INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

REHABILITACION DE UN SUELO CON BAJO PERFIL DE NUTRIENTES APLICANDO BIOSOLIDOS COMO FERTILIZANTE

T E S I S

P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E:

M A E S T R O

E N I N G E N I E R I A C I V I L

P R E S E N T A :

MARIA DEL CARMEN GARCIA ARAIZA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JORGE MELENDEZ ESTRADA

MEXICO, D.F

NOVIEMBRE DE 2011

A mi hermano

Lic. En Psicología

Francisco Javier García Araiza
Egresado del CICS Unidad Santo Tomas

Instituto Politécnico Nacional
"La técnica al servicio de la Patria"

Gracias a la vida, que me ha dado tanto…

INDICE GENERAL

SECCION	
INDICE GENERAL	5
CONTENIDO	6
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE FIGURAS	12
ACRONIMOS	16
RESUMEN	19
ABSTRACT	21
INTRODUCCION	22
ESTADO DEL ARTE	23
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	28
OBJETIVOS	30
HIPOTESIS	30
JUSTIFICACION	31

		Pág.
Capítulo 1	El suelo	32
Capítulo 2	Biosólidos	44
Capítulo 3	Sistemas de composteo con Biosólidos	53
Capítulo 4	Factores que influyen sobre la evaluación del proceso de compostaje con Biosólidos	62
Capítulo 5	Fundamentos de análisis físicos, químicos y microbiológicos realizados en el suelo a rehabilitar y Biosólidos a usar	68
Capítulo 6	Resultados y Discusión	116
Capítulo 7	Conclusiones y Recomendaciones	153
Glosario		156
Literatura citada		167
Anexos		169

C O N T E N I D O

1. EL SUELO	32
1.1 Funciones del suelo en la naturaleza	32
1.2 Composición del suelo	32
1.3 Tipos de suelo en México	36
1.4 Descripción y definición de un suelo con bajo perfil de nutrientes	39
1.5 Lixiviación de nitrógeno	39
1.6 Desnitrificación	39
1.7 Volatilización de Amonio	40
1.8 Aplicación de Fertilizantes Nitrogenados	40
1.9 Dosis de fertilizante Nitrogenado	40
1.10 Forma de aplicación y fuente	41
1.11 Nutrientes no móviles: fósforo y potasio	41
1.12 Importancia y fundamento de los análisis físicos, químicos, microbiológicos del suelo para su caracterización antes y después de la aplicación de los Biosólidos	42
1.12.1 Tamaño de la partícula	42
1.12.2 Heterogeneidad	42
1.12.3 Densidad aparente	43
1.12.4 Permeabilidad	43
1.12.5 pH.	43
1.12.6 Humedad	43
1.12.7 Materia orgánica	43
2. BIOSÓLIDOS	44
2.1 Definición y Descripción	44
2.2 Disposición final y uso	45
2.3 Los lodos residuales como fertilizantes	46
2.4 Los Biosólidos y su acción sobre el suelo agrícola	46
2.5 Reglamentación sobre el uso de los Biosólidos	47
2.6 Tipos y posibles procedencias de Biosólidos para su uso y aplicación de estos como fertilizantes naturales	48
2.7 Lodos residuales	49
2.8 Clasificación de los lodos residuales por su contenido de metales pesados según la EPA	50
2.9 Clasificación de los lodos residuales por su contenido de patógenos o calidad microbiológica	52

3. SISTEMAS DE COMPOSTEO CON BIOSÓLIDOS 53
3.1 Composteo en filas o camellones 53
3.2 Composta aireada en camellón 54
3.3 Composteo en pila estática 56
3.4 Sistema de composteo en reactor 58

4. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE CON BIOSÓLIDOS 62
4.1 Sustrato 62
4.1.1 Naturaleza del sustrato 62
4.1.2 Tamaño de la partícula 62
4.2 El proceso 62
4.2.1 Temperatura 62
4.2.2 pH 62
4.2.3 Aireación 63
4.2.4 Humedad 63
4.2.5 Relación Carbono:Nitrógeno 63
4.3 El tipo de sistema 63
4.3.1 Sistema abierto 63
4.3.2 Sistema cerrado 63
4.4 Proceso de maduración de la composta 65
4.5 Algunos métodos para evaluar la madurez de la composta. 66
4.5.1 De observación 66
4.5.1.1 Olor 66
4.5.1.2 Temperatura estable 66
4.5.1.3 Color 66
4.5.1.4 Peso específico 66
4.5.2 De parámetros de la biomasa 68
4.5.2.1 Respirómetros 68
4.5.2.2 Parámetros bioquímicos de la biomasa de la biomasa de la composta 67
4.5.2.3 Identificación de grupos fisiológicos de microorganismos 67
4.5.3 De análisis químicos 67
4.5.3.1 Determinación de pH 67
4.5.3.2 Relación C:N 67
4.5.3.3 Determinación de la temperatura máxima de auto calentamiento 67
4.5.3.4 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico 67

5. FUNDAMENTOS DE ANÁLISIS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS REALIZADOS EN EL SUELO A REHABILITAR Y BIOSÓLIDOS A USAR. 68
5.1 El suelo 68
5.1.1 pH 68
5.1.2 Conductividad eléctrica 70
5.1.3 Densidad aparente 73
5.1.4 Densidad real 74
5.1.5 Porosidad del suelo 75
5.1.6 Humedad 76
5.1.7 Carbono orgánico total 77
5.1.8 Materia orgánica 79
5.1.9 Fosforo soluble 81
5.1.10 Nitrógeno total 83
5.1.11 Bacterias totales por dilución en placa 86
5.1.12 Hongos totales por dilución en placa 87
5.1.13 Prueba de índice de germinación de semillas 89
5.1.14 Determinación de textura (tamaño de partículas de los suelos) 90
5.2 Biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002) 93
5.2.1 Método para la determinación de Coliformes fecales 93
5.2.2 Método para la determinación de *Salmonella sp.* 98
5.2.3 Método para la determinación de Huevos de Helminto 103
5.2.4 Método para la determinación de Metales pesados 108

6. RESULTADOS Y DISCUSION 116
6.1 Biosólidos 116
6.2 Paja de Trigo 122
6.3 Suelo 123
6.4 Resultados obtenidos durante la fertilización del suelo durante 90 días de proceso a partir del 11 de abril al 09 de julio del 2011 128
6.5 Índice de germinación 145

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 153
7.1 Conclusiones 153
7.2 Recomendaciones 155

GLOSARIO 156

LITERATURA CITADA 167

ANEXOS 169
1. Caracterización del Suelo 169
Figura 44. Proceso para la Determinación de pH 169
Figura 45. Proceso para la Determinación de Conductividad eléctrica 170
Figura 46. Proceso para la Determinación de Densidad aparente 171
Figura 47. Proceso para la Determinación de Densidad real 172
Figura 48. Proceso para la Determinación de Porosidad en el suelo 173
Figura 49. Proceso para la Determinación de Humedad 173
Figura 50. Proceso para la Determinación de Carbono Orgánico total y Materia Orgánica total 174
Figura 51. Proceso para la Determinación de Fosforo soluble 175
Figura 52. Proceso para la Determinación de Nitrógeno total 175
Figura 53. Proceso para la Determinación de Bacterias totales por dilución en placa 177
Figura 54. Proceso para la Determinación de Hongos por dilución en placa 178
Figura 55. Proceso para la Determinación de textura 179
Figura 56. Proceso para la Prueba de germinación de semillas 181
2. Caracterización de Paja de Trigo 182
Figura 57. Proceso para la Determinación de Nitrógeno total 182
Figura 58. Proceso para la Determinación de Carbono Orgánico Total 183
Figura 59. Proceso para la Determinación de pH 184
Figura 60.Proceso para la Determinación de Humedad 185
3. Caracterización de Biosólidos 186
Figura 61. Proceso para la Determinación Coliformes fecales 186
Figura 62. Proceso para la Determinación de *Salmonella sp.* 187
Figura 63. Proceso para la Determinación de Sólidos totales y Sólidos totales volátiles 188
Figura 64. Proceso para la Fertilización del Suelo 189
NOM-004-SEMARNAT-2002 190

L I S T A D E T A B L A S

		Pág.
Tabla 1	Categorías de suelos encontradas en México de acuerdo a la clasificación internacional de suelos FAO/UNESCO/ISRIC	38
Tabla 2	Características de los lodos	45
Tabla 3	Clasificación de los lodos de acuerdo al contenido de metales	51
Tabla 4	Límites máximos permisibles aplicados en suelo	51
Tabla 5	Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH	69
Tabla 6	Ajuste de conductividad en función de la solución de KCl	71
Tabla 7	Factores de corrección de la conductividad eléctrica en función de la temperatura del extracto de saturación	71
Tabla 8	Criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad	72
Tabla 9	Interpretación de los resultados	80
Tabla 10	Interpretación de los resultados	82
Tabla 11	Criterios para evaluar un suelo con base en su contenido de nitrógeno total	85
Tabla 12	Relación de longitud y ancho de la banda para los elementos analizados por flama	110
Tabla 13	Relación de concentraciones para calibración del instrumento utilizando flama	111
Tabla 14	Relación de longitud y ancho de banda para los elementos analizados por generador de hidruros	112
Tabla 15	Relación de concentraciones para calibración del instrumento utilizando generador de hidruros	113
Tabla 16	Límites Permisibles para metales pesados en Biosólidos	116

Tabla 17	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y Biosólidos	117
Tabla 18	Aprovechamiento de Biosólidos	117
Tabla 19	Resultados Arrojados de Muestras de Biosólidos	118
Tabla 20	Resultados arrojados de Paja de Trigo usada como aditivo	122
Tabla 21	Resultados arrojados de la caracterización Suelo a rehabilitar antes de la adición de Biosólidos	123
Tabla 22	Registro de contenido de Coliformes fecales (NMP/g base seca)	138
Tabla 23	Registro de contenido de *salmonella sp.*	138
Tabla 24	Registro de contenido de metales (mg/l)	139
Tabla 25	Resultados arrojados del suelo una vez ya rehabilitado con la mezcla 3 seleccionada por mejor relación carbono/nitrógeno	140-141
Tabla 26	Elongación radicular de las semillas de trigo en testigos positivos y negativos así como en muestra de suelo ya rehabilitada por la proporción de la mezcla 3 elegida 50:100:50	146
Tabla 27	Numero de semillas germinadas de trigo en un lapso de 5 días en un testigo positivo usado como es el lodo usado para la fertilización, un negativo agua destilada y una muestra de suelo ya fertilizada con el lodo de testigo positivo	148
Tabla 28	Índice final de germinación de semillas de trigo en un lapso de 5 días de crecimiento a partir de un porcentaje de germinación relativo, y un crecimiento relativo de radícula, esto a partir de un testigo positivo que es el lodo y una muestra de suelo en una dilución en 10	150

L I S T A D E F I G U R A S

		Pág.
Figura 1	Esquema general de las fracciones que componen el suelo	34
Figura 2	Perfil general del suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas	35
Figura 3	Principales tipos de suelos en la República Mexicana	37
Figura 4	Elaboración de las filas o camellones por el método convencional	53
Figura 5	Elaboración de las filas o camellones por el método convencional	55
Figura 6	Esquema general del proceso de composteo en camellos	56
Figura 7	Tipos de sistemas de composteo en pila estática	57
Figura 8	Reactor de flujo vertical con cilindro de acero	59
Figura 9	Reactor de flujo horizontal	60
Figura 10	Reactor de contenedor agitado	61
Figura 11	Curva de Temperatura y pH del proceso de compostaje	64
Figura 12	Triangulo de textura del sistema de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)	92
Figura 13	Textura que presentan los lodos en el fondo del recipiente	120
Figura 14	Preparación de Biosólidos para su secado en horno a 105 ºC	120
Figura 15	Biosólidos secándose en el horno a 105 ºC	120
Figura 16	Realización de dilución de la muestra de Biosólidos para su análisis	121
Figura 17	Determinación de Nitrógeno total mediante el método Kjeldahl	121
Figura 18	Preparación de diluciones para la determinación de la presencia o ausencia de *salmonella sp.* y Coliformes fecales	121

Figura 19	Suelo a rehabilitar de tipo franco	124
Figura 20	Tamizado de suelo	124
Figura 21	Diversas texturas del suelo obtenidas una vez que han sido tamizadas, por diversos números de malla	125
Figura 22	Determinación de humedad, en el suelo	125
Figura 23	Determinación de pH y Conductividad, en el suelo a rehabilitar	125
Figura 24	Determinación de Materia orgánica y Carbono orgánico en el suelo a rehabilitar	126
Figura 25	Determinación de Nitrógeno total, en el suelo a rehabilitar	126
Figura 26	Dispositivo instalado para la determinación de Nitrógeno total	126
Figura 27	Registro de temperatura de las pilas durante 90 días del proceso de rehabilitación	128
Figura 28	Color presentado durante el proceso en las pilas	130
Figura 29	Olor presentado en las pilas durante el proceso de rehabilitación	131
Figura 30	Comportamiento del pH durante el proceso	132
Figura 31	Porcentaje de Humedad durante el proceso	133
Figura 32	Evaluación de Sólidos Volátiles durante el proceso	134
Figura 33	Comportamiento del Nitrógeno Total en las Mezclas	135
Figura 34	Comportamiento del Carbono Orgánico Total	136
Figura 35	Evaluación de la Relación Carbono/Nitrógeno en el proceso de fertilización	137
Figura 36	Composición y textura de las mezclas, las cuales están formadas por paja de trigo, Biosólidos y suelo, así como agua para conservar un cierto porcentaje de humedad	142
Figura 37	Mezcla 1	142
Figura 38	Mezcla 2	142
Figura 39	Mezcla 3	143

Figura 40	Relación de Elongación en semillas de trigo para Testigo de lodo usado como fertilizante en la muestra de suelo (R^2= 0.908), Testigo negativo con agua destilada (R^2= 0.861) y Muestra de Suelo ya fertilizado (R^2= 0.925)	147
Figura 41	Relación de Elongación en semillas de trigo para Testigo de lodo usado como fertilizante en la muestra de suelo (R^2= 0.992), Testigo negativo con agua destilada (R^2= 0.920) y Muestra de Suelo ya fertilizado (R^2= 0.974)	149
Figura 42	Índice de Germinación de Semillas de Trigo y relación % de Germinación Relativa, % de Crecimiento de Radícula Relativo para un lapso de 5 días a partir de una dilución usada de 10	151
Figura 43	Crecimiento de las semillas de trigo después del término de la maduración de la mezcla 3 elegida por mejor relación Carbono/Nitrógeno, después de 10 días de haber adicionado las semillas a la mezcla de suelo, y lodo	152
Figura 44	Proceso para la Determinación de pH	169
Figura 45	Proceso para la Determinación de Conductividad eléctrica	170
Figura 46	Proceso para la Determinación de Densidad aparente	171
Figura 47	Proceso para la Determinación de Densidad real	172
Figura 48	Proceso para la Determinación de Porosidad en el suelo	173
Figura 49	Proceso para la Determinación de Humedad	173
Figura 50	Proceso para la Carbono Orgánico total y Materia Orgánica total	174
Figura 51	Proceso para la Determinación de Fosforo soluble	175
Figura 52	Proceso para la Determinación de Nitrógeno total	176
Figura 53	Proceso para la Determinación de Bacterias totales por dilución en placa	177
Figura 54	Proceso para la Determinación de Hongos por dilución en placa	178
Figura 55	Proceso para la Determinación de textura	179
Figura 56	Proceso para la Prueba de germinación de semillas	181

Figura 57	Proceso para la Determinación de Nitrógeno total	182
Figura 58	Proceso para la Determinación de Carbono Orgánico Total	183
Figura 59	Proceso para la Determinación de pH	184
Figura 60	Proceso para la Determinación de Humedad	185
Figura 61	Proceso para la Determinación Coliformes fecales	186
Figura 62	Proceso para la Determinación de *Salmonella sp.*	187
Figura 63	Proceso para la Determinación de Sólidos totales y Sólidos totales volátiles	188
Figura 64	Metodología para la Fertilización del Suelo	189

A C R O N I M O S

%	Porcentaje
<	Menor
>	Mayor
Ag	Plata
Al	Aluminio
As	Arsénico
ATP	Adenosin Trifosfato
b.s.	Base seca
C	Carbono
C/N	Relación Carbono Nitrógeno
Ca	Calcio
Ca	Calcio
CEBAS	Centro de Edafología y Biología Aplicada de la Segura
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
Cl	Cloro
CO %	Porciento de carbono orgánico
CO_2	Monóxido de Carbono
Cr	Cromo
Cr_2O_7	Ion Cromato
CRETIB	Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Toxico, Inflamable, Biológico-Infeccioso
Cu	Cobre
Da	Densidad aparente
Dr	Densidad real
dS/m	Diciems sobre metro
dSiemens/m	Decisiems sobre centímetro
EPA	Environmental Protection Agency USA
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
Fe	Hierro
f_{MO}	Factor de materia orgánica
g	Gramos
gST	Gramos de sólidos totales
H	Hidrogeno
H	Numero de huevos
H_2S	Sulfuro de hidrogeno
H_2SO_4	Ácido Sulfúrico

$H_3P(Mo_3O_{10})_4$	Azul molibdofosfórico
H_3PO_4	Ácido fosfórico
Ha	Hectárea
HCl	Ácido Clorhídrico
Hg	Mercurio
INE	Instituto Nacional de Ecología
ISRIC	Mapa de Suelos del Mundo
K	Potasio
$K_2Cr_2O_7$	Dicromato de potasio
KCl	Cloruro de Potasio
Km^2	Kilómetros cuadrados
L	Litros
M	Molar
M.S.	Masa Seca
m^3	Metros cúbicos
Mg	Magnesio
mg/l	Miligramo por litro
mhos/cm	Milimhos sobre centímetro
ml	Mililitros
mm	Milímetros
mmhos/cm	Milimohos sobre centímetro
MO	Materia orgánica
mS/m	Milisiems sobre metro
mSiemens/m	Milisiems sobre centímetro
N	Nitrógeno
N	Normalidad
Na	Sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
NH_3	Amonio
NMX	Norma Mexicana
NO_3	Nitratos
NOM	Norma Oficial Mexicana
O	Oxigeno
O,A,E,B,C,R	Símbolos de horizontes del suelo
ºC	Grados Celsius
OH	Ion Hidroxilo
Ohm/m	Ohms sobre metro
P	Fosforo
Pb	Plomo
pH	Potencial de hidrogeno

ppm	Partes por millón
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
r	Radio
rpm	Revoluciones por minuto
S	Azufre
S/m	Siems sobre metro
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Si	Sílice
$SnCl_2$	Cloruro estañoso
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TEAO	Tasa Especifica de Absorción de Oxigeno
UFC/g	Unidades Formadoras de Colonias por gramo
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)
USEPA	United States Environmetal Protección Agency
UV	Luz visible
Zn	Zinc
λ	Longitud de onda

R E S U M E N

Un importante problema sobre la gestión de residuos es la disposición final que se le puede dar a los Biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales que dependen de sus características físicas, químicas y microbiológicas y que una vez estabilizados y que han cumplido con los requerimientos necesarios establecidos en Normas Oficiales Mexicanas pueden ser usados, en dos formas importantes: cuando son de tipo Excelente pueden estar en contacto directo con todo el público, cuando estos son solo de Buena calidad pueden ser aplicados a Usos forestales, Mejoramiento de suelos, y Usos Agrícolas. La aplicación de Biosólidos es una práctica ya establecida por muchos países del mundo, donde México no es la excepción.

A lo largo de esta investigación se plasma una forma de reusar a los Biosólidos obtenidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Tlalnepantla de Baz, en la cual estos son destinados a un relleno sanitario, mismos que son altamente ricos en Nitrógeno, Carbono, Fosforo, por lo cual se propone una forma de reúso rehabilitando un suelo con bajo perfil de nutrientes a través del uso de estos como fertilizante natural y usando paja de trigo como aditivo adicional para el aumento del contenido de Carbono. Para ello se caracterizó previamente el suelo rehabilitado, posteriormente se realizaron los análisis pertinentes para constatar que el Biosólido cumpliera con todas las características establecidas en la NOM-004-SEMARNAT-2002, para su reúso, posteriormente se procedió a la elaboración de tres mezclas que contenían tres diferentes proporciones de Suelo, Biosólidos y Paja de trigo .De las mezclas identificadas como uno, dos y tres, se selecciona la mezcla tres por ser la que posee mayor cantidad y calidad de moléculas esenciales para la fertilización del suelo. Durante esta fertilización se tomaron datos importantes sobre el comportamiento y control de las mezclas en cuanto a pH, Temperatura, Humedad, Color, Olor, Carbono Orgánico Total, Nitrógeno Orgánico Total entre otros, esto durante un periodo establecido de noventa días. Posteriormente se realiza una caracterización del suelo después de haber sido fertilizado con los Biosólidos.

Los resultados arrojados muestran que el suelo incremento en gran medida las concentraciones de las moléculas esenciales así como de elementos importantes para el desarrollo de características autóctonas del mismo.

Una vez finalizado el proceso se procedió a realizar el plantío de semillas de Trigo, en el suelo fertilizado de las cuales en un lapso de quince días, diez semillas sembradas crecieron en este sin ningún tipo de anomalía.

La Hipótesis establecida, pudo ser comprobada y se obtuvo un suelo con alto contenido de nutrientes, además de dar un uso sustentable a los Biosólidos en beneficio de suelos agrícolas.

Se espera que esta investigación contribuya de manera satisfactoria en posteriores ensayos en los cuales se desee incrementar el nivel de nutrientes a través del uso de Biosólidos, esperando y buscando siempre una mejora continua de las técnicas aquí desarrolladas para llevar a cabo el fin de fertilización del suelo buscado.

A B S T R A C T

A major problem of waste management is the disposition that can be given to biosolids from wastewater treatment that depend on their physical, chemical and microbiological and stabilized once they have met the necessary requirements set on Mexican Official Standards can be used in two important ways: when Excellent type may be in direct contact with the public, when they are only good quality can be applied to forest uses, soil improvement and agricultural uses. The application of biosolids is an established practice in many countries of the world, where Mexico is no exception.

Throughout this research is a form of plasma reuse the biosolids obtained from the Treatment Plant Wastewater Municipality of Tlalnepantla de Baz, in which they are destined for a landfill, they are highly rich in nitrogen, carbon, phosphorus, and therefore proposes a way to reuse rehabilitating soil with low nutrient profile through the use of these as natural fertilizer and wheat straw using additional additive for increasing the carbon content. This soil was characterized previously rehabilitated subsequently performed the necessary analysis to make sure the biosolids met all the characteristics in the NOM-004-SEMARNAT-2002, for reuse, then proceeded to the elaboration of three mixtures containing three different ratios of Soil, Biosolids and wheat straw. Of the identified mixtures as one, two and three, the mixture is selected to be the three that has a greater quantity and quality of essential molecules for soil fertilization. During the fertilization took important data and control the behavior of mixtures for pH, temperature, humidity, Color, Odor, total organic carbon, total organic nitrogen among others, this for a set period of ninety days. Then perform a soil characterization after being fertilized with biosolids.

The results show that the soil thrown greatly increased concentrations of essential molecules as well as important elements for the development of indigenous characteristics thereof.

Once the process is proceeded with the planting of wheat seeds in the fertilized soil of which over a period of fifteen days, ten seeds sown grew up in this without any anomaly. Hypothesis established, could be checked and obtained a soil high in nutrients, in addition to sustainable use of biosolids for the benefit of agricultural soils.

It is hoped that this research will contribute successfully in subsequent trials in which you want to increase the level of nutrients through the use of Biosolids, waiting and always seeking continuous improvement of the techniques developed here to carry out the purpose of fertilization land sought.

I N T R O D U C C I Ó N

Los Biosólidos de las plantas de tratamiento de agua residual han aumentado notoriamente en los últimos años. Esto ha generado la urgente necesidad de buscar alternativas para su disposición final, de tal forma que no constituyan un riesgo para la salud y el medio ambiente.

Los Biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrimentos, que son estabilizados mediante procesos biológicos, físicos o químicos para cumplir con estricto criterio de calidad y poder ser aplicados en suelos agrícolas.

El incremento en la cantidad de lodos producidos por los procesos de tratamiento de aguas residuales hace necesario encontrar un método económico y seguro para su disposición. Además este tipo de residuos orgánicos han sido considerados como agentes adecuados para el acondicionamiento de suelos y así mejorar la disponibilidad de algunos elementos nutritivos para los cultivos.

Una forma de reciclar benéficamente los Biosólidos es su utilización en la agricultura, lo que permite reducir el uso de fertilizantes químicos comerciales, ofrecer la oportunidad de proveer Nitrógeno a bajo costo para los cultivos, así como también suministrar otros nutrimentos a suelos calcáreos del desierto como: fosforo, fierro, zinc y cobre disponibles para las plantas. La adición de la materia orgánica de los Biosólidos aumenta la disponibilidad de nutrimentos, los cuales son fijados en este tipo de suelos. No obstante estos materiales presentan efectos potencialmente peligrosos al incorporarse al suelo, entre los cuales se encuentran la introducción de materiales pesados con la consiguiente posibilidad de circulación de la cadena alimenticia.

En el norte de México, donde los suelos son predominantemente calcáreos, existen 62 plantas de tratamiento de agua residual, que producen alrededor de 475,000 toneladas de Biosólidos, las cuales pueden utilizarse como fertilizante en los cultivos industriales y forrajeros en una superficie estimada de 10,000 hectáreas.

En el presente estudio, además de hacer una caracterización físico, química, biológica y toxicológica de los Biosólidos, de forma que pueda atribuírsele valor como fertilizante, se estudia también el efecto directo que produce la aplicación de este sobre un suelo agrícola, y calcáreo así como su efecto sobre el crecimiento de plantas de maíz.

E S T A D O D E L A R T E

En la última década se han realizado varios estudios acerca de la aplicación de Biosólidos como mejorador de suelos calcáreos, agrícolas y contaminados con diversos tipos de compuestos, tales como hidrocarburos, metales y residuos sólidos. Estos estudios se han realizado y aplicado en Estados Unidos de América, España, Chile, Venezuela y en México.

Según los estudios realizados, los resultados arrojados son beneficiosos en diversos tipos de suelos, con diversos Biosólidos. En resumen de estos se puede comentar lo siguiente:

En el año 2006, en la revista Medio Ambiente, **GARCIA AMADOR** publicó el artículo, **"El desarrollo en el uso de Biosólidos en el Noroeste de España"**, el cual indica los beneficios obtenidos al abonar con Biosólidos un plantío de una afinca de maíz forrajero, el cual fue evaluado y finalmente obtenido altos y abundantes plantíos de maíz.

Por otro lado en el año de 1993, en el Campo Experimental Delicias-INIFAP, México en Delicias Chihuahua, se publicó un estudio por, **HUGO RAUL URIBE MONTES** denominado, **"El uso de Biosólidos para incrementar la productividad de alfalfa"**, estudio en el cual se aplican Biosólidos en un cultivo de alfalfa misma que la producción de forraje seco se incrementó entre 17 y 31% en comparación con fertilización química.

Otro estudio importante es el del año 2006, en la revista Técnica pecuaria en México, por **JURADO GUERRA PEDRO**, denominado, **"Producción y Calidad de Forraje del ZACATE Navajita con la aplicación de Biosólidos en un pastizal semiárido de Jalisco"**, el cual indica que en pastizales áridos y semiáridos que presentaban una baja producción y calidad del forraje, se aplicaron Biosólidos a estos y se evaluó la altura y la germinación de la semilla, los resultados obtenidos fueron mayor altura y una germinación de semilla más rápida.

El siguiente articulo denominado, **"Efecto del uso de los lodos papeleros sobre las fracciones de níquel en suelos de la cuenca del lago de Valencia, Venezuela"**, que fue publicado en el año 2008, por **MARTINEZ YADIRA, RIVERO CARMEN y LOPEZ LILIANA**, que indica que al aplicar lodo proveniente de una planta papelera a un suelo contaminado con Níquel, se modificó las concentraciones de Níquel, para después ser aplicado en plantíos de maíz obteniendo resultados beneficiosos.

Otro estudio denominado **"Rehabilitación de un suelo contaminado con hidrocarburos mediante la aplicación de lodos"**, publicado en el año 2006 en la revista AIDIS de Ingeniería en Ciencias Ambientales, por **RAMIREZ GONZALEZ A., SALAZAR BAUTISTA G., E ARGUELLES ITURBE R.,** donde se evaluó la eficiencia de remoción de hidrocarburos a nivel laboratorio de un suelo contaminado, mediante la aplicación de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas, finalmente los resultados indican que existe una remoción de hidrocarburos en la fracción de diesel a las cuatro semanas de aplicación de lodos y tensoactivos, obteniendo una eficiencia de remoción del 67 al 73%.

En el año 2008 se publicó el artículo, **"Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas"**, por **ACOSTA G., YUDITH RAMIREZ, EDICCIO y GUTIERREZ EDIXON,** en la universidad de Zulia Venezuela, el cual nos indica que la aplicación de los Biosólidos en un suelo de tipo franco arenoso, favoreció las condiciones óptimas de materia orgánica, así como el buen funcionamiento de la acción bacteriológica del suelo. El lodo residual, además de actuar sobre el suelo como fertilizante órgano mineral, se comporta también como un material encalador. Así que el lodo favorece el cultivo del maíz.

En el artículo publicado por **TARANGO RIVERO HECTOR SOCORRO**, en 2006 denominado, **"Uso de Biosólidos en la nutrición del Nogal Pecanero"**, publicado en la ciudad de Delicias Chihuahua, México por la Universidad Autónoma de Chihuahua, y la cual indica que luego de tres años de aplicar Biosólidos en dosis 2.41, 2.76 y 3.10 T/Ha en base seca, a nogales de 8,9 y 10 años de edad respectivamente, en el concluye: a) los Biosólidos son eficientes como los fertilizantes en proveer nutrimentos a los nogales y en promover su crecimientos y producción; b) el único macro nutrimento que aumenta los Biosólidos de manera significativa en el suelo es el fosforo; c) los Biosólidos no incrementaron el contenido de metales pesados tóxicos en el suelo; d) el abono orgánico no aumento la concentración de metales pesados en el fruto; e) a los siete meses de la aplicación de los Biosólidos no se detectaron bacterias patógenos en el suelo ni en la nuez.

“El uso de los lodos sobrenadantes provenientes de las lagunas de estabilización como acondicionador del suelo”, publicado en el año 2007 en la universidad de Zulia en el centro de investigación del agua en Maracaibo Venezuela, por **BLANCO EDITH, CARDENAS, NIBIS BRAZHO,** concluye que el lodo en estudio contiene elementos esenciales para la vida vegetal como nitrógeno, fosforo y materia orgánica en porcentajes aceptables para su utilización como acondicionador de suelos y que la presencia de metales tales como Níquel, Cadmio y Cobre se encuentran por debajo de los límites permisibles y por lo tanto no hay ningún daño nocivo.

En el libro **“Tratamiento biológico de aguas de desecho”** del autor **MICHAEL A. WINKLER** (1996), podemos encontrar diversos métodos de deshidratación de lodos así como el uso de lodos como fertilizantes y otros procesos de aprovechamiento de los mismos.
En otro libro del autor **GLYNN HENRY J., GARY W.H.** en el año (1999), **“Ingeniería Ambiental”,** también se observan estudios sobre la aplicación de Biosólidos en terrenos.

“Planta de Compostaje de Biosólidos Investigación y Desarrollo en Barloche, Argentina”, en el año 2000 en un artículo publicado por **LAOS, F., MAZZARINO, M.J., SATTI, P., ROSELL, L., MOYANO, S., RUIVAL, M., MOLLER POULSEN, L.** en este trabajo se muestra como el contenido de metales pesados orgánicos traza y patógenos pueden ser factor importante en la aplicación de Biosólidos en suelos agrícolas.

Otro artículo importante es, **“Utilización agraria de los Biosólidos y su influencia en el crecimiento de plántulas de tomate”**, en el año 2008, por **UTRIA BORGES, E., CABRERA RODRIGUEZ, J.A., REYNANDDO ESCOBAR, I.M., MORALES GUEVARA, D., FERNANDEZ A.M. TOLEDO, E.,** en el cual se evalúa el óptimo crecimiento de la plántulas de tomate debido a la aplicación de Biosólidos, obteniendo un óptimo rendimiento de estas. El cual se publicó por la Revista Chapingo serie horticultura.

“Aprovechamiento de Biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos”, publicado por **JURADO GUERRA, P., LUNA LUNA, M., BARRETERO HERNANDEZ, R.,** en el año 2004 en donde se describen los tipos de Biosólidos, y se presentan datos sobre su contenido de nutrientes para las plantas y otros elementos potencialmente tóxicos y su variabilidad.

Otro artículo que pudiera aportar mucho en nuestra investigación se refiere a la alternativa de usar lirio acuático como una opción más de enriquecimiento al suelo, a parte de Biosólidos al suelo titulado **"Vermiestabilización de los lodos residuales y lirio acuático"** en el año 2006, publicado por **CARDOSO VIGUEROS, L., RAMIREZ CAMPEROS, E.**

En el libro del autor **HERNANDEZ MUÑOZ AURELIO** (1999), **"Depuración de aguas residuales",** podemos encontrar una gran cantidad de usos y aplicaciones de lodos en agricultura así como de fangos de diversos procesos.

En la tesis **"Alternativas de uso agrícola y forestal de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras",** de **EDUARDO SALCEDO PEREZ**, 2000 (Universidad Autónoma de Chapingo), se habla de cómo se lleva a cabo la aportación de nutrientes al suelo, en especial el Nitrógeno y de cómo las mejoras del suelo son impresionantes.

En la tesis **"Calidad Nutrimental de Compostas Elaboradas con Lodos Residuales"**, nos indica que a diferencia de los residuos de podas y estiércol, los lodos residuales tienen concentraciones superiores de N, P, K así como de micronutrientes, lo cual da una calidad inmejorable a los suelos agrícolas. Esta tesis fue publicada por **MARIA ROSA RENDON GARCIA** en Mayo del 2003, en la Universidad Autónoma de Chapingo.

Juana Labrador Moreno en su libro titulado **"La materia orgánica en los agro sistemas"**, (2001) nos muestra una semblanza sobre cómo actúa el compost en el suelo, los beneficios que este aporta, y los parámetros de control con los que debe cumplir el proceso de compostaje, como es el pH, temperatura mínima y máxima, así como los organismos coliformes fecales.

En la publicación de Romero López María del Roció, titulado **"Agricultura orgánica, elaboración y aplicación de abonos orgánicos"**, (2000) podemos encontrar los efectos que tiene la incorporación de la materia orgánica en los suelos, este libro cita varios autores y opiniones de los mismos sobre cuál es el porcentaje adecuado de cada parámetro nutrimental en los suelos, para su enriquecimiento con materiales orgánicos.

Morgan Warner Ingrid Catherine **“Estabilización de lodos de la piscicultura mediante compostaje”**, Universidad de la frontera, Facultad de ingeniería Ciencias y administración, Departamento de ciencias químicas, 2007 indica las principales proporciones de lodo, suelo y paja que pueden ser realizadas para poder fertilizar un suelo y como estas arrojan resultados óptimos en cuanto al nivel de nitrógeno, y carbono. Así como también la manera en la cual se deben controlar los parámetros para llegar a tener una composta en condiciones óptimas.

Todas las publicaciones citadas representan una parte fundamental de la línea de investigación que seguirá la siguiente tesis desarrollada, y en gran parte mucha de esta información genera la pauta para los diseños experimentales y diversos ensayos realizados con las mezclas elaboradas en proporciones Biosolido:Suelo:Paja, para la fertilización del suelo a ensayar con bajo perfil de nutrientes. Aunque cada publicación fue ensayada con diversos procedimientos de fertilización, y compostaje el fin y objetivo es común en todas estas, el cual representa la fertilización, acondicionamiento y mejora de un suelo y planta.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión de residuos es probablemente uno de tantos problemas medioambiental más importantes del siglo XXI. A medida que las sociedades se industrializan se genera como resultado de las distintas actividades, una serie de residuos que una solución sustentable. Por eso actualmente se fomentan las actividades de gestión de residuos, poniendo en este orden la reducción, reutilización, reciclado, y otras formas de valoración y finalmente la eliminación, la menos deseable.

Un importante problema sobre la gestión de residuos es la disposición final que se le puede dar a los Biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales municipales que dependen de sus características físicas, químicas y microbiológicas. El contenido de materia orgánica y su riqueza en elementos esenciales puede permitir que dichos Biosólidos sean usados como fertilizantes agrícolas, o acondicionadores de suelos contaminados con hidrocarburos, o de algunos metales tales como zinc o níquel.

Debido al problema ecológico y económico provocado por el intenso uso de fertilizantes minerales sintéticos, la agricultura mundial en los últimos años, está encaminado a lograr una agricultura sostenible sobre la base de obtener altos rendimientos con aplicación de bajos insumos de estos productos y ha revitalizado la idea de hacer uso de productos de origen orgánicos.

Además la idea de preservar el ambiente libre de contaminación exige la depuración de aguas residuales antes de ser vertidas a cauces receptores, generando en este proceso grandes cantidades de lodos o Biosólidos.

Es por ello que hoy en día se ha dado a la tarea de fomentar la búsqueda de nuevas tecnologías para la disposición final de Biosólidos, así como para el tratamiento de suelos contaminados y la fertilización óptima y económica de los suelos rehabilitados para que estos sigan siendo productivos y ricos en nutrimentos.

En esta investigación se desarrollará una caracterización física, química y microbiológica de los Biosólidos a utilizar, los cuales provendrán de diferentes plantas de tratamiento de aguas de diversos giros, así como también del suelo a fertilizar.

Durante la fertilización del suelo, se aplica en la recta final del proceso como evaluador semillas de trigo, frijol y girasol, con las cuales se observara el índice de germinación, se procederá a realizar todas las observaciones acerca de alguna anomalía así como también servirán como testigo de los beneficios proporcionados.

Finalmente al cabo de la fertilización se llevará a cabo nuevamente la caracterización del suelo en estudio para verificar el cumplimiento del objetivo principal del proyecto.

O B J E T I V O G E N E R A L

- Rehabilitar un suelo con bajo perfil de nutrientes a través del uso de Biosólidos como fertilizante natural y paja de trigo como aditivo adicional.

O B J E T I V O S
E S P E C Í F I C O S

1. Determinar la relación adecuada de Carbono:Nitrógeno para la satisfactoria fertilización del suelo, así como la mejor mezcla.

2. Verificar el perfil agrícola del suelo mediante la aplicación de semillas de trigo.

3. Obtener un suelo con alto contenido de nutrientes.

4. Caracterizar el suelo antes y después de su rehabilitación.

H I P O T E S I S

La aplicación de Biosólidos, y paja de trigo al suelo favorecerá las condiciones óptimas de materia orgánica, pH, y nutrientes garantizando la acción bacteriológica del suelo, además de actuar sobre este como un fertilizante orgánico.

J U S T I F I C A C I Ó N

En la actualidad y debido a nuevas políticas medioambientales ha ido en aumento la valorización y reutilización de todos aquellos Biosólidos sobre su eliminación. La utilización de Biosólidos puede ayudar a que estos no sean enviados a un relleno sanitario, y que puedan ser usados alternativamente en sectores tan importantes como es la agricultura y la ganadería. Ya que de antemano sabemos que en los últimos tiempos la explotación y contaminación de los suelos para el desarrollo y producción de alimentos a nivel mundial van de la mano, lo que hace de suma importancia el cuidado e investigación de estos en nuestro país

Por esta razón es necesario presentar nuevas alternativas en cuanto a diversos tipos de contaminación, pues nuestros suelos son pieza fundamental en el desarrollo, explotación e innovación de productos alimenticios que pueden ser obtenidos de manera natural, transgénica o mediante otras técnicas Biotecnológicas establecidas.

Los Biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrimentos, derivados del tratamiento de aguas negras residuales, los que deberán ser estabilizados mediante un proceso biológico, físico o químico y cumplir con un estricto criterio de calidad para que puedan ser aplicados en suelos agrícolas. Una forma de reusar benéficamente los Biosólidos es su utilización en la agricultura, lo que permite reducir el uso de fertilizantes químicos comerciales, ofreciendo la oportunidad de rehabilitar un suelo a bajo costo para los cultivos y también suministrar otros nutrimentos a los suelos calcáreos del desierto como: fosforo, fierro, zinc y cobre disponibles para las plantas. La aplicación superficial de Biosólidos da como resultado un mejoramiento en las características físicas y químicas de los suelos, cuyo enriquecimiento nutrimental satisface parcialmente los requerimientos de fertilización.

El uso agrícola de los Biosólidos es una práctica establecida y aceptada en muchos países del mundo. En California, Estados Unidos de América, se utiliza en tierras agrícolas 52% de los Biosólidos producidos que equivalen a 390,000 toneladas por año en base seca. En la ciudad de Chihuahua, México se opera desde 1995 una planta tratadora de aguas residuales, la cual generan mensualmente 12,200 toneladas de Biosólidos que han sido digeridos anaeróbicamente, mismos que son aplicados como fertilizantes a suelos de la región. Por ello es de suma importancia el estudio de los Biosólidos y el planteamiento de mejores y nuevas técnicas para su uso sustentable.

1 EL SUELO

El suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por material mineral orgánico, líquidos y gases, que se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciales, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad (Volke *et al*., 2002a).

1.1 Funciones del suelo en la naturaleza.

Reactor natural. El suelo es elemento filtrante, amortiguador y transformador, que regula los ciclos de agua y los biogeoquímicos. Tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción contribuyendo a la protección de aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos.

Hábitat de organismos y reserva genética. El suelo constituye, junto con el agua, el aire, y la luz solar, el fundamento de la vida en los ecosistemas terrestres, alberga una gran diversidad de organismos y microorganismos.

Soporte físico de infraestructura. Por sus características físicas, químicas y mecánicas, el suelo posee propiedades de soporte para el desarrollo de actividades forestales, recreativas y agropecuarias, además de socioeconómicos como vivienda, industria y carreteras, entre otras. Es también fuente de materiales no renovables como son minerales no metálicos de interés para la construcción y combustibles fósiles como el petróleo (Volke *et al.*, 2002a).

1.2 Composición del suelo.

El suelo es una mezcla compleja de materiales inorgánicos (fracción mineral, formada principalmente de arcillas, limo y arena), materia orgánica, agua/aire y organismos vivos **(Figura 1).** A continuación se describe brevemente cada una de estas fracciones.

a) Fracción mineral. Los componentes minerales constituyen la mayor parte de la estructura de un suelo (figura1). En orden de abundancia, los elementos más abundantes en los minerales son: O>Si>Al>Fe>C>Ca>K>Na>Mg>Ti. Los minerales se dividen en primarios y secundarios; los primeros se encuentran constituidos principalmente por O y Si forman silicatos de estructuras Si-O (grava-arena). Los minerales secundarios, provenientes de procesos de disolución y precipitación, son de suma importancia debido a su superficie de reacción, y que sirven como depósitos de agua, nutrientes y materia orgánica, lo que le confiere la parte activa de un suelo (arcillas).

Los suelos se clasifican, en función de su tamaño de partícula, en cuatro principales componentes: arcilla (tamaño de partícula menor a 0.002 mm), limo (0.002-0.05 mm), arena (0.05-2 mm) y grava (partículas mayores a 2 mm). Las cantidades relativas de cada tipo de partícula mineral determinan la textura de un suelo y tienen un impacto directo sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

b) Fracción orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, además de cantidades variables de materia orgánica amorfa llamada humus. La fracción orgánica en un suelo puede ser muy variable: un suelo árido puede contener cerca de 0.5%, mientras que una turba puede tener alrededor de 95%; sin embargo, la mayoría de los suelos, en general, tiene un contenido de materia orgánica entre 0.5 y 5%.

c) Fracción agua/gases. Los espacios, o poros, que hay entre partículas sólidas orgánicas e inorgánicas del suelo, contienen diversas cantidades de dos componentes inorgánicos clave: el agua y el aire. El agua es el principal componente líquido de los suelos y contiene sustancias minerales, oxígeno y bióxido de carbono en disolución, mientras que la fase gaseosa en los suelos está constituida por aire. Dependiendo del contenido de humedad del suelo, los poros se encontraran ocupados por agua o por aire **(Figura 1)**.

