
CST	Suma de cuadrados
SCV	Suma de cuadrados totales
SCE	Suma de cuadrados del error
Gl	Grados de libertad
E	Entrada de residuos sólidos orgánico
S	Salida del compost
P	Perdida
GIRS	Gestión Integral de Residuos Sólidos
T	Número de tratamientos
CMT	Cuadrado medio de tratamientos
CME	Cuadrado medio del experimento
Fc	F calculada
MML	Microorganismos de montaña líquidos
MMS	Microorganismos de montaña sólidos
IMM	Inóculo de microorganismos de montaña
CT	Compost del tratamiento