

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADACIÓN DE PAÑALES
DESECHABLES USADOS”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS**

PRESENTA

ROSA MARÍA ESPINOSA VALDEMAR

DIRECTORA

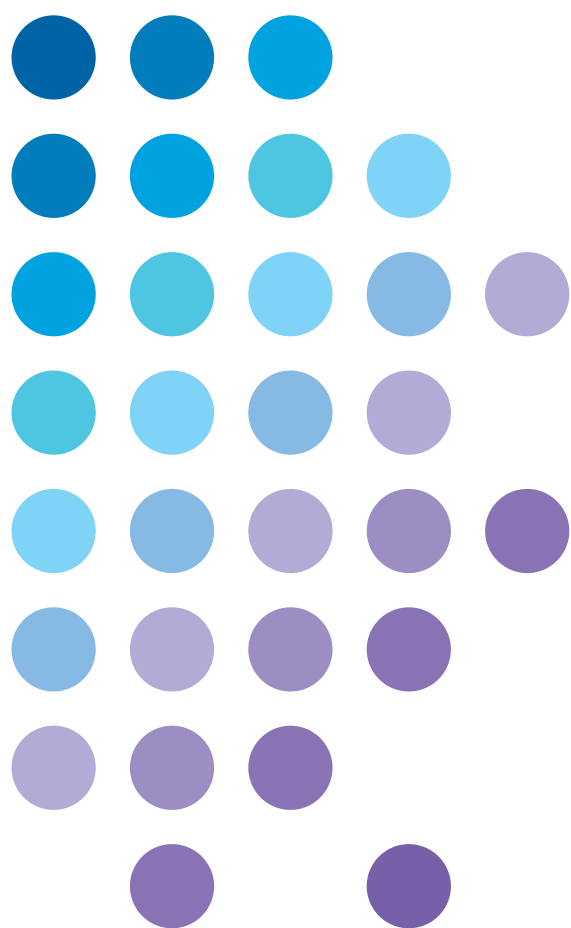
DRA. SARA OJEDA BENITEZ

CODIRECTORA

DRA. ALETHIA VÁZQUEZ MORILLAS

Mexicali, B.C.

Julio, 2015



Evaluación de la biodegradación de pañales desechables usados



Resumen

Este proyecto tuvo como objetivo demostrar la viabilidad de la degradación de pañales desechables usados mediante el hongo *Pleurotus ostreatus* a nivel de planta piloto, a fin de obtener los parámetros adecuados para su transferencia al sistema productivo y de gestión de residuos.

El diseño de la investigación consistió de cuatro etapas que fueron: **1)** Diseño y escalamiento del proceso para tratar los residuos producidos por un niño en un mes, **2)** Selección de acondicionamiento del pañal, cepas y cosustrato a través de pruebas experimentales, **3)** Comparación con la eficiencia de tratamiento de pañales en un sistema de composteo y **4)** Desarrollo de la propuesta metodológica para la aplicación a mediana escala.

En la **primera etapa** se realizó el acopio de información sobre el uso de pañales a partir de encuestas y mediante la recolección realizada en diez guarderías del IMSS, ISSSTE y particulares. Los resultados obtenidos indican que un niño genera en promedio 6.9 pañales al día de los cuáles 4.6 (66.6 %) contienen sólo orina y 2.3 contienen evacuaciones (33.3%). Dado que el mayor porcentaje corresponde a pañales con orina, los cálculos para el escalamiento se realizaron con base en esta consideración y se encontró que un niño genera por mes 15.25 kg de pañales con orina.

En la **segunda etapa** el acondicionamiento del sustrato se realizó a través de la molienda del pañal, ajuste de la humedad, mezcla con la paja en una proporción 65-35% y esterilización. También se evaluaron cinco diferentes formas de cultivo de *Pleurotus*: bolsa-cilindro, bolsa-cilindro-red, bolsa tradicional, tubo de PVC y charolas de plástico, para encontrar el más adecuado para su escalamiento a 5 kg. Los resultados indicaron que las 5 formas de cultivo son viables para el escalamiento del proceso; se seleccionó, la bolsa-cilindro porque ofrece una mayor superficie de contacto, que puede redundar en una mayor degradación del sustrato, además de que las bolsas podrían colgarse y aprovechar mejor los espacios.

Para el escalamiento del proceso se utilizaron bolsas de 5 kg, que se llenaron con una mezcla compuesta por 65% pañal (3.25 kg) y 35% cosustrato paja o pasto (1.75 kg), con y sin plástico. Sólo se utilizaron pañales desechables de bebé conteniendo líquidos (orina), cuya separación se realizó in situ en las guarderías participantes. Se utilizaron dos cepas de *Pleurotus ostreatus*, variedad gris BPR-81 y variedad blanca BPR-5. El proceso se evaluó a través de la reducción de masa, reducción de volumen y eficiencia biológica. La eficiencia biológica fue baja en todos los tratamientos, y como ha ocurrido en experiencias previas, el mayor porcentaje de eficiencia biológica fue para los testigos paja y pasto con ambas variedades blanca y gris (14.03 a 29.78%). Los tratamientos con pañal tuvieron valores que fluctuaron desde 0 hasta 9.23%. La reducción de masa en todos los sustratos fue mayor al 60% en promedio, la reducción de volumen fue mayor en los sustratos sin plástico, con 65.7%. La degradación del pañal, medida con base en la masa seca del pañal al final del cultivo, fue de 67.29% en sustratos sin plástico y de 31.70% para los que conservaron el plástico.



En la **tercera etapa**, para comparar la biodegradación obtenida con el cultivo de hongos con la que se puede alcanzar mediante composteo, se utilizaron los resultados obtenidos por Sotelo en 2014 al compostear pañales desechables en mezcla con residuos de jardinería, mismos que permitieron establecer que este tratamiento es adecuado para estos residuos ya que la masa de los sustratos obtuvo una reducción de 54% para los biorreactores sin pañal y 59% para los que contenían pañal. La degradación del pañal fue del 87%. El proceso permite obtener un producto estable y de buena calidad, susceptible de ser aprovechado como mejorador de suelos.

En la **cuarta etapa**, se comparó la eficiencia de ambos procesos de degradación (cultivo de hongos y composteo), y dado que se obtuvo una mayor reducción de masa mediante el composteo, se seleccionó este tratamiento para la de diseño y operación de una planta para la degradación de pañales desechables usados mezclados con residuos de jardinería. Se propone, por tanto, el composteo aerobio en biorreactores, en la que podrían tratarse los pañales con orina generados al mes por 100 niños. El diseño se basa en los resultados obtenidos experimentalmente y en los criterios de la norma sobre composta vigente en la Cd. de México. Se definió la distribución de la planta, los requerimientos humanos y materiales para su operación, así como los procedimientos y los métodos para el control de calidad de la composta obtenida. La planta propuesta, de tipo modular para permitir su escalamiento, cuenta con una superficie de 590 m² y con una capacidad de tratamiento de 7.5 t de residuos por mes, de los cuales 1.7 t son pañales desechables usados.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que el composteo en biorreactores es la mejor opción para la biodegradación de pañales desechables usados. La propuesta de una planta de tratamiento de pañales por composteo, aparece como una alternativa atractiva para las instancias interesadas en tratar los pañales desechables y los residuos de jardinería a través de un proceso flexible, que podría implementarse a distintas escalas, desde pequeñas comunidades hasta municipios. Esto contribuye a la solución de una problemática importante ya que esta planta permitiría el reciclaje de materiales y nutrientes que de otro modo quedaría en los rellenos sanitarios, con la ventaja adicional de producir una composta de buena calidad.



Abstract

The objective of this Project was to show the viability of the degradation of used disposable diapers by the fungus *Pleurotus ostreatus* at pilot scale, and to obtain the adequate parameters for its transference to the waste management system.

The research consisted of four stages: **1)** Design and upgrade of the process to treat waste produced in one month by child, **2)** Selection of diaper conditioning, strains and cosubstrate through experimental tests, **3)** Comparing to the efficiency of diapers treatment in a composting system and **4)** Development of the methodology for application on a medium scale.