Los componentes de los suelos maduros se encuentran dispuestos en una serie de zonas llamadas horizontes **(Figura 2).** El arreglo de estos horizontes en un suelo se conoce como perfil edáfico o perfil del suelo. Cada horizonte se caracteriza por tener diferentes propiedades como color, textura, estructura, espesor y composición (tipo de minerales y elementos químicos presentes), además de su consistencia y reacción. Todas estas propiedades son utilizadas para definir los tipos de horizontes, de los cuales se han identificado a la fecha seis, simbolizados con las letras O, A, E, B, C y R.

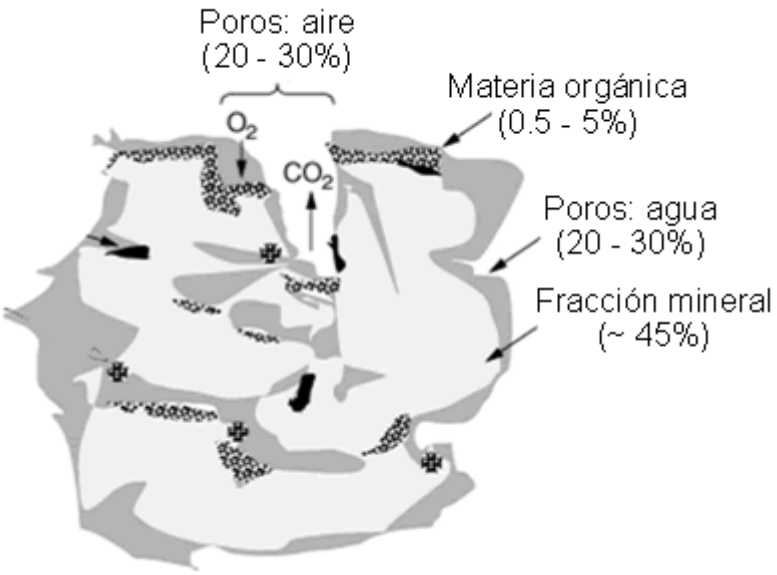


Figura 1. Esquema general de las fracciones que componen el suelo. (Volke et al., 2002a)

La mayoría de los suelos maduros posee, al menos tres de los horizontes (A, B y C), pero los suelos recientes o poco desarrollados pueden carecer de ellos. Algunos suelos tienen una capa orgánica horizonte O, compuesta principalmente por hojas, desechos animales, hongos y otros materiales orgánicos parcialmente descompuestos. El horizonte A, comúnmente es una mezcla poroso de materia orgánica descompuesta (humus), organismos vivos y algunas partículas minerales. El horizonte E, es una capa mineral de color claro, en la que ocurren perdidas de arcilla, minerales y cationes por lixiviación, generándose una acumulación de arena y limo. Los horizontes B (subsuelo) y C (material parental parcialmente descompuesto), son los que contienen la mayor parte de la materia inorgánica del suelo. El horizonte B contiene depósitos de arcillas y minerales (aluminio, óxidos de aluminio y carbonato de calcio) que recibe de las capas más superficiales por efecto de escurrimientos; el horizonte C en su mayor parte, es roca disgregada en forma de mezclas variables de arena, arcilla y grava, que contienen un mínimo de material orgánico; este horizonte, normalmente descansa sobre un lecho de roca (material parental) denominado con letra R, el cual no es considera como suelo (Volke *et al.*, 2002a).

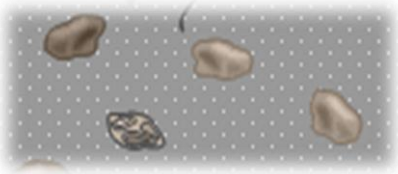
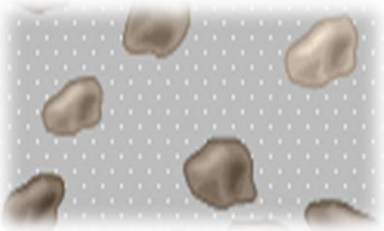
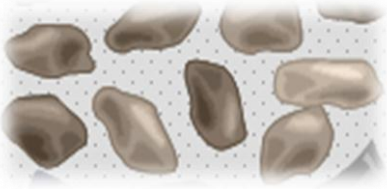
Horizonte O		Estrato superficial: detritos orgánicos, hojas, materia orgánica parcialmente descompuesta.
Horizonte A		Suelo superficial: materia orgánica parcialmente descompuesta, humus, raíces, organismos vivos y minerales.
Horizonte E		Zona de lavado infiltración: es una capa mineral que presenta lixiviación de minerales, arcillas y cationes, acumula partículas de arena y limo.
Horizonte B		Subsuelo zona de acumulación: capa mineral donde se acumulan arcillas, óxidos de hierro y aluminio, así como compuestos húmicos y los cationes lixiviados del horizonte A.
Horizonte C		Material parental parcialmente descompuesto regolita: compuesta pos sedimentos y fragmentos de roca, presenta sílice, carbonatos y yeso.
Horizonte R		Material parental: compuesta de rocas y difícil de penetrar.

Figura 2. Perfil general del suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas. (Volke et al., 2002a)

1.3 Tipos de suelo en México.

La clasificación internacional de los suelos, de acuerdo al sistema FAO/UNESCO/ISRIC de 1988, (FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación), (UNESCO- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), (ISRIC-Mapa de Suelos del Mundo), divide a los suelos en unidades o categorías de acuerdo a ciertas características generales, como su morfología y composición, con énfasis en las propiedades que se pueden medir, por ejemplo, la profundidad, el color, la textura, la estructura y la composición química, así como las características de los horizontes, junto con el grosor, número y naturaleza de las capas, entre otros factores.

De acuerdo con esta clasificación de los suelos actualmente, existen 28 unidades principales y 153 subunidades. De estas 28 categorías reconocidas en el mundo, en México se encuentran presentes 25 y 10 de ellas conforman el 74% de la superficie nacional. Las tres categorías dominantes en el territorio, en términos de superficie, son los Leptosoles, Regosoles y Calcisoles **(Tabla 1).**

El territorio mexicano abarca 1, 953,162 Km^2 y está distribuido, casi por partes iguales, a ambos lados del trópico de cáncer. El perímetro del país es de 15,518 Km, de los cuales 11,208 Km son litorales y 4,310 Km fronteras. Debido a la compleja historia geológica de la superficie terrestre, a los diferentes factores ambientales, fisiográficos, climáticos y biológicos, el país presenta gran diversidad de suelos (Volke *et al.,* 2002b).

En la **(Figura 3)** podemos observar los principales tipos de suelos en la República Mexicana.

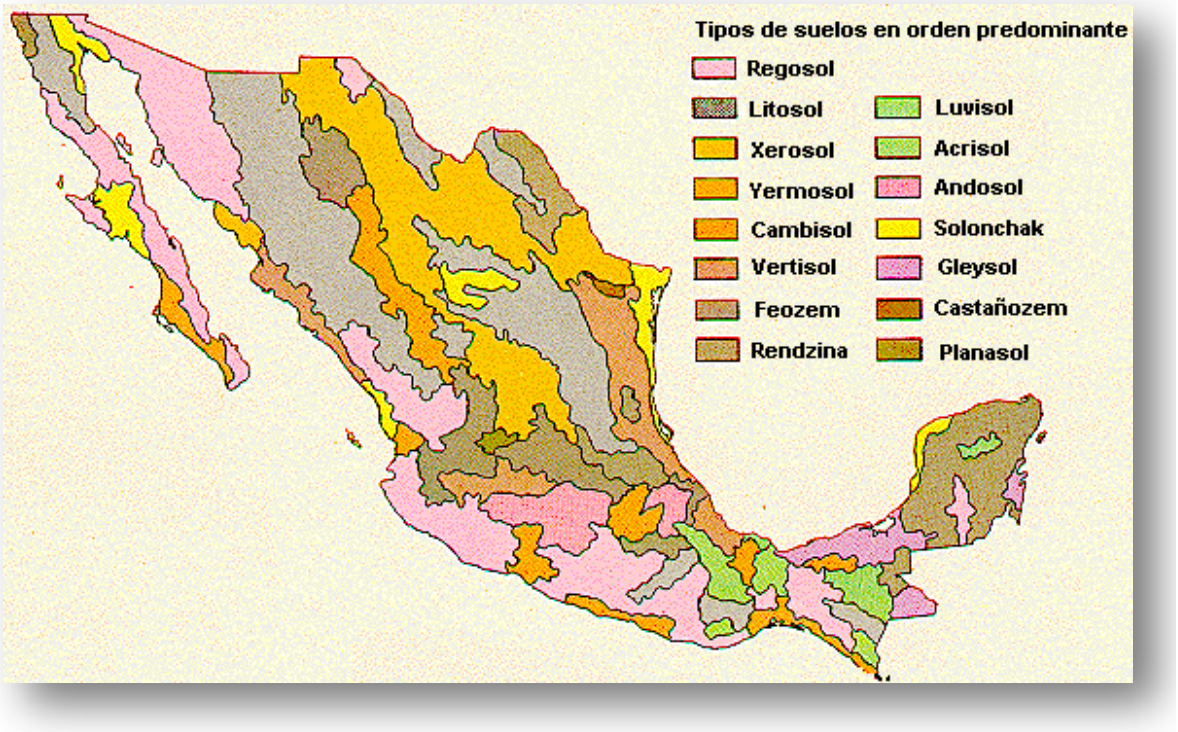


Figura 3. Principales tipos de suelos en la República Mexicana
Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Cartas Edafológicas, escala 1:1000 000, y 1:250 000, México 2007

Tabla 1. Categorías de suelos encontradas en México de acuerdo a la clasificación internacional de suelos FAO/UNESCO/ISRIC
****CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico***
Fuente: Semarnat 2004a
(Volke et al., 2002b)

CATEGORIA	CARACTERISTICAS	SUPERFICIE OCUPADA	
		Km^2	%
Leptosoles	Suelos muy delgados (espesor <30 cm sobre roca dura.	467,978	23.9
Regosoles	Suelos en formación a partir de material consolidado sobre roca madre.	361,335	18.5
Calsisoles	Suelos con alto contenido de calcio $CaCO_3$. Suelos saturados de bases, hasta 125 cm.	355,475	18.2
Feozems	Muy fértiles. Presentan una superficie oscura.	189,457	9.7
Vertisoles	Suelos con alto contenido de arcilla >35% hasta 50 cm.	162,112	8.3
Arenosoles	Suelos con alto contenido de arena 125 cm.	121,096	6.2
Cabisoles	Suelos con poco desarrollo de color claro, presentan cambios de estructura o consistencia por intemperización.	91,799	4.7
Luvisoles	Suelos con arcillas, saturados en bases con alta CIC*, en cualquier clima, excepto tropical y subtropical.	46,876	2.4
Gleysoles	Suelos con saturación de agua permanente.	29,297	1.5
Alisoles	Suelos con alto contenido de aluminio, solo se encuentran en climas tropicales y subtropicales.	29,297	1.5
	Otras	98,440	5.0
	Total	1,953,162	100.0

1.4 Descripción y definición de un suelo con bajo perfil de nutrientes.

En sistemas de cero laboreo la mineralización de la materia orgánica del suelo se ve reducida, y la no incorporación de los residuos enlentece la mineralización de los mismos. La magnitud del enlentecimiento en la mineralización de residuos dependerá de la cantidad de residuos, del tipo de residuos tanto en su forma física (tamaño, densidad y diámetro) como en su composición química (relación Carbono/Nitrógeno, contenido de lignina, etc.), y de las condiciones climáticas. El aumento en los requerimientos de fertilizante nitrógeno se debe no sólo a la menor mineralización de los restos y de la materia orgánica del suelo, sino también a la inmovilización de nitrógeno ya que en los primeros años usualmente hay una ganancia neta de materia orgánica del suelo. La inmovilización del Nitrógeno proveniente del fertilizante es más acentuada cuando este es aplicado en superficie (Bohn, 1993).

1.5 Lixiviación de nitrógeno.

La mayor infiltración de lluvias, el mayor almacenaje de agua en el perfil, junto a la menor evaporación resultan en un aumento en el potencial de lixiviación de nitratos. Por otro lado, el cero laboreo conduce a largo plazo a una mayor cantidad y continuidad de macroporos (poros realizados por mesofauna y canales dejados por raíces) lo que unido a la mayor infiltración aumenta el riesgo de pérdidas por lixiviación a través de flujo preferencial de fertilizantes aplicados sobre la superficie del suelo (Bohn, 1993).

1.6 Desnitrificación.

Como es esperable debido a la mayor humedad, a la menor fluctuación de la temperatura diaria, y la mayor acumulación de residuos orgánicos en la superficie del suelo, usualmente hay mayor actividad microbiana en superficie de los suelos bajo cero laboreos comparados con suelos bajo laboreo convencional. Normalmente hay también una mayor presencia de bacterias anaerobias lo cual resulta en menor potencial de oxidación y mayores pérdidas de NO_3 por desnitrificación en suelos no laboreados (Bohn, 1993).

1.7 Volatilización de Amonio.

Así mismo, las oportunidades de incorporación de fertilizantes nitrogenados en el suelo debajo de la capa de residuos se ve limitada en este sistema, por lo cual las pérdidas por volatilización de NH_3 cuando se aplican fertilizantes amoniacales en superficie se ven incrementada. Esto es especialmente importante al aplicar urea ya que produce un pH alcalino en la zona de disolución (Bohn, 1993).

1.8 Aplicación de Fertilizantes Nitrogenados.

Si bien las pérdidas de Nitrógeno asociadas a impactos de mineralización de materia orgánica pueden verse reducidas en cero laboreo (ya que se elimina el impacto de mineralización producido por el laboreo cuando no hay cultivos creciendo y absorbiendo nitrógeno), la forma, fuente y momento de aplicación de fertilizantes toma mayor relevancia para aumentar su eficiencia al aumentarse las potenciales pérdidas de eficiencia por inmovilización de fertilizantes en superficie, volatilización de NH_3 y lixiviación de NO_3 (Bohn, 1993).

1.9 Dosis de fertilizante Nitrogenado.

La dosis de fertilizante Nitrógeno a agregar a un cultivo debe determinarse en base a la diferencia existente entre lo requerido por el cultivo y lo suministrado por el suelo. El fertilizante a agregar es un complemento a lo que aporta el suelo. ***Acosta et al 2008,*** muestran mayores respuestas al agregado de nitrógeno al inicio de un sistema. Sin embargo reportó, en 11 ensayos de trigo en sistemas con más de tres años de siembra directa, una respuesta muy variable a la fertilización nitrogenada, con sitios con respuestas de más de 30 kg de trigo por unidad de nitrógeno y sitios sin respuesta. Estas variaciones en respuesta se relacionaron con cultivo anterior, años de instalado el sistema de siembra directa, y con indicadores objetivos cuantitativos de suelo ($N\text{-}NO_3$ a siembra temprana).

Las herramientas de diagnóstico y los valores de niveles críticos usados para decidir la dosis de fertilizante nitrogenado a agregar no parecen verse influidas por el sistema de laboreo para $N\text{-}NO_3$ en el suelo al estado de 6 hojas en maíz independiente del sistema de laboreo.

Las menores temperaturas del suelo tienden a retrasar la germinación, emergencia, y crecimiento temprano de los cultivos. Esto indicaría que el fraccionamiento del fertilizante nitrogenado sería más importante para mejorar el uso del fertilizante al acompasar la disponibilidad de nitrógeno con los mayores requerimientos del cultivo (Bohn, 1993).

1.10 Forma de aplicación y fuente.

Debido a las mayores probabilidades de pérdida de nitrógeno en cero laboreos en aplicaciones en cobertura sobre la superficie del suelo sería conveniente la aplicación de fertilizante nitrogenado localizado incorporado por debajo de la capa de residuos. Esta localización disminuiría las pérdidas de eficiencia por inmovilización en los residuos, volatilización de amonio y lixiviación por flujo preferencial. Esta localización mejoraría además la disponibilidad posicional del fertilizante, al aplicarse cerca de las raíces del cultivo. En el caso de no disponer de implementos para esta aplicación localizada cerca de la semilla (o de la planta en el caso de fraccionamientos), podría ser conveniente la aplicación de NO_3, NH_4 en vez de urea para reducir posibles pérdidas por volatilización de amonio, si el aumento en eficiencia justifica el mayor costo de la unidad de Nitrógeno proveniente de esta fuente (Bohn, 1993).

1.11 Nutrientes no móviles: fósforo y potasio.

La falta de incorporación de las aplicaciones en superficie de fertilizantes fosfatados y potásicos y de los residuos de los cultivos, junto con el reciclaje de nutrientes a través de la absorción de los cultivos desde capas más profundas del suelo produce estratificación de estos nutrientes inmóviles en la superficie del mismo. Esta estratificación junto a cambios en las relaciones cantidad/intensidad en profundidad (derivados de los cambios en pH, materia orgánica, etc.) resultan en que los cultivos presentan una alta dependencia de estos nutrientes concentrados en los primeros centímetros de suelo.

Existe preocupación de que la acumulación de Fosforo y Potasio cerca de la superficie puede resultar en menor disponibilidad para las plantas dado la mayor probabilidad de condiciones secas del suelo en superficie. La ocurrencia de déficit de agua en los primeros centímetros de suelo dependerá no sólo de las condiciones climáticas, sino también y en gran medida de la cantidad y tipo de residuos en superficie que afectarán la tasa de evaporación.

El éxito de la aplicación en superficie ha sido atribuido al incremento en la actividad radicular en esta zona de alta fertilidad debido al alto contenido de humedad del suelo bajo la capa de residuos vegetales y la adecuada lluvia recibida durante la estación de crecimiento.

Sin embargo, si la superficie del suelo se seca las raíces se vuelven inactivas, los nutrientes reducen su disponibilidad y la absorción por los cultivos se verá reducida, especialmente si las capas más profundas del suelo poseen baja disponibilidad de nutrientes. La estratificación de nutrientes inmóviles puede ser un problema significativo en zonas más secas (particularmente para potasio). La ubicación profunda de los fertilizantes fosfatados y potásicos sería deseable luego de varios años de continuo cero laboreo para proveer estos nutrientes a las raíces que crecen más profundo en el perfil del suelo (Bohn, 1993).

1.12 Importancia y fundamento de los análisis físicos, químicos, microbiológicos del suelo para su caracterización antes y después de la aplicación de los biosólidos

El suelo constituye un recurso natural que se desempeña diversas funciones en la superficie de la tierra, proporcionando un soporte mecánico así como nutrientes para el crecimiento de plantas y micro-organismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. Los materiales minerales son principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25 a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1%. A continuación se describen algunos de los datos del suelo, que pueden obtenerse con relativa facilidad y que controlan la eficiencia de una tecnología de fertilización.

1.12.1 Tamaño de la partícula. Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (<0.002 mm), los sedimentos (0.002-0.05 mm) y las arenas (0.05-2.0 mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación y fertilización.

1.12.2 Heterogeneidad. Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías in situ que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes.

1.12.3 Densidad aparente. Es el peso del suelo por unidad de volumen incluyendo espacios y agua. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material.

1.12.4 Permeabilidad. Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías in situ. Una baja permeabilidad disminuye la eficiencia de la aplicación de cualquier técnica de remediación.

1.12.5 pH. El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo. La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

1.12.6 Humedad. La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de tecnologías de remediación de suelos, así como provocar problemas durante la excavación y transporte.

1.12.7 Materia orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías (Volke *et al*., 2002a).

2 BIOSÓLIDOS

2.1 Definición y Descripción.

Según lo establecido por la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos o biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Un biosólido es un lodo que ha sido sometido a estabilización y por su contenido de materia orgánica; y nutrientes así como características adquiridas después de su estabilización puedan ser susceptibles de aprovechamiento (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales generan un subproducto ya denominado como biosólido, el cual es un material semisólido, oscuro, con alto contenido de materia orgánica y nutriente, que puede ser utilizado como abono en suelos deteriorados. Para su utilización deben ser declarados como no peligrosos para el ambiente, en base a un análisis CRETIB (corrosivo, reactivo, explosivo, toxico, inflamable y biológico-infecciosos).

Los biosólidos pueden ser de tipo doméstico o industrial, dependiendo de la procedencia de las aguas residuales, donde los primeros contienen menos contaminantes; también pueden ser de tipo aeróbico cuando se realiza un tratamiento de digestión con bacterias, y de tipo anaeróbico, donde se disminuye la cantidad de patógenos. Pueden ser líquidos, deshidratados o secos, de acuerdo al contenido de humedad.

Estos contienen un alto porcentaje de humedad, materia orgánica y nutrimentos para las plantas como Nitrógeno y Fosforo; sin embargo su composición varia diario y de manera estacional, aun dentro de una misma planta de tratamiento. También pueden contener metales pesados tales como Cadmio, Cromo y Plomo y algunos otros microorganismos patógenos y algunos compuestos tóxicos para el uso del suelo en las plantas. En la **(Tabla 2)**, se muestran las características típicas de los lodos (Hernández, 1999).

2.2 Disposición final y uso.

Las tres opciones más importantes para el uso y la disposición final de los biosólidos son la confinación en rellenos sanitarios, la incineración, y la reutilización en la agricultura y bosques. La disposición en rellenos sanitarios y la incineración, a pesar de su viabilidad, representan un riesgo de contaminación para el suelo, las aguas subterráneas y el aire, además de que representan un desperdicio de nutrimentos, que pueden ser reutilizados en la agricultura o bosques.

En la actualidad la aplicación de biosólidos a tierras agrícolas, de bosques y de pastizales es recomendable y benéfica (Hernández, 1999).

Tabla 2. Características de los lodos (Hernández, 1999)

Características	Lodo primario fresco	Lodo secundario	Lodo digerido primario y secundario
Peso de M.S. por habitante y día (g M.S./hab.dia)	30-36	18-29	31-40
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
Contenido orgánico (% de M.S.)	70-80	80-90	55-65
Grasas (% de M.S.)	12-16	3-5	4-12
Proteínas (% de M.S.)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (% de M.S.)	8-10	6-8	5-8
pH 5.6-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6	
Fosforo (% de M.S.)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Nitrógeno (% de M.S.)	2-5	1-6	3-7
Bacterias patógenas (NMP/100 ml)	10^3-10^5	100-1000	10-100
Organismos parásitos (NMP/100 ml)	8-12	1-3	1-3
Metales pesados (Zn, Pb, Cu % de M.S.)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

2.3 Los lodos residuales como fertilizantes.

El alto contenido de materia orgánica de los lodos, podría hacer que se consideren a primera vista, como fertilizantes ideales, aunque los lodos de aguas negras se utilizan como fertilizantes tienen limitaciones. Los lodos pierden progresivamente su contenido de Nitrógeno y Fósforo, según se reduce su contenido de agua lo que da como resultado proporciones de Nitrógeno, Fosforo y Potasio bajos, con una concentración alrededor del 3%. Los lodos tienen un valor fertilizante más alto cuando se utilizan en la fase liquida. Otra limitación es el hecho de que la capacidad de adsorción de estos hace que los lodos acumulen metales pesados en los mismos. Como los metales pesados permanecen junto a los sólidos de los lodos, su concentración aumenta según se reduce progresivamente el contenido de agua. Se ha demostrado que algunos organismos sobreviven la digestión anaeróbica pero se puede contrarrestar con el acondicionamiento térmico el cual es muy efectivo en este respecto.

Los lodos producidos en procesos de tratamiento residual representan una enorme cantidad de biomasa potencialmente valiosa. La composición de abonos con lodos crudos filtrados proporciona un material orgánico estable, semejante al humus, que se puede utilizar como acondicionador del terreno y como fuente de nutrientes para las plantas. Se hace pasar aire a través de pilas de tortas de filtro y el calor generado por el proceso destruye los organismos causantes de enfermedades (Rendón, 2003).

2.4 Los biosólidos y su acción sobre el suelo agrícola.

Los lodos proporcionan al suelo agrícola materia orgánica y nutrientes. La proporción de materia orgánica en el lodo seco y su contenido de nutrientes dependen de la procedencia de estos, así como de haber sido previamente estabilizados por digestión aeróbica o anaeróbica.

Un lodo liquido procedente de un tratamiento primario y secundario contienen entre 1 y 6.6% de nitrógeno, y entre 0.6 y 2.5% de fosforo sobre el peso total de los sólidos. Los lodos digeridos y secados al aire ven reducidos dichos contenidos al 2% de nitrógeno y al 1.5 de fosforo.

La materia orgánica de los lodos varía del 1 al 5 % del peso de sólidos contenidos en los mismos. Las cantidades de lodo aplicadas entre 200 y 500 m^3/Ha, han sido aplicadas sin ningún problema, aunque en climas húmedos para evitar la escorrentía superficial del lodo, la cifra debe ser limitada a los 200 m^3/Ha.

Además de nutrientes y materia orgánica el lodo aporta al suelo una gran cantidad de micronutrientes, el arsénico, cadmio, plomo, mercurio y níquel pueden tener un efecto perjudicial, si la dosis es demasiada alta.

Los principales elementos tóxicos que pueden ser aportados por los lodos son precisamente los metales pesados como: el cromo, níquel, cobre, zinc, arsénico, molibdeno, cadmio, mercurio y plomo, los estudio demuestran que el cadmio y el mercurio son los más peligrosos de estos metales. En aquellos lugares, en que la aplicación del lodo es continua, deben establecerse análisis fisicoquímicos continuos para determinar la susceptibilidad del terreno al incremento delos metales señalados.

Otro problema puede ser la presencia de organismos patógenos. En general los lodos suficientemente tratados poseen un contenido bajo en organismos patógenos. Tras la digestión anaerobia, sobre todo, si se acumulan y almacenan los lodos durante algún tiempo antes de su aplicación al terreno, las posibilidades de enfermedades inducidas por los lodos son muy remotas. Cuando el lodo se aplica líquido debe limitarse el cultivo a vegetales, que no se consumen crudos o que no están en contacto con el suelo, y también debe excluirse la presencia de animales en pastos a los que se aplica lodo líquido. Los principales patógenos que se pueden encontrar en el lodo son bacterias como la *Salmonella spp*. Nematodos como la *Ascaris lumbricoides*, enterovirus y parásitos como la *Tenia solium*. Hay que tener en cuenta que la reducción de *Escherichia coli* seguida en el tratamiento, no es correlacionable con la reducción de todos estos patógenos, por lo que no se puede tener una garantía completa de la ausencia de los mismos sin establecer unos análisis específicos (Rendón, 2003).

2.5 Reglamentación sobre el uso de los Biosólidos.

La Norma Oficial Mexicana **NOM-004-SEMARNAT-2002**, **Protección Ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final (Anexo)**. Establece los límites en la concentración de algunos elementos en los biosólidos que se aprovechan en terrenos con fines agrícolas, incluyendo pastizales. En general, los biosólidos para usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas deberán cumplir con las concentraciones indicadas para los biosólidos de tipo “buenos” y de clase C. Por lo tanto, el aprovechamiento de biosólidos se establece en función del tipo y clase y su contenido de humedad hasta el 85%.

Por otro lado la **USEPA** (United States Environmetal Protection Agency) recomienda realizar las siguientes prácticas de manejo para el uso de biosólidos en agricultura, incluyendo pastizales: 1) no aplicar biosólidos en lugares que contengan una planta amenazada o en peligro de extinción; 2) restricción en sitios inundados, congelados o cubiertos de nieve para evitar contaminación de agua; 3) no aplicar biosólidos a una distancia de 10 m o menos de cualquier fuente de agua; 4) no exceder la dosis agronómica de Nitrógeno; 5) etiquetar envases y contenedores de biosólidos (Rendón, 2003).

2.6 Tipos y posibles procedencias de biosólidos para su uso y aplicación de estos como fertilizantes naturales.

El Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, que impulsa la Consejería de Empresa e Investigación, ha realizado un proyecto conjuntamente con el Centro de Edafología y Biología Aplicada de la Segura (CEBAS).

Donde se confirma que la puesta en valor como abono de los lodos generados por las depuradoras de la industria de transformados vegetales es posible y que, además, gracias a un sencillo tratamiento conocido como compostaje, se consiguen toda una serie de beneficios para el suelo, mejorando así su calidad y disminuyendo el generalizado uso de fertilizantes químicos.

En la actualidad, el gran número de depuradoras instaladas en la industria de transformados vegetales tiene como consecuencia el aumento de los lodos que generan, planteándose a su vez problemas de almacenamiento y eliminación, todo ello añadido a los efectos económicos negativos derivados que conllevan los gastos de gestión, o en su caso, de transporte o de pago de tasas por su depósito en vertederos.

Tratamiento de compostaje «Si tenemos en cuenta que además la normativa ahora es más exigente y la gestión actual basada en la eliminación está más restringida, buscar una solución se había convertido en una necesidad», explican fuentes consultadas vinculadas al proyecto.

Así pues, el CEBAS se pusieron a trabajar en un proyecto subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, llegando finalmente a la conclusión de que si estos lodos son sometidos al tratamiento previo de compostaje, que es como se conoce al proceso de degradación de la materia orgánica por la acción del aire, el material orgánico se sanea, reduciendo así el poder de fermentación y, por consiguiente, los inconvenientes sanitarios de la incorporación al suelo de los lodos.

El proyecto también contempla poner en valor estos lodos para obtener biogás, en este caso a través de un proceso conocido como «digestión anaerobia», es decir, a través de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno que tiene lugar en fermentadores, proceso económicamente rentable, ya que a cambio se obtiene el biogás, que es una energía limpia capaz de generar calor o electricidad y se reduce el volumen de los residuos.

Precisamente, uno de los aspectos que se destaca de este estudio es el bajo coste de estos procesos, así como la posibilidad de emplear un subproducto industrial que de otra forma no tendría utilidad, cumpliendo además con la normativa vigente de uso agrícola (Jurado, 2006).

2.7 Lodos residuales.

Los lodos residuales suelen aplicarse a los suelos como alternativa para disponer de ellos, así como en algunos casos como enmiendas fertilizantes. La Materia Orgánica de los lodos residuales tienen mayor cantidad de Nitrógeno y menor relación Carbono: Nitrógeno que los de los suelos. Como resultado, estos son buenas fuentes de Nitrógeno aprovechable para las plantas. La producción de Ácido Sulfhídrico de los lodos residuales tienen relaciones Hidrógeno: Carbono levadas, sugiriendo un contenido alto de radicales alifáticos. También el Azufre esta en concentraciones importantes y gran parte no se han purificado se encuentran contaminadas con materiales surfactantes xenobióticos y por polisacáridos, aminoácidos y amino azúcares autóctonos.

Los inconvenientes de aplicar lodos residuales a las tierras agrícolas son su contenido de patógenos, de metales tóxicos como el Cadmio y otros, de sales solubles y compuestos orgánicos tóxicos que vierten las industrias. Los metales que causan daños a la salud son el Cadmio y el Plomo; mientras el Zinc, Cobre pueden ser fitotóxicos cuando aumentan su concentración en el suelo, especialmente cuando el pH es de < 5.5.

En general, un lodo residual típico contiene de 20 a 30 % de Carbono orgánico. El Carbono orgánico incluye los diversos constituyentes de las aguas negras, más los productos de su descomposición intermedios o finales. Los lodos, al aplicarlos a los suelos, contienen una mezcla de compuestos incluyendo proteína, polisacáridos, grasas, ceras y aceites. Además, las descargas de efluentes industriales a los sistemas de aguas negras municipales pueden influir en los niveles de compuestos orgánicos peligrosos, como bifenilos polisacáridos, esteres de ácidos ftálicos y gran variedad de solventes (Rendón, 2003).

2.8 Clasificación de los lodos residuales por su contenido de metales pesados según la EPA (Environmental Protection Agency).

El contenido de metales pesados en lodos residuales típicamente se establece en dos parámetros de clasificación. El contenido de estos metales le confiere a los lodos una clasificación 1 y 2. Si la concentración de metales es menor a los clasificados como nivel 1, estos pueden ser manejados, distribuidos y aun comercializados en bolsas. Estos podrán aplicarse a cualquier medio tal como: jardines de casa, invernadero, campos de golf, parques recreativos, etc., y no es necesario un inventario de su aplicación.

Si los niveles o concentraciones de uno o más de los metales regulados excede los valores límites establecidos en el nivel 1, el criterio que se sigue es clasificarlos como biosólidos clase 2. Estos biosólidos pueden aplicarse en sitios específicos y deberán cumplir con las restricciones en lo referente a límite anual y límite acumulativo como se indica en la **(Tabla 3)**.

Un ejemplo de acuerdo a esta tabla, el límite anual establece que con relación al cobre únicamente se podrán agregar 75 Kg por hectárea por año de este metal, mientras que al considerar el límite acumulativo, lo máximo que se podrá aplicar a este suelo serán 1500 Kg por hectárea y una vez alcanzado este límite ya no se podrá aplicar biosólidos en este suelo **(Tabla 4)**, (Rendón, 2003).

Tabla 3. Clasificación de los lodos de acuerdo al contenido de metales

Metal	Clase 1 mg/Kg	Clase 2 mg/Kg
As	41	75
Cd	39	85
Cr	1200	3000
Cu	150	4300
Pb	300	840
Hg	17	57
Ni	420	420
Se	36	100
Zn	3800	7500

Tabla 4. Límites máximos permisibles aplicados en suelo

Metal	Límite acumulativo kg/Hectárea	Límite anual Kg/Hectárea
As	41	2
Cd	39	1.9
Cu	1500	75
Pb	300	15
Hg	17	0.85
Ni	420	21
Se	100	5
Zn	2800	140

De acuerdo al criterio mencionado con anterioridad, la dosificación de biosólidos estará determinada por:

- La tasa agronómica
- La dosificación anual de metales contenidos en los lodos
- El límite acumulativo de un metal en particular.

2.9 Clasificación de los lodos residuales por su contenido de patógenos o calidad microbiológica.

De acuerdo a su calidad microbiológica los biosólidos pueden ser clasificados como clase “A” y “B”. Los biosólidos clase “A” son aquellos que han recibido un tratamiento drástico de desinfección, casi siempre por secado a altas temperaturas que van desde los 105ºC a los 200ºC.

Los biosólidos clase “A”, en lo que se refiere a su carácter microbiológico son seguros en su manejo y pueden emplearse sin restricciones de manera similar como se hace con los biosólidos clase 1 anteriormente mencionados.

Los biosólidos tipo “B” son aquellos que han recibido un tratamiento de desinfección menos estricto. Por ejemplo, cuando los lodos residuales son esparcidos en un terreno y se dejan secar en forma natural por acción de los rayos ultravioletas de la luz solar disminuyendo del contenido de patógenos. Esta clase solo debe emplearse en sitios restringidos, donde no haya acceso al público en general, como por ejemplo sitios en reforestación (Rendón, 2003).

3 Sistemas de composteo con biosólidos.

3.1 Composteo en filas o camellones.

Es el más sencillo, en él se colocan la mezcla de biosólidos y el material acondicionador o aditivo, en grandes filas que después se voltean usando equipo mecánico. Hay dos tipos de proceso, el convencional y el aireado. En el convencional, los biosólidos y el aditivo se colocan dentro de camiones de volteo que al descargar van formando las filas o camellones. Después los materiales se mezclan usando equipo móvil de composteo. Este viaja a lo largo del camellón, mientras que un sistema de alta velocidad con dientes fijos u oscilatorios va mezclando los materiales como se muestra en la **(Figura 4)**.

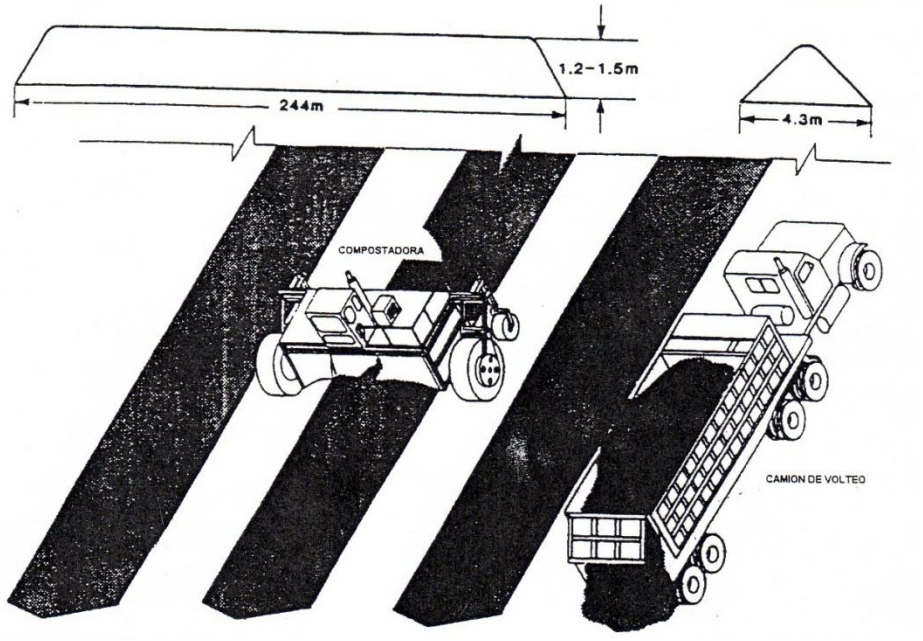


Figura 4. Elaboración de las filas o camellones por el método convencional. (Rendón, 2003)

La longitud mínima del camellón puede ser de 30 m, mientras que la máxima puede ser hasta 245m. La altura promedio del camellón va de 1.2 a 1.5 m, máximo 2 m, y el ancho puede ser hasta 4.2 m. Después de construida la composta requiere de 30 a 50 días o hasta más para completar el ciclo, esto depende del clima y la estación del año. La lluvia y el frio retardan el proceso. El camellón debe voltearse al menos tres veces por semana. El volteo contribuye con algunos requerimientos del proceso tales como:

- Reducción del tamaño de las partículas
- Mezcla y homogeniza los materiales
- Incrementa la porosidad y favorece las condiciones aerobias
- Permite el secado al incrementar la evaporación
- Expone todo el material a la temperatura interior para inactivar eficientemente los patógenos

Si la composta está bien construida y recibe los volteos necesarios, en pocas semanas se alcanzaran o rebasaran los 55 ºC, permaneciendo así durante casi todo el proceso. Es útil para matar patógenos y deshidratar la composta. Los bajo niveles de nutrimentos y humedad ocasionan que la actividad microbiana disminuya al final del proceso y causa decremento de la temperatura. El secado ocurre por el movimiento natural del aire a través del montón y los volteos, lo que evapora la humedad (Rendón, 2003).

3.2 Composta aireada en camellón.

Se le proporciona aireación mecánica, además de volteos periódicos. Los camellones se construyen a lo largo de canales de aireación o túneles que suministran aire por la base del camellón. El canal de aireación distribuye el aire a lo largo de la composta ayudado por una placa de aireación, mientras que otra red de tubos colecta los lixiviados y condensados del proceso. El buen funcionamiento depende en gran medida de que se coloque una capa de arena sobre la placa de aireación, cuidando que no tape los orificios por donde sale el aire, y reemplazándola aproximadamente cada seis meses **(Figura 5)**.

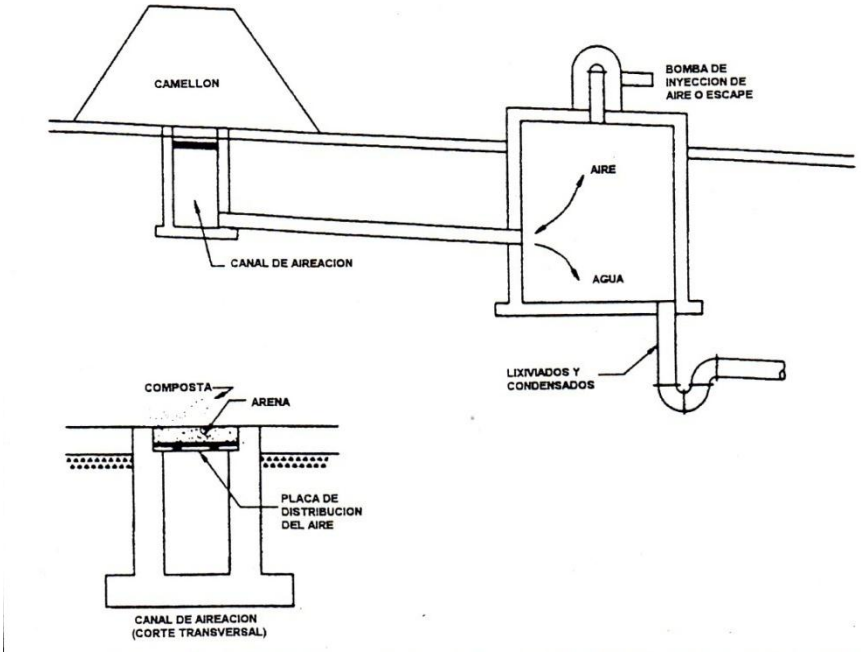


Figura 5. Elaboración de las filas o camellones por el método convencional. (Rendón, 2003)

Los sistemas de aireación pueden ser de dos tipos: con ventilación o presión y con ventilación al vacío. La ventaja de este último es que recoge los olores desagradables para darles tratamiento antes de liberarlos al ambiente. En algunas plantas de composteo, se utiliza este sistema los primeros 10 o 15 días del proceso para capturar los gases y olores desagradables que se desprenden; después se utiliza ventilación a presión para propiciar el secado. La ventaja principal de este método es que las condiciones aeróbicas están garantizadas durante todo el proceso **(Figura 6)**, (Rendón, 2003).

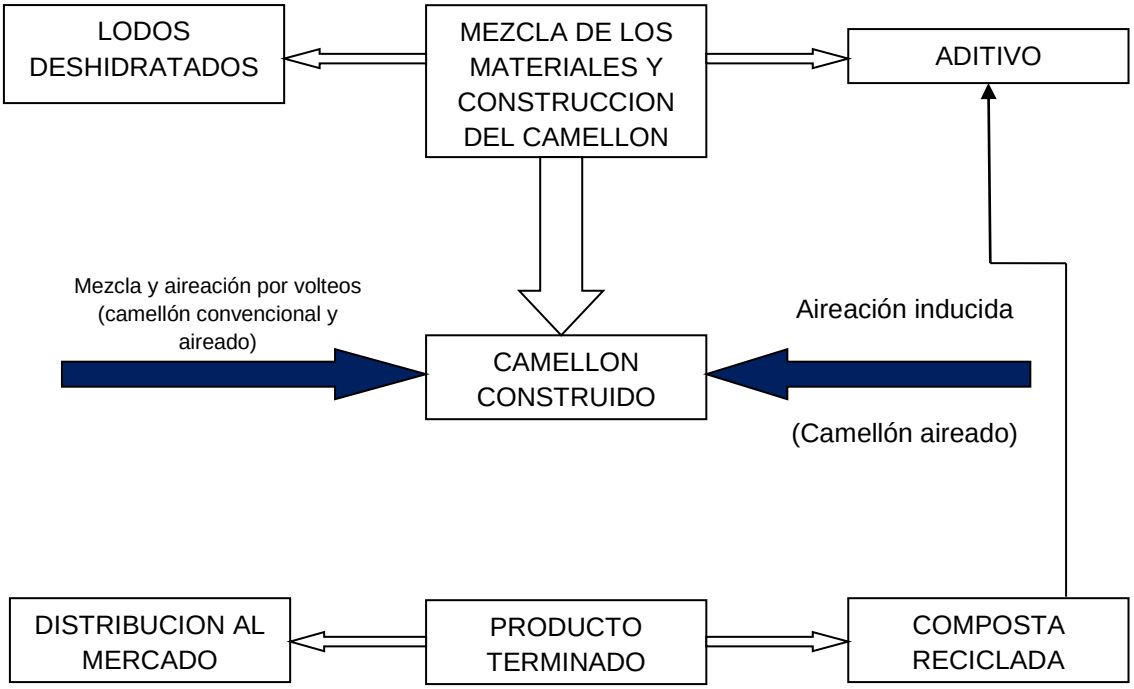


Figura 6. Esquema general del proceso de composteo en camellones.

3.3 Composteo en pila estática.

La mezcla se prepara cuidando el contenido de sólidos (mínimo 40%), para crear una masa con suficiente porosidad que permita un flujo uniforme de aire a través de la pila. Los aditivos o acondicionadores más comunes son las astillas de madera, ramas, cortezas, hojas, carbón, aserrín y ceniza. Una vez terminado el proceso, el aditivo se recupera con el cribado y se vuelve a utilizar para preparar la mezcla. Una mezcla inadecuada da lugar a condiciones anaerobias y olores desagradables en porciones de la pila, además de que no se alcanzan temperaturas suficientemente altas para destruir a los patógenos.

Se agrega aditivo fresco o reciclado a los biosólidos y se mezclan juntos, usando equipo móvil o estacionario. Una vez hecha la mezcla, se coloca sobre la placa de aireación que, al igual que en el método anterior, consiste en una red de tubos o conductos conectados a bombas de aireación. Se coloca una capa de 30 o 45 cm de espesor de astillas de madera u otro material poroso, sobre la placa de aireación, y arriba de esta se pone la mezcla. Conformada la pila, se cubre con una capa de 30 a 50 cm de espesor de composta cribada o sin cribar. Esta capa ayuda a que la temperatura se eleve, a contener la salida de olores desagradables y previene los problemas de olores.

La ventilación se provee con aire a presión que pasa por los tubos y la placa de aireación y penetra de abajo hacia arriba de la pila (modo positivo), o por difusión del aire impulsado con ventiladores de arriba hacia abajo a través de la pila (modo negativo). Durante la primera se debe mantener una cantidad de aireación que permita alcanzar de 55 a 60 ºC de temperatura para eliminar patógenos; después de 7 o 10 días de composteo, se debe mantener una temperatura de 55 ºC por lo menos durante tres días consecutivos. Esto servirá para acelerar el secado de la composta.

Hay dos maneras de organizar las pilas en las plantas de composteo; pilas individuales o pilas en conjunto **(Figura 7)**. Las ventajas de las pilas en conjunto son que requiere menos terreno, le flujo de aire y la temperatura son más uniformes, y se maneja menos cantidad de material para cubrir la pila. La ventaja de las pilas individuales es que se pueden manejar biosólidos con diferentes características.

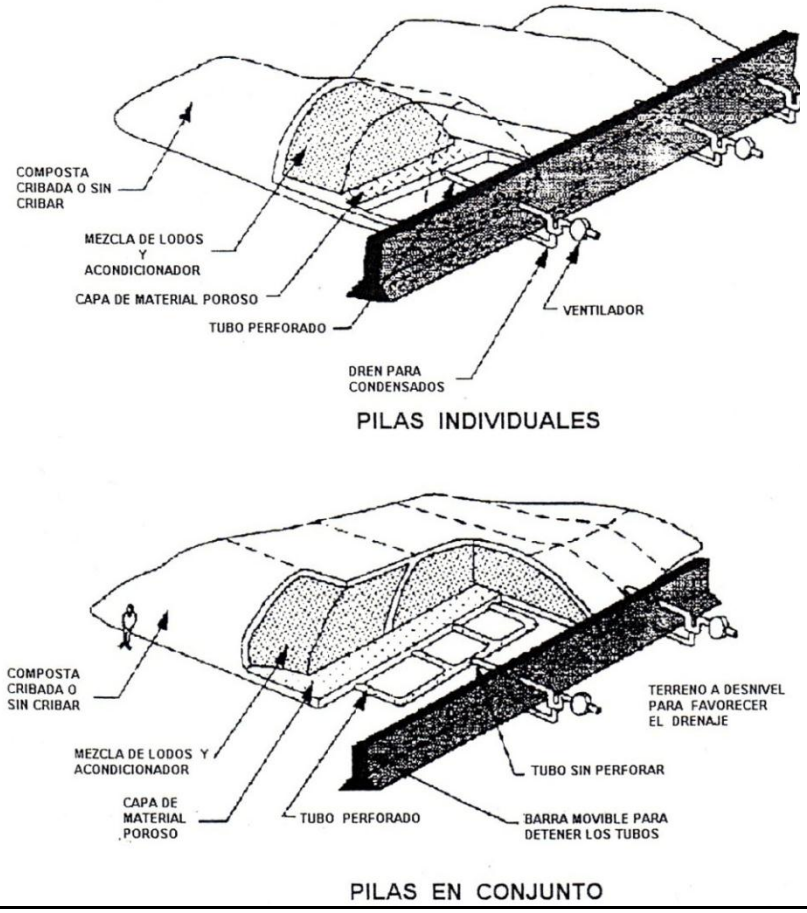


Figura 7. Tipos de sistemas de composteo en pila estática. (Rendón, 2003)

El proceso de composteo en pila estática dura de 14 a 28 días; 21 días es el periodo más común. Después de la etapa activa de la composta, se utilizan cribas para separar los biosólidos composteados del acondicionador, el cual se mezcla nuevamente con más biosólidos. Si el producto no se secó suficiente, se puede adicionar una etapa más de secada por varios días o semanas. El material debe tener un contenido de sólidos entre 55 y 60 % para que sea cribado eficientemente. Si el material está más húmedo, no se rompen los terrones grandes y se tapan los orificios de la criba. El secado se puede lograr por simple agitación del producto o cambiando de lugar el montón constantemente. Para que este sea más rápido, la composta se almacena bajo tejados para que no se moje con la lluvia. El curado permite la estabilización completa de la composta; la mayoría de las plantas de composteo utilizan mínimo 30 días cada una de estas fases (Rendón, 2003).

3.4 Sistema de composteo en reactor.

El sistema de composteo en reactor ofrece un producto más estable y constante que los métodos anteriores, los reactores se llenan y vacían mecánicamente y requiere de poca área de terreno. El tiempo que permanecen los materiales en el reactor varía de 10 a 21 días. El funcionamiento de los reactores es intensivo mecánicamente y requiere mucho trabajo para su mantenimiento.

Casi todas las plantas de composteo que utilizan este método, cuentan con molino de martillos y mezcladoras para picar el acondicionador y mezclarlo con los biosólidos. Aunque se puede utilizar el mismo material acondicionador que en los otros sistemas, se prefieren el aserrín y la composta reciclada. Esto es porque su tamaño no interfiere en el funcionamiento de tornillos y a bandas, también se degradan más rápido, creando espacios porosos. A diferencia del composteo en pila estática, el aditivo que se agrega no se recupera, sino que pasa a formar parte del producto final.

La mayoría de los sistemas que utilizan reactor, realizan la cura y el almacenamiento por separado. Algunas veces el curado se lleva a cabo dentro del reactor, aunque lo común es que se haga afuera, en montones que se ventilan por medio de volteos o con aire a presión. El tiempo de almacenamiento depende de la estacionalidad en la demanda del producto final.

Existen tres clases de reactor: reactor de flujo vertical, reactor de flujo horizontal y el reactor de contenedor agitado. Los sistemas de flujo vertical consisten en sitios verticales en los que el material entra por la parte superior y que queda en el fondo del reactor **(Figura 8)**. Comúnmente, el aditivo consiste en una mezcla de aserrín y composta sin cribar. La aireación se proporciona a través de lechos colocados en el fondo del reactor por los que sale el aire. La cura abarca de 28 a 35 días generalmente.

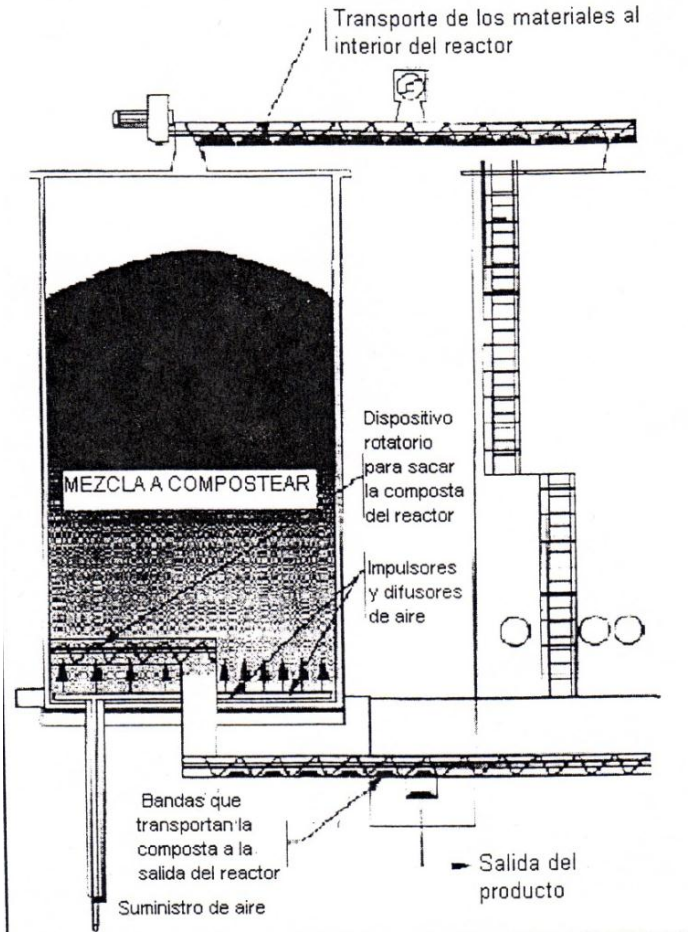


Figura 8. Reactor de flujo vertical con cilindro de acero. (Rendón, 2003)

Los sistemas de flujo horizontal también se conocen como túneles, por la forma que tiene el reactor. El funcionamiento es similar al reactor de flujo vertical, con la diferencia de que los materiales entran por un extremo usando un dispositivo tipo rampa, y se descargan por el otro extremo **(Figura 9)**.

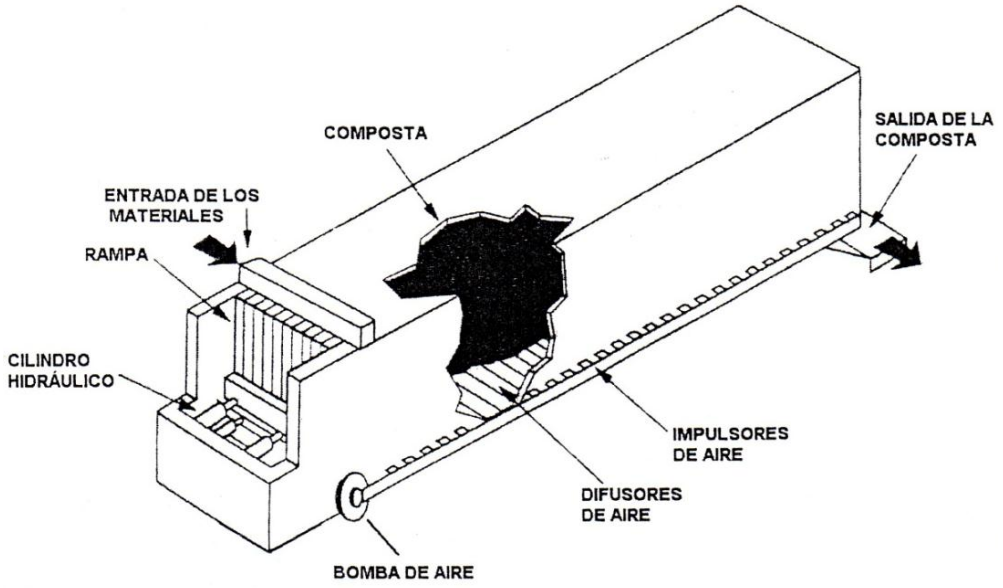


Figura 9. Reactor de flujo horizontal. (Rendón, 2003)

El reactor de contenedor agitado se diferencia del flujo, en que los materiales no se quedan sin mezclar, sino que los dispositivos mecánicos agitan periódicamente los materiales a compostear. Los contenedores están abiertos de la parte superior, el aire se suministra por el fondo y pueden ser circulares o rectangulares. La altura del reactor varía de 2 a 3 metros **(Figura 10)**.

Independientemente del sistema que se use, los criterios para condesar el ciclo completo son el tiempo, la temperatura, la cantidad de volteos y la calidad del producto en cuanto a la humedad, densidad de patógenos y tamaño de partícula, entre otras. Al finalizar el proceso, los camellones se rompen usando maquinaria. El producto final se arrastra fuera del área de composteo para ser almacenado o mezclado con otras materias como corteza de pino, astillas o cascarilla de trigo, antes de salir al mercado. Para mejorar la presentación de la composta, esta se debe cribar para deshacer terrones grandes y retirar objetos ajenos (Rendón, 2003).

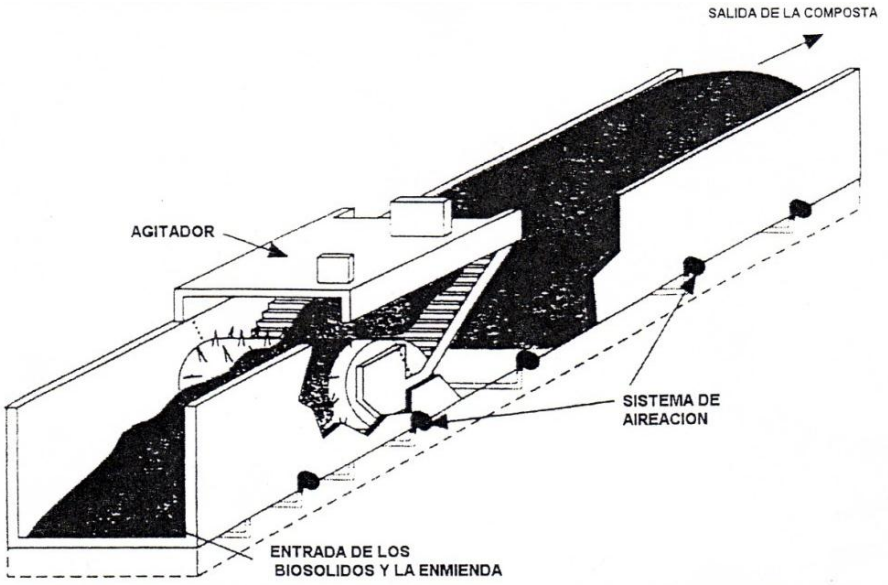


Figura 10. Reactor de contenedor agitado.
(Rendón, 2003)

4 Factores que influyen sobre la evaluación del proceso de compostaje con biosólidos

4.1 Sustrato.

4.1.1 Naturaleza del sustrato: Según sea agrícola, ganadero, forestal, urbano, industrial, etc. La importancia de su origen está en relación directa con las peculiaridades, características físicas y químicas.

4.1.2 Tamaño de la partícula: El tamaño ideal es de 1 a 5 cm. A menor tamaño mayor facilidad para el ataque microbiano y mayor velocidad de trasformación. Los residuos líquidos o semilíquidos deben mezclarse con materiales que les aporten mayor porosidad.

4.1.3 Composición de los materiales. Además del carbono y el nitrógeno, otros macro nutrientes, como el fosforo y la mayoría de los micronutrientes, son esenciales para la síntesis de enzimas y el metabolismo microbiano. Tan importante como su cantidad es su equilibrada proporción.

4.2 El proceso.

4.2.1 Temperatura: La temperatura del montón varía en función de la actividad microbiana, dividiéndose el proceso en fases: mesófila, termófila, de enfriamiento y maduración. El calentamiento inicial no debe sobrepasar 60-70 ºC.

4.2.2 pH: Al igual que la temperatura, es un indicador del buen funcionamiento del proceso. El valor óptimo está comprendido entre 5 y 8. Las bacterias prefieren un pH cercano al neutro, y los hongos prefieren pH acido.

En la **(figura 11)** se presenta una curva de Temperatura y pH del proceso de compostaje donde se puede observar efecto de la temperatura y pH en las diversas etapas que presenta.

4.2.3 Aireación: Un exceso de ventilación puede provocar el enfriamiento de la masa y el retardo del proceso de compostaje. Poco oxígeno menos del 20% provoca condiciones anaerobias y producción de H_2S y otros productos intermedios fitotóxicos. Entre el 28 y 55% de O_2 en el medio esta al máximo la actividad microbiana.

4.2.4 Humedad: La humedad debe ser adecuada durante la etapa de descomposición, actividad preferentemente bacteriana mayor del 35 al 40%; en la etapa de estabilización, actividad preferente de actinomicetos y hongos; la humedad requerida es menor. Si la humedad es escasa, disminuye la actividad microbiana. La óptima está situada entre el 30 y 60%.

4.2.5 Relación Carbono:Nitrógeno: Los microorganismos requieren 30 partes de carbono por una de nitrógeno es decir 30/1, estando el óptimo entre 26/35. Si la relación es inferior habrá mayor contenido de nitrógeno, y se producen perdidas del mismo en forma amoniacal; si es mayor, el proceso se hace lento. Si se utilizan lodos, la relación óptima es entre 15 y 20.

4.3 El tipo de sistema.

4.3.1 Sistema abierto: Los montones de compost se sitúan al aire, pudiendo realizarse en pilas de composta estática con aireación forzada, pilas de compost con volteo periódico o bien pilas de composta con ventilación forzada y volteos periódicos.

4.3.2 Sistema cerrado: En aparatos especiales para fermentar, reactores verticales u horizontales (Labrador, 2001).

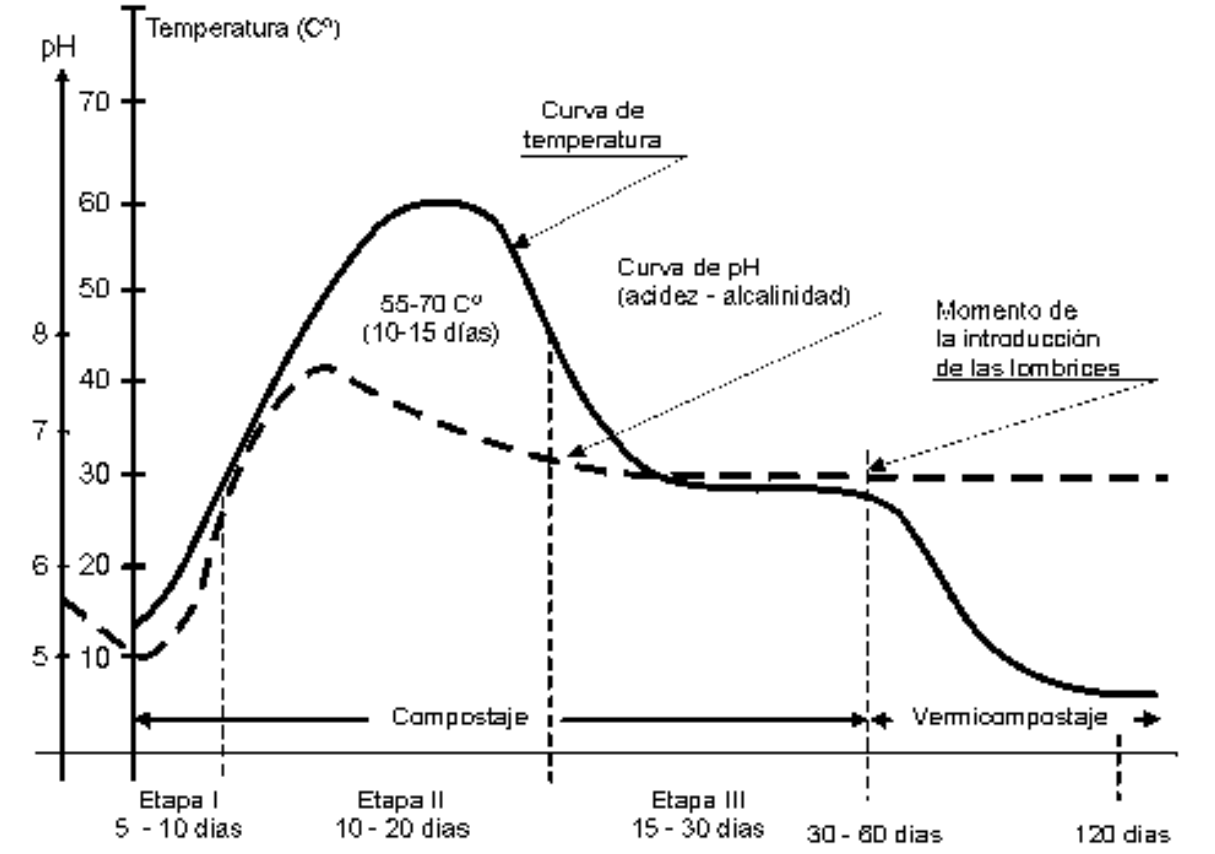


Figura 11. Curva de Temperatura y pH del proceso de compostaje (Labrador, 2001).

4.4 Proceso de maduración de la composta.

La fase activa requiere un período de al menos un mes para que el proceso termine y para que la composta desarrolle características deseadas para sus posteriores aplicaciones. En el curso de la maduración las sustancias húmicas evolucionan no solo cuantitativamente, si no también cualitativamente. Una composta inmadura puede interferir con el crecimiento de las plantas inmovilizando el Nitrógeno cuando la relación Carbono/Nitrógeno es alta, lo que causa competencia entre las raíces y los microorganismos edáficos; por toxicidad con compuestos nitrogenados. Cuando la relación Carbono/Nitrógeno es baja; por originar deficiencias de oxígeno para el sistema radicular cuando la biología del suelo utiliza este elemento para metabolizar la materia orgánica inmadura; por la aparición de fitotóxinas, que son producidas durante la primera etapa de metabolización de la materia orgánica y luego metabolizadas durante el proceso de compostaje, etc.

El periodo de maduración se lleva a cabo en una zona diferente al sitio donde se ha realizado la fase activa del compostaje, pero también puede realizarse en el mismo sitio y en la misma pila donde se ha tenido lugar la fase activa.

En esta etapa no se requieren volteos ni aireación forzada, las pilas en maduración deben ser lo suficientemente pequeñas para permitir un adecuado intercambio de aire en su interior, sobre todo si el uso que se lleva a dar a la composta requiere un producto de alta calidad. Debido a que las pilas en fase de maduración no producen suficiente calor como para dar lugar a que haya una pérdida de agua por vaporación, la zona de maduración debe estar bien drenada con canalizaciones para recoger el agua de lluvia y evitar que se acumulen en el sitio donde están las pilas.

La evaluación de la madurez de la composta incluye una prueba de observación fácil de realizar en el terreno. Pruebas de germinación de semillas para comprobar la posible fitotóxicidad del producto; el olor que debe ser agradable y tender a asemejarse al del suelo de un bosque; de color que debe ser oscuro, propio de la transformación y la madurez de la materia orgánica; de temperatura etc.

Una forma de determinar la madurez de la composta es colocando una muestra de compost levemente mojado en una bolsa de plástico. La compostas madura emitirá un suave olor a tierra al abrir la bolsa después de una semana de almacenamiento a temperatura de 20 a 30 ºC. Una composta inmadura tendrá una fermentación anaeróbica que producirá un olor séptico.

Un segundo método de prueba de terreno para madurez utiliza un contenedor sellado, muy bien aislado de una determinada capacidad, lleno de compost con un 40-50% de humedad y almacenado a temperatura ambiente. Si la temperatura en el termómetro colocado en el centro del compost se mantiene a temperatura ambiente después de varios días, el compost se considera maduro.

La madurez de la composta no debe confundirse con la calidad de la composta. Madurez significa que los nutrientes y la energía que contienen los materiales que han contribuido al producto final han sido combinados de forma adecuada, siguiendo un proceso correcto y formado como consecuencia una masa orgánica estable. La calidad refleja madurez, pero también refleja que hemos obtenido un producto orgánico estable, con un contenido elevado en sustancias húmicas, equilibrado en nutrientes, optimo con microorganismos útiles, que presenta una granulometría idónea, así como un olor agradable y una coloración oscura y que está libre de contaminantes y de sustancias fitotóxicas, siendo su dinámica en el suelo semejante a la de las sustancias húmicas (Labrador, 2001).

4.5 Algunos métodos para evaluar la madurez de la composta.

4.5.1 De observación.

4.5.1.1 Olor: Los olores anómalos iníciales desaparecen con la madurez del producto, siendo el de un compost maduro semejante al de un suelo de un bosque.

4.5.1.2 Temperatura estable: Se considera un compost maduro cuando, después de las distintas fases de aumento y disminución de temperatura, esta se estabiliza con la ambiental sin variar con el volteo.

4.5.1.3 Color: El compost se oscurece con la madurez, llegando a un color marrón oscuro o negro, dependiendo de los materiales de partida.

4.5.1.4 Peso específico: Se intercambia su valor con el proceso de compostaje.

4.5.2 De parámetros de la biomasa.

4.5.2.1 Respirómetros: Consiste en calcular el oxígeno absorbido en la respiración o el CO_2 desprendiendo del producto sin mezclar o de la mezcla con el suelo. Nos indica la mineralización de la materia orgánica y su evolución durante el ensayo.

4.5.2.2 Parámetros bioquímicos de la biomasa de la biomasa de la composta: Se miden las variaciones que experimentan ciertos parámetros bioquímicos, como son la concentración de ATP o la actividad de enzimas hidrolíticas.

4.5.2.3 Identificación de grupos fisiológicos de microorganismos: Ya que cada etapa del compost está caracterizada por poblaciones de organismos específicas.

4.5.3 De análisis químicos.

4.5.3.1 Determinación de pH: Desciende ligeramente al principio, para subir posteriormente cuando lo hace la temperatura, desciende con la madurez hasta estabilizarse entre 7 y 8.

4.5.3.2 Relación C:N: Se trabaja con esta relación a lo largo del proceso de compostaje, considerándose un compost como maduro cuando la relación es menor de 20 o lo más cercano a 15. Depende de los materiales de partida.

4.5.3.3 Determinación de la temperatura máxima de auto calentamiento: El valor máximo de temperatura alcanzado en función de la actividad biológica va a depender del estado de degradación del compost.

4.5.3.4 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico: La capacidad de cambio catiónico aumenta el progreso de los procesos de compostaje y maduración, está relacionada con la fracción C:N (Labrador, 2001).

5 Fundamentos de análisis físicos, químicos y microbiológicos realizados en el suelo a rehabilitar y biosólidos a usar.

5.1 Suelo.

5.1.1 pH.

Es una propiedad química del suelo, se refiere a la concentración de iones hidrogeno activos (H^+) que se dan en la interface liquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrogeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo-agua, y es expresado en términos de la escala de pH. El valor de este es el logaritmo del reciproco de concentración de iones hidrogeno, que se expresa por números positivos del 0 a al 14.

5.1.1.1 Método.

Para la determinación del pH se utiliza el método potenciométrico.

5.1.1.2 Fundamento.

El método potenciométrico o electroquímico se basa en la medición del potencial de un electrodo sensitivo a los iones H^+ (electrodo de vidrio) presentes en una solución problema; cuya solución no se modifica cuando cambia la concentración de iones por medir, que es generalmente un electrodo de calomelano o de Ag/AgCl. El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. Se utilizan soluciones amortiguadoras para calibrar el instrumento y luego comparar. Ya sea el potencial eléctrico o pH directamente de la solución por evaluar (Fernández *et al*, 2006).

5.1.1.3 Criterio de evaluación.

En la **(tabla 5)**, se presentan los criterios de evaluación del suelo con respecto al pH.

Tabla 5. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH (Fernández et al, 2006)

Categoría	Valor de pH
Fuertemente acido	<5.0
Moderadamente acido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	8.5

5.1.2 Conductividad eléctrica.

Es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en mmhos/cm o en mSiemens/m; la NOM-021-RECNAT-2000 establece dSiemens/m a 25 ºC. Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos. Es una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos del suelo. De acuerdo con los valores con los valores de conductividad eléctrica, pH, y porcentaje de sodio intercambiable los suelos pueden clasificarse de la siguiente manera.

a) Suelos salinos. Se caracterizan porque su extracto de saturación tiene un valor de conductividad eléctrica igual o superior a 4 mmhos/cm a 25 ºC y la cantidad de sodio intercambiable es menor de 15%.

b) Suelos sódicos. Presentan un color negro debido a su contenido elevado de sodio. Su porcentaje de sodio intercambiable es mayor que 15 el pH se encuentra entre 8.5 y 10.0, y la conductividad eléctrica está por debajo de 4 mmhos/cm a 25 ºC.

c) Suelo salino-sódico. Posee una conductividad eléctrica de 4 mmhos/cm a 25 ºC, con una concentración de sodio intercambiable de 15% y pH es variable o superior a 8.5.

5.1.2.1 Método.

Para determinar la conductividad eléctrica se emplea un conductimetro sobre una muestra de agua o extracto de suelo.

5.1.2.2 Fundamento.

Se basa en la teoría de la disociación *electrolítica*. Se usa un conductimetro como equipo, que consiste en dos electrodos colocados a una distancia fija y con una liquido entre ellos. Los electrodos son de platino negro o gradito; estos se encuentran sellados dentro de un tubo de plástico o vidrio, de tal manera que este aparato puede ser sumergido en el líquido a medir. La resistencia eléctrica a través de los electrodos se registra a una temperatura estándar generalmente de 25 ºC. Antes de usar el conductimetro este debe calibrarse, para ello se utilizan soluciones estándar de KCl 0.1 N y 0.01 N, con una se ajusta el equipo como se indica en la **(Tabla 6)**.

Tabla 6. Ajuste de conductividad en función de la solución de KCl (Fernández et al, 2006)

Sol. Estándar de KCl	Conductividad eléctrica a 25 ºC
0.1 N	12.9 dS/m
0.01 N	1.412 dS/m

Cuando no se sabe que conductividad tienen la muestra se calibra primero con una de las dos soluciones y se toma la lectura de la muestra, después se vuelve a calibrar con la segunda solución y se toma nuevamente la lectura. Finalmente para calibrar el equipo se usa la solución estándar que se aproxime a la conductividad de la muestra. Si es necesario al leer la muestra se hace corrección de la lectura a diferentes temperaturas como se indica en la **(Tabla 7)**, se multiplica el resultado de la conductividad eléctrica por el valor correspondiente.

Tabla 7. Factores de corrección de la conductividad eléctrica en función de la temperatura del extracto de saturación (Fernández et al, 2006)

Temperatura (Cº)	Factor de corrección	Temperatura (ºC)	Factor de corrección
8	1.499	22	1.067
10	1.421	23	1.044
12	1.350	24	1.021
14	1.284	25	1.000
16	1.224	26	0.979
18	1.168	28	0.941
19	1.142	30	0.906
20	1.128	32	0.873
21	1.092	34	0.843

5.2.1.3 Cálculos.

La unidad estándar de conductividad eléctrica es el siemens/metro (S/m = Ohm/m), pero para no reportar el resultado en fracciones decimales se usa el miliSiemens/metro (mS/m) que es más pequeño, aunque la conductividad se mide en μmhos/cm.

1 mS/m = 10 mmhos/cm

Para convertir la conductividad eléctrica en unidades de salinidad se usa la **(Tabla 8)**, tomando el valor de referencia de una solución de NaCl 0.05 N con una conductancia de 604 μmhos/cm a 25 ºC como el factor, que al multiplicarlo por la conductividad expresa la salinidad (Fernández *et al* 2006).

Salinidad = mhos/cm X 604

Tabla. 8 Criterios para evaluar la salinidad de un suelo, con base en su conductividad (Fernández et al, 2006)

Categoría del suelo	Valor (mmhos/cm o dS/m
No salino	0-2.0
Poco salino	2.1-4.0
Moderadamente salino	4.1-8.0
Muy salino	8.1-16.0
Extremadamente salino	>16.0

5.1.3 Densidad aparente.

La densidad aparente (Da) de un suelo es la relación que existe entre la masa del sólido y el volumen total ocupado por el sólido y por el espacio poroso. La masa del solido se determina pesando la muestra una vez secada a 105 ºC, y el volumen total se deduce a través de un cilindro para la toma de muestra.

5.1.3.1 Cálculos.

$$Da = \frac{P_2 - P_1}{P_3 - P_1} \times \rho a$$

Dónde: ρa es la densidad del agua a la temperatura del experimento, expresando los resultados en g/cm^3 (Soriano *et al*, 2004).

5.1.4 Densidad real.

La densidad real (Dr) de un suelo es la relación que existe entre la masa de las partículas sólidas y el volumen ocupado por las mismas, es decir, se excluye el volumen ocupado por los por que hay entre las partículas. La masa de las partículas sólidas se determina por pesada y volumen se calcula a partir de la masa de agua, que es desplazada por la muestra de suelo.

5.1.4.1 Calculo.

$$Dr = \frac{\text{masa sólido}}{\text{Volumen sólido}} \times \rho a$$

5.1.4.2 Donde:

Masa solido = $P_2 - P_1$
Volumen solido = volumen total – volumen no ocupado por el sólido
Volumen total = $P_4 - P_1$
Volumen no ocupado por solido = $P_3 - P_2$
ρa = densidad del agua a la temperatura de la experiencia
Por tanto: volumen solido = $(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)$ y de ahí:

$$Dr = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \times \rho a$$

$$Dr = \frac{P_2 - P_1}{(P_2 - P_1) - (P_3 - P_4)} \times \rho a$$

Los resultados se expresan en g/cm^3 o g/ml (Soriano *et al*, 2004).

5.1.5 Porosidad del suelo.

La porosidad del suelo se define como el cociente entre el volumen de porros de una muestra y su volumen total aparente; es un índice que nos da una idea de la cantidad de poros que tienen un terreno y del volumen relativo que ocupan los mismos, y como tal, informa del estado de la tierra, de la disponibilidad de esta para dejar paso a las raíces o de la mayor o menor permeabilidad hidráulica y gaseosa de la misma. Una porosidad relativamente alta nos da una idea de una tierra más esponjosa, y en consecuencia, menos compacta. Sus valores medios para suelos se sitúan entre 40 y 60 %.

5.1.5.1 Cálculos.

La porosidad se determina cuantitativamente a partir de la densidad aparente y la densidad real, y se expresa como porcentaje (Soriano *et al*, 2004)

$$\% \text{ porosidad} = \frac{\text{volumen de poros}}{\text{Volumen total}} \times 100$$

$$\% \text{ porosidad} = 1 - \frac{Da}{Dr} \times 100$$

Dónde:

Da = densidad aparente
Dr = densidad real

5.1.6 Humedad.

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participan en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas, intemperiza las rozas y los minerales, ioniza los macro y micro nutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable.

5.1.6.1 Método.

Para la medición de humedad se utiliza el método gravimétrico.

5.1.6.2 Fundamento.

La humedad del suelo se calcula por la diferencia de peso entre una misma muestra humedad y después de haberse secado en la estufa hasta obtener un peso constante (Fernández *et al,* 2006)

5.1.6.3 Cálculos.

Calcular el % de humedad obtenido en el suelo mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ Humedad del suelo} = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso final})}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

5.1.7 Carbono orgánico total.

El carbono orgánico es uno de los principales componentes de los seres vivos, aproximadamente el 50% del peso de la materia orgánica es carbono. En el medio ambiente su ciclo está estrechamente ligado al flujo de energía, debido a que las principales reservas de energía de los organismos son compuestos de carbono reducidos que han derivado de la fijación del CO_2 atmosférico, ya sea por medo de la fotosíntesis o, con menor frecuencia de la quimiosíntesis. Las plantas y los animales que mueren son desintegrados por los microorganismos, en particular bacterias y hongos, los cuales regresan al carbono al medio en forma de bióxido de carbono. La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo; y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición puede incluir materiales tóxicos y contaminación por hidrocarburos.

5.1.7.1 Método.

Para la cuantificación de carbono orgánico total se utiliza el procedimiento de Walkey y Black.

5.1.7.2 Fundamento.

El método se basa en la oxidación del Carbono orgánico con un exceso de dicromato de potasio y sin aporte externo de calor. Se estima que en estas condiciones se oxida solo el 77% del carbono orgánico:

$$2Cr_2O7^{2-} + 16H^{+} + 3C \longrightarrow 4Cr^{3+} + 8H_2O + 3CO_2$$

El exceso de dicromato se valora por retroceso con sulfato ferroso amoniacal

$$Fe^{2+} \longrightarrow Fe^{3+}$$

5.1.7.3 Cálculos.

La cantidad utilizada de sulfato ferroso amoniacal para titular la muestra se resta del consumo del sulfato ferroso amoniacal de un testigo esto da la cantidad de ácido crómico, reducido por el Carbono del suelo (Marín, 2002).

$$CO\ (\%) = \frac{(T - B)\ X\ N}{S}\ X\ 100$$

Dónde:

T = ml de sulfato ferroso amoniacal valorado gastado en la muestra
B = ml de sulfato ferroso amoniacal gastado en el blanco
N = normalidad exacta del sulfato ferroso amoniacal
S = peso de la muestra de suelo

5.1.8 Materia orgánica.

La materia orgánica del suelo está constituida por organismos vivos y por residuos de plantas y animales parciales o totalmente descompuestos. El material orgánico que los microorganismos del suelo han transformado a una forma más estable recibe el nombre de humus. El humus está compuesto por sustancias no húmicas (30%) y sustancias húmicas (70%). Entre las primeras se incluyen glúcidos, lípidos, aminoácidos, etc., resultantes del metabolismo de los organismos vivos. Entre las sustancias húmicas destacan los ácidos húmicos y fúlvicos, sustancias complejas de alto peso molecular sintetizadas por los microorganismos del suelo. El humus constituye del 50% al 85% del contenido total de materia orgánica. La mayor parte de las propiedades coloidales de la materia orgánica del suelo se deben al humus. Además de ser altamente coloidal su área superficial y su capacidad de adsorción son mayores que las de otros elementos constitutivos del suelo como los silicatos. Su gran capacidad de intercambio catiónico se debe a su carga negativa resultado de la disociación de los grupos ácidos que contiene. Desde el punto de vista químico es una fuente de nutrientes para las plantas principalmente de C, N, P y S.

5.1.8.1 Método.

El método utilizado para la determinación de Materia orgánica es mediante la determinación del Carbono orgánico oxidable por el método de Walkley – Black.

5.1.8.2 Fundamento.

La materia orgánica del suelo se calcula a partir del contenido de carbono orgánico por medio de un factor f_{MO} que varía entre 1.7 y 2.0:

$$M.O. = C.O. \ X \ f_{MO}$$

Según Waksman, el contenido en carbono de la materia orgánica es de 58% esto hace que para pasar del % de Carbono orgánico al % de Materia orgánica tengamos que aplicar el factor 1.724 (f_{MO}) (Soriano *et al*, 2004).

Los suelos se pueden clasificar según el porcentaje de materia orgánica, **(Tabla 9)**:

Tabla 9. Interpretación de los resultados (Marín, 2002)

Menos del 1% de M.O.	Muy mineralizada
1 – 1.5% de M.O.	Mineralizado
1.5 – 2.0% de M.O.	Mineral – Orgánico
Más del 2% de M.O.	Orgánico

5.1.9 Fosforo soluble.

El fosforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza porque se oxida muy fácilmente; sin embargo, son muy comunes los compuestos orgánicos y principalmente minerales que contienen fosforo. En términos generales, el fosforo del suelo se clasifica en fosforo orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos que forme. La forma orgánica se encuentra en el humus y la materia orgánica. La fracción inorgánica está constituida por compuestos de hierro, aluminio, calcio y flúor, entre otros, y normalmente son más abundantes que los compuestos orgánicos. Solo una pequeña parte del fosforo aparece en solución en suelo en una concentración aproximada y los microorganismos, junto con el nitrógeno y el potasio.

5.1.9.1 Método.

El método utilizado para la cuantificación de fosforo es el azul de molibdofosfórico.

5.1.9.2 Fundamento.

Este método se basa en la formación de un complejo fosfomolibdico por adición de iones molibdato a una disolución que continúe ácido fosfórico. A continuación este heteropoliacido complejo se reduce parcialmente con cloruro estanoso para dar el característico azul molibdofosfórico o azul de molibdeno:

$$H_3PO_4 + 12H_2MoO_4 \longrightarrow H_3P(Mo_3O_{10})_4 + 12H_2O$$

$$H_3P(Mo_3O_{10})_4 + SnCl_2 + H+ \longrightarrow \text{azul de molibdeno}$$

El método es muy sencillo pero tienen el inconveniente de que las condiciones experimentales de desarrollo de color son críticas.

5.1.9.3 Cálculos.

Constituir una curva patrón de fosforo en una concentración de ppm para utilizarla como curva de calibración, y leer la absorbancia de la muestra a 660 nm en el espectro UV visible, con ello calcular la concentración de P (ppm), usando la concentración de cada punto de la curva, realizando una regresión lineal de los puntos de la curva (Marín, 2002).

Dónde:

Y = es la absorbancia (ua) de la muestra
m = pendiente de la recta de la curva de calibración
b = ordenada de origen de la recta de la curva de calibración
x = es la concentración en ppm de fosforo

5.1.9.4 Interpretación de resultados.

Los valores de concentración de fosforo obtenidos por este método permiten hacer el siguiente diagnostico **(tabla 10)**:

Tabla 10. Interpretación de los resultados (Marín, 2002)

De 0 a 1 ppm de fosforo	Contenido muy deficiente
De 1 a 3 ppm de fosforo	Contenido deficiente
De 3 a 6 ppm de fosforo	Contenido normal
De 6 a 10 ppm de fosforo	Contenido alto
Más de 10 ppm de fosforo	Contenido muy alto

5.1.10 Nitrógeno total.

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. Es también uno de los elementos más abundantes de la tierra, pues en su forma gaseosa (N_2) constituye el 78% de la atmosfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire.

Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. Cuando dichos organismos se mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo. Este ciclo es complejo e involucra una serie de reacciones y organismos con diferentes metabolismos. Siempre comienza con compuestos orgánicos sencillos (NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, N_2, NH_3) y termina con compuestos orgánicos complejos; que a través de la descomposición regresan a la etapa de compuestos sencillos.

En los microorganismos la carencia de nitrógeno puede afectar el crecimiento, por lo que la población microbiana no tendrá un desarrollo óptimo. En contraste, demasiado nitrógeno permite el crecimiento microbiano rápido y acelera la descomposición; pero puede crear problemas de color en condiciones anaerobias. Además, el exceso de nitrógeno puede ser liberado como amoniaco; en tanto que el nitrógeno aprovechable escapara en forma de gas. En los suelos normalmente el contenido de nitrógeno varia de 0.05 a 2% en sus diferentes formas.

5.1.10.1 Método.

La determinación de nitrógeno total se realiza con el método Micro-Kjeldahl. Este método fue modificado.

5.1.10.2 Fundamento.

El método Kjeldahl comprende tres fases fundamentales:

1) Digestión de la muestra: La muestra de suelo se somete a una digestión por calentamiento con ácido sulfúrico y por una mezcla de sales que aceleran y facilitan tanto la oxidación de la materia orgánica como la conversión de todas las formas de nitrógeno en N^{+3}, que en medio acido se encuentran en forma de radical amonio (NH^{4+}); es decir se llevan las formas orgánicas a formas minerales de nitrógeno.

2) Destilación. Una vez transformado el nitrógeno en NH^{4+}, se expone a una base fuerte como el hidróxido de sodio para formar hidróxido de amonio, que por la acción del calor se descompone en amoniaco (NH_3) y agua.

3) Valoración. El amoniaco desprendido por la reacción se recoge en un volumen conocido de solución valorada de ácido bórico y por comparación con un blanco se determina la cantidad de ácido que reacciono con el NH_3.

5.1.10.3 Cálculos.

Calcular la concentración de nitrógeno, sustituyendo en la siguiente formula (Fernández *et al*, 2006).

$$\text{Nitrógeno (\%)} = \frac{(T - B) \times N \times 1.4}{S}$$

Dónde:

T = ml de ácido sulfúrico valorado gastados en la muestra
B = ml de ácido sulfúrico gastados en el blanco
N = normalidad de la solución del ácido sulfúrico valorada
S = peso de la muestra de suelo

5.1.10.4 Criterios de evaluación.

Los siguientes valores encontrados en la **(Tabla 11)** sirven para evaluar la calidad de un suelo con respecto al nitrógeno total.

Tabla 11. Criterios para evaluar un suelo con base en su contenido de nitrógeno total (Fernández et al, 2006)

Categoría	Valor (%) de nitrógeno en el suelo
Extremadamente pobre	<0.032
Pobre	0.032 – 0.063
Medianamente pobre	0.064 – 0.095
Medio	0.096 – 0.126
Medianamente rico	0.127 – 0.158
Rico	0.159 – 0.221
Extremadamente rico	>0.221

5.1.11 Bacterias totales por dilución en placa.

La cuenta de bacterias totales de un sistema se refiere a las bacterias heterótrofas presentes en un suelo, es decir, aquellas que contienen su fuente de carbono a partir de compuestos orgánicos. En este grupo de bacterias se pueden encontrar la gran mayoría de la población microbiana del ambiente. Los medios usados para la cuenta de un amplio número de bacterias en el suelo, sedimento, agua, aguas residuales o composta pueden ser complejos en su formulación, pero relativamente escasos en su composición. Uno de los medios de cultivo recomendado para su desarrollo es el agar nutritivo o caldo nutritivo, ya que es un medio relativamente simple, rico en fuentes de carbono y/o proteínas, capaz de permitir el desarrollo de muchas bacterias heterótrofas y en corto tiempo.