In **the first stage**, information was gathered on the use of diapers through surveys and from the collection performed in ten baby daycare facilities operated by IMSS, ISSSTE and private. The results indicate that a child generates on average 6.9 diapers a day of which 4.6 (66.6%) contain only urine and 2.3 (33.3%) feces. Since the highest percentage correspond to the diapers with urine, the scaling calculations were based on in this consideration, and it was found that a child generates per month 15.25 kg of diapers with urine.

In **the second stage**, the substrate conditioning was performed using milled diapers, and adjusting moisture. These diapers were mixed with the straw in a proportion 65-35% and sterilized. Five different types of configuration were also: cylinder-bag, cylinder bag-net, traditional bag, PVC pipe and plastic trays, to find the most suitable for scaling to 5 kg batches. The results indicate that the five types of configurations are viable for the scaling process. The cylinder bag was selected because it offers a bigger contact surface that can lead to further degradation of the substrate, besides the bags could hang and exploit better the spaces.

Bags of 5 kg were used for the scaling process. They were filled with a mixed composed by 65% diaper (3.25 kg) with or without plastic and 35% straw and grass cosubstrate (1.75 kg). Only disposable diapers containing fluids (urine) were used. Its separation was performed in situ in the participating nurseries. Two strains of *Pleurotus ostreatus*, gray variety BPR-81 and white variety BPR-5 were used. The process was assessed by the mass and volume reduction and biological efficiency.

The biological efficiency was low in all the treatments. As in previous experiences, the highest percentage of biological efficiency was for straw and grass without diapers, for both varieties white and gray (14.03 to 29.78 %). For the treatment with diapers, the values fluctuated from 0 to 9.23 %. The highest mass reduction was 60% on average. The volume reduction was greater for substrates without plastic, 65%. The diaper degradation was 67.29 % and 31.70 % in substrates with or without plastic respectively.

In **the third stage**, the results of degradation of diapers by *Pleurotus* were compared to the degradation achieved by Sotelo in 2014 in a composting process. Their results allowed to establish that composting is appropriate for the treatment of diapers, since the mass of the substrates



was reduced by 54% in the bioreactors without diapers and by 59% in the bioreactors containing diapers. The diaper degradation was 87% since at the end of the process, only 13% of the diapers, mainly the plastic parts, were recovered at the end of the experiment. The process provides a stable product with good quality, which could be exploited as a soil enhancer.

In **the fourth stage**, the efficiency of both processes (fungi cultivation and composting) was compared by their mass reduction. The composting was selected as the best option with 87% of degradation. Additionally, a proposal was made for design and operation of a plant for degradation of disposable used diapers mixed with gardening waste. The plant works through aerobic composting in bioreactors, in which diapers with urine generated by 100 children per month could be treated. The design is based on the experimental results obtained and in the criteria for the standard for compost in Mexico City. The layout and the human and material requirements were defined, as well as the procedures and methods for quality control of the compost. The proposed plant is modular to allow upgrading, has an area of 590 m² and a treatment capacity of 7.5 t of waste a month, of which 1.7 t are used disposable diapers.

According to the results of this study, in the assessment of the biodegradation of used disposable diapers, it is concluded that composting in bioreactors is the best option. The proposal of a treatment plant of diapers by composting is an attractive alternative to the authorities concerned in treating disposable diapers and gardening waste. This could be done through a flexible process that could be implemented in small communities or even municipalities. This contributes to solving a major problem because the plant would allow the recycling of materials and nutrients that would otherwise be in landfills, with the additional advantage of producing good quality compost.



Agradecimientos

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito federal, por su apoyo para la realización de este proyecto a través del Convenio ICyTDF-294-2011.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de este posgrado.

Al personal de las guarderías del IMSS, del ISSSTE y particulares por participar y apoyarnos en la separación y recolección de los pañales desechables utilizados en esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Baja California, en especial al Instituto de Ingeniería campus Mexicali, por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios en esta gran institución.

A la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, gran institución en la que he pasado casi la mitad de mi vida, a la que he conocido profundamente, donde he tenido más logros y alegría que cosas negativas, por la fortuna de tener tantos alumnos y de conocer a muchos compañeros maravillosos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme formado, por tener el privilegio de ser parte de esta gran institución y porque ahí conocí a mis compañeros de vida, mis amigos de la licenciatura, mi queridos rucos. Como no te voy a querer. Puma por siempre

A mi asesora Dra. Alethia Vázquez Morillas, mi más sincero y profundo agradecimiento por todas sus enseñanzas, por su paciencia infinita, por compartir conmigo su visión, su experiencia y mis sueños de este proyecto. Agradezco sobretodo el privilegio de conocerla y de ser su amiga, ese es mi mayor logro en esta etapa.

A mi asesora Dra. Sara Ojeda Benítez agradezco infinitamente el que haya estado en mi camino, por sus enseñanzas, por compartir su visión y experiencia, por su calidez y su gran calidad humana, gracias por siempre estar.

A mis sinodales, Dra. María Elizabeth Ramírez Barreto, Dr. Nestor Santillan Soto y Dra Samantha Eugenia Cruz Sotelo, por su confianza en la revisión de la tesis. Agradezco especialmente a los doctores Paul Taboda y Quetzalli Aguilar Virgen, quienes siguieron el desarrollo de este trabajo, gracias por su asesoría en la parte estadística y por motivarme y alentarme siempre.

A la Dra. Sylvie Turpin Marion por su visión y su cuidadosa revisión, como siempre enseñándome diferentes formas de ver las cosas a través de la “silvicultura”, gracias por tus enseñanzas y tu dedicación, sobre todo, gracias por ser mi amiga.

Al Área de Tecnología Sustentables que son mi compañeros de muchos años de trabajo, vaya mi reconocimiento por su apoyo para la realización de este trabajo, porque después de muchos



años logramos el sueño de tener nuestro laboratorio, en especial me da gusto que este proyecto haya contribuido a su fortalecimiento. Mi reconocimiento especial para Adrianita, Margarita y Maribel, participantes del proyecto que han enriquecido esta investigación, gracias por su amistad y contribución a tener un buen ambiente de trabajo.

A la M en C. e I. Xóchitl Quecholac Piña, gracias por tu apoyo incondicional, por tu dedicación en el laboratorio y en los informes, por aguantar el pesado ritmo de trabajo, sobre todo por trabajar en horarios extremos y por tu gran paciencia para ayudarme en las cosas difícilísimas para mí.

A la M en C. e I. Perla Xochitl Navarro Sotelo, gracias por tu empeño y desempeño en este proyecto, sabes que tu trabajo fue muy importante para decidir el futuro del proyecto y que aún nos queda mucho por hacer, especialmente a ti.

A la Ing. Mariel Anel García Rivera por su gran contribución en este proyecto, por su profesionalismo y compromiso, por la calidad de su trabajo y por su visión, gracias Mariel fue un gusto trabajar contigo.

A las Ing. Gabriela Arango Escorcia, Sonia Cabrera Elizalde y Liliana Salazar Sánchez, quienes contribuyeron de manera importante en la generación de resultados.

Al equipo de Separación, Ing. Roberto Carlos Vázquez Solís y Mtro. Alfonso de la Torre Vega, por estar siempre, a José Alberto Guzmán Vilchis, Jesús Ramírez Vargas, Noe Gómez Fuentes, Sr. Leopoldo Almaraz y Alejandro Villegas Sánchez, por responder rápida y eficientemente a todas las solicitudes del proyecto y por su apoyo incondicional.

A los Ingenieros ambientales, ayudantes y alumnos de servicio social que colaboraron en la realización de este proyecto: Beatriz Alejandra, Juan Carlos, Miriam Hidemi, Gladys, Cecilia, Baldo, Kristell.

Al Lic. Diego Santana de la COSEI, por su apoyo en la obtención de la información bibliográfica, mi reconocimiento y agradecimiento a su eficiente trabajo.