5.1.11.1 Método.

Para el conteo de bacterias heterótrofas del suelo se utiliza la técnica de cuenta por dilución en placa con agar nutritivo como medio de crecimiento.

5.1.11.2 Fundamento.

Este método se basa en el fundamento de la dilución en placa y en este caso el crecimiento se debe a la capacidad de los microorganismos heterótrofos de crecer bien en agar nutritivo.

5.1.11.3 Cálculos.

Contar solo aquellas cajas (diluciones) que contenga de 30 a 300 colonias. Con la siguiente ecuación calcular las UFC/g de suelo seco (Fernández *et al*, 2006).

UFC/g s.s. = (NC X 1/FD X 1/V) / (P X FH)

Dónde:

UFC/g.s.s. = unidades formadoras de colonias / g de suelo seco.
NC = número de colonias en una caja.
FD = factor de dilución que corresponde a la dilución de donde se tomó la muestra con la que inocula la caja (10^{-2} a 10^{-10}).
V = volumen inoculado en la caja = 0.1 ml
P = peso de la muestra humedad = 1 g.
FH = factor de corrección de humedad (1) - (% humedad/100).

5.1.12 Hongos totales por dilución en placa.

Los hongos tienen hábitats muy diversos; sin embargo, la mayoría son terrestres y habitan en el suelo, desempeñando una actividad importante en la mineralización del carbono orgánico. Cuando se compara a los hongos con las bacterias, en general, estos tienen requerimientos nutricionales muy simples, pero su desarrollo es más lento, por lo que requieren mayor tiempo de incubación para su cultivo. En el aislamiento, cultivo y cuenta de la mayoría de los hongos se aprovechan ciertas características especiales de ellos, como su tolerancia a pH ácido y su preferencia por medios de cultivo con gran cantidad de azúcar fácilmente degradable. Además, su resistencia a la penicilina y estreptomicina permite usar estos antibióticos, lo que al ser agregados a los medios de cultivo reducen el número de bacterias contaminantes.

5.1.12.1 Método.

El método para el conteo de hongos del suelo es por la técnica de cuenta por dilución en placa. El medio recomendado para la detección y enumeración de hongos y levaduras es el de papa – dextrosa agar (PDA) adicionado con rosa de bengala para permitir el contero de hongos; así como la adición de un antibiótico (estreptomicina) para evitar el crecimiento de bacterias.

5.1.12.2 Fundamento.

Este método se basa en el fundamento de la dilución en placa; sin embargo, en este caso una célula no da origen a una colonia, sino a una espora o una parte del hongo, basándose en la habilidad de estos microorganismos para crecer en medios vegetales (papa), así como en las propiedades tanto del rosa de bengala, de limpiar el crecimiento de hongos permitiendo su conteo, como de la estreptomicina, de evitar el crecimiento indeseable de bacterias.

5.1.12.3 Cálculos.

Contar solo aquellas cajas (diluciones) que contenga de 30 a 300 colonias. Con la siguiente ecuación calcular las UFC/g de suelo seco (Fernández *et al*, 2006).

UFC/g s.s. = (NC X 1/FD X 1/V) / (P X FH)

Dónde:

UFC/g.s.s. = unidades formadoras de colonias / g de suelo seco.
NC = número de colonias en una caja.
FD = factor de dilución que corresponde a la dilución de donde se tomó la muestra con la que inocula la caja (10^{-2} a 10^{-10}).
V = volumen inoculado en la caja = 0.1 ml
P = peso de la muestra humedad = 1 g.
FH = factor de corrección de humedad (1) – (% humedad/100).

5.1.13 Prueba de índice de germinación de semillas.

Se colocaron 10 ml de cada extracto que es la muestra de suelo en placas Petri, las que contenían 10 semillas de las especies evaluadas sobre papel filtro, éstas se compararon con un testigo que es agua destilada y un testigo positivo que es el lodo usado para la fertilización. Las placas se mantuvieron durante 120 horas es decir 5 días en cámara de germinación a 25ºC.

Durante este periodo se midió la elongación de radícula y el número de semillas germinadas.

Mediante las siguientes fórmulas, descritas por Tiquia (2000) se obtuvo el IG para los distintos residuos.

$$GR = \frac{\text{N° de semillas en el extracto X 100}}{\text{N° de semillas germinadas en el testigo}}$$

$$ER = \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto X 100}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}}$$

$$IG = \frac{GR \text{ X } ER}{100}$$

Dónde:

GR es el Porcentaje de Germinación Relativo.
ER es el Crecimiento de Radícula Relativo.
IG es Índice de Germinación

5.1.14 Determinación de textura (tamaño de partículas de los suelos).

5.1.14.1 Introducción.

La textura del suelo es la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla; las cuales al combinarse permiten categorizar al suelo en una de las 12 clases de textura.

5.1.14.2 Método.

La determinación del tamaño de partículas del suelo puede realizarse entre otros métodos por el procedimiento de pipeta.

5.1.14.3 Principio y aplicación.

El método de la pipeta es un procedimiento de muestreo directo que consiste en tomar una submuestra de una suspensión de suelo en agua, donde se está llevando a cabo un proceso de sedimentación, determinando el tipo de partícula en función de su velocidad de sedimentación.

La submuestra es tomada a una profundidad h y a un tiempo t, en el que todas las partículas con diámetro mayor o igual que 0.002 mm han sedimentado, teniéndose en las alícuotas únicamente partículas pertenecientes a la fracción arcillosa. El método se basa en la Ley de Stokes.

5.1.14.4 Cálculos.

$$\% \text{ de arena} = (B/A) \times 100$$

Dónde:

A= peso de la muestra
B= peso de arenas

$$\% \text{ de arcilla} = (E/A) \times 100$$

C= peso de arcilla + limo = (A-B)

$$\% \text{ de limo} = (F/A) \times 100$$

D= peso del suelo en la alícuota (partículas <0.002 mm)
E= peso de la arcilla = D X 8
F= peso del limo = A-B-E

Con los porcentajes de arena, limo y arcilla y mediante el uso del triángulo de textura se determina la textura del suelo (Fernández *et al*, 2006).

En la **(figura 12)** se presenta el Triángulo de textura para la identificación del tipo de suelo trabajado.

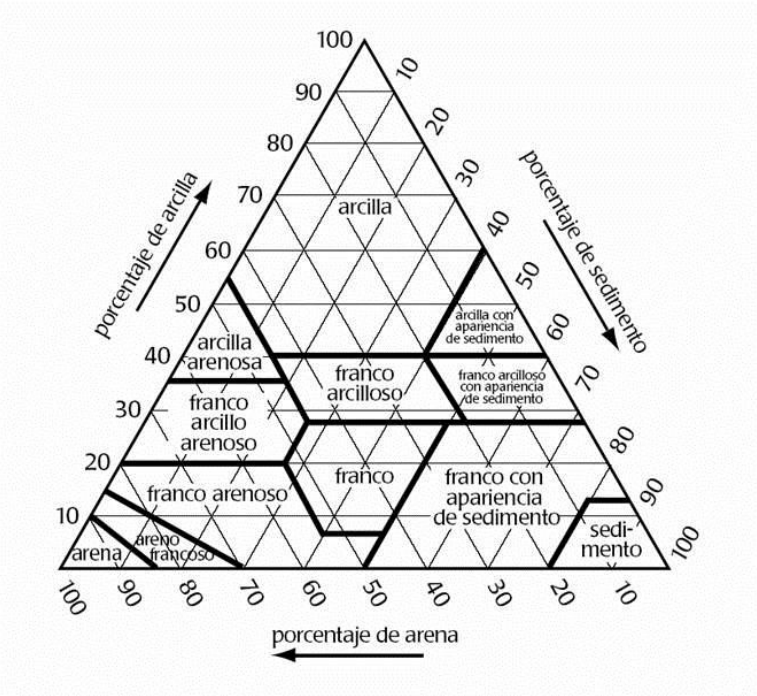


Figura 12. Triangulo de textura del sistema de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Fernández et al, 2006).

5.2 Biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

5.2.1 Método para la determinación de Coliformes fecales.

El presente método establece la técnica para llevar a cabo la cuantificación del grupo coliformes fecales en lodos y biosólidos, con el fin de evaluar la calidad y la eficiencia de los diferentes tratamientos, y es aplicable para la evaluación de la calidad de lodos y biosólidos.

5.2.1.1 Principios del método.

Este método de análisis se basa en que:

Las bacterias presentes en una muestra pueden ser separadas por agitación, dando por resultado una suspensión de células bacterianas, uniformemente distribuidas.

A través de diluciones sucesivas de la muestra se obtienen inóculos de, al menos, una célula para obtener crecimiento en el medio de cultivo (tubos positivos), y otros que al sembrarse dan resultado en por lo menos, un tubo de la serie.

La combinación de resultados positivos y negativos permite realizar una estimación de la densidad bacteriana por medio de cálculos de probabilidad.

La técnica seleccionada permite el estudio de un volumen de muestra suficiente para obtener resultados significativos, considerando la alta turbidez que la muestra pudiera presentar a causa de la gran cantidad de material acumulado. En caso de aplicar técnicas como filtro de membrana se correría el riesgo de un cálculo de coliformes fecales inferior al real.

5.2.1.2 Muestreo, preparación y acondicionamiento de la muestra.

El muestreo constituye una parte integral y fundamental de cualquier programa de evaluación de calidad de lodo.

La muestra deberá ser tomada en frascos de 500 ml de capacidad, de boca ancha y previamente esterilizados.

Las muestras deben ser colocadas en hieleras con bolsas refrigerantes o hielo inmediatamente después de su toma.

Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo.

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso y posteriormente se obtendrá el peso en fresco que corresponda a 4 g de ST.

A partir de su toma y hasta antes de ser procesada, la muestra debe estar en refrigeración y no transcurrir más de 48 horas.

5.2.1.3 Preparación de la muestra.

a) Suspender X g de materia fresca que correspondan a 4 g de sólidos totales en 36 ml de agua de dilución y así obtener una dilución de 10^{-1}.

b) Mezclar durante 2 o 3 minutos, con ayuda de una parrilla de agitación, a velocidad baja (800 rpm), hasta la completa disolución.

5.2.1.4 Preparación de diluciones.

Por el origen de las muestras se requieren inóculos menores a 1 ml, utilizando diluciones seriadas de submúltiplos de 10.

a) Se preparan diluciones decimales seriadas a partir del homogeneizado resultante (10^{-1}) lo antes posible, reduciendo al mínimo la sedimentación. Transferir 1 ml en 9 ml de agua de dilución (10^{-2}) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.

b) Cada dilución debe ser homogeneizada perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba abajo o con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables.

c) Se debe utilizar una pipeta estéril diferente, para cada una de las diluciones decimales subsecuentes. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir, a la muestra, más de la tercera parte de la pipeta.

d) Si una muestra o un lote de muestras va a ser analizado por primera vez, utilizar al menos cuatro series de tres (o cinco) tubos cada una, posteriormente tres series de tres tubos serán suficientes.

5.2.1.5 Determinación de coliformes fecales.

Prueba presuntiva (caldo lauril-triptosa o caldo lactosado).

a) Transferir 1 ml de las diluciones seleccionadas a cada una de las series de tubos correspondientes conteniendo el caldo lauril o caldo lactosado e incubar a 35 ± 0,5°C.

b) Examinar cada tubo a las 24 ± 2 horas. La acidificación, con o sin producción de gas (cambio de coloración de púrpura a amarillo), a partir de la fermentación de la lactosa en el medio de cultivo, indica una prueba presuntiva positiva de la presencia de bacterias del grupo coliformes.

En caso contrario re incubar durante otras 24 horas más.

c) La acidificación del medio, con o sin formación de gas dentro de las 48 ± 3 horas, constituye una prueba presuntiva positiva. Cuando no existe acidificación del medio, constituye una prueba.

Prueba confirmativa flama del (medio EC).

a) Los tubos positivos de la prueba presuntiva se re siembran por triple asada (esterilizada al mechero y enfriada) en tubos de fermentación presuntiva negativa que contengan caldo EC e incubados a 44,5 ± 0,2°C en baño de agua.

b) Examinar cada tubo a las 24 ± 2 horas.

c) El resultado será positivo cuando haya producción de gas a partir de la fermentación de la lactosa contenida en el medio EC. Los tubos sin formación de gas se desechan.

5.2.1.6 Cálculos.

El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio EC. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en la tabla, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

NMP= (NMP de tablas) X (10/mayor volumen inoculado)

Por ejemplo: en medio EC se obtuvo el código 3/3 para la serie de la dilución 0,01; 2/3 para la serie de la dilución 0,001 y 1/3 para la serie de la dilución 0,0001.

El código es de 3, 2, 1; el índice de coliformes en tabla es de 150, por lo que el resultado es:

NMP/g ST= (150) x (10/0, 01) = 150 000

NMP/g ST=1,5 x 10 5 coliformes fecales

Cuando se inoculan más de tres volúmenes decimales, para la composición del código se utilizan los resultados positivos correspondientes a tres series consecutivas inoculadas.

En ocasiones algunos de los posibles resultados de tubos múltiples son omitidos de las tablas del NMP. Así los códigos como 0-0-3, 0-0-4 y 0-0-5 junto con muchos otros, no están incluidos. Ello se debe a que la probabilidad de su ocurrencia es muy baja.

Si en un laboratorio dichos resultados improbables aparecen con una frecuencia mayor de 1%, es posible que se deban a procedimientos equivocados en el mismo, por lo que deben ser revisados.

Cuando el código del NMP no aparezca en tablas, se utilizará la siguiente fórmula:

NMP = (Número de tubos positivos x 100)/ [(ml muestra tubos neg.) x (ml muestra total)]

La frecuencia de obtención de resultados que no se encuentren en las tablas debe ser baja (< **1**%), de otra forma se tendrá que revisar y confirmar el procedimiento de la prueba.

5.2.1.7 Expresión de resultados.

La densidad de los coliformes fecales se expresa como NMP de coliformes por g de materia seca o ST, el cual se obtiene a partir de tablas ya establecidas, las cuales incluyen los límites de confianza al 95% para cada una de las combinaciones de tres (o cinco) series de tubos positivos posibles. Para su utilización se proporcionan códigos formados por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas.

5.2.1.8 Interferencias.

La posible presencia de otras bacterias que producen ácido a partir de lactosa, lo que se elimina en la prueba confirmativa a la temperatura de 44,5°C. Es importante que los tubos de Durham colocados en los tubos de fermentación, una vez preparados y esterilizados, no presenten aire en su interior. En caso contrario se pueden obtener resultados positivos falsos.

5.2.2 Método para la determinación de *Salmonella sp.*

El presente método establece la técnica para llevar a cabo la cuantificación de *Salmonella sp.* mediante la técnica de tubos múltiples o número más probable (NMP) en lodos y biosólidos, con el fin de evaluar su calidad y la eficiencia de los tratamientos de los mismos. Este método es aplicable para la evaluación de la calidad de los lodos y biosólidos.

5.2.2.1 Principio.

Este método de análisis se basa en los siguientes principios:

A partir de un enriquecimiento con medios selectivos, que contienen sustancias inhibidoras, se favorece la multiplicación de *Salmonella sp*., reconstituyendo a su vez la vitalidad de las células dañadas y, de igual forma, impidiendo el desarrollo de bacterias coliformes asociadas.

Una vez realizada la selección, las bacterias presentes en una muestra pueden ser separadas por agitación, dando por resultado una suspensión de células bacterianas, uniformemente distribuidas, a través de diluciones sucesivas de la muestra.

La aplicación de pruebas bioquímicas que permiten conocer el perfil bioquímico de las cepas en estudio para compararlo, con el que generalmente exhiben las cepas del género *Salmonella sp.*

5.2.2.2 Muestreo, preparación y acondicionamiento de la muestra.

El muestreo constituye una parte integral y fundamental de cualquier programa de evaluación de calidad del lodo, por lo cual, éste deberá efectuarse de acuerdo a lo referido en el Anexo Norma Oficial Mexicana **NOM-004-SEMARNAT-2002.**

La muestra deberá ser tomada en frascos de 500 ml de capacidad, de boca ancha y previamente esterilizados.

Las muestras deben ser colocadas en hieleras con bolsas refrigerantes o hielo inmediatamente después de su toma.

Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo.

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso y posteriormente se obtendrá el peso en fresco que corresponda a 4 g de ST.

A partir de su toma y hasta antes de ser procesada, la muestra debe estar en refrigeración y no transcurrir más de 48 horas.

5.2.2.3 Preparación de la muestra.

a) Suspender X gramos de materia fresca que correspondan a 4 gramos de sólidos totales en 36 ml de agua de dilución y así obtener una dilución de 10^{-1}.

b) Mezclar durante 2 o 3 minutos, con ayuda de una parrilla de agitación, a velocidad baja (800 rpm), hasta la completa disolución.

5.2.2.4 Enriquecimiento.

a) Suspender X g de materia fresca que correspondan a 4 g de sólidos totales en 36 ml de caldo de tetrationato, obteniendo una dilución de 10^{-1}.

b) Mezclar durante 2 o 3 minutos, con la ayuda de una parrilla de agitación, a baja velocidad (800 rpm) hasta la completa disolución.

c) Incubar durante 22 ± 2 horas a 37°C ± 0,2°C.

5.2.2.5 Preparación de diluciones.

a) Una vez transcurrido el tiempo de incubación, preparar las diluciones decimales seriadas transfiriendo 1 ml de caldo de tetrationato en 9 ml de agua de dilución (10^{-2}) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada.

b) En cada dilución se debe homogeneizar perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba a abajo o con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables y utilizar una pipeta estéril diferente, para cada una de las diluciones decimales subsecuentes.

c) Adicionar por triplicado 1 ml de cada una de las diluciones preparadas en tubos conteniendo caldo, selenito cistina correctamente etiquetados. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir en la muestra, más de la tercera parte de la pipeta.

d) Incubar durante 24 ± 2 horas a 41°C ± 0,2°C.

e) Realizar la observación del virado de coloración, considerando un color anaranjado intenso como positivo de la prueba correspondiente.

5.2.2.5 Aislamiento e identificación bioquímica de *Salmonella sp.*

a) El aislamiento y la identificación no son indispensables para la cuantificación de *Salmonella sp*., pero son necesarios como control para el laboratorio de que las bacterias fueron correctamente identificadas.

b) A partir de un cierto número de tubos positivos (con virado anaranjado), con la ayuda de un asa, sembrar por estría para obtener colonias aisladas sobre la superficie de placas de alguno de los medios diferenciales selectivos. Los medios utilizados pueden ser agar verde brillante, agar sulfito de bismuto, agar XLD, agar SS.
c) Incubar a 35°C durante 24 horas.

d) Observar los cultivos para identificar las colonias sospechosas para *Salmonella sp*. Como sigue:

- **Agar verde brillante:** colonias rojas o rosas rodeadas del medio rojo.
- **Agar bismuto de sulfito:** colonias negras con o sin brillo metálico, rodeadas de un halo café que posteriormente se transforma en negro.
- **Agar XLD:** colonias rojas, generalmente presentan el centro negro.
- **Agar SS:** colonias translúcidas, transparentes u opacas y algunas veces con centro negro.

e) Para la identificación bioquímica se seleccionan al menos 2 colonias típicas sospechosas de cada placa, que se encuentren bien aisladas.

f) Tocar con un asa recta cada colonia e inocular por estría en una placa conteniendo agar nutritivo (u otro medio similar). Incubar a 35°C ± 0,2°C por 24 horas.

g) A partir de colonias perfectamente aisladas inocular 2 tubos, uno con agar triple azúcar y hierro (TSI) y otro con agar hierro lisina (LIA), por estría en la superficie inclinada y por picadura en el fondo. Incubar a 35°C durante 24 horas.

h) Observar el crecimiento en los tubos y considerar positivas las colonias que den las siguientes reacciones:

- **Agar TSI:** en el fondo del tubo se observa virado color amarillo debido a la fermentación de la glucosa, en la superficie del medio se intensifica el color rojo. En la mayoría de los casos se observa coloración negra a lo largo de la picadura, debido a la producción de H_2S.
- **Agar LIA:** se observa coloración púrpura en todo el tubo, en ocasiones se observa la producción de H_2S, con ennegrecimiento a lo largo de la picadura.

5.2.2.6 Cálculos.

El NMP de *Salmonella sp*. se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el caldo de selenito cistina. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en tablas, se obtienen el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

NMP = (NMP de tablas) x (10/mayor volumen inoculado)

Por ejemplo: en medio selenito cistina se obtuvo el código 3/3 para la serie de la dilución 0,1; 2/3 para la serie de la dilución 0,01 y 1/3 para la serie de la dilución 0,001.

El código es de 3, 2, 1 al consultar en las tablas obtenemos un valor de 150, el resultado es:

NMP/g ST= (150) x (10/0, 1) = 15 000
NMP/g ST= 1, 5 x 10 4 *Salmonella sp.*

Cuando se inoculan más de tres volúmenes decimales, para la composición del código se utilizan los resultados positivos correspondientes a tres series consecutivas inoculadas.

En ocasiones algunos de los posibles resultados de tubos múltiples son omitidos de las tablas del NMP. Así los códigos como 0-0-3, 0-0-4 y 0-0-5 junto con muchos otros, no están incluidos. Ello se debe que la probabilidad de su ocurrencia es muy baja. Si en un laboratorio dichos resultados improbables aparecen con una frecuencia mayor de 1%, es posible que se deban a procedimientos equivocados en el mismo, por lo que deben ser revisados. Cuando el código del NMP no aparezca en tablas, se utilizará la siguiente fórmula:

NMP = (Número de tubos positivos x 100)/ $\sqrt{\text{[(ml muestra tubos neg.) x (ml muestra total)]}}$

La frecuencia de obtención de resultados que no se encuentren en las tablas debe ser baja (menor 1%), de otra forma se tendrá que revisar y confirmar.

5.2.2.7 Expresión de resultados.

La densidad de *Salmonella sp*. se expresa como NMP de coliformes por g de materia seca o ST, el cual se obtiene a partir de tablas ya establecidas, las cuales incluyen los límites de confianza al 95% para cada una de las combinaciones de tres (o cinco) series de tubos positivos posibles.

Para su utilización se proporcionan códigos formados por tres algoritmos correspondientes al número de tubos con resultados positivos en tres series consecutivas.

5.2.3 Método para la determinación de Huevos de Helminto

El presente método tiene por objeto establecer la técnica para la detección, enumeración, determinación y de la viabilidad, en caso requerido, de huevos de helmintos en muestras de lodos y biosólidos, con el fin de evaluar la calidad de estos subproductos y la eficiencia de los sistemas de tratamiento a los que están sujetos.

5.2.3.1 Principio.

La prueba se basa en el siguiente principio:

Por medio de lavados continuos, combinados con diversas etapas de filtración y flotación se logra la separación de los huevos de helmintos del resto de las partículas de mayor y menor tamaño, así como su concentración.

Permite, en caso de ser requerido, determinar la viabilidad de los huevos de helminto y con ello confirmar la calidad de diversos procesos de estabilización en lodos.

5.2.3.2 Muestreo, preparación y acondicionamiento de la muestra.

El muestreo constituye una parte integral y fundamental de cualquier programa de evaluación de calidad del lodo, por lo cual, éste deberá efectuarse de acuerdo con lo referido en el punto 5 de esta Norma.

Preparar recipientes de plástico inerte de 500 ml de boca ancha y de cierre hermético, previamente desinfectados con cloro comercial, lavados con agua potable a chorro y enjuagados con agua destilada.

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso para, posteriormente, tomar en los recipientes el peso en fresco (X) que corresponda a 2 g de ST, para todo tipo de lodos.

Mantener la muestra a una temperatura de 4°C ± 2°C hasta su llegada al laboratorio.

A partir de su toma y hasta antes de ser procesada, la muestra debe estar en refrigeración hasta su análisis.

5.2.3.3 Procedimiento.

El tratamiento de la muestra se realizará efectuando los siguientes pasos:

a) Por 1 minuto y con la ayuda de una licuadora homogeneizar el peso en freso que corresponda a 2 g de ST.

Utilizar para ello 200 ml de una solución de Tween 80 al 0,1%, integrando los enjuagues del recipiente que originalmente contenía la muestra.

b) Recuperar homogeneizado y enjuagues del vaso de la licuadora en un recipiente de plástico de 2 L, utilizar para ello 800 ml de la solución de Tween 80 al 0,1%.

c) Dejar sedimentar la muestra al menos durante 3 horas.

d) Aspirar el sobrenadante por vacío y filtrar el sedimento a través del tamiz de poro seleccionado (150 a 170 μm). Enjuagar recipiente y tamiz con 1 L de agua destilada, para lo cual se recomienda utilizar una pizeta. El filtrado y los enjuagues se recuperan en el recipiente de plástico de 2 L.

e) Dejar sedimentar al menos durante 3 horas.

f) Aspirar el sobrenadante por vacío y recuperar sedimento y enjuagues, con agua destilada, en un tubo de centrífuga de 200 ml o mayor capacidad.

g) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

h) Aspirar el sobrenadante por vacío y desecharlo. Resuspender la pastilla en 150 ml de la solución de sulfato de zinc. Homogeneizar la pastilla con ayuda de un agitador de tubos y, sólo en caso de ser necesario, utilizar aplicadores de plástico o espátula de teflón para lograr su completa disolución.

i) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

j) En caso de contar con un tamiz de 20 μm de poro se recomienda efectuar un segundo filtrado, cuya finalidad es remover el detritus de menor tamaño y facilitar la lectura de los huevos de helminto en el sedimento final al microscopio. Para ello, filtrar el sobrenadante y recuperar la película que ha quedado retenida sobre la malla con el volumen de agua destilada que sea necesario (utilizar pizeta), en un tubo de 200 ml de centrífuga, desechar filtrado y pasar al inciso i.

En caso contrario verter el sobrenadante en un recipiente de 2 L y romper la densidad con 1 L de agua destilada.

k) Sedimentar al menos durante 3 horas.

l) Una vez transcurrido el tiempo de sedimentación aspirar el sobrenadante por vacío y recuperar el sedimento resultante en un tubo de centrífuga de 200 ml o mayor capacidad, incluir los enjuagues del recipiente.

m) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

n) Aspirar el sobrenadante por vacío y resuspender el sedimento por agitación, con ayuda de un agitador de tubos (si es necesario, utilizar aplicadores). La solución resultante se recupera en un tubo cónico de centrífuga de 50 ml, incluyendo el agua destilada de enjuague.

o) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

p) Aspirar el sobrenadante y con ayuda de un agitador de tubos resuspender la pastilla en 15 ml de la solución de alcohol-ácido (u opcionalmente, el patrón de aceto-acético) y, posteriormente, agregar 10 ml de éter (o acetato de etilo, que es menos tóxico). Agitar suavemente y, de vez en cuando, destapar para dejar escapar el gas que se desprenda. Por seguridad, realizar todo este proceso dentro de la campana de extracción (en el laboratorio) o con mascarilla de protección antigás (en campo).

q) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

r) Aspirar el sobrenadante, hasta 2 mm por arriba de la parte cónica del tubo de 50 ml (aproximadamente 5 ml).

Realizarlo bajo las mismas condiciones de seguridad (en el laboratorio) dentro de la campana de extracción o (en campo) con mascarilla de protección antigás.

s) Efectuar un primer enjuague agregando H_2SO_4 0,1 N (o formalina 0,5%).

t) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

u) Aspirar el sobrenadante, dejando 5 ml y realizar un segundo enjuague agregando H_2SO_4 0,1 N (o formalina 0,5%).

v) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos.

w) Aspirar el sobrenadante dejando 5 ml del mismo.

5.2.3.4 Determinación de viabilidad y lectura al microscopio.

a) Si no es necesario determinar la viabilidad, proceder a la cuantificación, en caso contrario, incubar el tubo con la muestra durante 4 semanas a 26°C ± 0,2°C. Dejar la tapa del tubo floja para que entre aire y, por lo menos una vez por semana, verificar que el nivel del líquido no disminuya. Si es necesario, agregar agua destilada.

b) Una vez transcurrido el tiempo de incubación, homogeneizar la pastilla y proceder a la cuantificación de los huevos. Para la lectura verter el sedimento final en una celda de Sedgwich Rafter o Disco Doncaster. En caso necesario, y para evitar la sobreposición de estructuras y del detritus no eliminado, distribuir en alícuotas y homogeneizar con agua destilada. Sólo aquellos huevos donde se observe la larva se consideran viables.

c) Como paso opcional, y antes de realizar la lectura al microscopio, añadir hipoclorito de sodio (10%) en igual volumen al sedimento final y dejar reposar durante 10 minutos. Aforar con agua destilada.

d) Centrifugar a 660 g durante 5 minutos y decantar hasta dejar 5 ml del sobrenadante.

e) Realizar un segundo enjuague con agua destilada y centrifugar bajo las mismas condiciones.

Lo anterior permite una mayor claridad en el contenido interno de los huevos (especialmente de *Ascaris* y *Trichuris*), una mejor diferenciación y, en consecuencia, un conteo más rápido.

f) Aspirar sobrenadante hasta 5 ml del volumen final.

5.2.3.5 Cálculos.

La fórmula para calcular g es:

$$g = \frac{r\ (rpm)}{k}$$

Dónde:

g = fuerza relativa de centrifugación
k = constante cuyo valor es 89, 456
r = radio de la centrífuga en cm
rpm = revoluciones por minuto

Para el cálculo del por ciento de sólidos totales (ST), se utiliza el % de humedad como sigue:

% de sólidos totales = 100% -% de humedad (2)

5.2.3.6 Expresión de resultados.

% de sólidos totales = 100% -% de humedad

Expresar los resultados en número de huevos/2 g de sólidos totales (volumen de muestra analizada).

$$\frac{H}{2g\ ST}$$

Dónde:

H = número de huevos leídos en la muestra
gST = gramos de sólidos totales de la muestra analizados

5.2.3.7 Interferencias.

La sobreposición de estructuras y/o detritus no eliminados en el sedimento puede dar una evaluación errónea al dificultar la lectura. En tal caso, es importante diluir con agua destilada y hacer las alícuotas que se consideren necesarias para que en cada una se realice el conteo.

La falta de experiencia en la identificación de géneros es un elemento común de sobreconteo. En caso de que la muestra presente la formación de hongos durante el proceso de incubación se recomienda remplazar el H_2SO_4 0,1 N por una solución de formalina 0,5%.

5.2.4 Método para la determinación de Metales pesados

El presente método tiene por objeto establecer la técnica para la determinación de arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, níquel y zinc, en muestras de biosólidos, por espectrofotometría de absorción atómica, donde el análisis de los elementos se efectúa individualmente.

5.2.4.1 Principio.

El método analítico se basa en la atomización de la muestra para liberar los átomos, a los que se les aplica una energía de una longitud de onda específica que es absorbida e induce al electrón a pasar a un estado excitado. Esta energía absorbida es proporcional a la concentración del elemento en la muestra analizada.

5.2.4.2 Recolección.

La muestra debe tomarse en recipientes de polietileno o de vidrio y boca ancha de 50 ml y llenando hasta el tope.

5.2.4.3 Preservación y almacenamiento de la muestra.

La muestra debe refrigerarse inmediatamente a 4°C por un tiempo máximo de 6 meses, excepto para el caso del mercurio que se requiere analizar antes de 28 días.

5.2.4.4 Procedimiento.

Los siguientes puntos describen la secuencia del método de prueba, el que se debe realizar conforme a lo descrito.

5.2.4.5 Preparación de la muestra.

Las muestras de lodos y biosólidos, requieren, en general, un tratamiento previo antes del análisis. Los metales totales incluyen la combinación de los que se encuentran en la fase orgánica y en la inorgánica, así como los disueltos y en partículas.

5.2.4.6 Notas.

a) Durante todo el procedimiento analítico donde se mencione utilización de ácidos, éstos deben ser grado suprapuro.

b) Procesar las muestras de control establecidas en su programa de AC, por cada serie de digestión.

5.2.4.7 Digestión por horno.

Homogeneizar perfectamente la muestra, verificando que no existan sólidos adheridos en el fondo del recipiente. En seguida, vaciar aproximadamente 10 g en una cápsula de porcelana (a peso constante) y colocarla en el horno hasta que el material esté a peso constante. El horno debe estar a 100ºC.

5.2.4.8 Digestión por parrilla.

Pesar y registrar de uno a dos gramos de la muestra en un vaso de precipitado de 100 ml o en un crisol de platino y añadir 10 ml de HNO_3 concentrado. Cubrir con un vidrio de reloj y calentar lentamente hasta que exista reflujo de vapores, cuidando que no alcance la temperatura de ebullición. Calentar casi a sequedad.

Enfriar y lavar el vidrio de reloj con agua. Adicionar otros 5 ml de HNO_3 concentrado. Cubrir y continuar calentando hasta digestión completa, que es cuando la solución adquiere apariencia cristalina y los vapores son blancos. Agregar el ácido necesario para obtener esto.

Evaporar hasta obtener un volumen aproximado de 2 ml, enfriar y enjuagar el vidrio de reloj con agua. Añadir 10 ml de HCL 1:1 (ver 6.1.3) y 15 ml de agua. Calentar nuevamente por 15 minutos para redisolver precipitados que se hayan formado.

Enfriar, enjuagar las paredes del vaso y vidrio de reloj con agua. Vaciar el contenido a un matraz volumétrico de 50 ml, filtrando a través de papel filtro número 40, para remover el material insoluble que pueda tapar el nebulizador. Aforar al volumen correspondiente.

5.2.4.9 Digestión por autoclave.

En un vaso de teflón de 100 ml, transfiera 0,5 g de la muestra seca. Marque y pese los vasos antes y después para obtener el peso exacto de la muestra.

Añadir 5 ml de HNO_3, tapar los recipientes herméticamente y la autoclave. Encender el equipo y dejarlo en operación a 15 lb, aproximadamente una hora. El laboratorio debe validar el tiempo de digestión, con el equipo que utilizará para tal fin.

Sacar y enfriar a temperatura ambiente los vasos de teflón.

Abrir y filtrar a través de papel filtro número 40, si se requiere, para retener materiales insolubles. Lavar las paredes con agua y diluir la muestra a 50 ml.

5.2.4.10 Digestión por horno de microondas.

Para usar el horno de microondas como fuente de energía, en la digestión de la muestra, se sigue el mismo procedimiento descrito, excepto que el tiempo de la digestión puede variar de 30 a 50 min dependiendo de las características de la muestra y de la potencia aplicada.

5.2.4.11 Análisis instrumental.

5.2.4.11.1 Flama-aire-acetileno.

Conectar la lámpara de cátodo hueco o descarga sin electrodos y encender el equipo.

Seleccionar la longitud de onda y el ancho de banda espectral de acuerdo al metal a analizar, siguiendo el protocolo del laboratorio o el manual del fabricante. En la **(Tabla 12)** se proponen las longitudes de onda y el ancho de banda espectral con los que se pueden analizar los elementos.

Tabla 12. Relación de longitud y ancho de la banda para los elementos analizados por flama

Elemento	Longitud de onda (λ)	Ancho de banda espectral (nm)
Cd	228.8	0.7
Cr	357.9	0.7
Cu	324.8	0.7
Ni	232.0	0.7
Pb	217.0	0.7
Zn	213.9	0.7

Alinear la lámpara vertical, horizontal y rotacionalmente, hasta obtener la máxima energía.

Esperar de 10 a 20 minutos para que se estabilice el instrumento.

Ajustar las condiciones de la flama aire-acetileno, de acuerdo con las indicaciones del fabricante.

Encender la flama. Permitir que el sistema alcance el equilibrio de temperatura.

Aspirar el blanco y ajustar el instrumento a cero.

Aspirar la disolución del estándar con la concentración necesaria para obtener 0,2 unidades de absorbancia. Ajustar con esta disolución el instrumento y si es necesario también ajustar el quemador, hasta obtener el valor más cercano a 0,2 unidades de absorbancia. En la siguiente **(Tabla 13)** se presentan la relación de concentración de calibración del instrumento.

Tabla 13. Relación de concentraciones para calibración del instrumento utilizando flama

Elemento	Concentración ppm
Cd	1.5
Cr	4.0
Cu	2.0
Ni	7.0
Pb	9.0
Zn	1.0

Aspirar la disolución estándar, mínima cinco concentraciones, para realizar la curva de calibración y un blanco de reactivos. El primer punto debe ser igual o mayor al límite de cuantificación del método y el último debe estar dentro del intervalo lineal.

Proceder a analizar las muestras problema y las muestras control. Si las lecturas de las muestras están fuera del intervalo de la curva de calibración, efectuar la(s) dilución(es) que sean necesarias, hasta obtener valores en el intervalo de trabajo.

5.2.4.12 Determinación de mercurio y arsénico por generador de hidruros.

Instalar la lámpara correspondiente al metal que se va a analizar en el instrumento y encenderlo.

Esperar de 20 a 30 minutos para su estabilización.

Seleccionar la longitud de onda y el ancho de banda espectral. En la **(Tabla 14)** se proponen las longitudes de onda y ancho de banda para cada uno de los elementos.

Tabla 14. Relación de longitud y ancho de banda para los elementos analizados por generador de hidruros

Elemento	Longitud de onda (λ)	Ancho de banda espectral (nm)
As	193.7	0.7
Hg	253.7	0.7

Alinear la lámpara vertical, horizontal y rotacionalmente, hasta obtener la máxima energía.

Alinear la celda de cuarzo vertical, horizontal y rotacionalmente, hasta obtener la mínima energía.

Esperar de 20 a 30 minutos para su estabilización.

Ajustar y optimizar los flujos de aire-acetileno y encender la flama. Esperar aproximadamente 10 minutos para su estabilización. Este ajuste sólo se requiere para la determinación de arsénico.

Abrir el tanque de nitrógeno y ajustar la presión de acuerdo a las especificaciones del fabricante, para transportar el hidruro formado a la celda de cuarzo.

Colocar en el recipiente del reductor la disolución de borohidruro de sodio y conectar al sistema según las especificaciones del instrumento.

Conectar el vaso de reacción vacío al sistema generador y esperar el tiempo suficiente a que se estabilice el sistema. Cuando se ha estabilizado, registrar el cero en el espectrofotómetro (autocero). Retirar el vaso.

Conectar otro vaso de reacción con 10 ml de HCl 1,5%, permitir la entrada del hidruro formado y registrar el cero. Repetir esta operación hasta obtener el cero por lo menos tres veces. Retirar el vaso.

Vaciar en otro vaso de reacción, 10 ml de disolución estándar, para obtener el 0,2 unidades de absorbancia. En la **(Tabla 15)** se indican las concentraciones, con las que se obtiene el 0,2 unidades de absorbancia. Repetir esta operación hasta que se obtenga por lo menos tres veces la misma lectura, la cual deberá ser aproximadamente de 0,2. En caso de existir variación en las lecturas, verificar la alineación de la lámpara y de la celda de cuarzo.

Tabla 15. Relación de concentraciones para calibración del instrumento utilizando generador de hidruros

Elemento	Concentración, mg
As	5
Hg	50

De forma similar al punto anterior, realizar la curva de calibración con un mínimo de cinco concentraciones y por lo menos tres lecturas independientes. Limpiar el sistema haciendo pasar ácido clorhídrico al 1,5% cada tres lecturas.

Una vez determinada la curva de calibración, proceder a analizar el blanco, las muestras problema y las muestras control, como se indica en los dos puntos anteriores. Si las lecturas de las muestras están fuera del intervalo de la curva de calibración, efectuar la(s) dilución(es) que sean necesarias, hasta obtener valores en el intervalo de trabajo.

5.2.4.13 Cálculos.

Interpolar los valores de absorbancia o altura de pico de la muestra analizada en la curva de calibración, para obtener la concentración en mg/l (A). En seguida realizar los cálculos, tomando en cuenta los factores de dilución y peso de la muestra con la fórmula siguiente:

$$mg\ /\ kg = CAxBxFD$$

Dónde:

A: Concentración en mg/l de la muestra a interpolar en la curva de calibración.
B: Volumen al que se llevó la muestra (ml).
C: Peso de la muestra (g).
FD: Factor de dilución.

En los instrumentos que tienen integrado un procesador de datos, se puede obtener directamente la concentración del elemento.

5.2.4.14 Reporte de resultados.

No se deben reportar concentraciones de elementos por debajo del límite de cuantificación.

Reportar los resultados del análisis en mg/kg.

5.2.4.15 Interferencias.

Probablemente no existirá nunca un método analítico que esté totalmente libre de alguna interferencia por parte de la naturaleza de la muestra, sin embargo, en absorción atómica, por ser una técnica muy específica, las interferencias están bien definidas como también los medios para su tratamiento.

Interferencia por matriz: la principal interferencia para este tipo de muestras es la presencia de materia orgánica y sólidos en suspensión, lo que se elimina mediante una adecuada digestión de la muestra. Interferencia de absorción no específica (fondo). La absorción molecular y la dispersión de la luz causadas por partículas sólidas en la flama pueden causar errores positivos. Para evitar este problema se debe utilizar la corrección de fondo del instrumento. Estos sólidos además de presentar una barrera física al paso de la luz de la lámpara en la flama, forman depósitos en la cabeza del quemador, sin embargo, esto se puede evitar aspirando continuamente agua acidulada.

Interferencias físicas: Están relacionadas con las diferentes propiedades existentes entre las muestras y los estándares. Las cuales pueden afectar a la aspiración y eficiencia de nebulización en el sistema de atomización. Si las soluciones presentan diferencias de viscosidad y/o tensión superficial, la eficiencia de nebulización no será igual y los resultados analíticos se ven afectados. La presencia de otros compuestos además del elemento de interés puede afectar a los resultados analíticos.

Estas interferencias pueden ser corregidas utilizando el método de adición interna (adición de estándares).

Las interferencias en generador de hidruros se presentan por presencia de otros elementos o moléculas presentes en la muestra. Los efectos se ven reflejados en una disminución de la cantidad de hidruro formado y, por lo tanto, en una disminución de la señal analítica. La forma de eliminar este tipo de interferencias es modificando la concentración del ácido y/o del borohidruro de sodio.

5.2.4.16 Manejo de residuos.

Cada laboratorio debe considerar dentro de su programa de control de calidad (CC) el tratamiento de los residuos generados durante la determinación.

Confinamiento. El laboratorio debe contar con áreas especiales, que tengan señalamientos adecuados, para almacenar temporalmente las soluciones contaminadas con metales pesados.

Todas las muestras que cumplan con la norma de descarga al alcantarillado pueden descargarse en el mismo.

6 RESULTADOS Y DISCUSION

Con base a la metodología establecida para la determinación de parámetros de calidad con la que los biosólidos deben cumplir según lo establecido en la **NOM-004-SEMARNAT-2002**, para ser reutilizados y a la metodología establecida para la caracterización del suelo a fertilizar y de la paja usada como aditivo y finalmente a la metodología seguida para fertilizar el suelo, se presentan los siguientes resultados:

6.1 Biosólidos.

La (**Tabla 16)** presenta los límites máximos permisibles para metales pesados.

Tabla 16. Límites Permisibles para metales pesados en biosólidos NOM-004-SEMARNAT-2002

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/Kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

La **(Tabla 17)** presenta los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos.

Tabla 17. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos NOM-004-SEMARNAT-2002

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	***Salmonella sp.* NMP/g en base seca**	**Huevos de Helminto/ 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

Los demás parámetros se realizaron para establecer el contenido de nutrientes en el lodo, y así saber la factibilidad de su aplicación en el suelo.

La **(Tabla 18)** muestra la clasificación de los biosólidos con base a su uso o aprovechamiento dependiendo de la clase de estos y a los resultados arrojados al ser comparados con límites máximos permisibles establecidos en la **NOM-004-SEMARNAT-2002.**

Tabla 18. Aprovechamiento de biosólidos NOM-004-SEMARNAT-2002

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	• Usos urbanos con contacto directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase B y C
Excelente o Bueno	B	• Usos urbanos sin contacto publico directo durante su aplicación • Los establecimientos para clase C
Excelente o bueno	C	• Usos forestales • Mejoramiento de suelos • Usos agrícolas

Se analizaron 3 muestras de biosólidos provenientes de diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales, algunas de ellas industriales y otras de tipo municipal, de los cuales se arrojaron los resultados siguientes descritos en la **(Tabla 19)**:

Tabla 19. Resultados Arrojados de Muestras de Biosólidos

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Nitrógeno total (mg/L)	3.9872	1.6090	3.80
Fosforo total (mg/L)	0.8070	0.1200	1.8636
COT (Carbono Orgánico Total) (%)	35.52	37.01	42.7067
MOT (Materia Orgánica Total) (%)	20.76	15.90	28.50
*Arsénico total (mg/L)	<0.001	<0.001	<0.0025
*Cadmio total (mg/L)	<0.0052	<0.0052	<0.0250
*Plomo total (mg/L)	<0.001	<0.001	0.1372
*Cromo total (mg/L)	<0.1	<0.1	0.0934
*Mercurio total (mg/L)	<0.001	<0.001	<0.0005
*Cobre total (mg/L)	<0.001	<0.001	1.0306
*Níquel total (mg/L)	<0.001	<0.001	<0.1000
*Zinc total (mg/L)	<0.001	<0.001	1.0664
*Coliformes fecales (NMP/100 ml)	N.D.	110000	4300
**Salmonella sp.* (en 25 g)	AUSENTE	AUSENTE	AUSENTE
*Huevos de Helminto (H/5 L)	<1	<1	<1
*Sólidos totales (mg/L)	0.09491	0.11234	32.3254
*Sólidos volátiles (mg/L)	0.00508	0.03456	22.1278
pH (unidades pH)	9.21	7.94	6.85
Conductividad eléctrica (μS/cm)	183.6	9.67	1439
Calcio total (mg/L)			2.500
Magnesio total (mg/L)			1.0000
Sodio total (mg/L)			110.6180
Potasio (mg/L)			58.0985
Humedad (%)	30.98	46.14	80.21

*****Parámetros establecidos en la **NOM-004-SEMARNAT-2002**

Finalmente de las tres muestras analizadas se escogió la tercera muestra por tener mejores resultados, en cuanto a nutrientes esenciales.

En las **(Figuras 13, 14, 15, 16, 17 y 18)** se presentan el principio de los análisis efectuados para las muestras de lodos.

La muestra 1 y 2 de biosólidos presenta bajas concentraciones de Nitrógeno total, Fosforo total, Carbono orgánico total, Materia orgánica total, Sólidos totales y volátiles en cuanto a pH presentan valores altamente alcalinos, la conductividad eléctrica es baja. En cuanto a patógenos y parásitos no hubo presencia de *salmonella sp.* y los huevos de Helminto se presentaron <1. Los coliformes fecales no fueron detectados en la muestra 1 pero si en la muestra 2 en una alta concentración. Los metales fueron todos menores a los límites máximos permisibles establecidos en la **tabla 1** de la **Norma Oficial Mexicana 004-SEMARNAT-2002**, donde se presentan los límites máximos permisibles para metales. En cuanto a su humedad ambas muestras presentan una humedad pobre.

La muestra 3 presentó una mejor y más alta concentración de Nitrógeno total, Fosforo total, Carbono orgánico total, Materia orgánica total, Sólidos totales y volátiles en cuanto a pH muestra un valor ligeramente ácido, la conductividad eléctrica es alta. En cuanto a patógenos y parásitos para *salmonella sp*. no se muestra la presencia de esta y para huevos de helminto se muestra un valor de <1. En cuanto a coliformes fecales se presentó una cantidad considerable de estos pero nada que rebasara los límites establecidos en la **tabla 2** de la **Norma 004-SEMARNAT-2002** que presenta los límites permisibles para patógenos y parásitos, y que cumple con los requerimientos para biosólidos que serán aplicados en clasificación C, que se refiere a mejoramiento de suelos y uso agrícola. Los metales están dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la **tabla 1** de la **Norma Oficial Mexicana 004-SEMARNAT-2002** para metales. Presenta una muy buena humedad que favoreció en gran medida al suelo a rehabilitar.

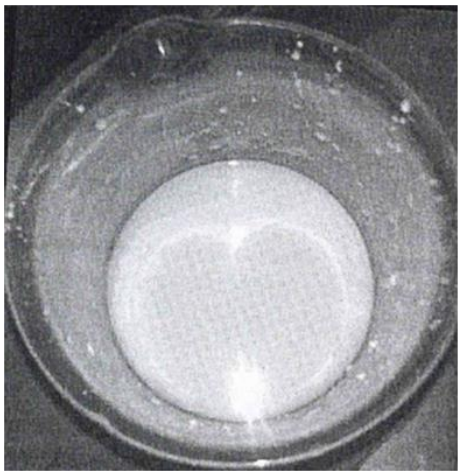


Figura 13. Textura que presentan los lodos en el fondo del recipiente.

Figura 14. Preparación de biosólidos para su secado en horno a 105 ºC.

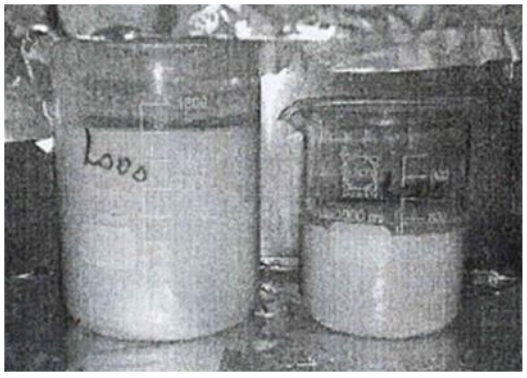


Figura 15. Biosólidos secándose en el horno a 105 ºC.

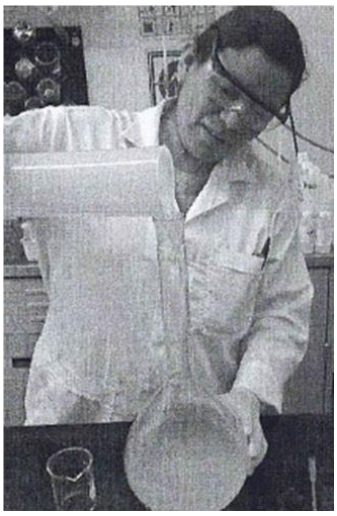


Figura 16. Realización de dilución de la muestra de biosólido para su análisis.

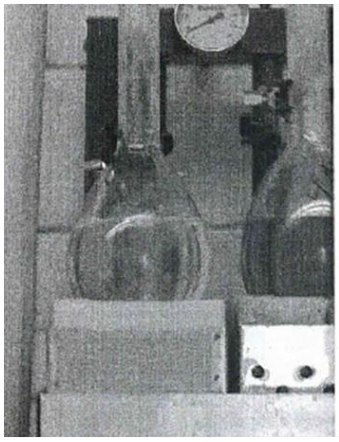


Figura 17. Determinación de Nitrógeno total mediante el método Kjeldahl.

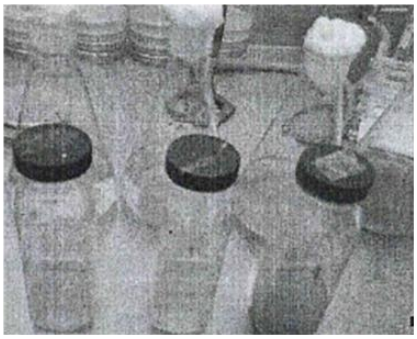


Figura 18. Preparación de diluciones para la determinación de la presencia o ausencia de microorganismos patógenos.

A continuación se presenta los resultados obtenidos del análisis del % de Nutrientes que puede presentar el Trigo en la **(Tabla 20)**, así como en la **(Tabla 21)** se presenta los resultados de la caracterización del Suelo a rehabilitar.

6.2 Paja de Trigo.

Tabla 20. Resultados arrojados de Paja de Trigo usada como aditivo

Parámetro	Resultado
Nitrógeno total (% b.s)	0.37
COT (Carbono Orgánico Total) (% b.s)	45.23
pH (unidades pH)	5.1
Humedad (%)	5.75
Relación C:N (Labrador , 2001)	100-122.2

Se usó paja de trigo como aditivo ya que según Labrador 2001, la relación C:N es de 100:122 lo cual es bastante beneficio para el suelo, es por ello que se escogió esta como un importante nutriente para el mismo.

6.3 Suelo.

Tabla 21. Resultados arrojados de la caracterización Suelo a rehabilitar antes de la adición de biosólidos

Parámetro	Resultado
Nitrógeno total (%)	0.14
Fosforo total (mg/L)	0.8070
COT (Carbono Orgánico Total) (%)	44.02
MOT (Materia Orgánica Total) (%)	20.76
Bacterias totales por dilución en placa (UFC/100 ml)	6.4×10^5
Hongos por dilución en placa (UFC/100 ml)	8.0×10^7
pH (unidades pH)	5.88
Conductividad eléctrica (μS/cm)	571
Densidad aparente (g/ml)	1.27
Densidad real (g/ml)	2.49
Porosidad del suelo (%)	48.83
Humedad (%)	7.55
Sólidos totales (%)	92.45
Textura % de arena	45
Textura % de arcilla	15
Textura % de limo	40
Clasificación textura del suelo según triangulo de textura Departamento de Agricultura de los Estado Unidos (USDA)	Franco

Como se puede observar el suelo fue ácido, carece de nitrógeno, fosforo y tuvo muy poca humedad. Por otro lado es un suelo Franco. En subsecuentes figuras se muestran imágenes de los diversos análisis realizados para la caracterización del suelo a rehabilitar.

El suelo a fertilizar según su caracterización realizada, mediante la metodología seguida por el autor ***Fernández, 2006*** se define al suelo a rehabilitar como de tipo Franco, el cual según ***Soriano, 2004*** es un suelo muy equilibrado y bueno para el crecimiento de cualquier tipo de planta y/o cultivo.

La baja humedad del suelo puede dificultar el transporte de nutrimentos de los biosólidos a este y de este a las plantas, así como también impedir la biodegradación de la materia orgánica para que sea más fácil la asimilación de nutrientes.

A pesar de esto la cantidad de sólidos totales representa una gran cantidad de materia orgánica e inorgánica que resulta ser beneficioso para cubrir nuestro objetivo principal, que es la incrementación de nutrientes.

El Carbono orgánico del suelo presenta una buena concentración en cuanto a Carbono y Oxigeno para el desarrollo de microorganismos. El porcentaje restante del 100% es parte de la Materia orgánica y de la fijación de CO_2 atmosférico debido a la presencia de bacterias y hongos que desintegran a plantas y animales del suelo. El déficit de Fosforo como micronutriente esencial para las plantas y microorganismos representa un parámetro importante a modificar, junto con el Nitrógeno y Potasio esenciales para plantas y microorganismos. En las **(figuras 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26)** se muestra el suelo usado y las diferentes determinaciones realizadas al suelo para su caracterización.

Figura 19. Suelo a rehabilitar de tipo franco.

Figura 20. Tamizado de suelo.

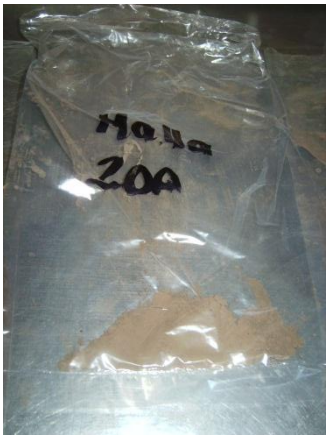


Figura 21. Diversas texturas del suelo obtenidas una vez que han sido tamizadas, por diversos números de malla.

Figura 22. Determinación de humedad, en el suelo.

Figura 23. Determinación de pH y Conductividad, en el suelo a

Figura 24. Determinación de Materia orgánica y Carbono orgánico en el suelo a rehabilitar.

Figura 25. Determinación de Nitrógeno total, en el suelo a rehabilitar.

Figura 26. Dispositivo instalado para la determinación de Nitrógeno total.

Por otro lado se presentan los resultados obtenidos de la metodología seguida para la rehabilitación del suelo, la cual se realizó durante el periodo del 11 de abril al 09 de julio del 2011 hasta el cumplimiento de 90 días, tiempo en el cual se pretende alcanzar la madurez del suelo para obtener los nutrimentos necesarios para la fertilización adecuada.

Los parámetros que fueron determinados son los siguientes y algunos de ellos se realizan diariamente otros cada semana y algunos solo se llevaron a acabo al final de los 90 días establecidos para la madurez de las mezclas.

- Temperatura (Diario)
- Color, Olor (Diario)
- pH (Diario)
- Humedad (Una vez a la semana)
- Sólidos volátiles (Una vez a la semana)
- Materia orgánica (Una vez a la semana)
- Carbono total (Una vez a la semana)
- Nitrógeno total (Una vez a la semana)
- Relación Carbono:Nitrógeno (Una vez a la semana)
- Coliformes fecales (Término del proceso)
- *Salmonella sp*. (Término del proceso)
- Metales (Término del proceso)
- Germinación de semillas (Término del proceso)

A continuación se presentan las siguientes **(figuras 27 a la 35)**, con los datos obtenidos sobre las diversas determinaciones realizadas en los 90 días establecidos de rehabilitación del suelo.

6.4 Resultados obtenidos durante la fertilización del suelo durante 90 días de proceso a partir del 11 de abril al 09 de julio del 2011.

En la **(Figura 27)**, se presenta el comportamiento de la temperatura durante los 90 días de rehabilitación.

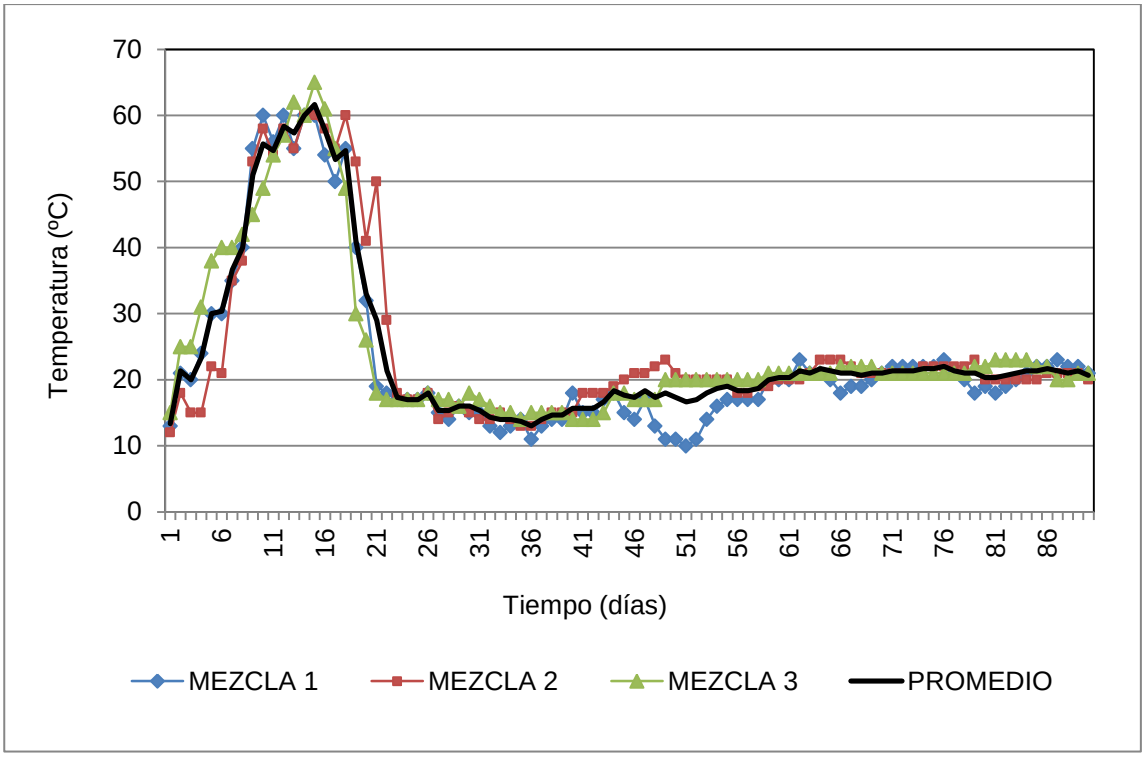


Figura 27. Registro de temperatura de las pilas durante 90 días del proceso de rehabilitación

La temperatura se registró en tres puntos de las mezclas, llevándose a cabo esta actividad en un horario de las 18:00 a 18:30 hrs, la medición se realizó con un termómetro de mercurio. En la figura se presenta la evolución de la temperatura en las mezclas, durante el proceso de fertilización.

El aumento de la temperatura registrado en las mezclas, responde a las reacciones exotérmicas asociadas al metabolismo respiratorio, donde el calor generado es función de la actividad microbiana, según (Labrador, 2001).

En relación al comportamiento de las etapas en función de la temperatura, se puede observar la etapa mesofílica, siendo una etapa de pequeña duración, obtenida entre los días 1 a 6 para las tres mezclas. Donde existe eclosión de huevos, larvas, bacterias y hongos mesofílicos. Luego sigue la etapa termofílica, que se extiende entre los días 7 a 18 donde se alcanzaron temperaturas de entre 58 a 60 ºC en las mezclas 1 y 2. En esta etapa se presenta la muerte de la mayoría de los microorganismos patógenos, bacterias y hongos termófilos. Lamentablemente los descensos de temperatura brusca lo presentan las tres mezclas esto se debe a los volteos realizados, no alcanzando a la etapa termofílica, por lo que se recomienda medir la temperatura antes de estos, para no provocar intervención en el proceso de la fertilización.

La etapa de enfriamiento se observa en las tres pilas, en donde reaparecen los hongos termófilicos que reinvaden el mantillo y descomponen la célula. Al bajar a 40 ºC, los mesófilicas también reinician su actividad y el pH del medio desciende ligeramente.

Se llegó a la etapa de la maduración (Morgan, 2007) que se había propuesto a los 90 días.

En la **(Figura 28)**, se presenta el comportamiento del color durante el periodo de 90 días.

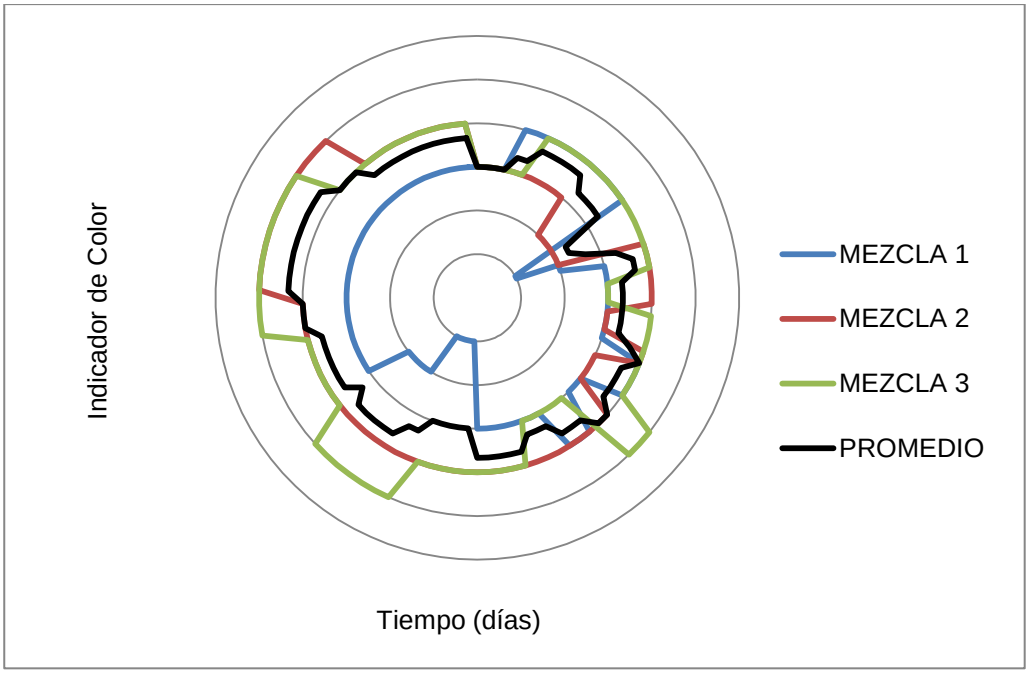


Figura 28. Color presentado durante el proceso en las pilas.

Como podemos observar en la **figura 28** el color presentado durante el proceso de fertilización en las tres mezclas fue de café oscuro a café marrón lo cual es una buena señal de que el proceso de fertilización está produciendo buenos resultados, según Labrador, 2001. El color es un indicador muy importante de que las mezclas no presentan estado de descomposición avanzado o que hay una momificación de bacterias. El café marrón es el color predominante en las tres mezclas, y en cada una de ellas se llega al proceso final de maduración.

En la (Figura 29), se presenta el registro y comportamiento del Olor durante el proceso de rehabilitación del suelo en un periodo de 90 días.

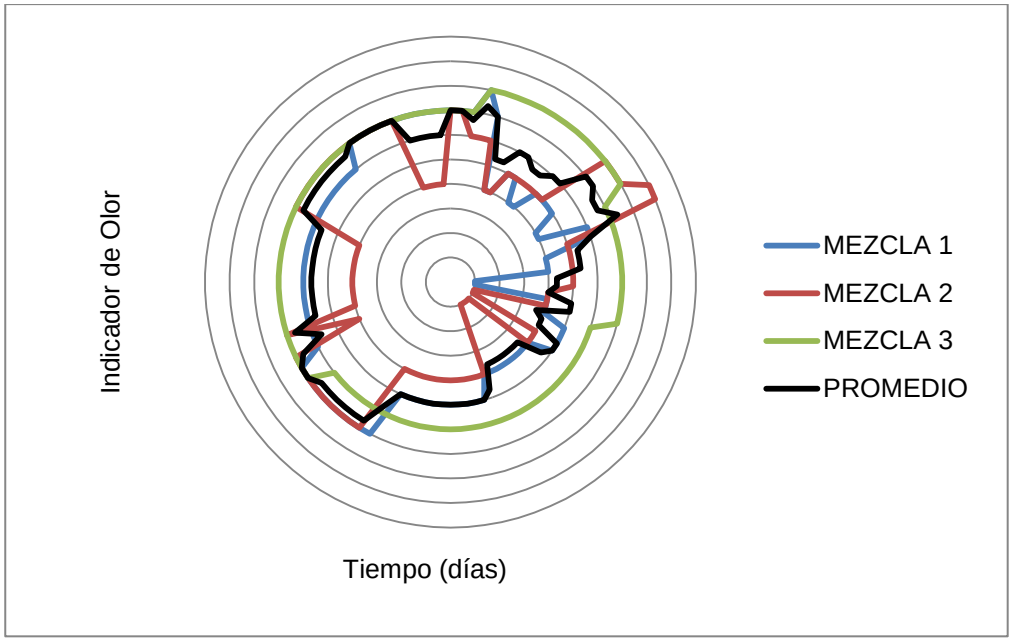


Figura 29. Olor presentado en las pilas durante el proceso de rehabilitación.

El olor presentado durante el proceso de fertilización se evalúa entre fresco, tierra mojada y dulce, esto para las tres mezclas lo cual es un buen indicio de que los procesos metabólicos y químicos llevados a cabo en las mezclas son adecuados, es importante estar siempre pendientes del olor ya que al comenzar a presentan un olor a mantequilla, o vinagre hay que tener cuidado pues puede iniciarse un proceso de descomposición en las mezclas y todo el proceso puede finalmente no funcionar (Labrador, 2001). Al final del proceso de 90 días el olor predominante es fresco, tierra mojada y en algunos días dulce.

En la **(Figura 30)** se presentan los registros y comportamiento que se presentaron durante el proceso de rehabilitación del suelo en un periodo de 90 días.

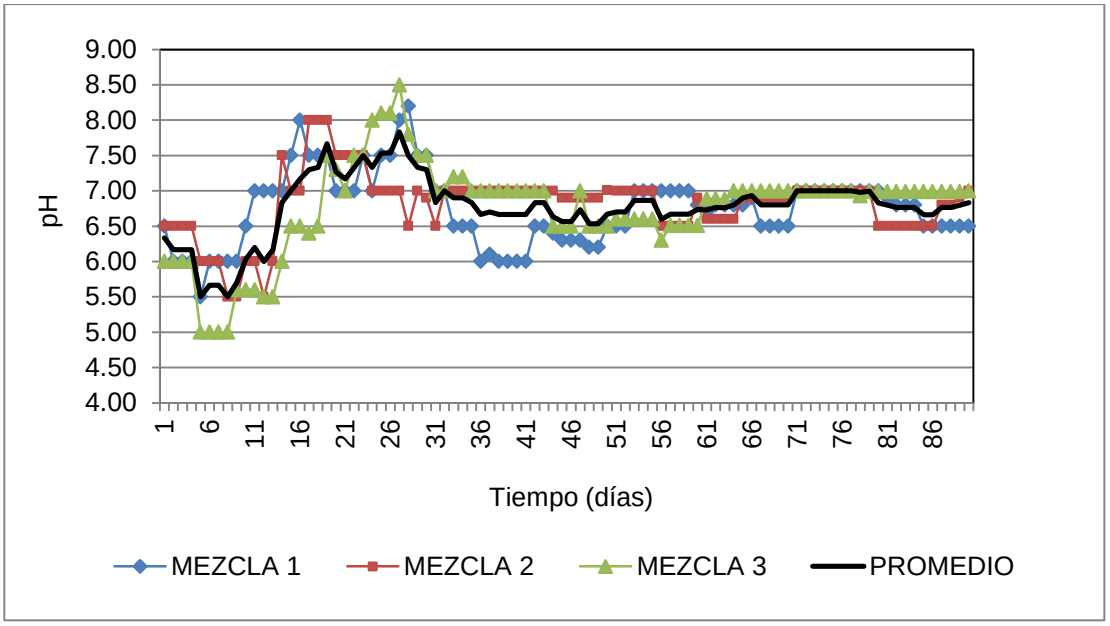


Figura 30. Comportamiento de pH durante el proceso.

Durante el presente estudio, se realizó la medición de pH utilizando un potenciómetro marca Hanna 92010. El cual cuenta también con un sensor de temperatura. Las mediciones se hicieron, tomando tres porciones de muestras de tres diferentes puntos en la parte inferior de esta, en la parte de en medio y en la parte superior, se mezclaron las tres para obtener una sola muestra, la cual se traslada al laboratorio para su análisis en frasco ámbar con tapa de boca ancha. Los rangos de pH fueron similares para las tres mezclas. Transcurridos los primeros 5 días del proceso, se observó una disminución del valor de pH, alcanzando valores de pH 5 en las mezclas, debido a que en estas etapas comienza la reproducción de microorganismos mesofílicos, produciéndose un aumento de temperatura. Entre los días 6 al 24 el pH se mantuvo entre 7 a 8 en las mezclas debido a la momificación microbiana. El pH decae ligeramente durante la etapa de enfriamiento y llega a un valor entre 6,5 a 7,5 ya estabilizado. El pH final de cada mezcla estuvo entre 6.5 - 7.0, por lo tanto está dentro del rango establecido, según (Labrador, 2001).

En la **(Figura 31)**, se presentan los valores registrados y comportamiento obtenido sobre él % de humedad en las mezclas elaboradas para la rehabilitación del suelo.

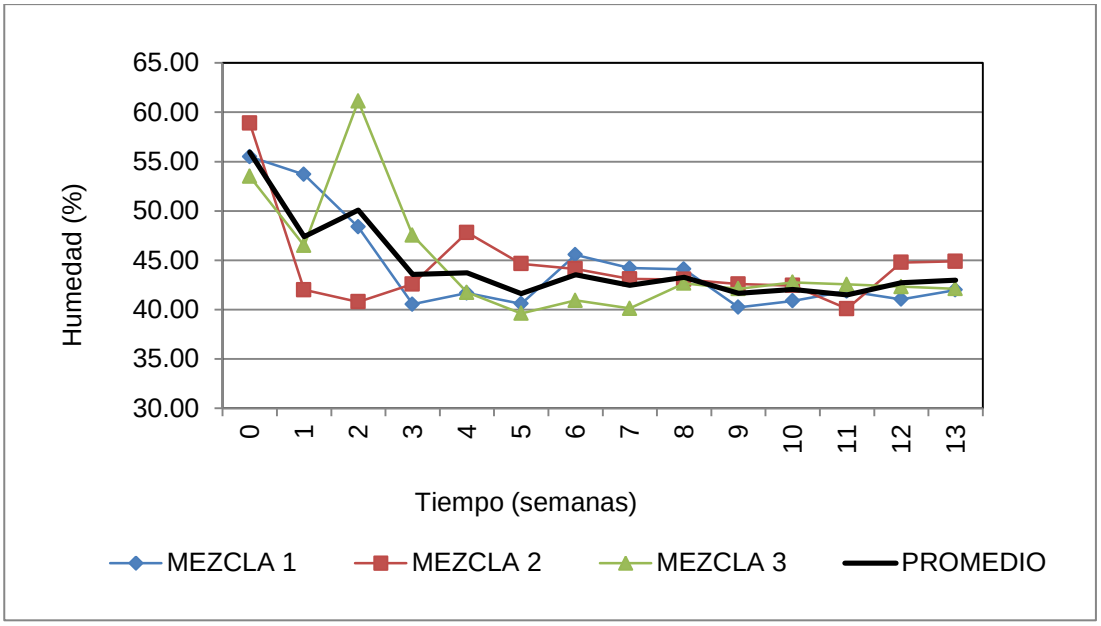


Figura 31. Porcentaje de Humedad durante el proceso.

Las mezclas fueron regadas para mantener la humedad del material de la fertilización. Las muestras para la medición de humedad fueron extraídas, de manera que sean muestras representativas, sacándolas de diferentes partes de las mezclas. El contenido de humedad fue medido y controlado mediante riego durante los 35 días que van del proceso que durara 90 días, trabajando en un rango de humedad entre 40 a 60 %.

En el primer día del proceso se inició con humedad del 50 al 60 % en las tres mezclas. A las semanas siguientes está disminuyó, debido a que comienza el aumento de temperatura en las mezclas por la actividad de microorganismos, observándose un descenso brusco de la humedad desde la tercera semana, pero se mantuvo control en un rango de 50 a 40 % por lo tanto está dentro del rango. El comportamiento de la humedad fue similar en las tres mezclas.

El comportamiento de la humedad en las tres mezclas se mantuvo muy similar durante todo el proceso de 90 días.

En la **(Figura 32)** se observan los registros del comportamiento de Solidos volátiles en las mezclas.

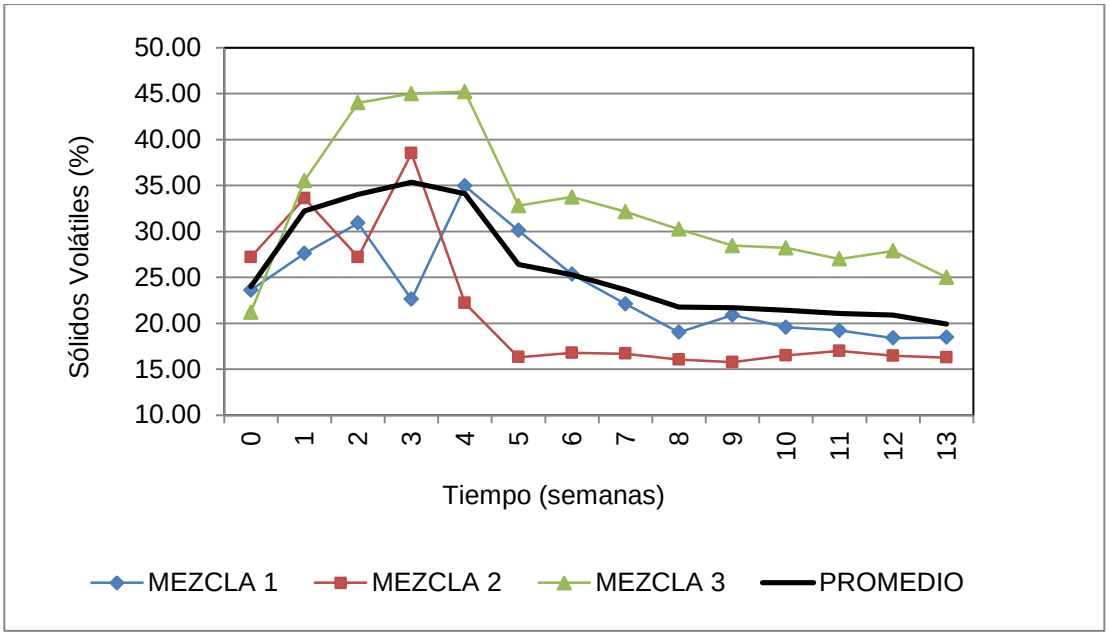


Figura 32. Evaluación de Sólidos Volátiles durante el proceso.

La figura 32 muestra la evaluación de sólidos volátiles contra el tiempo. El día 1 correspondió al lodo y trigo. Al inicio de la etapa de las mezclas se observó un leve aumento en el nivel de sólidos volátiles, cuya muestra no fue representativa, pudiendo influenciar en los resultados, razón por la cual se produjo un aumento de este parámetro. La disminución de los sólidos volátiles indica degradación de los componentes orgánicos de la mezcla, presentándose desde la cuarta semana (Rendón, 2003). Al inicio de las mezclas se presenta un claro incremento que se mantuvo durante 3 semanas, posteriormente en la 4 semana comenzó la degradación de los sólidos.

Las mezclas oscilaron en su cantidad de sólidos volátiles, principalmente en la mezcla 1 y 2. La mezcla 3 presento mayor porcentaje de sólidos volátiles con respecto a las demás este fenómeno puede deberse a la baja temperatura en la etapa termofílica, y por ello no se ha degrado complemente la materia orgánica de la mezcla.

Según (Morgan, 2007) la concentración de Solidos volátiles es adecuada y equitativa en cuanto a los promedios de las tres mezclas lo cual satisface a los requerimientos necesarios contenidos de materia orgánica en estas.

En la **(Figura 33)** se presentan el registro y comportamiento del Nitrógeno total a lo largo del periodo de rehabilitación de 90 días.

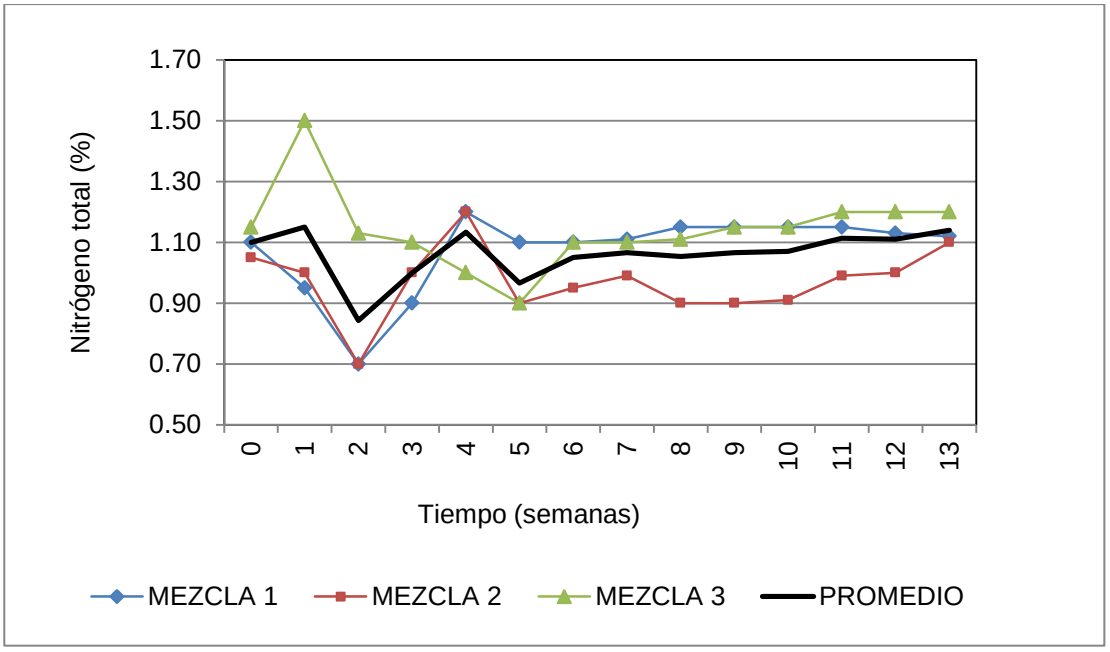


Figura 33. Comportamiento del Nitrógeno Total en las Mezclas.

En la figura 33 se puede observar que la mezcla 3 presento mayor cantidad de nitrógeno en un principio hasta el término de la primera semana, decayendo abruptamente hasta 1.10 %.Por otro lado las mezclas 1 y 2 desde un principio presentaron baja cantidad nitrógeno hasta caer en la segunda semana hasta 0.70 %. De ahí a partir de la semana 4 aumenta y disminuye abruptamente hasta 0.90%.

Este fenómeno se debe a que hay un mayor consumo de Carbono orgánico y por ello la cantidad consumida de Nitrógeno no es estable. Lo que se puede observar en la relación Carbono:Nitrógeno. Finalmente la mezcla 3 presenta mayor cantidad de Nitrógeno total que las mezclas 1 y 2, alcanzando en la semana 13, 1.20% de Nitrógeno. En general las tres mezclas presentaron un Nitrógeno promedio de entre 0.9 – 1.15.

Según (Morgan, 2007) el % de Nitrógeno favorable en una composta debe ser entre 0.9 y 2.0% como mínimo para que el proceso sea favorable, por lo tanto las mezclas se encuentran en óptimas condiciones.

En la **(Figura 33)**, se presentan los registros de Carbono Orgánico Total, así como el comportamiento de este.

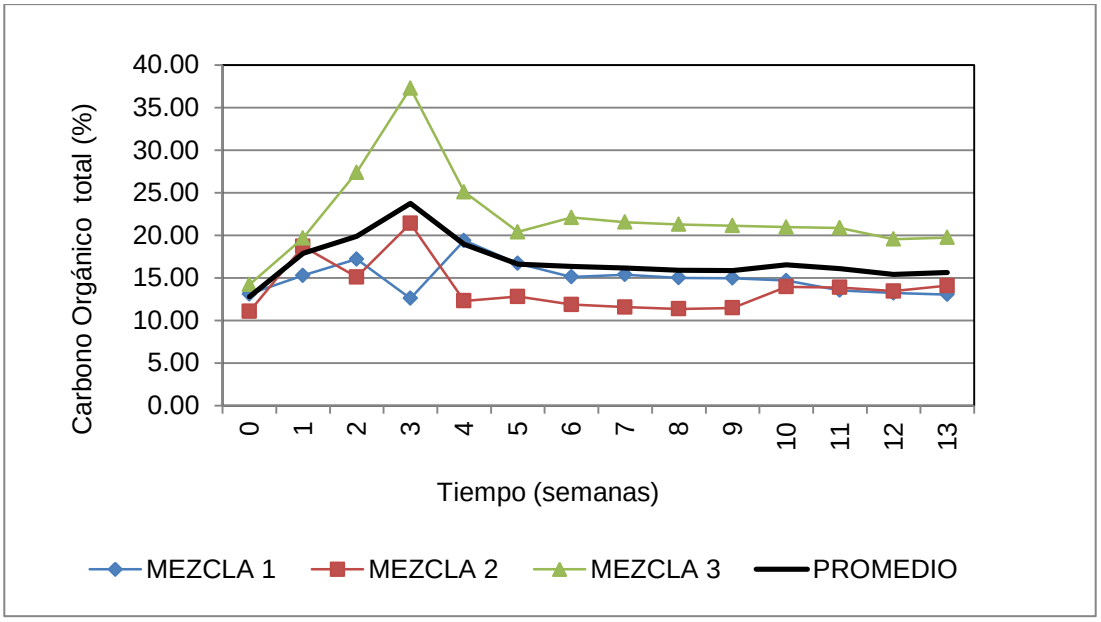


Figura 34. Comportamiento del Carbono Orgánico Total.

La cantidad de carbono orgánico fue mayor en la mezcla 3, pero en las mezclas 1 y 2 no hubo mayor incremento de carbono, estas permanecieron estables decayendo su contenido de carbono en la 4 semana del proceso.

Lo que indica que hay mayor contenido de carbono orgánico lo que debería propiciar un mayor consumo de nitrógeno. A partir de la semana 4 la mezcla 3 presenta un incremento de Carbono respecto a las mezclas 1 y 2, las cuales permanecen estables hasta la semana 13, durante el periodo de 90 días de rehabilitación.

Morgan, 2007 indica que la cantidad de Carbono Orgánica Total adecuada para una composta oscila entre los 9.0 y 12.0 % para que al efectuarse la relación C:N esta se encuentre entre los 10 y 12.

Sin embargo como se puede apreciar la cantidad de Carbono Orgánico Total se encuentra por arriba de lo especificado en la literatura citada lo que puede repercutir a que se presente una producción de amoniaco debido a que no hay consumo de nitrógeno debido a la alta concentración de Carbono.

En la **(Figura 35)**, se presenta la relación C/N de las mezclas durante un periodo de 90 días de rehabilitación de suelo, y su comportamiento durante este periodo.

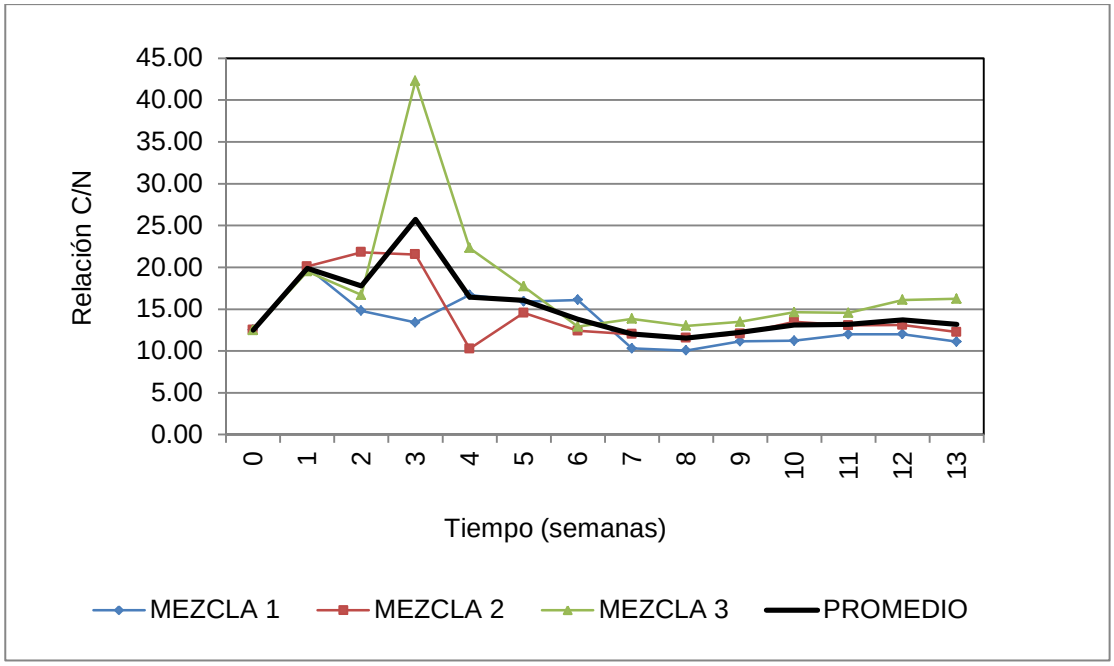


Figura 35. Evaluación de la Relación Carbono/Nitrógeno en el proceso de fertilización.

En el proceso de fertilización el carbono es la fuente de energía utilizada por los microorganismos para sus procesos metabólicos, mientras que el nitrógeno, es el material básico para la síntesis de material celular. La relación C:N se considera como un indicador del grado de avance del proceso. En la figura 35 se muestra la reducción de la relación Carbono/Nitrógeno en las mezclas. Como se aprecia en la figura el día cero corresponde al lodo crudo, previo al proceso de mezclado, con una relación de 12.5 % en la primera semana. Este valor es considerado relativamente bajo para realizar el proceso, por lo tanto debido a ello se agregó paja de trigo con lo que se obtuvo una proporción 20:1. Se observó una disminución en la proporción C:N por lo que significa que la tasa de consumo de Carbono Orgánico es mayor que la de Nitrógeno.

En general la mezcla 3 presento una mejor relación en cuanto a Carbono/Nitrógeno, permaneciendo esta relación casi estable desde la semana 9. Las tres mezclas en promedio presentaron una relación de Carbono/Nitrógeno entre 11 a 26%. Sin embargo hubo variaciones para la asimilación de energía y nutrientes en las mezclas.