A Mayra Lizbeth Rivera García por su apoyo en el diseño e impresión de la tesis, por su dedicación y profesionalismo, muchas gracias.

A todos los alumnos que a lo largo de los años han participado en esta investigación y que han contribuido de manera muy importante en la generación de resultados.

Gracias a la vida que me ha dado tanto



Dedicatoria

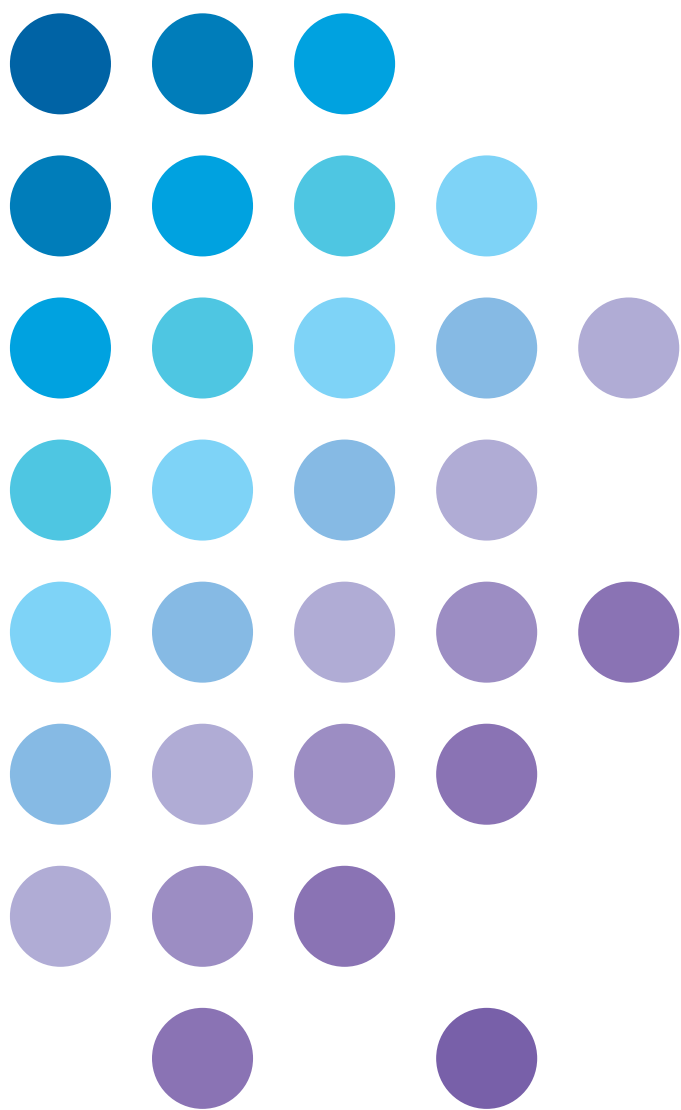
Para Irma Delfín Alcalá *in memoriam*, mi muy querida maestra que forma parte importante de esta investigación, con quién sentamos la bases de lo que es ahora este proyecto, mi dedicatoria especial para ella que me sigue impulsando.

Para Efraín, por su apoyo, por su paciencia y por impulsarme a realizar este proyecto, gracias amor por compartir, además de todo lo que tenemos, este sueño.

Para mis hijos Yunuen y Efraín, una dedicatoria muy especial ya que son el motor e impulso de este proyecto, gracias por apoyarme siempre.

Para toda mi familia y amigos, de quienes siempre recibo palabras de apoyo y aliento, vaya para ustedes con todo mi cariño.

Finalmente espero y deseo que los resultados de esta investigación, pronto puedan ponerse en práctica y que ayuden a resolver esta importante problemática.



Índice



Índice

ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVIII
1. INTRODUCCIÓN	2
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. OBJETIVOS	9
3.1 OBJETIVO GENERAL	9
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
4. MARCO TEÓRICO	11
4.1 PAÑALES DESECHABLES	11
4.1.1 Historia de los pañales desechables	11
4.1.2 Composición de los pañales desechables	12
4.1.3 Efectos ambientales de los pañales desechables	14
4.2 TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS	16
4.2.1 Degradación mediante el cultivo de hongos <i>Pleurotus</i>	17
4.2.2 Tratamiento mediante composteo	20
5. ESTADO DEL ARTE	27
5.1 DISPOSICIÓN EN RELLENO SANITARIO	27
5.2 OPCIONES DE TRATAMIENTO	28
5.2.1 Incineración	28
6. METODOLOGÍA	34
6.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	34
6.2 ETAPA 1. CÁLCULO DE LA MASA DE PAÑALES USADOS PARA EL ESCALAMIENTO DE LOS PROCESOS 40	35
6.2.1 Acopio de información sobre uso de pañales	35
6.2.2 Determinación de la masa de pañales y análisis de datos	37
6.2.3 Cálculo de la masa de pañales usados	37
6.3 ETAPA 2. DEGRADACIÓN POR <i>Pleurotus</i>	37
6.3.1 Molienda	37
6.3.2 Selección del tipo de cultivo	38
6.3.3 Preparación del sustrato paja-pañal	40
6.3.4 Siembra	40
6.3.5 Fase oscura	42
6.3.6 Fase luminosa	42
6.3.7 Evaluación del proceso	43
6.3.8 Escalamiento del proceso de cultivo	44
6.3.9 Comparación de los parámetros utilizados en los dos experimentos de cultivo	52
6.4 ETAPA 3. DEGRADACIÓN POR COMPOSTEO	53



6.5 ETAPA 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y PROPUESTA METODOLÓGICA

54

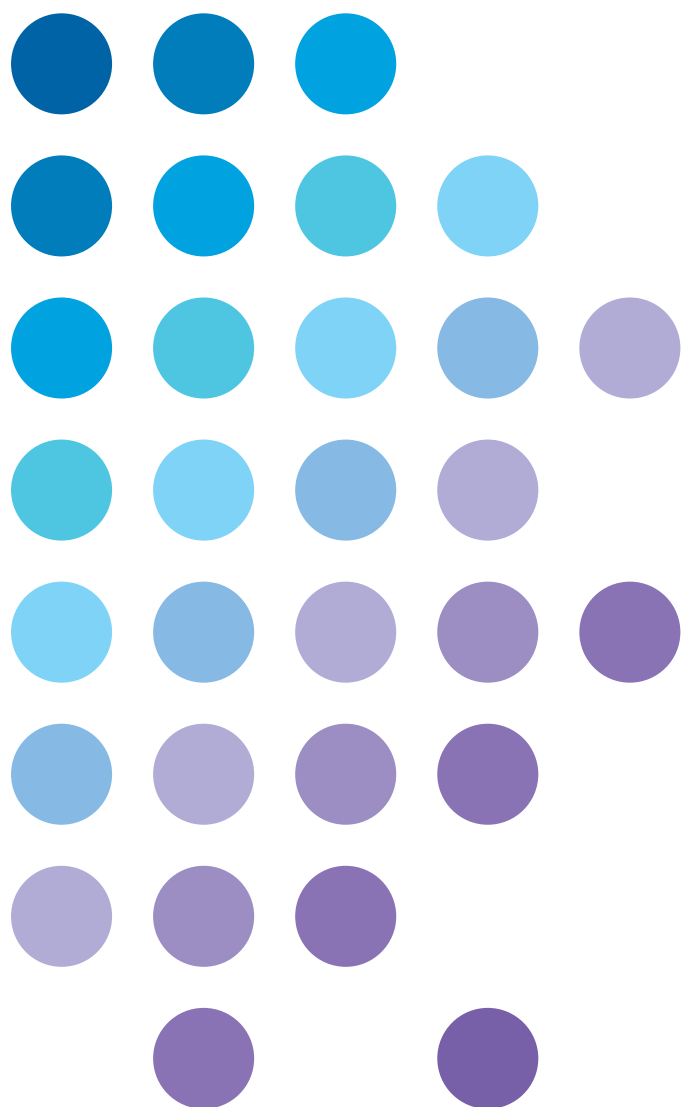
7. RESULTADOS

57

7.1 ETAPA 1. CÁLCULO DE LA MASA DE PAÑALES PARA EL ESCALAMIENTO DE LOS PROCESOS	57
7.1.1 <i>Acopio de información sobre uso de pañales</i>	57
7.1.2 <i>Masa de los pañales y análisis de datos</i>	58
7.1.3 <i>Cálculo base para el escalamiento</i>	60
7.2 ETAPA 2. DEGRADACIÓN POR CULTIVO DE <i>Pleurotus</i>	60
7.2.1 <i>Molienda</i>	60
7.2.2 <i>Formas de cultivo</i>	64
7.2.3 <i>Preparación del sustrato paja-pañal</i>	64
7.2.4 <i>Siembra</i>	66
7.2.5 <i>Fase oscura</i>	66
7.2.6 <i>Fase luminosa y fructificación</i>	66
7.2.7 <i>Evaluación del proceso</i>	69
7.2.8 <i>Escalamiento del proceso de cultivo</i>	71
7.3 ETAPA 3. DEGRADACIÓN POR COMPOSTEO	86
7.3.1 <i>Obtención y acondicionamiento de los sustratos</i>	87
7.3.2 <i>Caracterización de los materiales a emplear para el proceso de composteo</i>	89
7.3.3 <i>Preparación de los biorreactores</i>	93
7.4 ETAPA 4. a) COMPARACIÓN ENTRE LOS DOS SISTEMAS PARA LA DEGRADACIÓN DE PAÑALES	93
7.4.1 <i>Proceso de composteo</i>	94
7.4.2 <i>Insumos, operación e infraestructura, eficiencia y materiales residuales</i>	94
7.4.3 <i>Ventajas y desventajas</i>	96
7.5 ETAPA 4. b) PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA A MEDIANA ESCALA	97
7.5.1 <i>Descripción del proceso</i>	97
7.5.2 <i>Obtención, recepción y acopio de residuos</i>	98
7.5.3 <i>Acondicionamiento de los residuos</i>	98
7.5.4 <i>Composteo</i>	99
7.5.5 <i>Acondicionamiento de la composta</i>	100
7.5.6 <i>Pruebas de calidad</i>	100
7.6 DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	100
7.6.1 <i>Capacidad de la planta</i>	100
7.6.2 <i>Distribución de la planta</i>	102
7.7 ORGANIZACIÓN	106
7.8 ETAPA 4. c) MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE LA PLANTA DE COMPOSTEO DE PAÑALES DESECHABLES USADOS	107
7.9 RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS	107
7.10 ACONDICIONAMIENTO DE MATERIA PRIMA	108
7.10.1 <i>Funcionamiento de la trituradora</i>	108
7.10.2 <i>Molienda de los residuos</i>	109
7.11 PREPARACIÓN Y MONTAJE DE BIORREACTORES	110
7.11.1 <i>Perforación de los contenedores cilíndricos</i>	110
7.11.2 <i>Montaje de los biorreactores</i>	111
7.11.3 <i>Aireación y volteo</i>	112
7.12 MONITOREO	112



7.12.1	<i>Ph</i>	112
7.12.2	<i>Temperatura</i>	112
7.12.3	<i>Humedad</i>	113
7.12.4	<i>CO₂</i>	113
7.13	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA COMPOSTA	113
7.13.1	<i>Humedad</i>	115
7.13.2	<i>pH</i>	115
7.13.3	<i>Conductividad eléctrica</i>	115
7.13.4	<i>Materia orgánica</i>	115
7.13.5	<i>Carbono total</i>	115
7.13.6	<i>Nitrógeno total</i>	116
7.13.7	<i>Relación c/n</i>	116
7.13.8	<i>Macronutrientes (PK)</i>	116
7.13.9	<i>Elementos traza</i>	116
7.13.10	<i>Coliformes fecales</i>	117
7.13.11	<i>Salmonella</i>	117
7.13.12	<i>Huevos de helmintos viables</i>	117
7.13.13	<i>Estabilidad</i>	117
7.13.14	<i>Madurez evaluada por fitotoxicidad</i>	117
7.14	ACONDICIONAMIENTO FINAL DEL PRODUCTO	118
7.14.1	<i>Verificación final del producto</i>	118
7.14.2	<i>Tamizado</i>	118
7.15	EMPAQUETADO DEL PRODUCTO FINAL	118
7.15.1	<i>Venta individual</i>	118
7.15.2	<i>Disposición a granel</i>	118
7.16	ETIQUETADO DEL PRODUCTO	119
7.17	VENTA O ENTREGA DE PRODUCTO	119
7.17.1	<i>Venta individual</i>	119
7.17.2	<i>Venta a granel</i>	119
7.18	MANEJO DE RESIDUOS	120
7.19	MANTENIMIENTO	120
7.19.1	<i>Montacargas</i>	120
7.19.2	<i>Trituradora</i>	120
7.20	REVOLVEDORAS	121
7.21	EQUIPOS DE LABORATORIO	121
7.21.1	<i>Medidor de pH</i>	121
7.21.2	<i>Medidor de conductividad</i>	122
7.21.3	<i>Medidor de CO₂</i>	122
7.21.4	<i>Básculas</i>	122
8.	CONCLUSIONES	124
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
ANEXO A		140
ANEXO B		145
ANEXO C		148
ANEXO D		152