En el periodo de la semana 0 a la semana 5, posteriormente estas variaciones fueron escasas, y la población microbiana pudo asimilar de una manera adecuada la fuente de energía y nutrientes a lo largo del proceso de fertilización.

En las **(Tablas 22, 23)** se muestra los resultados arrojados del contenido de microorganismos patógenos en las mezclas.

Tabla 22. Registro de contenido de coliformes fecales (NMP/g BASE SECA)

SEMANAS	FECHA	MEZCLA			PROMEDIO	DESVEST
		1	2	3		
Lodo inicial	11/04/2011	4300	4300	4300	4300	0,00
13	08/07/2011	170	140	110	140,00	30,00

Como se puede observar la mezcla 3 es la que contiene una menor cantidad de Coliformes fecales con una cantidad de 110 NMP/g inicialmente se tomó como base de Coliformes contenidos en las mezclas los encontrados en los biosólidos al final del proceso de 90 días las mezclas presentaron una cantidad mínima de Coliformes en un promedio de 140 NMP/g en base seca.

Tabla 23. Registro de contenido de salmonella sp.

SEMANAS	FECHA	MEZCLA			PROMEDIO	DESVEST
		1	2	3		
Lodo inicial	11/04/2011	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	0,00
13	08/07/2011	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	0,00

Durante la determinación de *Salmonella sp*. en la recta final del periodo comprendido de 90 días para alcanzar la maduración de las 3 mezclas, no se detectó la presencia de este microorganismo, lo cual es un buen indicio de que los procesos no tuvieron algún tipo de contaminación por la adición del lodo y que por lo tanto al realizar la determinación de esta ya directo en el suelo una vez seco y tamizado será exitosa.

En la **(Tabla 24)** se muestra en contenido de metales presentes al final del proceso de rehabilitación de 90 días.

Tabla 24. Registro de contenido de metales (mg/l)

SEMANAS	FECHA	MEZCLAS			PROMEDIO	DESVEST
		1	2	3		
		Lodo inicial 11/04/2011				
Calcio total		2,500	2,501	2,502	2,501	0,00
Magnesio total		1,000	1,000	1,002	1,001	0,00
Sodio total		110,6180	110,6180	110,6180	110,6180	0,00
Potasio		58,0985	58,0985	58,0985	580.985	0,00
*Arsénico total		<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	0,00
*Cadmio total		<0,0250	<0,0250	<0,0250	<0,0250	0,00
*Plomo total		0,1372	0,1372	0,1372	0,1372	0,00
*Cromo total		0,0934	0,0934	0,0934	0,0934	0,00
*Mercurio total		<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,00
*Cobre total		1,0306	1,0306	1,0306	1,0306	0,00
*Níquel total		<0,1000	<0,1000	<0,1000	<0,1000	0,00
*Zinc total		1,0664	1,0664	1,0664	1,0664	0,00
		Semana 13 09/07/2011				
Calcio total		6,320	6,480	7,760	6,853	0,79
Magnesio total		1,940	2,021	2,761	2,241	0,67
Sodio total		1,020	1,152	1,260	1,144	1,42
Potasio		3,156	3,396	4,356	3,636	0,63
*Arsénico total		<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	0,00
*Cadmio total		<0,0250	<0,0250	<0,0250	<0,0250	0,00
*Plomo total		<0,1372	<0,1372	<0,1372	<0,1372	0,00
*Cromo total		<0,0934	<0,0934	<0,0934	<0,0934	0,00
*Mercurio total		<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,00
*Cobre total		1,0010	1,1215	1,0087	1,0437	0,07
*Níquel total		<0,1000	<0,1000	<0,1000	<0,1000	0,00
*Zinc total		1,011	1,120	1,212	1,114	0,10

*****Parámetros establecidos en la **NOM-004-SEMARNAT-2002**

De acuerdo a la **NOM-004-SEMARNAT-2002**, dada la baja concentración de Arsénico, Cadmio, Plomo, Cromo, Mercurio, Cobre, Níquel y Zinc las mezclas obtenidas se clasifican en la categoría de excelente.

Teniendo la mezcla 3 mayor cantidad de Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio lo cual es beneficioso para nuestro suelo pues son macro nutrientes importantes, así como el Zinc, estos juntos pueden corregir deficiencias en el suelo y en el crecimiento de plantas que generalmente los fertilizantes comerciales no pueden hacer.

En la **(Tabla 25)** se muestran los resultados obtenidos una vez que el suelo ya ha sido rehabilitado después de un periodo de 90 días.

Tabla 25. Resultados arrojados del suelo una vez ya rehabilitado con la mezcla 3 seleccionada por mejor relación Carbono:Nitrógeno

Parámetro	Resultado
Nitrógeno total (%)	2.23
Fosforo total (mg/L)	1.60
COT (Carbono Orgánico Total) (%)	37.44
MOT (Materia Orgánica Total) (%)	32.60
Bacterias totales por dilución en placa (UFC/100 g)	2550
Hongos por dilución en placa (UFC/100 g)	510
Coliformes fecales (NMP/100 g)	110
Salmonella sp.	AUSENTE
Huevos de Helminto (Nº H/5 L)	<1.0
pH (unidades pH)	6.76
Conductividad eléctrica (μS/cm)	712
Densidad aparente (g/ml)	1.98
Densidad real (g/ml)	2.12
Porosidad del suelo (%)	50.02
Humedad (%)	44.69
Sólidos volátiles%	32.60
Sólidos totales (%)	98.15
Textura % de arena	41
Textura % de arcilla	13
Textura % de limo	35

Tabla 25. Resultados arrojados del suelo una vez ya rehabilitado con la mezcla 3 seleccionada por mejor relación Carbono:Nitrógeno

Parámetro	Resultado
Clasificación textura del suelo según triangulo de textura del Departamento de Agricultura de los Estado Unidos	Franco
Calcio total (mg/L)	8.640
Magnesio total (mg/L)	3.061
Sodio total (mg/L)	1.310
Potasio (mg/L)	4.236
*Arsénico total (mg/L)	<0.0025
*Cadmio total (mg/L)	<0.0250
*Plomo total (mg/L)	<0.1372
*Cromo total (mg/L)	<0.0934
*Mercurio total (mg/L)	<0.0005
*Cobre total (mg/L)	1.70
*Níquel total (mg/L)	<1.000
*Zinc total (mg/L)	1.65
Relación Carbono/Nitrógeno	17.55

En las **(figuras 36 a la 39)** se presentan las imágenes de las 3 mezclas realizadas para la óptima rehabilitación del suelo. En la figura 36 se observa la textura que las 3 mezclas presentan.

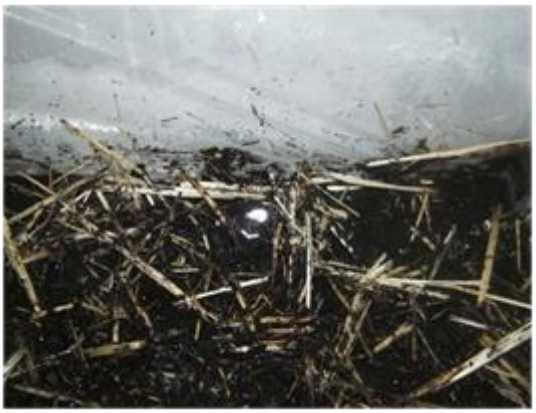


Figura 36. Composición y textura de las mezclas, las cuales están formadas por paja de trigo, biosólidos y suelo, así como agua para conservar un cierto porcentaje de humedad.

Figura 37. Mezcla 1.

Figura 38. Mezcla 2.

Figura 39. Mezcla 3

La temperatura promedio de las tres mezclas mostró presencia de las etapas mesofílica, termofílica y de enfriamiento. Se espera la etapa de maduración. El descenso brusco de temperatura se controló a través de la frecuencia de volteo, pues la temperatura disminuyó de 5 a 10ºC, regresando a las pocas horas a su valor anterior.

Los lodos pierden progresivamente su contenido de Nitrógeno y Fósforo, según se reduce su contenido de agua y las proporciones de estos en los sólidos de los lodos resultan bajos, alrededor del 3% se obtendrán el valor fertilizante más alto cuando se utilice también la fase liquida.

El pH promedio de las mezclas fue de 6.0 a 7.5, lo cual se encuentra dentro de las condiciones óptimas establecidas, se considera que los descensos y aumentos de pH coinciden y son coherentes con los cambios de temperatura, y con el desarrollo y presencia microbiana.

Según los indicadores establecidos para los parámetros de olor y color, el promedio de olor en las mezclas se presentó entre fresco, a tierra mojada y a veces dulzón, lo que es un buen indicio de aireación en las mezclas.

En todas las mezclas se inicia con una humedad del 50-60% posteriormente esta disminuye debido a que comienza a aumentar la temperatura por la actividad microbiana. Sin embargo en las últimas semanas de la 4 a la 13 disminuye hasta un 40%.

El contenido de Sólidos volátiles y Materia orgánica para las tres mezclas al inicio tuvo un leve aumento, en la mezcla 3 se presentó más constante, disminuyendo bruscamente en la semana 5, en la mezcla 1 y 2. No obstante el alto contenido de materia orgánica en los lodos utilizados, mostro una disminución de esta en la semana 7 lo que indica la degradación de componentes orgánicos. (Labrador, 2001) indica que el contenido ideal de materia orgánica debe ser de 35 a 40%.

El Nitrógeno en promedio se presentó de 0.9 a 1.5 % en las tres Mezclas. Inicialmente se presentó 3.80% de este en el lodo. El Carbono orgánico se presentó en un promedio de 12 a 24% aparentemente ambos permanecieron constantes con un ligero decaimiento a la fecha.

La Relación C: N, observó una disminución lo que significa que la relación no excede de 30 lo que significa que este no está en exceso y por lo tanto el tiempo de 90 días establecido para la maduración de las mezclas no será excedido teóricamente. Tampoco hay una relación por debajo de 15 de nitrógeno por lo tanto este está siendo bien aprovechado (Morgan, 2007).

6.5 Índice de germinación.

Una vez que se hubo finalizado el proceso de fertilización en las tres mezclas establecidas con proporciones de **LODO:SUELO:PAJA** en una cantidad de 75:100:25, 63:100:37,50:100:50, se procedió a escoger la tercera mezcla como la mejor en cuanto a calidad de nutrientes, necesarios para la fertilización del suelo. Para verificar que este no haya sido afectado por la adición del biosólido se procedió a realizar una prueba de Índice de Germinación de Semillas, para observar y determinar la viabilidad de cómo la fertilización afecto de manera satisfactoria o deplorable al suelo.

Se utilizaron semillas de Trigo *(Triticum sp.)* inicialmente para las pruebas, se prepararon extractos en proporción de diluciones 0.1, 1.0, 10, 100, 1000, agua destilada. Se colocaron 10 ml de cada extracto en placas Petri, que contenían 10 semillas de trigo sobre papel filtro; éstas se compararon con un testigo con agua destilada. Se mantuvieron en cámaras de germinación durante 5 días a 25 ºC. Se midió porcentaje de germinación relativo (PGR), crecimiento de radícula relativo (CRR) e índice de germinación (IG), según metodología descrita por Tiquia (2000).

$$PGR = \frac{\text{Nº de semillas germinadas en el extracto}}{\text{Nº de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto}}{\text{Elongación de radículas en el testigo}} \times 100$$

$$IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

Dónde:

PGR: Porcentaje de germinación relativo
CRR: Crecimiento de radícula relativo
IG: Índice de Germinación

En las **(Tabla 26, 27 y 28)** y **(Figura 40, 41, 42)**, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de IG de semilla efectuada para comprobar que el suelo rehabilitado no presenta ningún tipo de toxicidad que afecte a las plantas.

Tabla 26. Elongación radicular de las semillas de trigo en testigos positivos y negativos así como en muestra de suelo ya rehabilitada por la proporción de la mezcla 3 elegida 50:100:50

DIA	ENLOGACION RADICULAR (mm), DILUCION 10		
TIPO DE ENSAYO	**TESTIGO POSITIVO LODO**	**TESTIGO NEGATIVO AGUA DESTILADA**	**MUESTRA SUELO**
1	0,00	0,00	0,00
2	3,10	0,50	5,50
3	5,60	0,98	7,89
4	11,37	1,10	15,96
5	22,15	1,12	28,80
6	22,84	1,18	23,54
7	23,12	1,27	28,47
8	23,78	1,56	31,24
9	24,05	1,57	33,96
10	24,59	1,74	38,11
11	24,86	1,79	41,89
12	25,47	1,82	45,97
13	25,99	1,94	51,63
14	26,27	1,96	53,87
15	26,57	2,01	55,03
PROMEDIO	**19,32**	**1,37**	**30,15**
DESVEST.	**9,28**	**0,58**	**17,91**

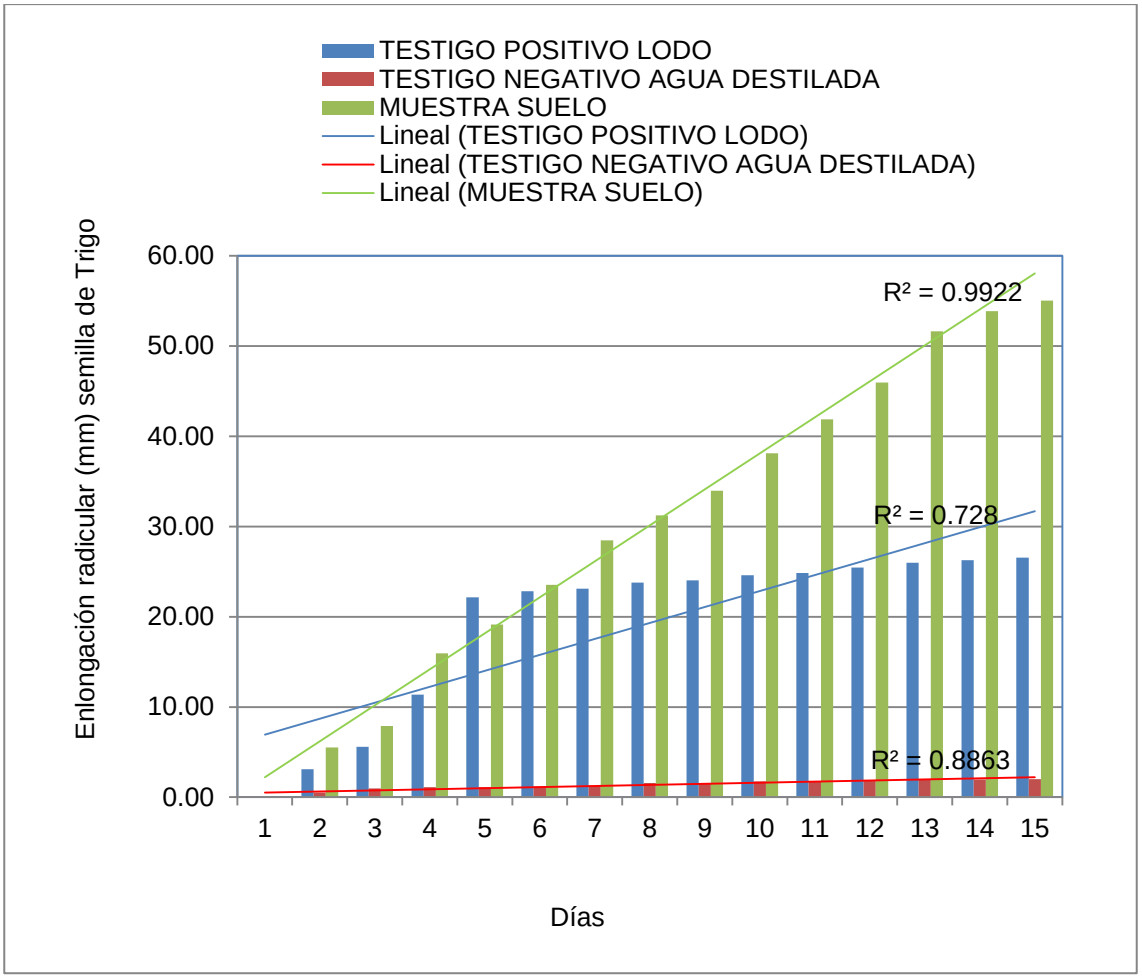


Figura 40. Relación de Elongación en semillas de trigo para Testigo de lodo usado como fertilizante en la muestra de suelo (R^2= 0.908), Testigo negativo con agua destilada (R^2= 0.861) y Muestra de Suelo ya fertilizado (R^2= 0.925)

Como se puede observar la elongación en el testigo negativo que es el agua destilada fue casi nula con un crecimiento de aproximadamente en promedio de 1.37 mm. En promedio para el lodo o biosólido se presentó una elongación promedio de 30.15 mm y para la muestra de suelo ya rehabilitado de 19.32 mm. Estas mediciones fueron realizadas en un periodo de 15 días y al final de este lapso se puede observar que la muestra de suelo no afectó en ningún tipo el crecimiento y desarrollo de la semilla de trigo, si no que ayuda a su crecimiento más rápidamente.

Tabla 27. Numero de semillas germinadas de trigo en un lapso de 5 días en un testigo positivo usado como es el lodo usado para la fertilización, un negativo agua destilada y una muestra de suelo ya fertilizada con el lodo de testigo positivo.

DIA	**SEMILLAS GERMINADAS (BASE INICIAL 10 SEMILLAS), DILUCION 10**		
TIPO DE ENSAYO	**TESTIGO POSITIVO LODO**	**TESTIGO NEGATIVO AGUA DESTILADA**	**MUESTRA SUELO**
1	0,00	0,00	0,00
2	1,00	1,00	1,00
3	3,00	1,00	5,00
4	4,50	1,50	8,00
5	6,00	2,00	10,00
6	7,00	3,00	
7	8,00	3,00	
8	9,00	4,00	
9	10,00	5,00	
10		5,00	
11		6,00	
12		6,00	
13		7,00	
14		8,00	
15		8,00	
PROMEDIO	**5,39**	**4,03**	**4,80**
DESVEST.	**3,52**	**2,64**	**4,32**

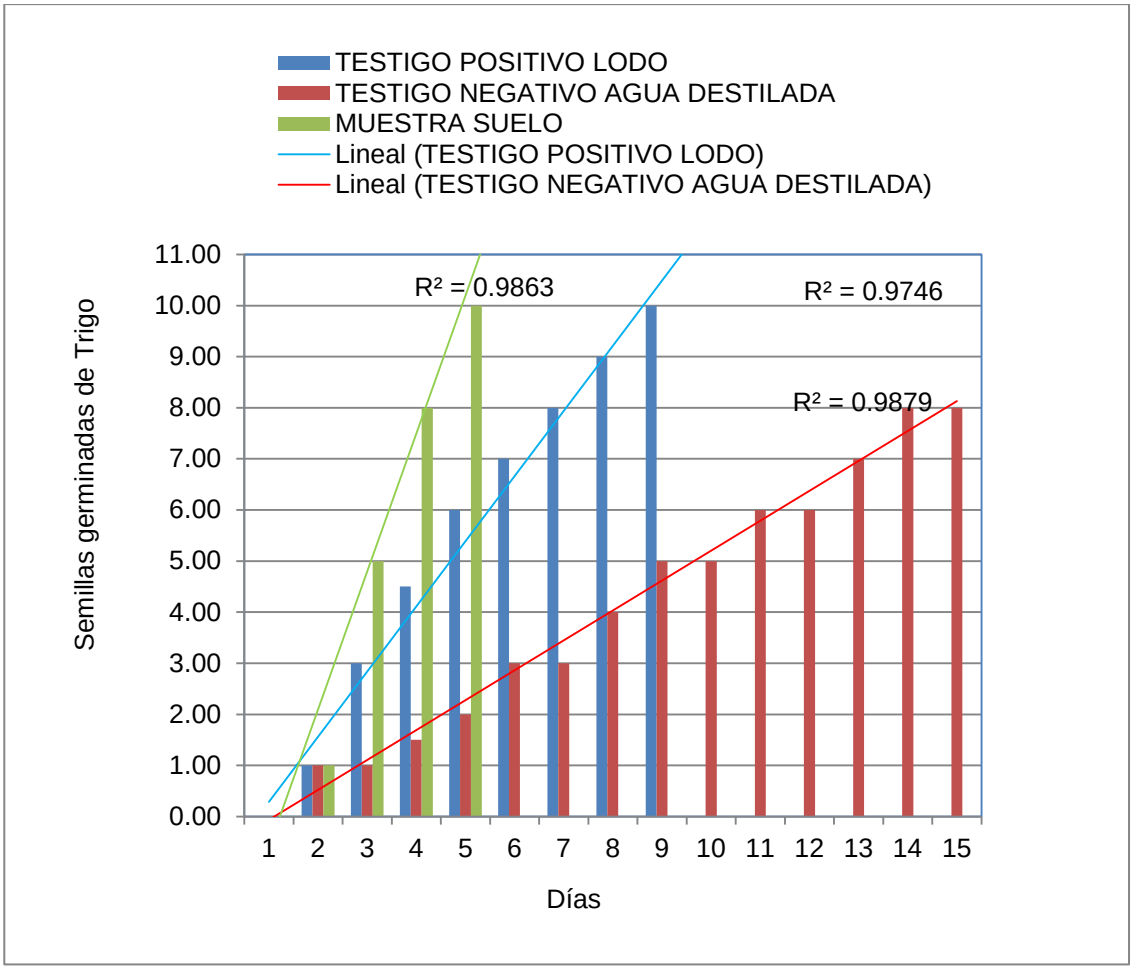


Figura 41. Relación de Elongación en semillas de trigo para Testigo de lodo usado como fertilizante en la muestra de suelo (R^2= 0.992), Testigo negativo con agua destilada (R^2= 0.920) y Muestra de Suelo ya fertilizado (R^2= 0.974)

En la figura 41 se observa que la mayor germinación de semillas se presentó en la muestra de suelo la cual tuvo una germinación de semillas de 10, es decir todas las semillas germinaron en el día 5, y luego en el testigo positivo de lodo que obtuvo al final de 15 días, una germinación de 10 semillas para el día 9 y finalmente presentarse en el testigo negativo (agua destilada) que presento una germinación de 8 semillas, al final de los 15 días. Lo cual significa que el lodo aplicado al suelo no presentó hasta este lapso de 15 días de crecimiento en la semilla de trigo ningún tipo de problema fenotípico toxicidad ya que la planta presenta buen aspecto, además de un adecuado desarrollo y crecimiento según los controles usados.

Tabla 28. Índice final de germinación de semillas de trigo en un lapso de 5 días de crecimiento a partir de un porcentaje de germinación relativo, y un crecimiento relativo de radícula, esto a partir de un testigo positivo que es el lodo y una muestra de suelo en una dilución en 10.

DIA	PORCENTAJE DE GERMINACIÓN RELATIVO (PGR)	CRECIMIENTO DE RADICULA RELATIVO (CRR %)	INDICE DE GERMINACIÓN EN MUESTRA DE SUELO (IG %)
1	0,00	0,00	0,00
2	10,00	17,74	1,77
3	16,67	14,09	2,35
4	17,78	14,04	2,50
5	16,67	13,00	2,17
6	0,00	10,31	0,00
7	0,00	12,31	0,00
8	0,00	13,14	0,00
9	0,00	14,12	0,00
10	0,00	15,50	0,00
11	0,00	16,85	0,00
12	0,00	18,05	0,00
13	0,00	19,87	0,00
14	0,00	20,51	0,00
15	0,00	20,71	0,00
PROMEDIO	**12,22**	**10,90**	**1,61**
DESVEST.	**7,49**	**6,91**	**1,00**

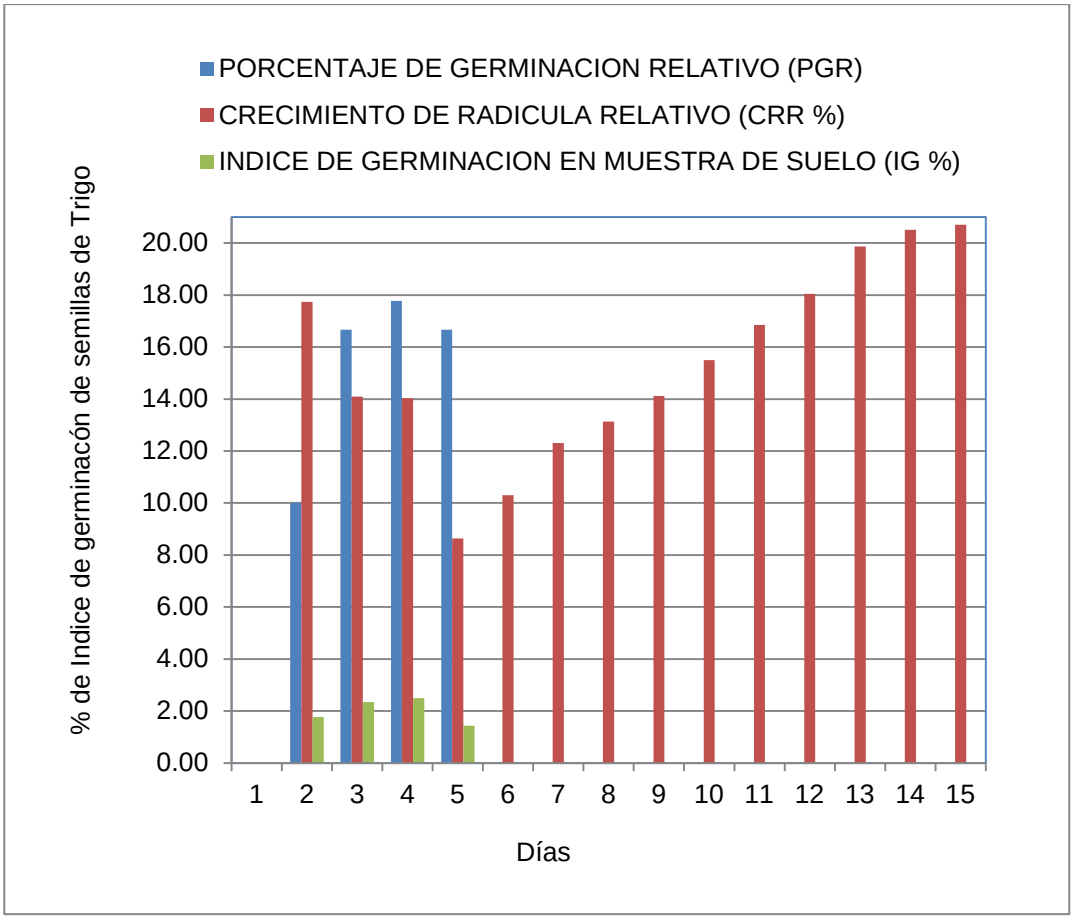


Figura 42. Índice de Germinación de Semillas de Trigo y relación % de Germinación Relativa, % de Crecimiento de Radícula Relativo para un lapso de 5 días a partir de una dilución usada de 10

Como se puede observar en el día 4 se presentó un mayor índice de germinación de semillas, así como un mayor % de germinación relativo y en el día 2 hubo mayor crecimiento de radícula relativo; todo esto en la muestra de suelo. El índice de germinación relativo está basado en una cantidad de 10 semillas de trigo y de esas 10 semillas ninguna presento ninguna anomalía en su crecimiento forma, color. Como se observa en la Tabla 38 y la Figura 42 se siguió manifestando durante los 15 días para el testigo negativo que es agua destilada.

En la **(Figura 43)** se muestra el comportamiento de la germinación de semillas en la muestra de suelo rehabilitada las cuales presentaron un óptimo desarrollo.

Figura 43. Crecimiento de las semillas de trigo después del término de la maduración de la mezcla 3 elegida por mejor relación Carbono/Nitrógeno, después de 10 días de haber adicionado las semillas a la mezcla de suelo, y lodo.

En cuanto al Índice de Germinación de Semillas se observó que la elongación de radícula tuvo un crecimiento promedio de 11.63 mm, y un Índice de Germinación de 2.50% en el día 4, cuando el número de semillas germinadas en la muestra de suelo fue de 10 es decir todas, lo que representa que el suelo no presenta ningún tipo de toxicidad hacia la planta en ningún aspecto establecido durante el ensayo.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones.

Con base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Se confirma la hipótesis en el sentido de que la aplicación de Biosólidos y paja de Trigo favorece las condiciones óptimas de material orgánico, pH, y Nutrientes garantizando la acción bacteriológica del suelo además de actuar como un fertilizante orgánico.

La muestra 3 de biosólido fue la seleccionada para rehabilitar el suelo porque presenta mejores características de macronutrientes y micronutrientes, así como alto contenido de Materia orgánica.

De acuerdo a la **NOM-004-ECOL-2002**, y a los resultados obtenidos de la caracterización, los biosólidos usados cumplen con la **clase C excelente o bueno** para aprovechamiento forestal, mejorador de suelo, y uso agrícola.

El suelo rehabilitado presentó características moderadamente acidas, es un suelo no salino poco poroso, poco húmedo, muy orgánico y deficiente de fosforo, pero rico en nitrógeno.

El pH y la Conductividad eléctrica presentados en el suelo fueron aceptables para el crecimiento de bacterias autóctonas. Las unidades formadoras de colonias son recomendadas para iniciar los procesos de rehabilitación de nutrientes en un suelo.

De las tres mezclas realizadas para la fertilización del suelo**, la mezcla 3** con una proporción de 50:100:50 (biosolido:suelo:paja), presentó las mejores condiciones en cuanto a todos los parámetros, físicos, químicos, microbiológicos y concentración de metales que favorecieron al proceso de fertilización del suelo trabajado. Además de contener una relación de Carbono:Nitrógeno adecuada.

El color presentado en la mezcla fue de un café oscuro a marrón durante el proceso de fertilización, lo que indico un buen control microbiano, de temperatura, pH y Humedad durante el proceso.

La tasa de consumo de Carbono Orgánico fue mayor a la de Nitrógeno, lo cual indica que el nitrógeno fue transformado en otros productos útiles para el suelo como Nitritos, Nitratos y formación de Amonio atmosférico, el cual no presento toxicidad en el proceso debido a su formación. El consumo de carbono orgánico por parte de los microorganismos y el consiguiente desprendimiento de dióxido de carbono provoco, a lo largo del proceso de fertilización, un descenso en el contenido en carbono y por tanto un descenso de la relación carbono/nitrógeno.

Al realizar la respectiva caracterización del suelo una vez fertilizado se obtuvo que este presento un mejor contenido de Nitrógeno, Fosforo, Materia orgánica, pH, Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, y Zinc. Los cuales presentaban poca concentración previa a la fertilización realizada con las proporciones de la mezcla 3.

Finalmente se obtuvo un suelo fertilizado y rehabilitado a base de una aplicación de biosólidos como fertilizante natural.

7.2 Recomendaciones.

Es necesario realizar y evaluar el crecimiento de semillas como el frijol, girasol y maíz no solo a corto plazo si no a largo plazo ya que no se estableció durante esta fase de experimentación, cual es el comportamiento de este a largo plazo en cuanto al crecimiento de estas plantas; además es necesario establecer el tiempo adecuado en el cual se debe adicionar o acondicionar el suelo nuevamente con la mezcla o proporción establecida. Puesto que los micronutrientes y macronutrientes necesarios para el crecimiento y germinación de las semillas pueden llegar a un límite si no se adiciona constantemente.

Para posteriores experimentos se recomienda trabajar sobre un diseño experimental que facilite el análisis de datos y de sustento científico a los resultados obtenidos ahora y en ese momento, además de registrar parámetros como temperatura, humedad, pH entre otros que son importantes en el control de crecimiento de plantas y semillas.

Es conveniente, utilizar biosólidos con una gran cantidad de Materia orgánica, así como con una concentración de Nitrógeno, Fosforo, Carbono orgánico total elevado en base seca, para poder obtener buenos resultados en la rehabilitación de nutrimentos en un suelo. Un lodo liquido procedente de un tratamiento primario y secundario contienen un alto contenido de nitrógeno, y de fosforo sobre el peso total de los sólidos, pero al paso del tiempo al perder la humedad su contenido disminuye gradualmente. Los lodos digeridos y secados al aire ven reducidos dichos contenidos de nitrógeno y fosforo. Se usa paja de trigo como aditivo debido a su alta relación de Carbono-Nitrógeno, pero se pueden usar otros materiales para mejorar esta relación tales como Bagazo de Caña, de Café que contienen altas cantidades de Carbono Orgánico Total, útil en procesos fotosintéticos, y de Intercambio Catiónico en plantas así como también precursor de fijación y transformación de Nitrógeno para muchas bacterias autóctonas de los suelos.

G L O S A R I O

Abono: Es cualquier sustancia orgánica o inorgánica que mejora la calidad del sustrato, a nivel nutricional, para las plantas arraigadas en éste.

Acompasar: Adaptación del suelo al lodo o biosólido.

Acondicionamiento: Técnica agrícola que permite mantener o mejorar la productividad de los suelos.

Actividad microbiana: Interacción y actividad metabólica que llevan a cabo los microorganismos en el suelo.

Adsorción: Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas.

Agar: Gelatina vegetal de origen marino, es un polisacárido sin ramificaciones obtenida de la pared celular de las algas rojas.

Aguas residuales: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas, alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas.

Almacenamiento: Acción de mantener en un sitio los lodos y biosólidos, hasta su aprovechamiento o disposición final.

Análisis fisicoquímico: Descripción de las características, como físicas como pH, Conductividad, Densidad, Porosidad, y químicas como Humedad, Nitrógeno, Fosforo, Carbono, Solidos totales, Solidos volátiles.

Aprovechamiento: Es el uso de los biosólidos como mejoradores o acondicionadores de los suelos por su contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio.

Áscaris lumbricoides: Es un nematodo parásito del intestino delgado del hombre, muy frecuente en países subdesarrollados. A este gusano se le llama también lombriz intestinal por su forma alargada que lo asemeja a la lombriz de tierra.

Atracción de vectores: Es la característica de los lodos y biosólidos para atraer vectores como roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar agentes infecciosos.

Autoclave: Es un recipiente metálico de paredes gruesas con un cierre hermético que permite trabajar a alta presión para realizar una reacción industrial, una cocción o una esterilización con vapor de agua.

Base seca: Es la cantidad de agua que tiene el lodo en relación solamente a la cantidad de materia seca.

Biogás: Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.) y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico).

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

Caldo Ec: Medio utilizado para el recuento de coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* en agua, alimentos y otros materiales.

Caldo lactosado: Medio para el ensayo presuntivo de bacterias coliformes en aguas, alimentos y productos lácteos.

Caldo lauril triptosa: Medio para la detención de microorganismos coliformes en materiales de importancia sanitaria.

Células bacterianas: Descripción morfológica y clasificación de los diversos tipos de bacterias.

Centrifugar: Es un método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una fuerza rotativa , la cual imprime a la mezcla con una fuerza mayor que la de la gravedad, provocando la sedimentación de los sólidos o de las partículas de mayor densidad.

Cero laboreo: La alteración mínima del suelo para conservar su estructura, fauna y materia orgánica.

Ciclo Biogeoquímicos: Al movimiento de cantidades masivas de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, calcio, sodio, azufre, fósforo, potasio, y otros elementos entre los seres vivos y el ambiente (atmósfera, biomasa y sistemas acuáticos) mediante una serie de procesos de producción y descomposición.

Coliformes fecales: Bacterias patógenas presentes en el intestino de animales de sangre caliente y humanos. Bacilos cortos Gram negativos no esporulados, también conocidos como coliformes termotolerantes. Puede identificarse por su tolerancia a temperaturas de 44 °C a 45 °C. Tienen la capacidad de fermentar la lactosa a temperatura de 44.5 °C. Incluyen al género *Escherichia* y algunas especies de *Klebsiella.*

Colonia celular: Es un grupo de células con similares características, que actúan en conjunto, con la excepción de que su función no es formar una unidad estructural mayor o una especie de tejido.

Compostaje: También llamado humus se forma por la descomposición de productos orgánicos y esta sirve para abonar la tierra. Es un proceso en el que no interviene la mano del hombre, el reciclaje es 100% natural.

Confinamiento: Encierro de una cosa material o inmaterial dentro de unos límites, especialmente estrechos, contaminantes disueltos o en suspensión.

CRETIB: Clasificación de los residuos que lo hacen Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Toxico, Inflamable y Biológico.

Desazolve: La acción de extraer sólidos provenientes de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no incluye los provenientes de las presas o vasos de regulación.

Detritos: Son residuos, generalmente sólidos permanentes, que provienen de la descomposición de fuentes orgánicas (vegetales y animales). Es materia muerta. Aunque es materia orgánica en descomposición, hay numerosos seres vivos que se alimentan de ella degradándola aún más.

Digestión aerobia: Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada mediante el uso de oxígeno.

Digestión anaerobia: Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en gas mediante la ausencia se oxígeno.

Digestión: La digestión es el proceso de transformación de los alimentos, previamente ingeridos, en sustancias más sencillas para ser absorbidos. La digestión ocurre tanto en los organismos pluricelulares como en las células, como a nivel subcelular. En este proceso participan diferentes tipos de enzimas.

Dilución: Una forma común de realizar esta reducción de la concentración, en una muestra o solución.

Disolución estándar: Es una disolución que contiene una concentración conocida de un elemento o sustancia específica, llamada patrón primario que, por su especial estabilidad, se emplea para valorar la concentración de otras soluciones, como las disoluciones valorantes.

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

dS: Diciems unidad con la cual se puede medir la conductividad eléctrica.

E. Coli: Organismo procariota más estudiado por el ser humano. Se trata de una enterobacteria que se encuentra generalmente en los intestinos animales, y por ende en las aguas negras, pero se lo puede encontrar en todos lados, dado que es un organismo ubicuo.

Electrodo: Es un conductor el cual cuenta con una membrana que detecta las diferentes señales en iones hidronio y oxhidrilo.

Enterovirus: Es un género de virus de ARN mensajero de sentido positivo asociado con diversas enfermedades en humanos y otros mamíferos.

Escorrentía superficial: Es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo. Según la teoría de Horton se forma cuando las precipitaciones superan la capacidad de infiltración del suelo, es una de las principales causas de erosión a nivel mundial. Suele ser particularmente dañina en suelos poco permeables, como los arcillosos, y en zonas con una cubierta vegetal escasa.

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

Estabilización: Son los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para favorables.

Fenotipo: Expresión del genotipo en función de un determinado ambiente. Los rasgos fenotípicos incluyen rasgos tanto físicos como conductuales. Es cualquier característica o rasgo observable de un organismo, como su morfología, desarrollo, propiedades bioquímicas, fisiología y comportamiento.

Fermentación: Es un proceso catabólico de oxidación incompleta, totalmente anaeróbico, siendo el producto final un compuesto orgánico. Estos productos finales son los que caracterizan los diversos tipos de fermentaciones

Fertilizante: Tipo de sustancia o mezcla química, natural o sintética utilizada para enriquecer el suelo y favorecer el crecimiento vegetal.

Filtrar: Al proceso de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, que retiene los sólidos y permite el pasaje del líquido.

Filtro de membrana: Técnica para la determinación de bacterias Coliformes en la cual se filtra la muestra que contiene las bacterias Coliformes a través de una membrana.

Fitotoxina: Son gruesas moléculas proteínicas, que generalmente pueden ser destruidas por un prolongado calentamiento. Se encuentran entre las plantas conocidas como de mayor toxicidad y no son destruidas por los procesos digestivos.

Germinación: Es el proceso mediante el cual una semilla se desarrolla hasta convertirse en una nueva planta. Este proceso se lleva a cabo cuando el embrión se hincha y la cubierta de la semilla se rompe. Para lograr esto, toda nueva planta requiere de elementos básicos para su desarrollo: luz, agua, oxígeno y sales minerales.

Helminto: Término designado a un amplio grupo de gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales), de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados, y sus ciclos vitales comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no.

Horizontes: Serie de niveles horizontales que se desarrollan en el interior del mismo y que presentan diferentes caracteres de composición, textura, adherencia, etc. El perfil del suelo es la ordenación vertical de todos estos horizontes.

Huevos de helmintos viables: Huevos de helmintos susceptibles de desarrollarse e infectar.

Humus: Es la sustancia compuesta por ciertos productos orgánicos, de naturaleza coloidal, que proviene de la descomposición de los restos orgánicos (hongos y bacterias). Se caracteriza por su color negruzco debido a la gran cantidad de carbono que contiene. Se encuentra principalmente en las partes altas de los suelos con actividad orgánica. El humus también es considerado una sustancia descompuesta a tal punto que es imposible saber si es de origen animal o vegetal.

Infiltración: Es la penetración del agua en el suelo.

Inóculos: El punto de partida de cualquier fermentación es un recipiente limpio que ha sido esterilizado y rellenado con el medio de cultivo estéril. Posteriormente, el fermentador se inocula con el microorganismo adecuado. El tamaño del inóculo generalmente es del orden del 1-10% del volumen total del medio.

La Secretaría: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Lactosa: Es un disacárido formado por la unión de una molécula de glucosa y otra de galactosa. Concretamente intervienen una β-galactopiranosa y una β-glucopiranosa unida por los carbonos 1 y 4 respectivamente. Al formarse el enlace entre los dos monosacáridos se desprende una molécula de agua.

Límites máximos permisibles: Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido por los lodos y biosólidos para que puedan ser usados para fines, agrícolas o forestales.

Lixiviado: Líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene grandes cantidades de material en suspensión son anóxicos, ácidos y ricos en ácidos orgánicos y iones sulfato.

Lodos: Son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo biológico.

Longitud de onda: Es el período espacial de la misma, es decir, la distancia a la que se repite la forma de la onda. Forma parte del espectro electromagnético.

Macronutrientes: Son aquellos nutrientes que suministran la mayor parte de la energía metabólica del organismo. Los principales son glúcidos, proteínas, y lípidos. Otros incluyen alcohol y ácidos orgánicos. Se diferencian de los micronutrientes como las vitaminas y minerales en que estos son necesarios en pequeñas cantidades para mantener la salud pero no para producir energía.

Macroporos: No retienen el agua gravitacional y son los responsables del drenaje y de la aireación en un suelo.

Material orgánico: Está compuesta por **residuos animales o vegetales.** Se trata de sustancias que suelen encontrarse en el suelo y que contribuyen a su fertilidad. De hecho, para que un suelo sea apto para la producción agropecuaria, debe contar con un buen nivel de materia orgánica: de lo contrario, las plantas no crecerán.

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

Mesofilíca: Etapa en la cual tiene una temperatura óptima de crecimiento comprendida entre 20ºC y 45ºC.

Metabolización: Es el conjunto de reacciones bioquímicas y procesos físico-químicos que ocurren en una célula y en el organismo. Estos complejos procesos interrelacionados son la base de la vida a escala molecular, y permiten las diversas actividades de las células: crecer, reproducirse, mantener sus estructuras, responder a estímulos, etc.

Método Gravimétrico: Son un tipo de método geofísico, y constituyen pruebas realizadas para la determinación de las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de un reconocimiento geotécnico.

Mezcla aire-acetileno: Mezcla utilizada para la excitación de metales en la determinación de metales por absorción atómica.

Micronutrientes: Son sustancias que el organismo de los seres vivos necesita en pequeñas dosis. Son indispensables para los diferentes procesos bioquímicos y metabólicos de los organismos vivos y sin ellos morirían.

Microorganismos: Son organismos dotados de individualidad que presentan, a diferencia de las plantas y los animales, una organización biológica elemental. En su mayoría son unicelulares, aunque en algunos casos se trate de organismos cinéticos compuestos por células multinucleadas, o incluso multicelulares.

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

Nematodos: Los nematodos son gusanos redondos, tienen el cuerpo alargado, cilíndrico y no segmentado, con simetría bilateral.

Organismos patógenos: Organismos, incluidos virus, bacterias o quistes, capaces de causar una enfermedad (tifus, cólera, disentería) en un receptor (por ejemplo una persona). Hay diversos tipos de organismos que NO causan enfermedades. Estos se denominan no patógenos.

Parásito: Organismo animal o vegetal que vive sobre o dentro de un individuo de otra especie.

Parental: Roca madre o de un depósito superficial o arrastrado) en donde se irán formando los horizontes del suelo. Los suelos típicamente tienen un gran compromiso estructural y de minerales desde su material parental. El material parental hecho de minerales consolidados o inconsolidados que son sometidos a algún grado de meteorización física o química o biológica.