Índice de tablas

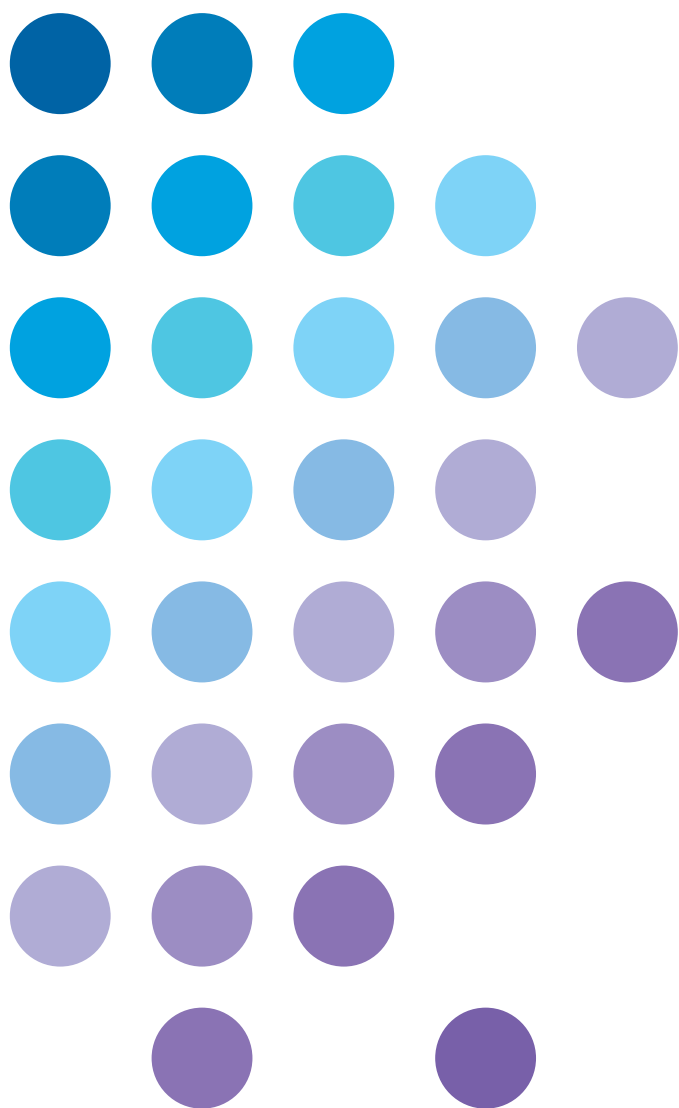


Índice de tablas

Tabla 1-1	Composición porcentual de los residuos sólidos municipales	3
Tabla 1-2	Generación estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de residuos 2000-2012 (porcentaje)	4
Tabla 4-1	Composición típica de un pañal infantil mediano	14
Tabla 4-2	Condiciones ambientales del cultivo de <i>Pleurotus</i> (Guzmán <i>et al.</i>, 2008; Mushworld, 2004; Sánchez y Royse, 2002)	18
Tabla 4-3	Clasificación de sustratos para cultivar los hongos	19
Tabla 4-4	Residuos lignocelulósicos usados para el cultivo de <i>Pleurotus ostreatus</i>	20
Tabla 4-5	Principales factores del proceso de composteo (Colomer y Gallardo, 2007; Espinosa y Delfín, 2005; Tchobanoglous <i>et al.</i>, 1994)	22
Tabla 4-6	Principales tecnologías de composteo en pilas aerobias (Bonmatí, 2008; Colomer y Gallardo, 2009; Tchobanoglous <i>et al.</i>, 1994)	24
Tabla 5-1	Principales empresas identificadas como referencia de tratamiento por composteo (Sotelo-Navarro, 2014)	29
Tabla 6-1	Guarderías participantes en el proyecto	36
Tabla 6-2	Descripción de las unidades experimentales	39
Tabla 6-3	Diseño experimental y codificación consecutiva	39
Tabla 6-4	Diseño del escalamiento para el cultivo seleccionado	44
Tabla 6-5	Codificación de Unidades Experimentales	49
Tabla 6-6	Comparación de parámetros en los experimentos de cultivo	53
Tabla 7-1	Masa total de pañales recolectados por tipo de sala	59
Tabla 7-2	Masa promedio de pañales con orina por tipo de sala	59
Tabla 7-3	Cálculo para el escalamiento	60
Tabla 7-4	Número de cosechas en los diferentes cultivos	67
Tabla 7-5	Promedio del % humedad inicial en los sustratos utilizados	72
Tabla 7-6	Masa de pañales recuperados al final del experimento con el cosustrato paja	81
Tabla 7-7	Masa de pañales recuperados al final del experimento con el cosustrato pasto	82
Tabla 7-8	Resumen de los resultados finales para paja	83
Tabla 7-9	Resumen de los resultados finales para pasto	84
Tabla 7-10	Materia orgánica, nitrógeno, C/N durante el composteo (valores promedio)	89
Tabla 7-11	Coliformes totales y fecales durante el composteo	91
Tabla 7-12	Masa inicial y final de los pañales en los biorreactores	92
Tabla 7-13	Resultados finales promedio de la fase experimental	93
Tabla 7-14	Porcentaje promedio de degradación de pañales en cultivo y por composteo	94
Tabla 7-15	Comparativa de los insumos, operación e infraestructura utilizados en el cultivo y en el composteo	95
Tabla 7-16	Ventajas y desventajas de los sistemas de cultivo y biorreactores	96
Tabla 7-17	Materiales a emplear en el proceso de biodegradación de pañales desechables	99
Tabla 7-18	Parámetros de monitoreo del proceso de composteo (GODF, 2012)	99
Tabla 7-19	Pruebas de calidad en la composta obtenida (GODF, 2012)	100
Tabla 7-20	Cálculo de masa tratada de pañales/día y número de biorreactores	101
Tabla 7-21	Resumen de la masa a tratar y número de biorreactores	102
Tabla 7-22	Maquinaria, equipo y mobiliario requeridos en la planta de tratamiento	105
Tabla 7-23	Resumen de los parámetros y valores que debe cumplir una composta (modificado de la NADF-020-AMBT-2011)	114
Tabla A-1	Resultados de encuestas aplicadas a padres de familia	142
Tabla A-2	Masa de pañales con orina por tipo de sala	143
Tabla B-1	Análisis de varianza para % reducción de masa - suma de cuadrados tipo III	146



Tabla B-2	Método: 95.0 porcentaje LSD (Fisher)	146
Tabla B-3	Análisis de varianza para eficiencia biológica - suma de cuadrados tipo III	147
Tabla C-1	Análisis de varianza para % reducción de masa - suma de cuadrados tipo III	149
Tabla C-2	Análisis de varianza para % disminución de volumen - suma de cuadrados tipo III	149
Tabla C-3	Pruebas de múltiple rangos para % disminución de volumen por sustrato método: 95.0 porcentaje LSD	150
Tabla C-4	Análisis de varianza para % eficiencia biológica - suma de cuadrados tipo III	150
Tabla C-5	Pruebas de múltiple rangos para % eficiencia biológica por sustrato método: 95.0 porcentaje LSD	151



Índice de figuras

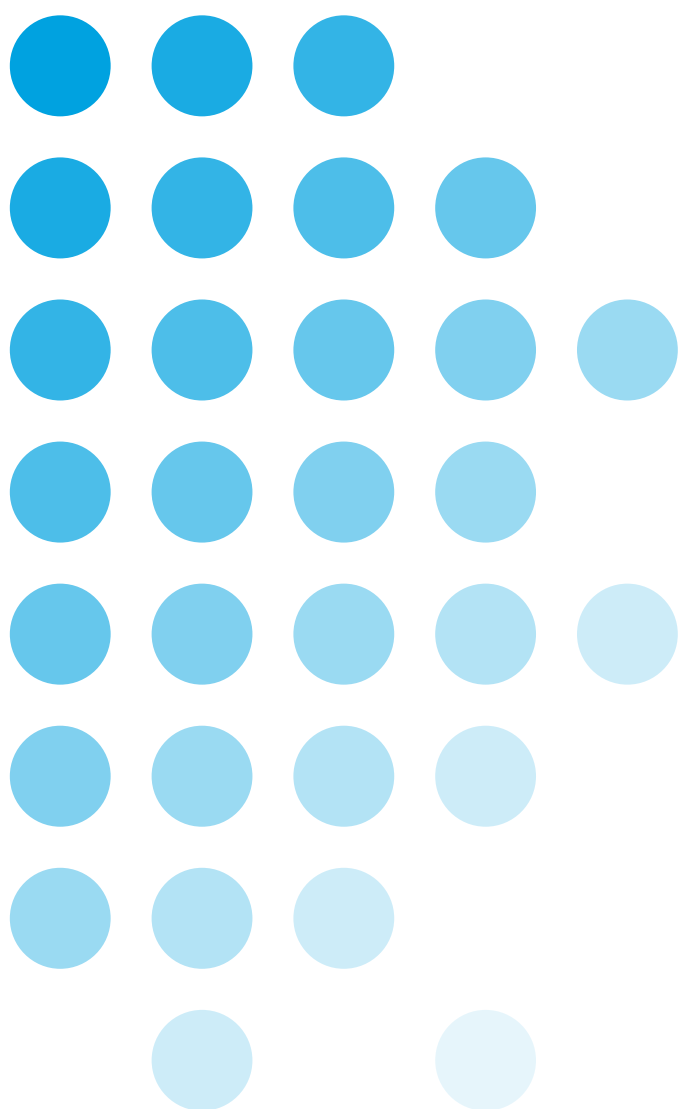


Índice de figuras

Figura 1-1	Composición porcentual de los residuos sólidos urbanos en estaciones de transferencia del Distrito Federal	4
Figura 4-1	Componentes del pañal desechable	14
Figura 5-1	Métodos tradicionales de tratamiento de los pañales desechables usados y sus efectos negativos (Modificado de Yeh <i>et al.</i>, 2006)	27
Figura 6-1	Diseño general de la investigación	34
Figura 6-2	Diseño de la metodología	35
Figura 6-3	Masa del sustrato	41
Figura 6-4	Distribución del sustrato y el micelio	41
Figura 6-5	Siembra en tubos de PVC	41
Figura 6-6	Siembra en charolas de plástico	42
Figura 6-7	Distribución de las unidades experimentales	42
Figura 6-8	Astilladora Vermeer	45
Figura 6-9	Pañales en la entrada de la astilladora	45
Figura 6-10	Separación manual del plástico de los pañales	45
Figura 6-11	Paja en remojo	46
Figura 6-12	Secado de pasto	46
Figura 6-13	Tamizado del pasto	46
Figura 6-14	Pesaje del cosustrato paja	47
Figura 6-15	Pesaje del cosustrato pasto	47
Figura 6-16	Mezclado manual del cosustrato con el pañal	47
Figura 6-17	Recipiente con el que se midió volumen	47
Figura 6-18	Bolsas con cosustrato y pañal para esterilizar	47
Figura 6-19	Pesaje de micelio	48
Figura 6-20	Forma cilíndrica de bolsas	48
Figura 6-21	Distribución de las unidades experimentales	50
Figura 6-22	Perforación de bolsas	50
Figura 6-23	Sustrato colonizado por el micelio	50
Figura 6-24	Unidades experimentales en la fase luminosa: a) paja, b) pasto	51
Figura 6-25	Unidad experimental en red	51
Figura 6-26	Hongos listos para cosechar	51
Figura 6-27	Masa del hongo cosechado	52
Figura 6-28	Metodología experimental para el composteo (Adaptado de Sotelo, 2014)	53
Figura 7-1	Número de pañales usados / niño / día	57
Figura 7-2	Número de pañales /niño/día y proporción de ellos con orina o con materia fecal	58
Figura 7-3	Pañal triturado en el molino de martillos	61
Figura 7-4	Pañal triturado en el molino de aspas	61
Figura 7-5	Aspecto de la celulosa (izquierda) y del chasis (derecha), del pañal triturado en la astilladora	62
Figura 7-6	Molienda de pañal de merma	62
Figura 7-7	Aspecto de material antes (izquierda) y después (derecha) de la molienda	63
Figura 7-8	Volumen del material antes (izquierda) y después (derecha) de la molienda	63
Figura 7-9	Diagrama de flujo del proceso de acondicionamiento del sustrato	65
Figura 7-10	Unidades experimentales invadidas por el micelio	66
Figura 7-11	Aparición de primeros cuerpos fructíferos	67
Figura 7-12	Cuerpos fructíferos listos para la cosecha	67
Figura 7-13	Temperatura en la fase luminosa	68
Figura 7-14	Humedad ambiental en la fase luminosa	68
Figura 7-15	Reducción de masa en base seca	69
Figura 7-16	Eficiencia biológica por forma de cultivo	70



Figura 7-17	Cosustratos: a) paja, b) pasto	71
Figura 7-18	a) pañal recolectado de guarderías, b) pañal sin plástico	72
Figura 7-19	Pañal triturado	72
Figura 7-20	Esterilización correcta, cinta indicadora con líneas negras	73
Figura 7-21	Siembra del sustrato paja	73
Figura 7-22	Contaminación en las unidades experimentales, cosustrato paja	74
Figura 7-23	Aislamiento de la contaminación por <i>Pleurotus</i>	74
Figura 7-24	Temperatura durante la fase oscura	75
Figura 7-25	Humedad ambiental durante la fase oscura	75
Figura 7-26	Temperatura durante la fase luminosa	76
Figura 7-27	Humedad ambiental durante la fase luminosa	76
Figura 7-28	Unidades experimentales en fase luminosa	77
Figura 7-29	Setas del testigo de paja	77
Figura 7-30	Crecimiento de primordios en cosustrato pasto	78
Figura 7-31	Reducción de masa en el sustrato paja-pañal	79
Figura 7-32	Reducción de masa en el sustrato pasto-pañal	79
Figura 7-33	Reducción de volumen en el sustrato paja-pañal	80
Figura 7-34	% Reducción de volumen en el sustrato pasto-pañal	80
Figura 7-35	Eficiencia biológica en el sustrato paja-pañal	81
Figura 7-36	Eficiencia biológica en el sustrato pasto-pañal	81
Figura 7-37	Proceso de biodegradación de pañales desechables	98
Figura 7-38	Distribución de la planta de tratamiento de pañales desechables	102
Figura 7-39	Lay-out de la planta de tratamiento	104
Figura 7-40	Pañales desechables usados	108
Figura 7-41	Pasto fresco, hoja seca, hoja fresca y mulch	108
Figura 7-42	Trituradora con adaptador para molienda de pañales	110
Figura 7-43	Entrada de los pañales al proceso de molienda y pañales triturados	110
Figura 7-44	Perforación de contenedores cilíndricos y tapa	111
Figura 7-45	Medición de CO ₂	113
Figura A-1	Encuesta aplicada a padres de familia	141



Introducción



1. INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual los pañales desechables se pueden considerar como parte de la canasta básica ya que son adquiridos y utilizados en todos los estratos sociales, de hecho, en casos de desastres se mencionan como artículos cuya donación es indispensable. Según datos de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), un bebé requiere en promedio seis pañales al día, lo que implica un consumo de 2190 pañales anuales por niño (PROFECO, 2011). Pendry et al. (2012) afirman que su alta comercialización los ha convertido en un ícono de la modernización y que de hecho son una necesidad, más que un lujo en la vida de ritmo rápido.

Producción y consumo de pañales desechables en México.

El consumo anual de pañales desechables para bebés y niños, en México parece ser estable ya que tanto en 2003 como en 2007, fue de alrededor de 5 mil millones de unidades, esta cifra coloca a México en el décimo lugar dentro de los países de mayor consumo de pañales (PROFECO, 2003, 2011). Sin embargo, la investigación sobre la venta de pañales en el mundo que realizó la Consultoría Internacional de la industria de pañales Carlos Richer en 2014 mostró que México es el segundo país de mayores ventas, con más de 5 mil 93 millones de pañales desechables vendidos, sólo por debajo de los Estados Unidos (Richer, 2014).

Por su parte el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) menciona el aumento de la producción de pañales, en 2007 se manufacturaron alrededor de 5,844,200 millones de pañales y en 2012 la cifra aumentó a 7,235,700 millones de pañales en México (INEGI, 2013), a partir de los datos mencionados queda claro que México es alto consumidor de pañales.

Los pañales en los residuos sólidos urbanos.

Los componentes principales del pañal desechable, que representan entre 50 y 60 % del total, son algodón y textiles naturales (celulosa); el resto lo constituyen películas plásticas (polietileno y polipropileno) y un material superabsorbente. Además de ello los pañales actuales presentan atributos novedosos: elásticos ergonómicos, capas protectoras con sustancias suavizantes, acondicionadores para la piel del bebé y aditivos detectores de orina (PROFECO, 2011).

Una vez que han sido usados, los pañales desechables se convierten en residuos, y son parte importante de la problemática ambiental relacionada con los residuos sólidos urbanos debido al volumen generado y a su composición mixta orgánica-inorgánica, por la cual son clasificados generalmente como residuos no degradables.

Históricamente los pañales desechables han estado presentes en los residuos; de 1974 a 1997 representaron, en las diferentes zonas del país, entre el 2.74 y el 8.31% del total en peso de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), lo que daba un promedio de 6% a nivel nacional. Para este periodo la información oficial disponible reportaba los datos correspondientes a los pañales desechables separados de otros residuos (SEDUE, 1998) como se muestra en la [Tabla 1-1](#).



Del 2000 a 2012 los pañales se han contabilizado junto con el resto de los sanitarios, los residuos finos y otros, por lo que se cuenta únicamente con un valor aproximado, como se muestra en la **Tabla 1-2**, (INEGI, 2011, 2014). Dentro de esta categoría los pañales representan el principal componente (en masa) en ese conjunto de residuos, debido a su alto contenido de humedad, ya que el gel superabsorbente que contienen puede absorber hasta 500 veces su masa en agua (Po, 1994).