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

Permeabilidad: Es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

Relleno sanitario: Es un lugar destinado a la disposición final de desechos o basura, en el cual se pretenden tomar múltiples medidas para reducir los problemas generados por otro método de tratamiento de la basura como son los tiraderos, dichas medidas son, por ejemplo, el estudio meticuloso de impacto ambiental, económico y social desde la planeación y elección del lugar hasta la vigilancia y estudio del lugar en toda la vida del vertedero.

Remediación: Tecnología de restauración de un sitio o suelo contaminado, en la cual se echa mano de técnicas físicas y químicas para su mejora.

Salmonella sp.: Bacilos motiles por sus flagelos periticos, que fermentan de manera característica glucosa y manosa sin producir gas, pero no fermentan lactosa ni sacarosa. La mayoría produce sulfuro de hidrógeno (H_2S). A menudo, son patógenos para el hombre y los animales cuando se ingieren, ocasionando fiebre tifoidea y enterocolitis (conocida también como gastroenteritis).

Sistema de alcantarillado urbano o municipal: Es el conjunto de obras y acciones que permiten la prestación de un servicio público de alcantarillado, incluyendo el saneamiento, entendiendo como tal la conducción, tratamiento, alejamiento y descarga de las aguas residuales.

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

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

Solución amortiguadora: Es la mezcla en concentraciones relativamente elevadas de un ácido débil y su base conjugada, es decir, sales hidrolíticamente activas.

Tamiz: Instrumento compuesto de un aro y de una tela, por lo común de cerdas, más o menos clara, que cierra la parte inferior. Sirve para separar las partes sutiles de las gruesas de algunas cosas, como la harina, el suero etc.

Tasa Específica de Absorción de Oxígeno (TEAO): Es la masa de oxígeno consumida por unidad de tiempo y por unidad de masa en peso seco de los sólidos totales de los lodos y biosólidos.

Tenía solium: Es un platelminto parásito de la clase *Cestoda,* que vive en el intestino delgado de los seres humanos, donde mide normalmente de 3 a 4 m. Es, junto con *T. saginata*, una de las especies conocidas como lombriz solitaria.

Térmico: Es un material usado en la construcción y la industria y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura, impidiendo que entre o salga calor del sistema que nos interesa (como una vivienda o una nevera).

Termófilo: Se aplica a organismos vivos que pueden soportar condiciones extremas de temperatura relativamente altas, por encima de los 45 ºC. Es un subtipo de vida extremófila.

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

Toxicidad: Es una medida usada para medir el grado tóxico o venenoso de algunos elementos. El estudio de los venenos se conoce como toxicología. La toxicidad puede referirse al efecto de esta sobre un organismo completo, como un ser humano, una bacteria o incluso una planta, o a una subestructura, como una (citotoxicidad).

Tratamiento primario: Es un tratamiento físico-químico que busca reducir la materia suspendida por medio de la precipitación o sedimentación, con o sin reactivos, o por medio de diversos tipos de oxidación química poco utilizada en la práctica, salvo aplicaciones especiales, por su alto coste.

Tratamiento secundario: Es un tratamiento biológico que se emplea de forma masiva para eliminar la contaminación orgánica disuelta, la cual es costosa de eliminar por tratamientos físico-químicos. Suele aplicarse tras los anteriores. Consisten en la oxidación aerobia de la materia orgánica en sus diversas variantes de fangos activados, lechos de partículas, lagunas de oxidación y otros sistemas o su eliminación anaerobia en digestores cerrados. Ambos sistemas producen fangos en mayor o menor medida que, a su vez, deben ser tratados para su reducción, acondicionamiento y destino final.

Tubo Durham: Se utilizan en microbiología para detectar la producción de gas por microorganismos. Son simplemente pequeños tubos de ensayo insertado boca abajo en otro tubo de ensayo. Este pequeño es el tubo inicialmente lleno con la solución en la que el microorganismo es que se cultivan. Si gas se produce después de la inoculación e incubación, un visible gas burbuja será atrapado en el interior del tubo pequeño.

Tubo múltiple: Método para la determinación y cuantificación de bacterias Coliformes mediante la producción de gas en un tubo en una serie de 3 a 5 tubos.

Viabilidad: Es un atributo que interviene en las fórmulas para determinar la densidad de siembra, por lo que su conocimiento es fundamental. El ensayo de germinación o poder germinativo (PG) es el más aceptado para evaluar la viabilidad de las semillas y el objetivo es determinar la potencialidad de las semillas para desarrollar plántulas normales y producir una implantación rápida y pareja de los cultivos en condiciones óptimas

L I T E R A T U R A C I T A D A

1. Bohn, L. H. (1993), **"Química del Suelo"**, Primera edición, Limusa, México DF, pp. 319-356

2. Fernández, B.A., Yarto, R.M., Castro, D.J., (2005), **"Las sustancias toxicas persistentes en México"**, Primera edición, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México DF

3. Fernández L.L.C., Rojas, A.G., Roldan, CTG., Ramírez I.M.E., Zegarra, M.H.G., Uribe, H.R., Reyes, A.R.J., Hernández, F.D, Arce, O.J.M., (2006), **"Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados"**, (Primera edición), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto Mexicano del Petróleo, México, DF

4. García, A., (2009), **"El desarrollo del uso de biosólidos en el Noroeste de España"**, Medio Ambiente Online, Consulta 09 de Septiembre de 2009, <http://www.agroamb.com

5. Glynn, J.H., Gary W.H., (1999), **"Ingeniería Ambiental"**, Segunda edición, Prentice Hall, México DF, pp. 479-480

6. Hernández, M.A., (1999), **"Depuración de aguas residuales"**, Colegio de Ingenieros, Canales y Puentes, Tercera edición, Madrid España, pp. 953-957

7. Jurado, G.P., Luna, L.M., barretero, H.R., Royo, M.M., Melgoza, C.A., (2006), **"Producción y Calidad de forraje y semilla del Zacate Navajita con la aplicación de biosólidos en un pastizal semiárido de Jalisco"**, Técnica Pecuaria en México, Vol. 44, Nº. 003, PP. 289-300

8. Labrador, M.J. (2001), **"La materia orgánica en los agrosistemas"**, Editorial Mundi prensa, Madrid, España, pp. 37-54, 115-129

9. Marín G., María Luisa (2002), **"Análisis químicos de suelos y aguas"**, Editado por Universidad Politécnica de Valencia, Primera edición, Valencia España, pp. 99-101,115-119

10. Morgan Warner Ingrid Catherine (2007), **"Estabilización de lodos de la piscicultura coipue mediante compostaje"**, Universidad de la frontera, Facultad de ingeniería Ciencias y administración, Departamento de ciencias químicas, 2007

11. **NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002**, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

12. Rendón, G.R., (Mayo 2003), **"Calidad nutrimental de compostas elaboradas con lodos residuales"**, Departamento de Agroecología, Universidad Autónoma de Chapingo

13. Soriano S., Ma. Desamparados, Pons Vicente (2004), **"Practicas de edafología y climatología"**, Primera edición, Valencia España, pp. 33-38

14. Salcedo, P.E. (Diciembre 2000), **"Alternativas de uso agrícola y forestal de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras"**, Diciembre 2000, Universidad Autónoma de Chapingo

15. Tiquia, S.M. (2000), "**Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig – on – litter system**" En: P.R. Warman y B.R. Taylor, Ed., Proceedings of the International Composting Symposium, CBA Press Inc.Truro,NS, p:625-647.

16. Volk e, S.T., Velasco, T.J., Rosa, P.D., (2002a), **"Suelos contaminados por metales y metaloides, muestreo y alternativas para su remediación"**, Primera edición, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México DF

17. Volke, S.T., Velasco, T.J., Rosa, P.D., (2002b), **"Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados"**, Primera edición, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México DF

18. Winkler, M.A. (1996), **"Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho"**, Cuarta edición, Limusa, México DF, pp. 313-314

ANEXOS

METODOLOGIA PARA CARACTERIZACION DE SUELO, BIOSOLIDOS Y PAJA DE TRIGO

1. Caracterización del suelo.

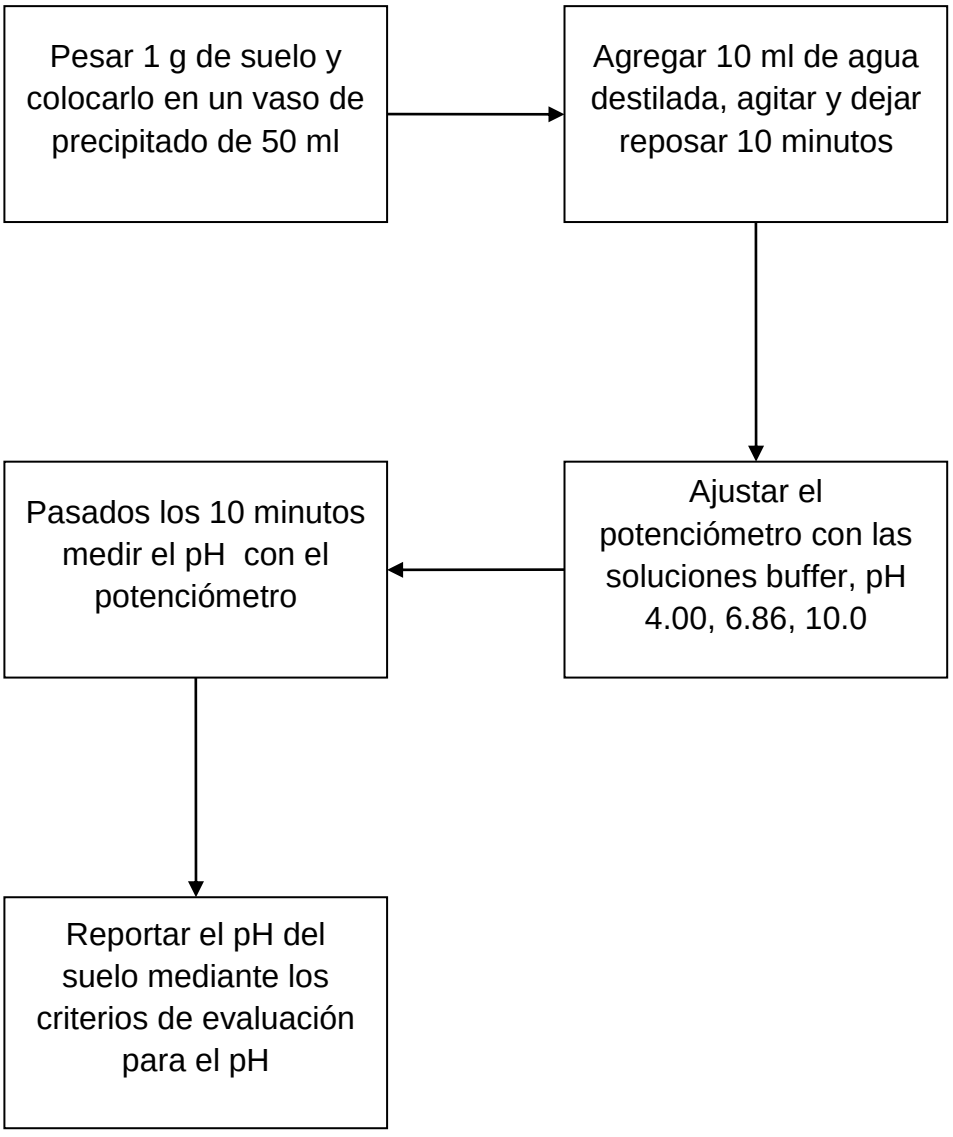


Figura 44. Proceso para la Determinación de pH

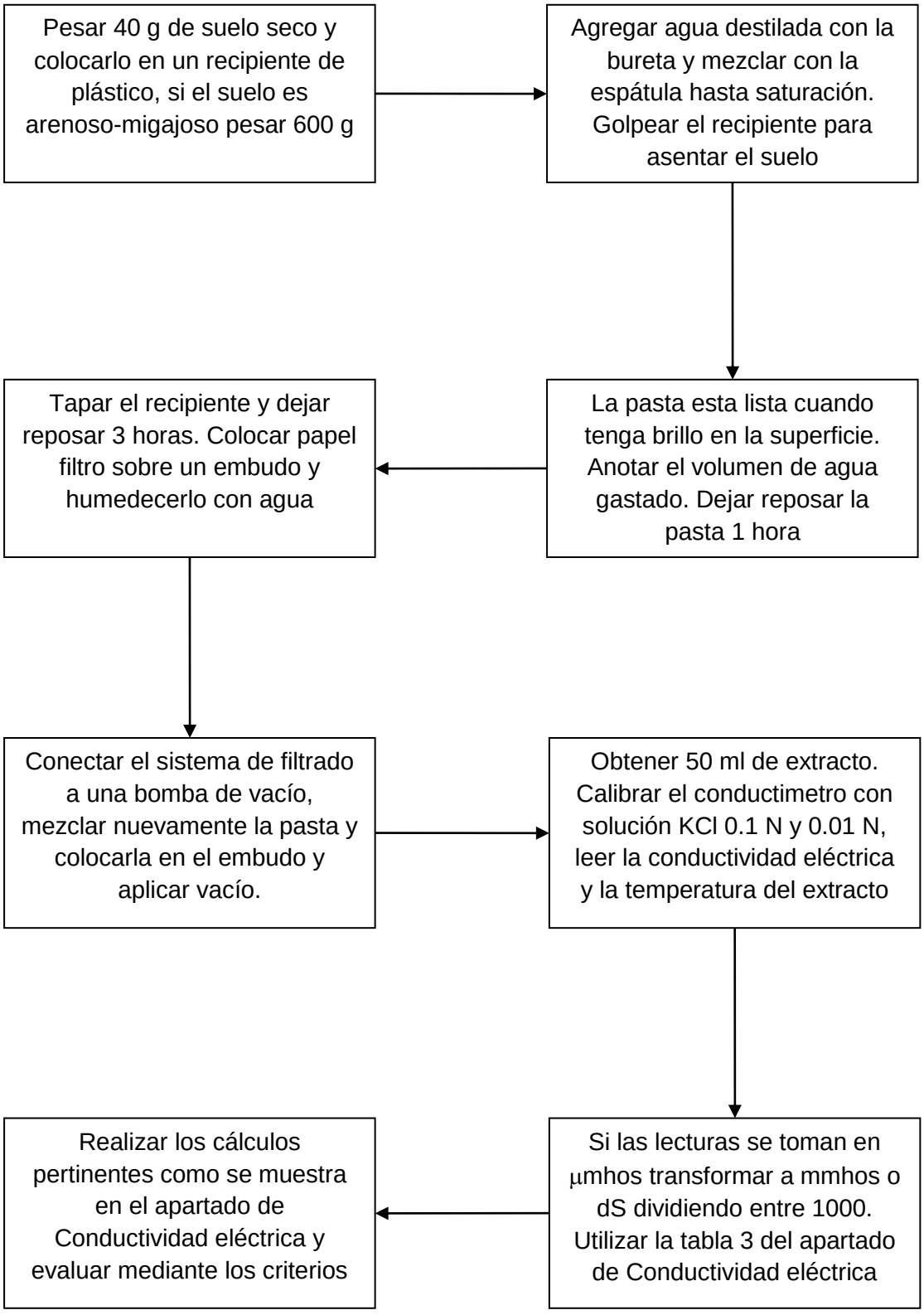


Figura 45. Proceso para la Determinación de Conductividad eléctrica

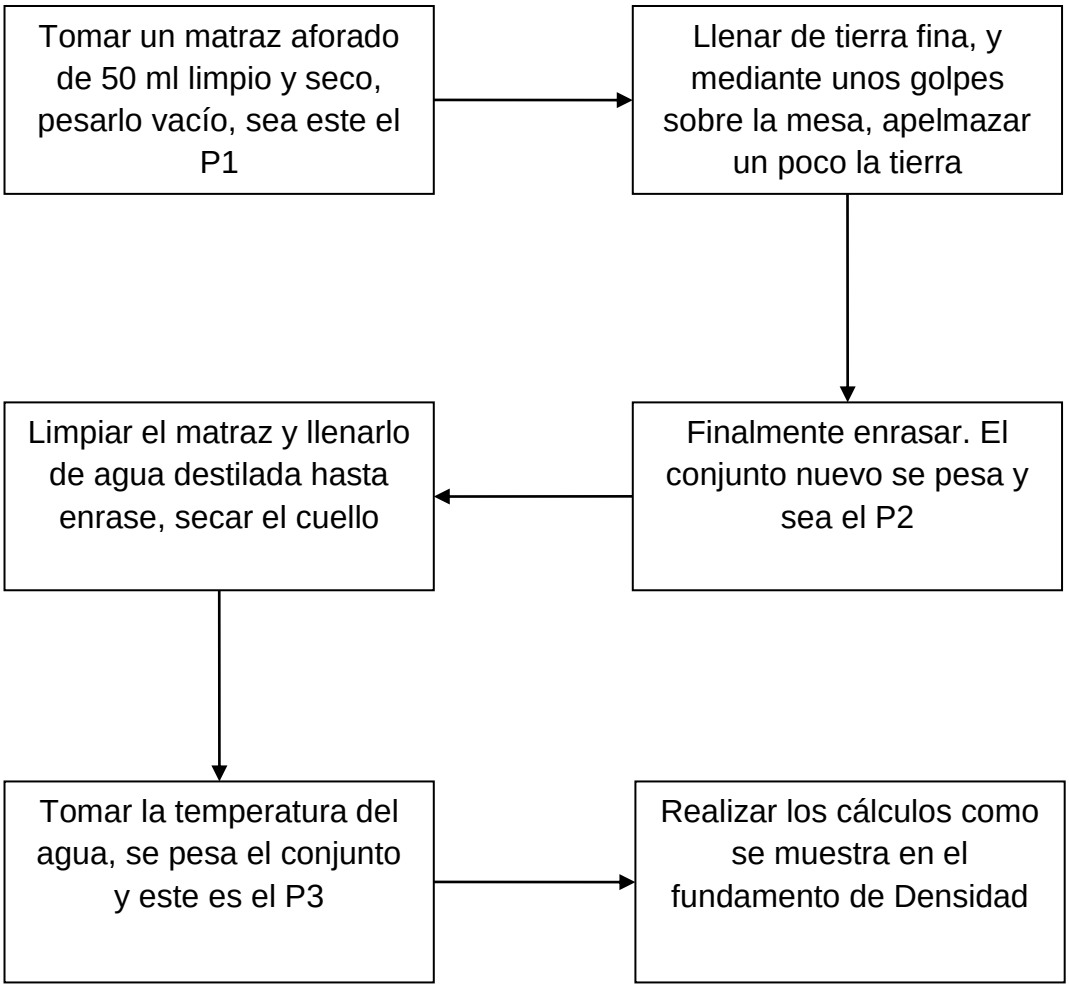


Figura 46. Proceso para la Determinación de Densidad aparente

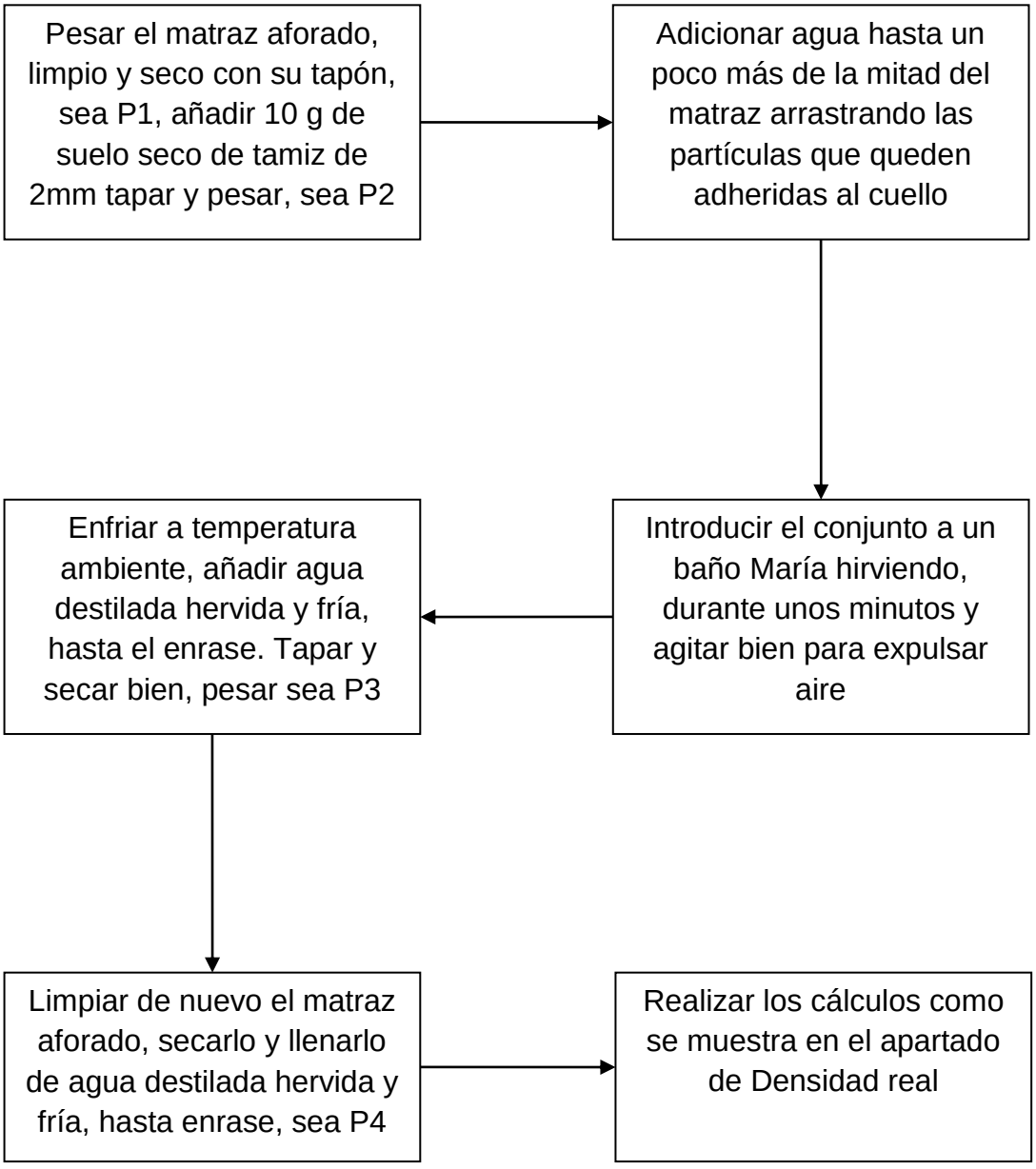


Figura 47. Proceso para la Determinación de Densidad real

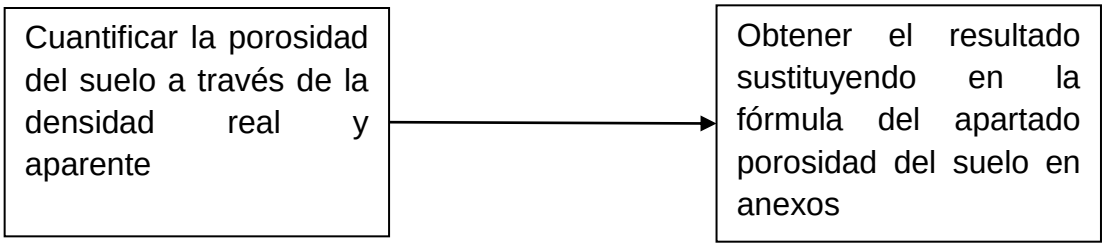


Figura 48. Proceso para la Determinación de Porosidad en el suelo

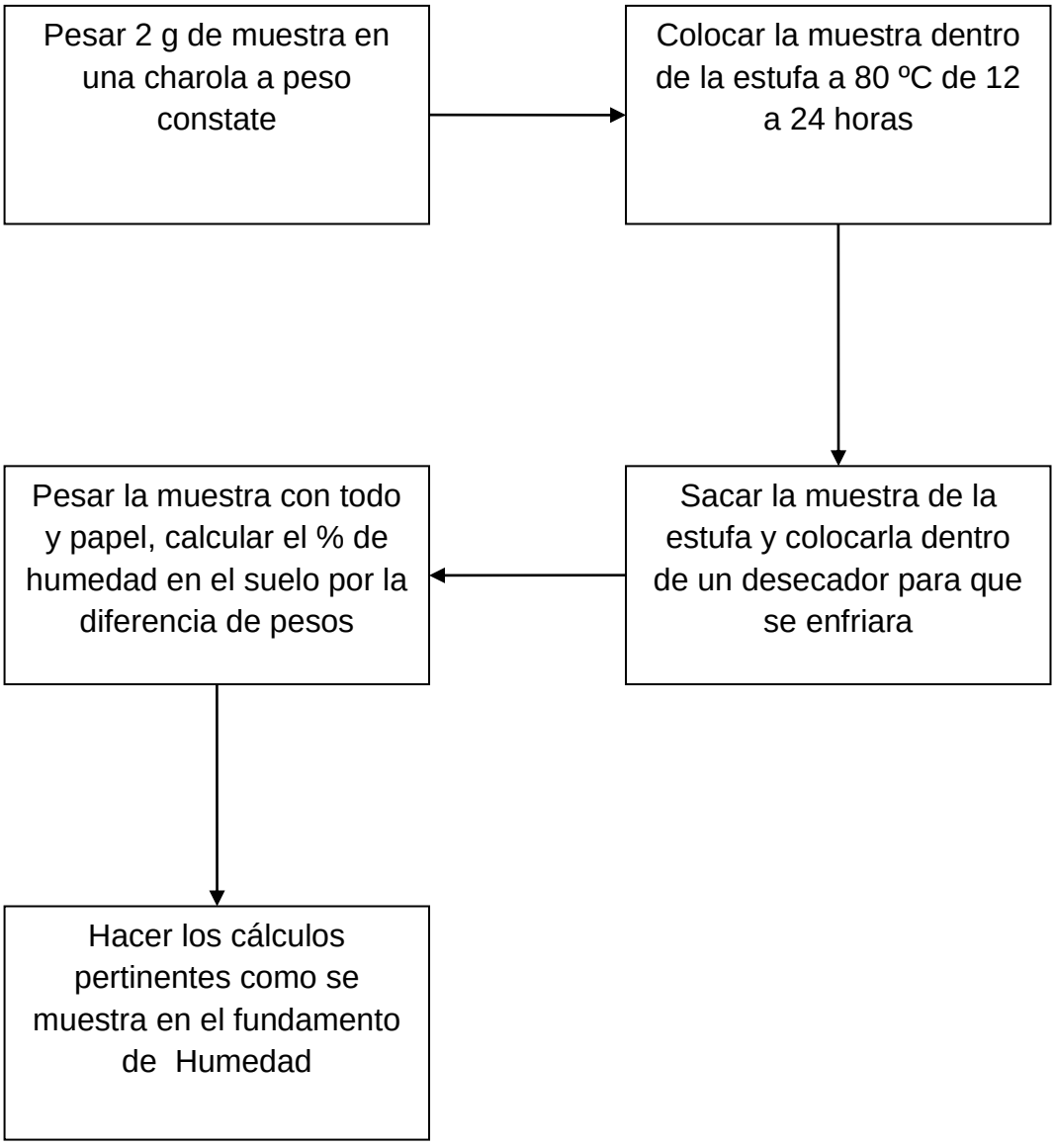


Figura 49. Proceso para la Determinación de Humedad

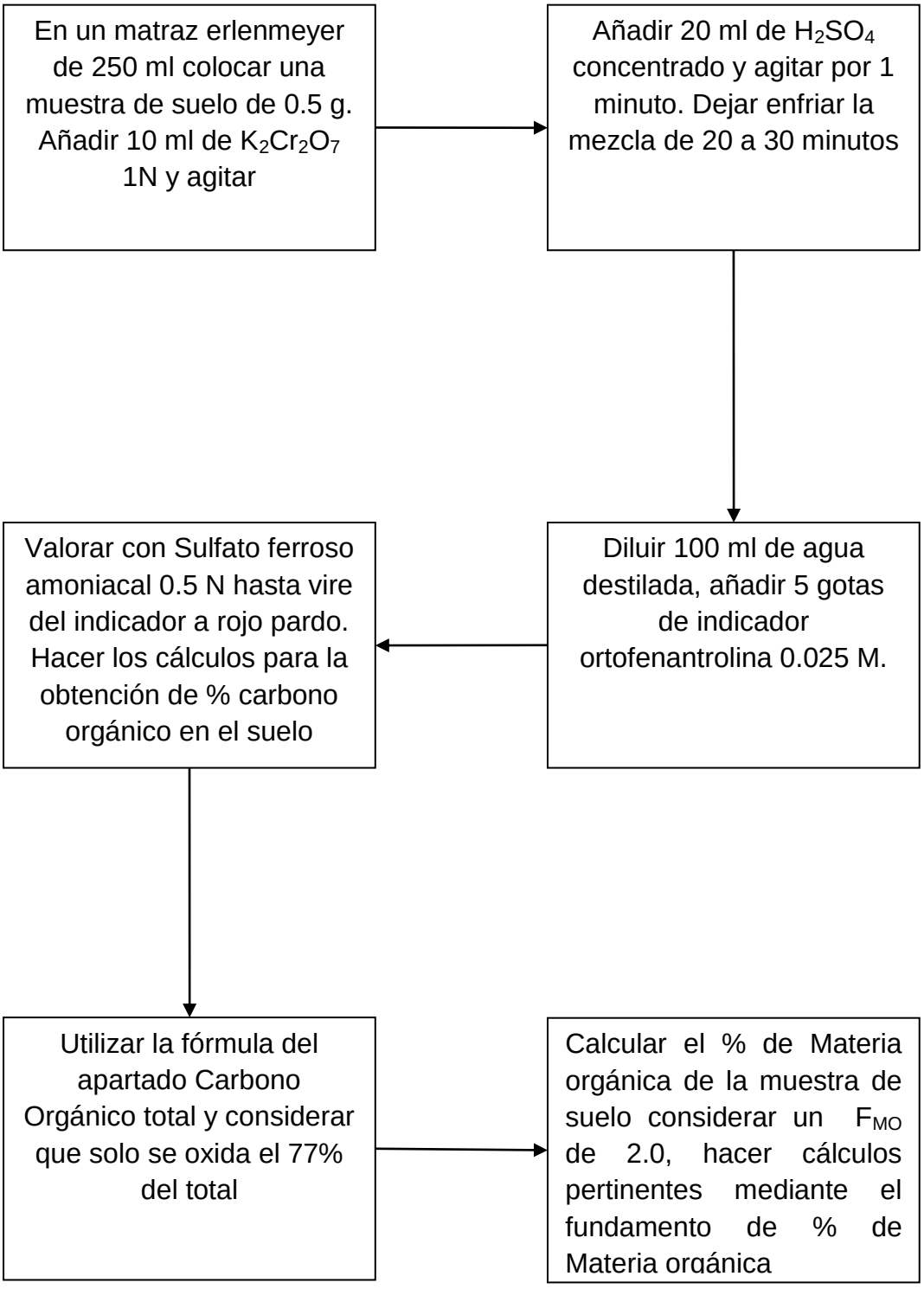


Figura 50. Proceso para la Determinación de Carbono Orgánico total y Materia Orgánica total

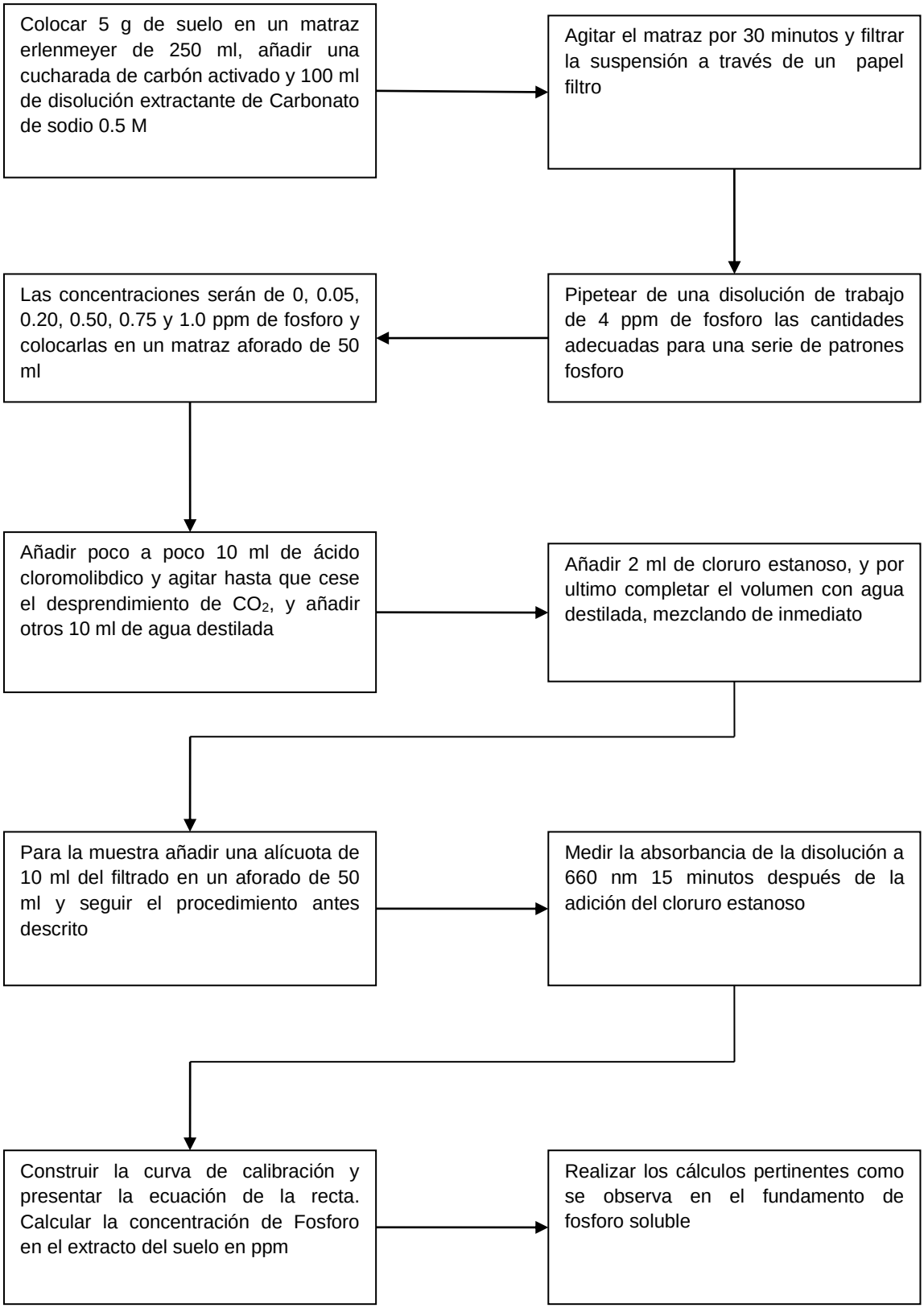


Figura 51. Proceso para la Determinación de Fosforo soluble

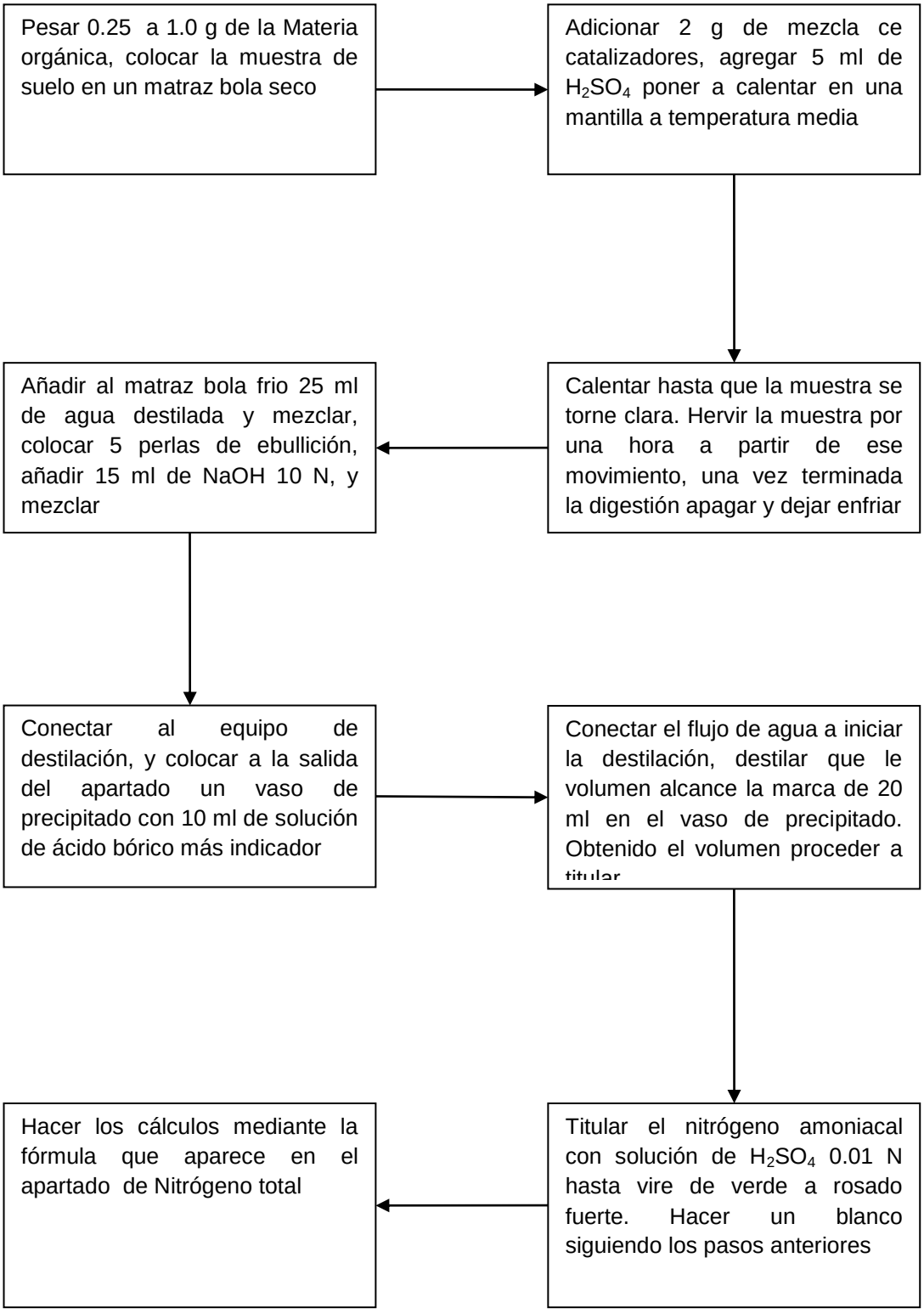


Figura 52. Proceso para la Determinación de Nitrógeno total

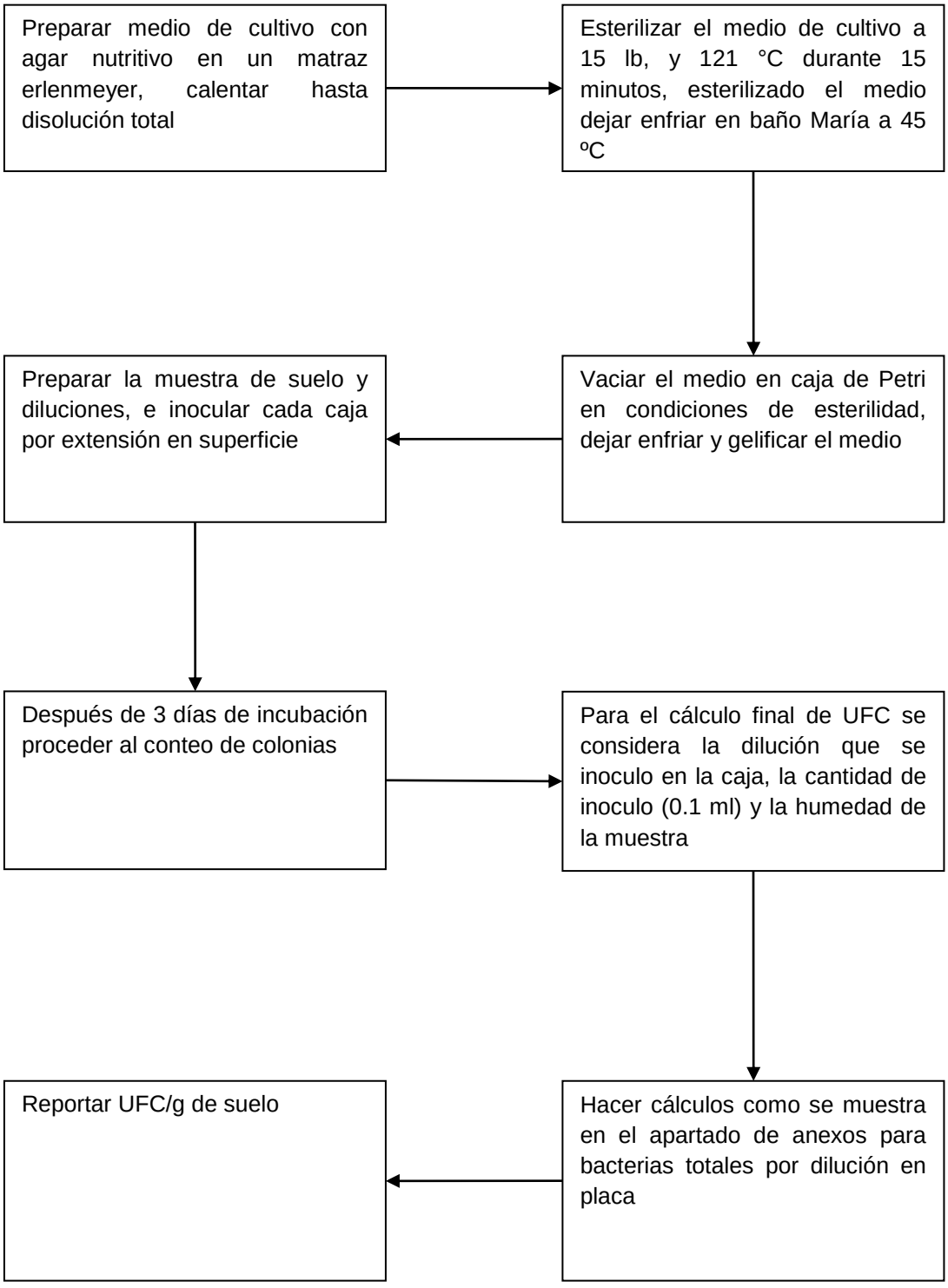


Figura 53. Proceso para la Determinación de Bacterias totales por dilución en placa