En el 2012 se generaron mil 42,102.75 toneladas de residuos sólidos a nivel nacional y el 12% de éstos, 5, 098.70 mil toneladas, correspondió a la categoría en la que se encuentran los pañales es decir, se generaron más de 5 mil toneladas de residuos clasificados como “otro tipo de basura” (INEGI, 2011; SEMARNAT-SINGIR, 2014). Los datos mencionados indican que el porcentaje de pañales dentro de los residuos ha aumentado de manera considerable, del 6% en 1997 al 12% para el 2012, a pesar de que la masa promedio de los pañales nuevos ha disminuido.

Por otro lado el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, elaborado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de la SEMARNAT indica que el porcentaje de pañales desechables, considerados como un solo subproducto, correspondió al 6.52% de la composición total (SEMARNAT- INECC, 2012), valor que coincide con el obtenido en años atrás.

Tabla 1-1 Composición porcentual de los residuos sólidos municipales.

Subproductos	Zona geográfica									
	Fronteriza		Norte		Sur		Centro		D.F.	
	74/80	91/97	74/80	91/97	74/80	91/97	74/80	91/97	74/80	91/97
Cartón	2.96	3.97	4.20	4.37	4.08	1.83	4.43	4.84	3.28	5.36
Residuos finos	4.59	1.37	9.52	2.23	6.16	3.51	6.25	8.08	0.94	1.21
Hueso	0.51	0.50	0.58	0.64	0.93	0.27	0.60	0.25	0.82	0.08
Hule	0.70	0.28	0.77	0.20	0.89	0.09	0.30	0.35	0.21	0.20
Lata	3.07	2.93	2.42	1.40	2.06	1.70	2.75	2.97	1.59	1.58
Metal ferroso	0.50	1.18	0.45	1.48	0.85	0.29	1.35	0.40	0.51	1.39
Metal no ferroso	0.22	0.23	0.56	0.65	0.44	0.94	0.99	1.70	0.21	0.06
Papel	13.83	12.13	9.98	10.60	8.63	13.68	6.77	8.85	12.43	14.58
Pañal desechable	4.87	6.55	2.54	8.31	2.74	6.00	3.94	5.72	3.00	3.37
Plástico película	2.63	4.79	3.72	5.12	3.26	1.66	3.89	1.72	5.04	6.24
Plástico rígido	2.75	2.90	2.34	3.15	1.93	1.95	2.34	1.23	4.76	4.33
Residuos de jardín	15.05	16.10	7.34	19.76	6.92	7.11	7.73	26.98	3.97	5.12
Residuos alimenticios	25.22	26.97	37.73	21.27	37.46	38.54	40.26	16.34	44.14	34.66
Trapo	2.48	1.97	1.91	2.40	1.97	0.81	1.23	2.16	2.37	0.64
Vidrio de color	3.91	2.06	3.30	0.93	2.81	4.25	3.88	0.60	2.50	4.00
Vidrio transparente	4.14	4.59	4.19	5.25	4.07	5.05	4.20	3.72	4.32	6.67
Otros	13.37	11.50	8.45	2.27	14.08	12.33	9.05	14.10	9.91	10.41
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: SEDUE, 1998.



Tabla 1-2 Generación estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de residuos 2000-2012 (porcentaje).

Tipo de residuo	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Papel, cartón, productos de papel	14.07	14.07	14.07	14.90	14.91	14.90	14.91	14.89	13.83	13.83	13.83	13.83	13.83
Textiles	1.49	1.49	1.49	1.51	1.50	1.50	1.50	1.50	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Plásticos	4.38	4.38	4.38	6.12	6.11	6.11	6.11	6.03	10.89	10.89	10.89	10.89	10.89
Vidrio	5.90	5.90	5.90	6.55	6.39	6.39	6.39	6.35	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88
Metales ^a	2.90	2.90	2.90	3.18	3.35	3.35	3.35	3.52	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
Basura de comida, jardines y materiales orgánicos similares ^b	52.40	52.40	52.40	50.41	50.40	50.75	50.75	50.39	52.42	52.42	52.42	52.42	52.42
Otro tipo de basura ^c	18.86	18.86	18.86	17.33	17.33	17.01	17.00	17.32	12.11	12.11	12.11	12.11	12.11

Nota: Los datos se refieren a basura producida en las ciudades, la cual incluye desechos generados en casa habitación, comercios, algunos totales pueden no coincidir debido al redondeo de las cifras.

^a Incluye aluminio, metales ferrosos y no ferrosos (cobre, plomo, estaño y níquel)

^b En su proceso de descomposición natural, estos residuos generan distintos gases conocidos como biogás

^c Incluye residuos finos, material de demoliciones, hule y pañal desechable entre otros

Fuente: modificado de INEGI, 2014.

La Secretaría del medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA) reporta una generación de residuos sólidos urbanos de 12,740 t/día, para el 2012, no se reportan estudios de composición (SEDEMA, 2014). En el estudio realizado por Orta y colaboradores en 2012, en el que analizó la composición de los residuos en estaciones de transferencia del D.F., (**Figura 1-1**) se calculó un promedio de 9.55% incluyendo pañales y otros residuos sanitarios.

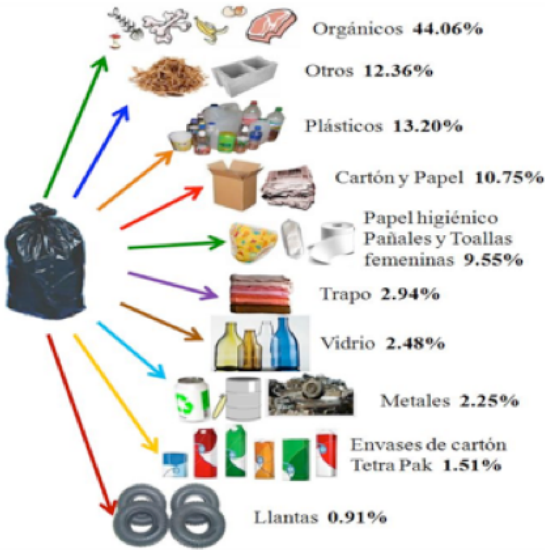


Figura 1-1 Composición porcentual de los residuos sólidos urbanos en estaciones de transferencia del Distrito Federal.

Fuente: (Orta *et al.*, 2012)



En esta misma línea de estudios, Durán y colaboradores (2013), realizaron un estudio de la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en 15 estaciones de transferencia del DF y reportaron el 10.77 % para los residuos sanitarios, en los que están incluidos los pañales desechables, valor un poco mayor al obtenido en el 2009.

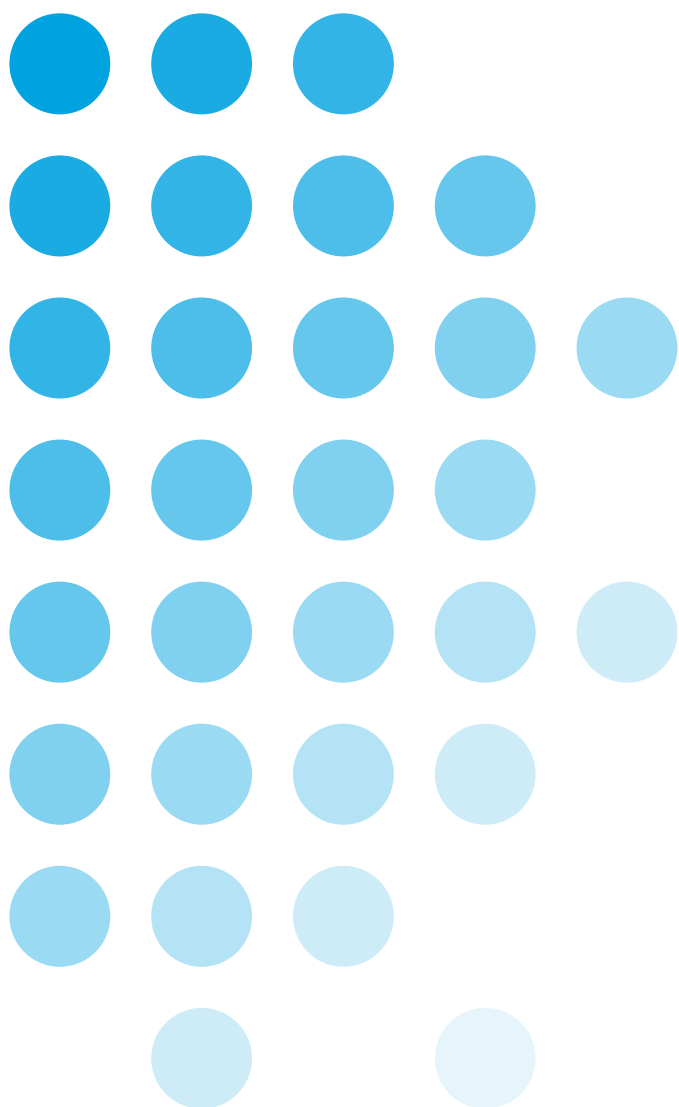
Como puede observarse tanto a nivel nacional como en la Ciudad de México, las cifras oficiales, respecto al porcentaje que constituyen los pañales desechables dentro de la composición total de residuos sólidos urbanos (RSU), presenta variaciones importantes, los criterios a la hora de clasificarse dependen del interés y de los recursos técnicos y humanos con los que se disponga, lo que es muy claro es que los pañales desechables son un componente importante de los residuos y que representan un problema a considerarse dado que actualmente se depositan sin tratamiento en los sitios de disposición final.