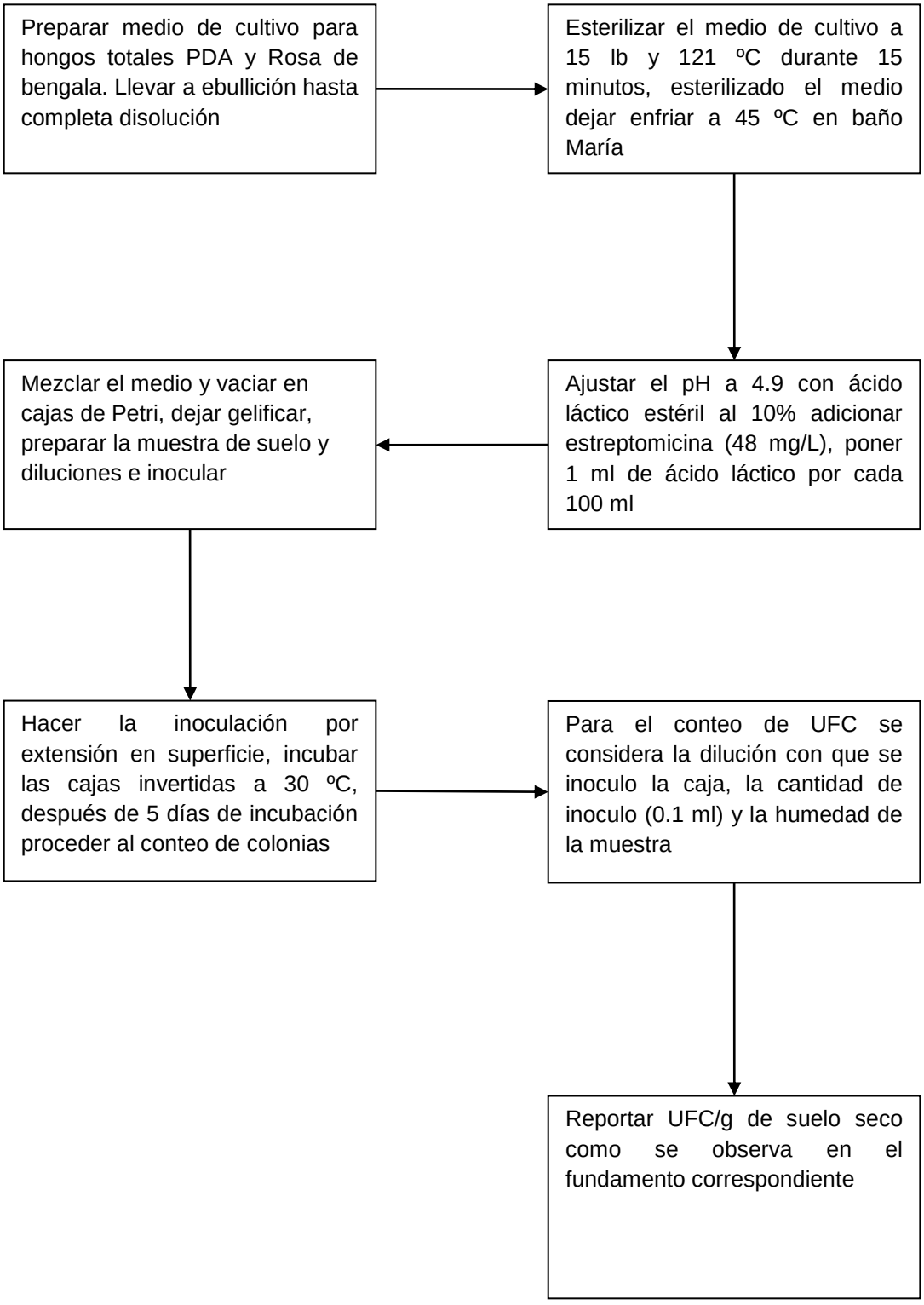


Figura 54. Proceso para la Determinación de Hongos por dilución en placa

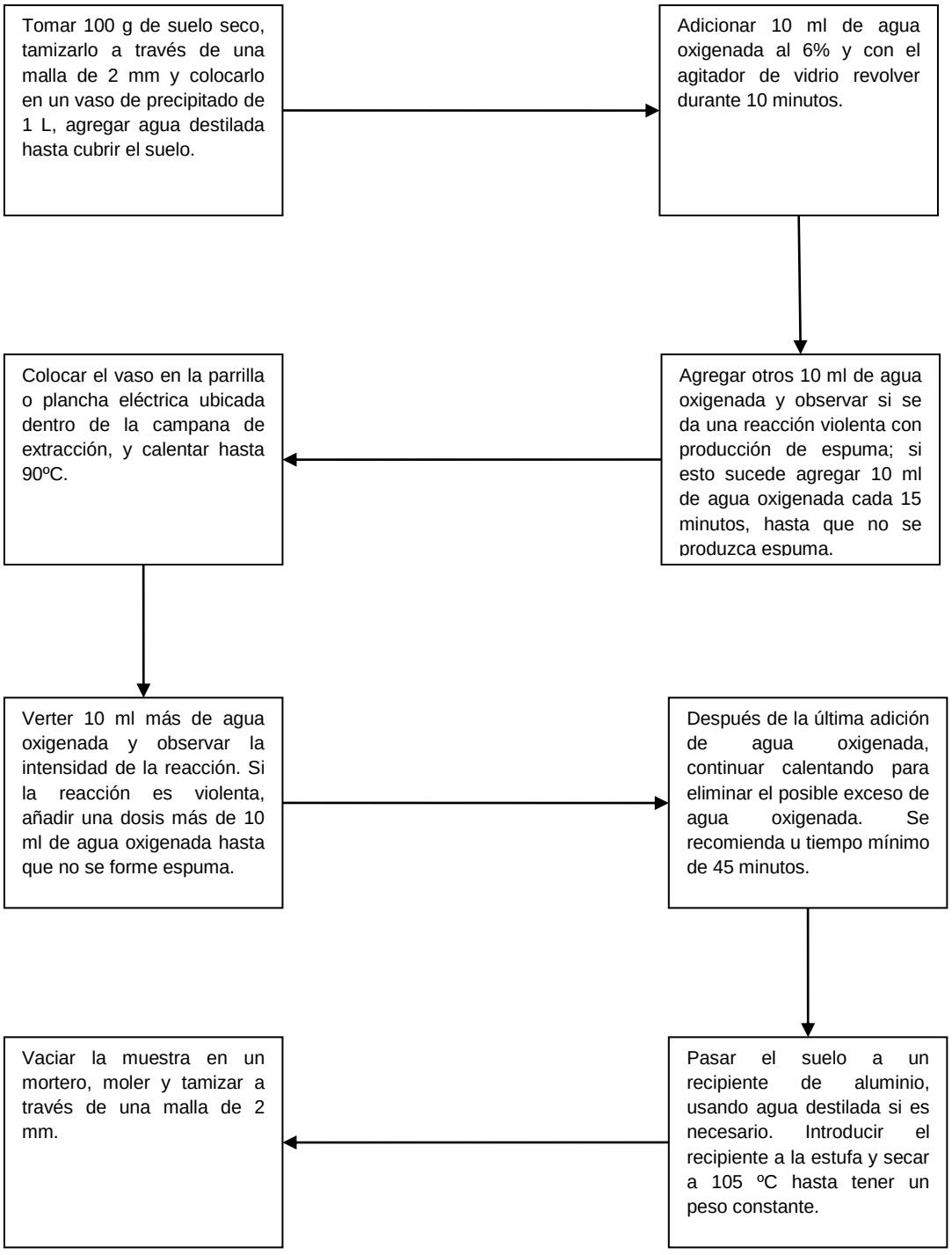
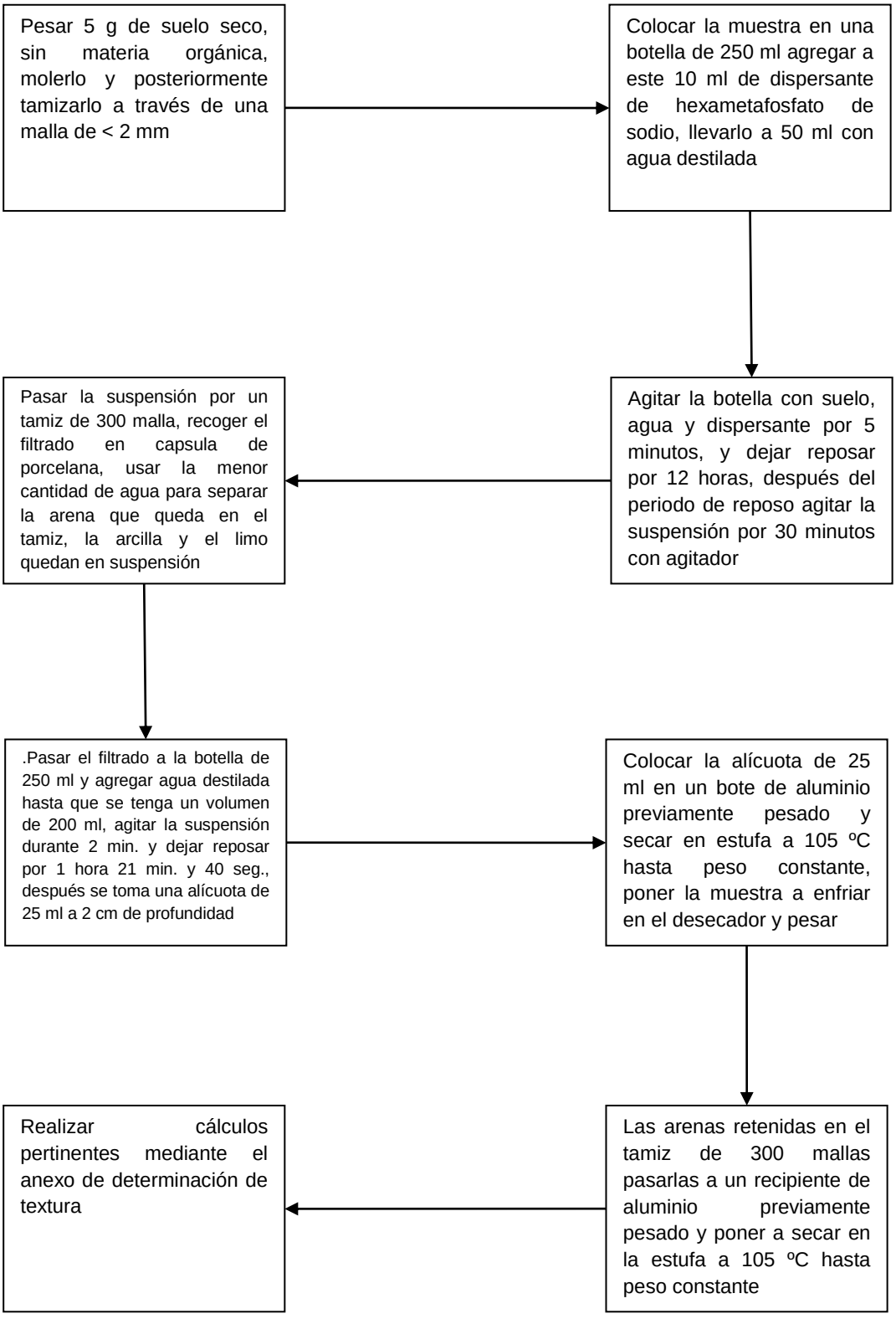


Figura 55. Proceso para la Determinación de textura

Pre tratamiento de la muestra digestión de la materia orgánica.


Pesar 5 g de suelo seco, sin materia orgánica, molerlo y posteriormente tamizarlo a través de una malla de < 2 mm
Colocar la muestra en una botella de 250 ml agregar a este 10 ml de dispersante de hexametafosfato de sodio, llevarlo a 50 ml con agua destilada
Agitar la botella con suelo, agua y dispersante por 5 minutos, y dejar reposar por 12 horas, después del periodo de reposo agitar la suspensión por 30 minutos con agitador
Pasar la suspensión por un tamiz de 300 malla, recoger el filtrado en capsula de porcelana, usar la menor cantidad de agua para separar la arena que queda en el tamiz, la arcilla y el limo quedan en suspensión
.Pasar el filtrado a la botella de 250 ml y agregar agua destilada hasta que se tenga un volumen de 200 ml, agitar la suspensión durante 2 min. y dejar reposar por 1 hora 21 min. y 40 seg., después se toma una alícuota de 25 ml a 2 cm de profundidad
Colocar la alícuota de 25 ml en un bote de aluminio previamente pesado y secar en estufa a 105 ºC hasta peso constante, poner la muestra a enfriar en el desecador y pesar
Las arenas retenidas en el tamiz de 300 mallas pasarlas a un recipiente de aluminio previamente pesado y poner a secar en la estufa a 105 ºC hasta peso constante
Realizar cálculos pertinentes mediante el anexo de determinación de textura

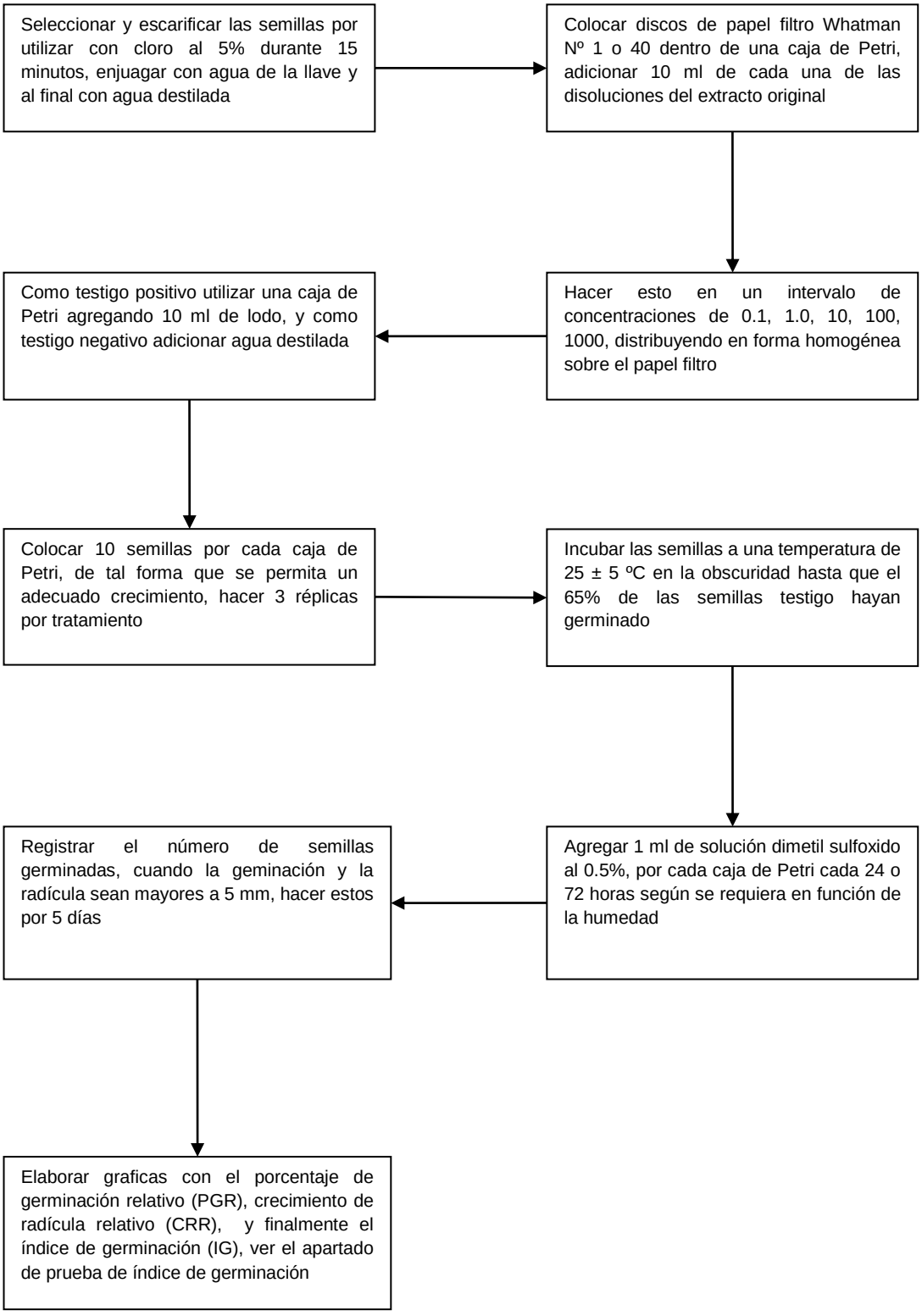


Figura 56. Proceso para la Determinación de germinación de semillas

2. Caracterización de Paja de Trigo.

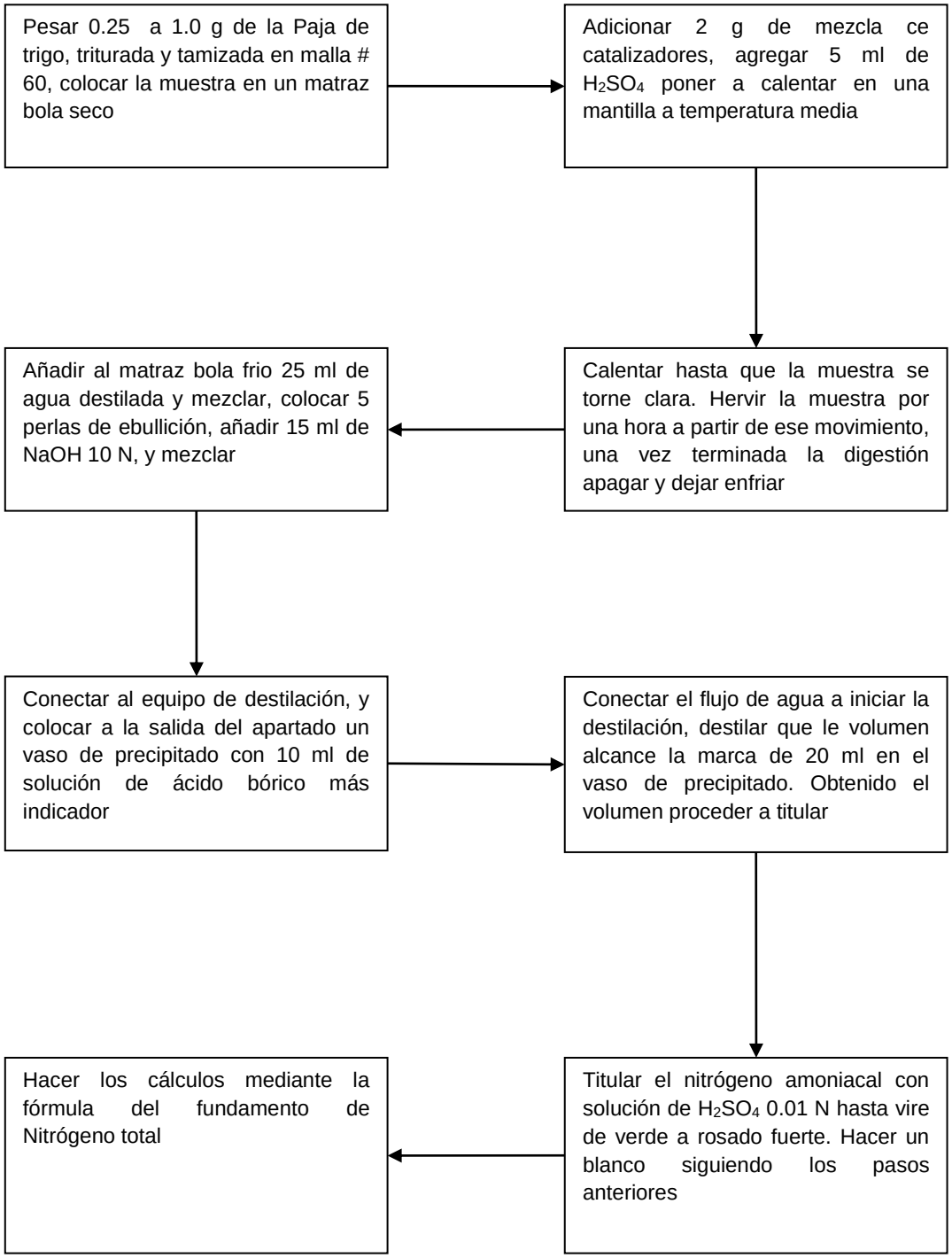


Figura 57. Proceso para la Determinación de Nitrógeno total

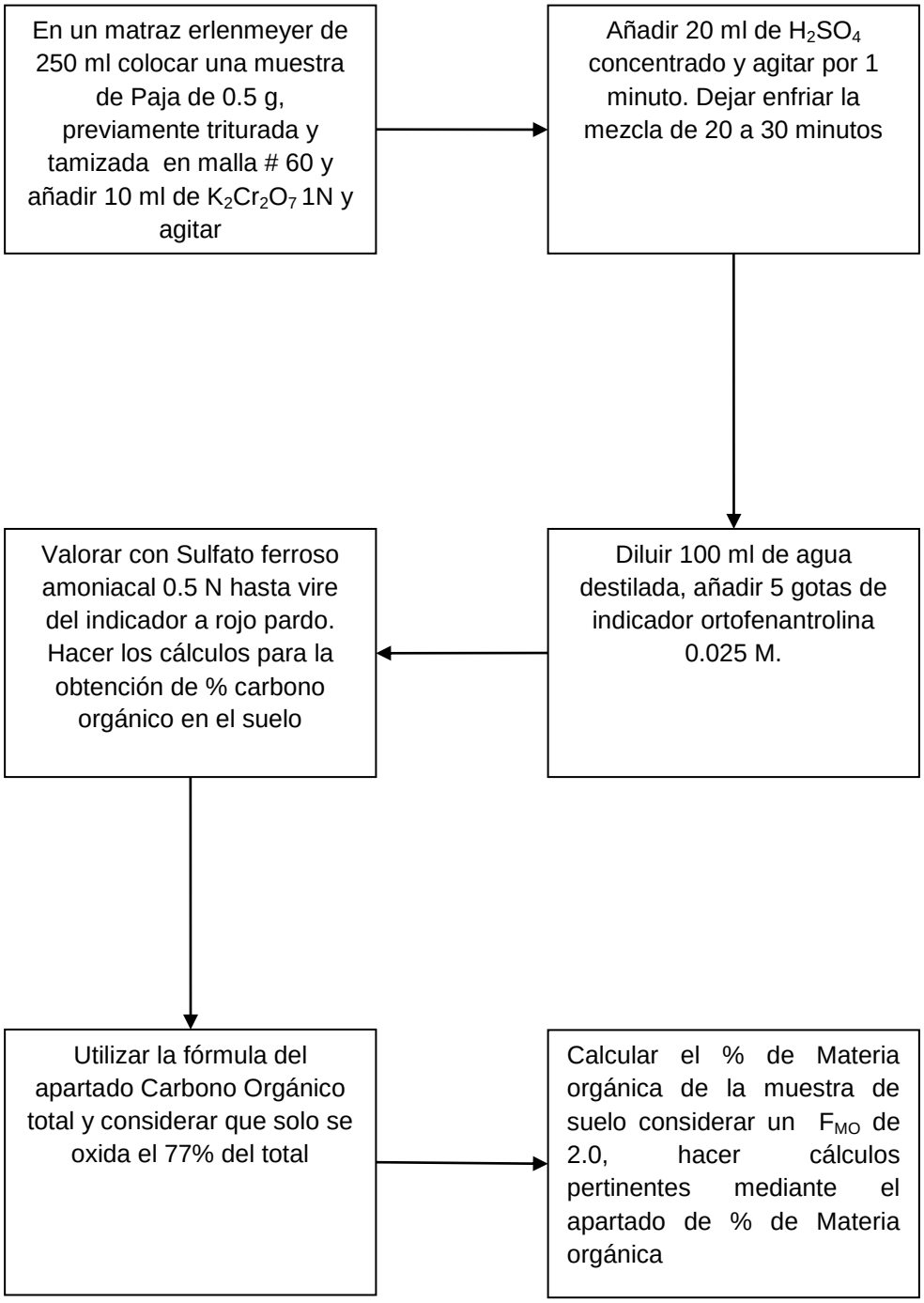


Figura 58. Proceso para la Determinación de Carbono Orgánico Total

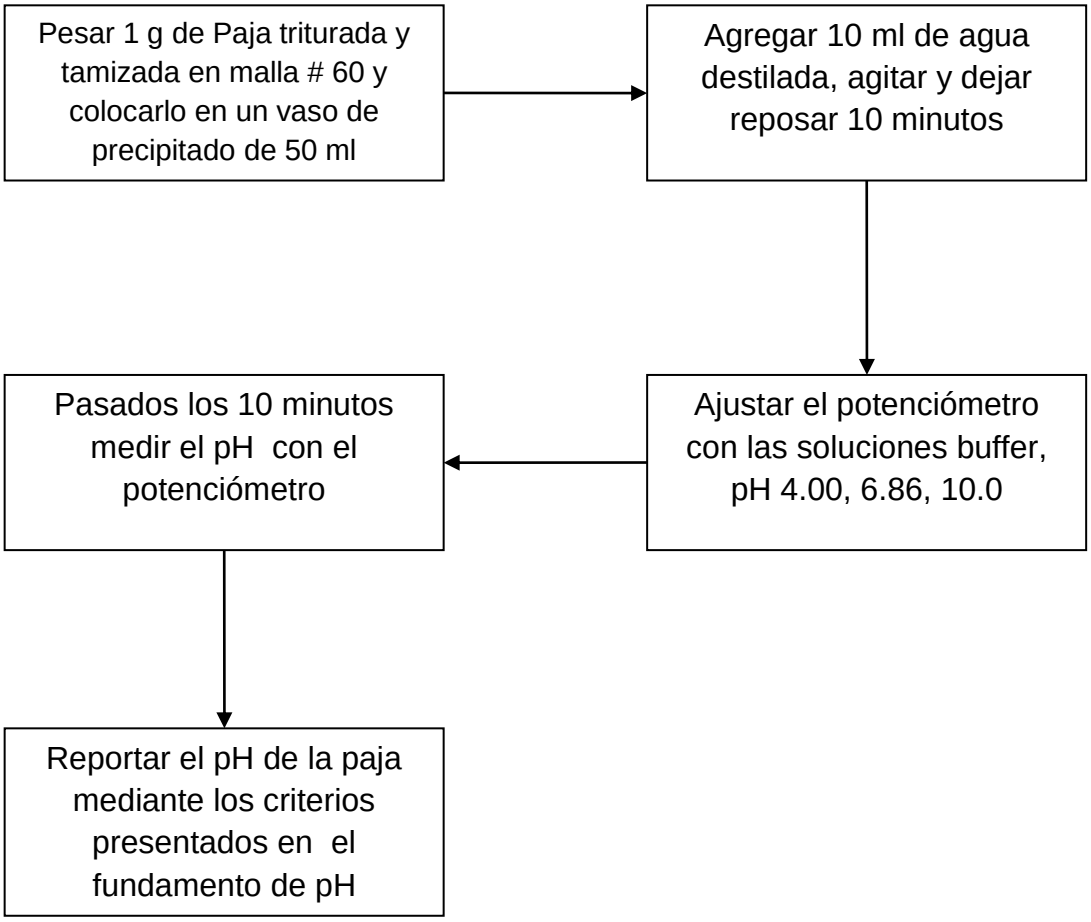


Figura 59. Proceso para la Determinación de pH

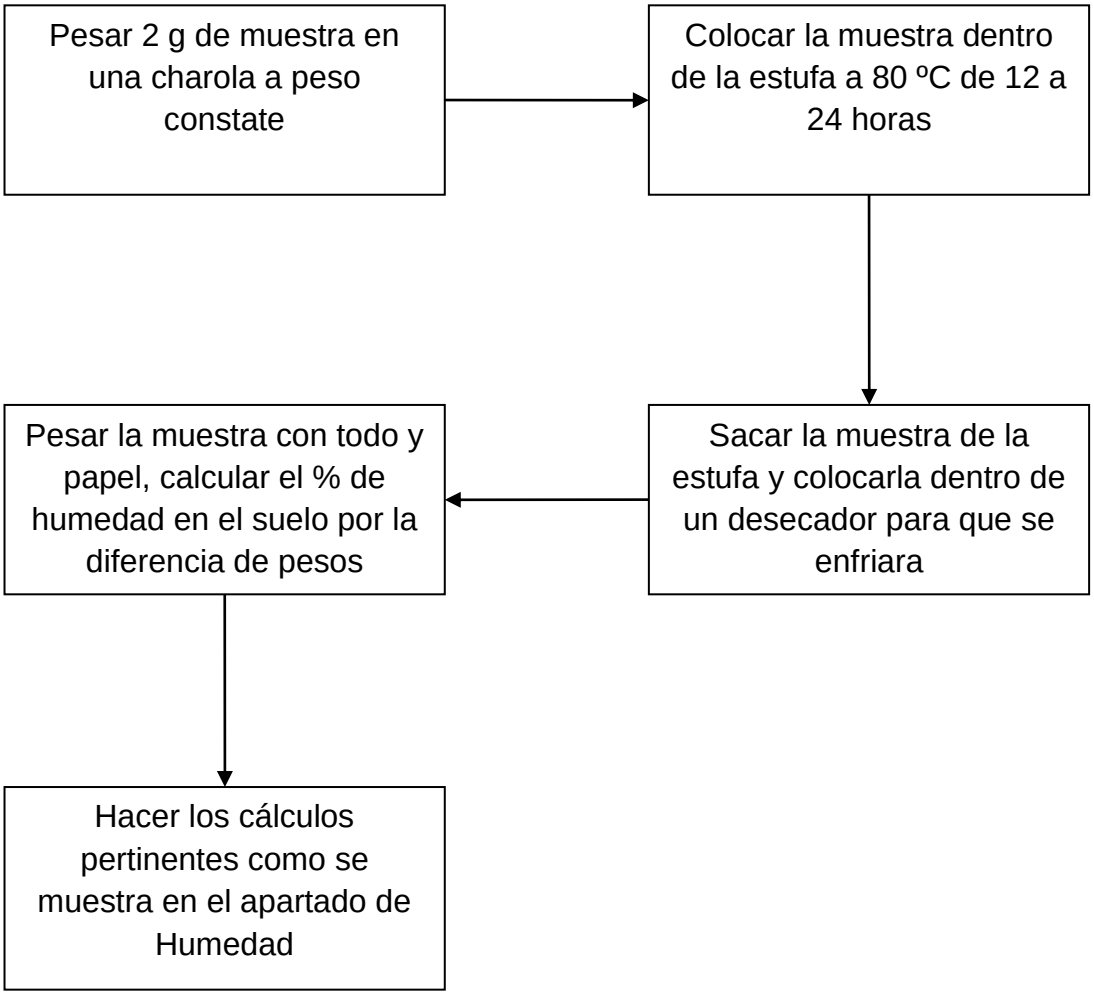


Figura 60. Proceso para la Determinación de Humedad

3. Caracterización de los biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002)

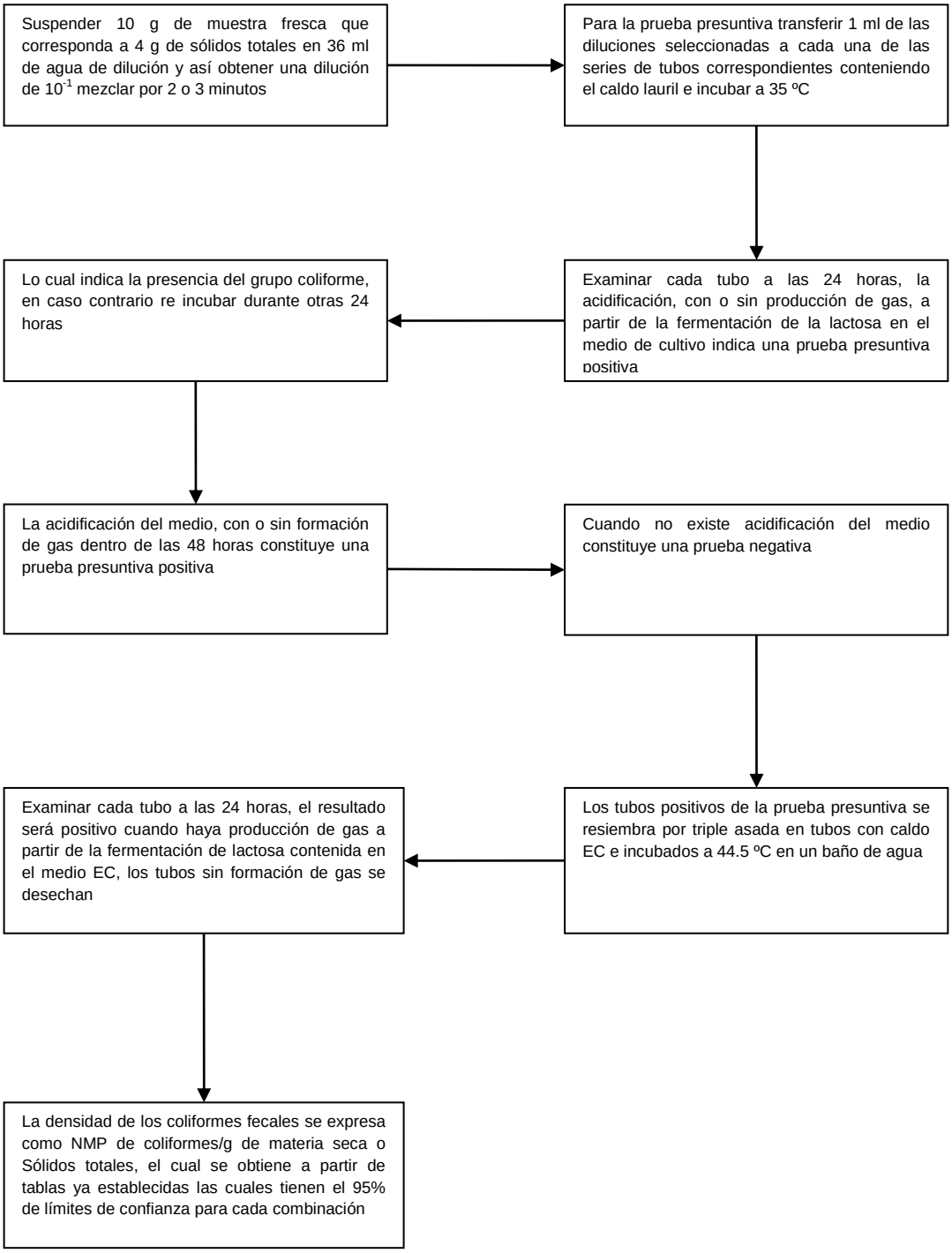


Figura 61. Proceso para la Determinación Coliformes fecales

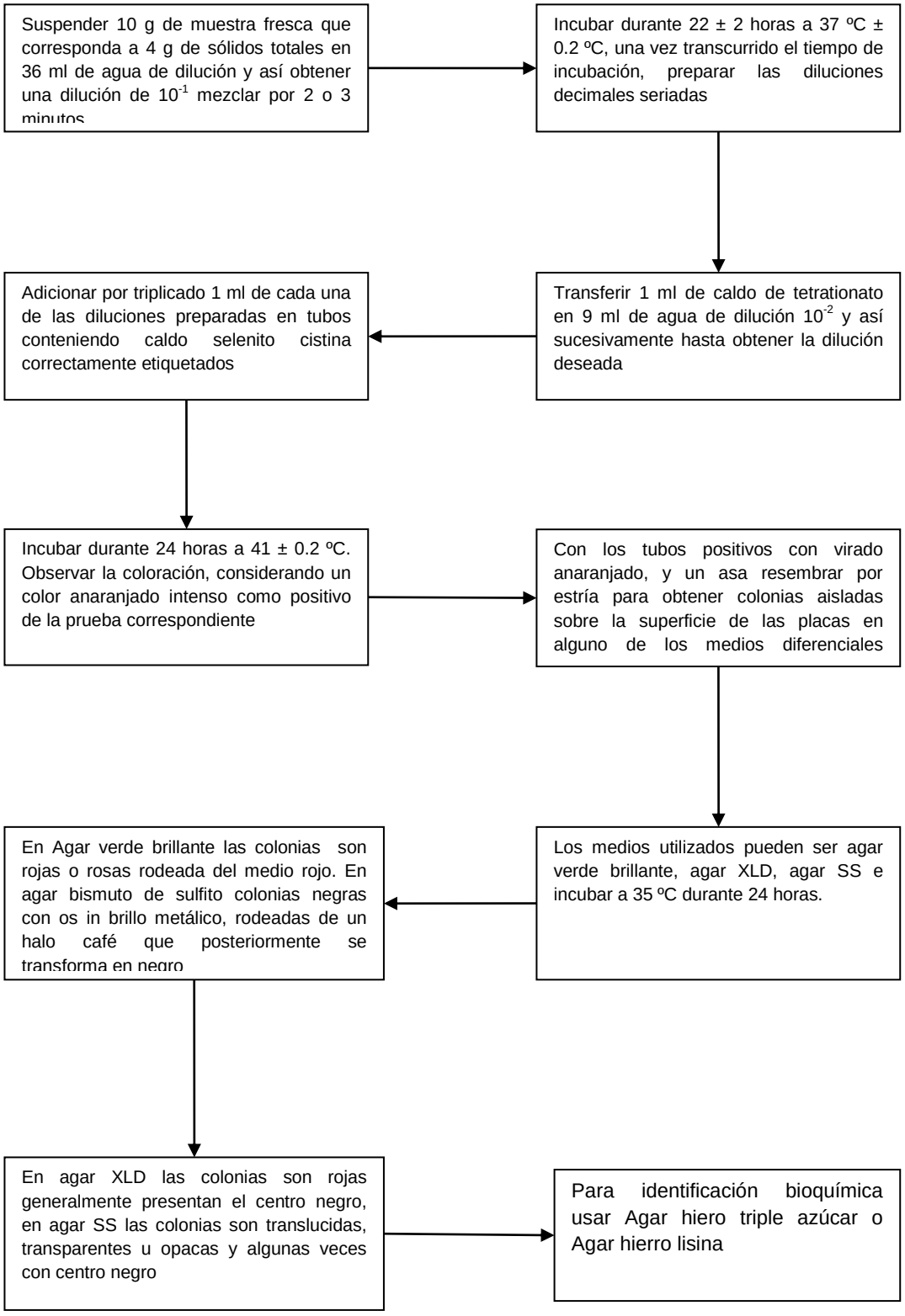


Figura 62. Proceso para la Determinación de *Salmonella sp.*

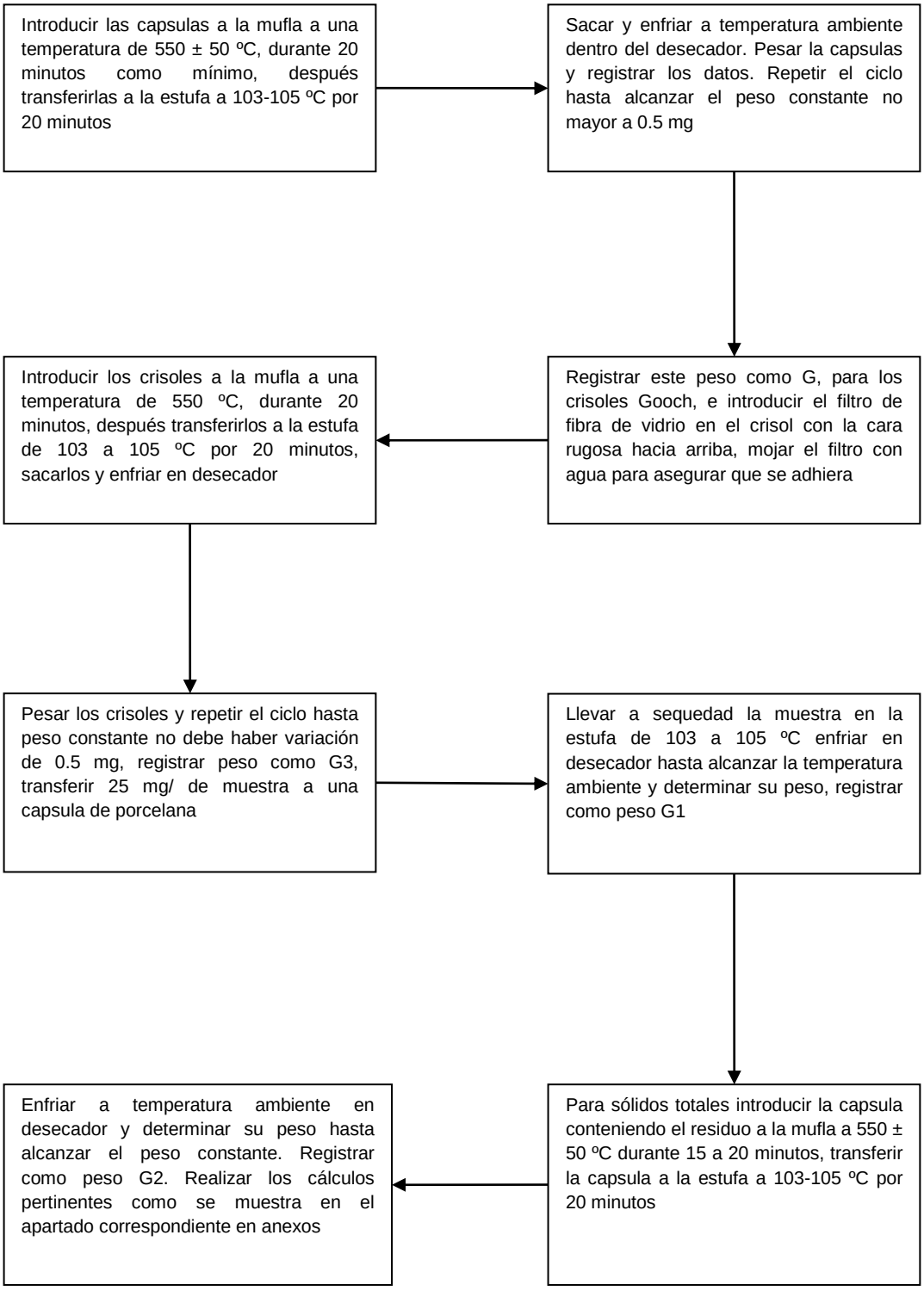


Figura 63. Proceso para la Determinación de Sólidos totales y Sólidos totales volátiles

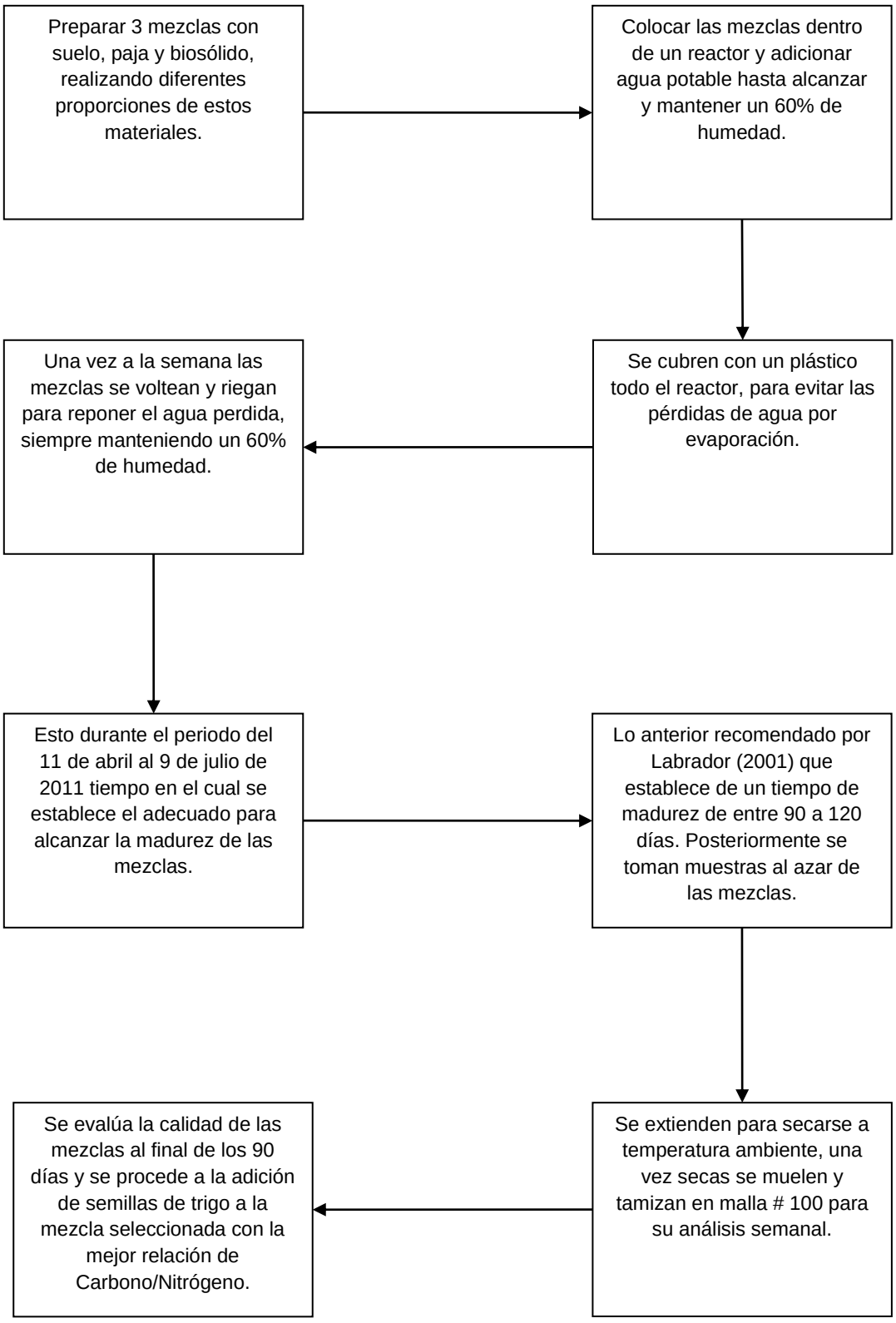


Figura 64. Proceso para la Fertilización del Suelo