Alternativas para el tratamiento de pañales desechables estudiadas en la UAM-Azcapotzalco.

En México desde 1992 en la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana existe una línea de investigación que tiene como objetivo proponer alternativas de tratamiento para los residuos de pañal desechable. Se ha desarrollado una metodología de tratamiento biotecnológico que es una adaptación de las técnicas comerciales de cultivo de *Pleurotus ostreatus* en sustratos convencionales. Se han experimentado diferentes formas de acondicionamiento del pañal, entre ellas, reducirlo a fragmentos, eliminar o mantener la cubierta plástica, someterlo a pasteurización o esterilizarlo en autoclave, utilizar pañales con gel o sin este material superabsorbente.

La degradación del pañal, medida como la reducción de masa, llegan a valores superiores al 80% en un tiempo promedio de tres meses, lo que muestra la factibilidad de tratar estos residuos utilizándolos como sustrato para el cultivo de *Pleurotus* (Espinosa *et al.*, 2011).

También se han realizado trabajos para evaluar la degradación del pañal mediante composteo en mezcla con residuos de jardinería, se han probado diferentes escalas y métodos, como pilas y reactores. Los valores obtenidos demuestran que este método es adecuado para degradar estos residuos y que la composta obtenida es de buena calidad y está libre de patógenos (Espinosa *et al.*, 2003; Espinosa *et al.*, 2000).



Justificación



2. JUSTIFICACIÓN

En México el pañal usado se colecta con la fracción inorgánica y es depositado sin tratamiento en los sitios de disposición final. Debido a su composición mixta y a que generalmente se tiran envueltos en la capa de plástico, su degradación es muy lenta, a pesar de su alta proporción de materiales celulósicos que se consideran potencialmente biodegradables, por lo que los pañales se acumulan en los rellenos sanitarios, ocupando un volumen importante y consecuentemente acorta el tiempo de vida de éstos contribuyendo a la problemática nacional del manejo de residuos sólidos.

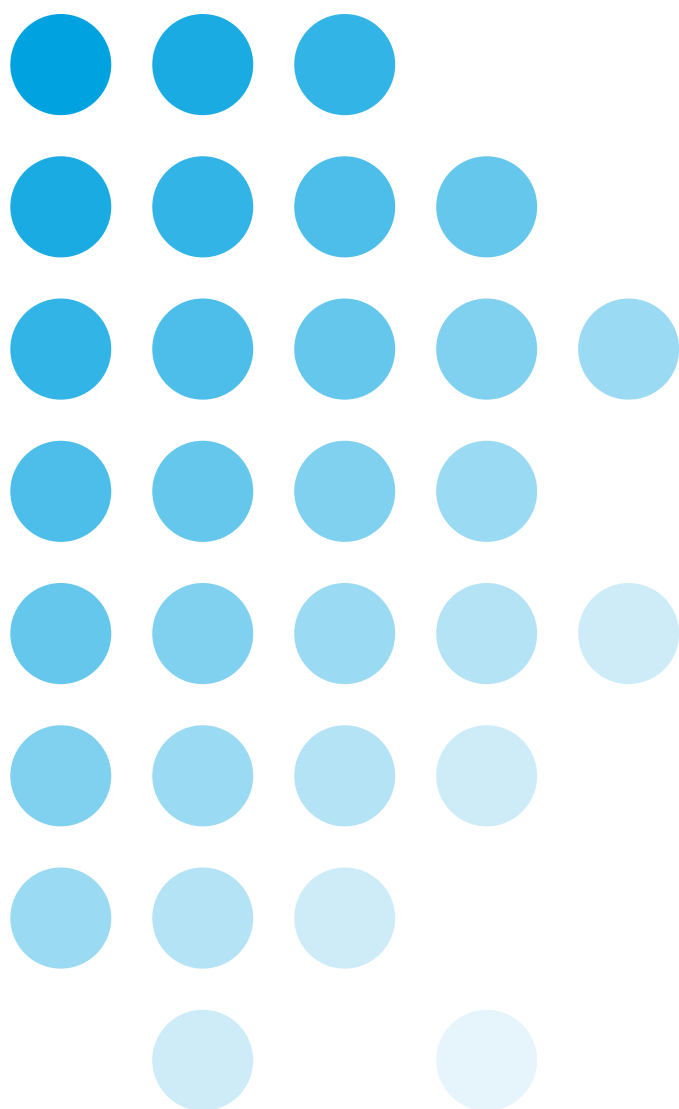
Dada la composición de los pañales se buscó un organismo capaz de degradar la celulosa, y se encontró que el hongo *Pleurotus ostreatus* puede metabolizar residuos vegetales, por lo que desempeña un papel importante en el aprovechamiento de la materia orgánica. En la naturaleza no abundan organismos con actividad celulolítica y menos aún, con capacidad ligninolítica, ambas presentes en *Pleurotus*, por lo que desde hace más de 30 años, el hongo se cultiva sobre una gran diversidad de residuos agroindustriales (Zadrazil et al., 2004).

Los resultados obtenidos en estudios previos al degradar los pañales mediante su uso como sustrato para el cultivo de *Pleurotus* son muy alentadores, sin embargo hasta ahora los ensayos realizados han sido a nivel laboratorio, por lo que es necesario definir las variables que permitan el escalamiento del proceso, y demostrar la viabilidad de su aplicación en condiciones de operación que permitan integrarlo a los sistemas de gestión de residuos.

Este escalamiento permitiría ofrecer una tecnología para tratar los pañales a través de su biodegradación por *Pleurotus* y con ello reducir la masa y volumen de éstos, en lugar de enviarlos a un sitio de disposición final. La factibilidad del proceso ha sido probada y se cuenta con la patente correspondiente, por lo que el siguiente paso para su escalamiento es definir las variables óptimas de operación para evaluar la viabilidad del aprovechamiento de esta tecnología a nivel local. Esto redundaría en un doble beneficio, por un lado un ahorro de espacio en estos sitios con la consecuente prolongación de su vida útil y por otro lado, la producción de un recurso alimentario para consumo humano o como forraje.

Como parte de las bondades que ofrece esta tecnología, se encuentra también la posibilidad de dar tratamiento a materiales nuevos que son rechazados por el control de calidad del sistema de producción, como pueden ser toallas sanitarias y material absorbente de limpieza, entre otros. El proceso ha despertado interés en diferentes sectores por su simplicidad de aplicación, por lo que se perfila también como una alternativa para micro y pequeñas empresas, que podría ser aplicada tanto por la iniciativa privada como por el gobierno, formando parte del programa integral de manejo de residuos sólidos.

El cierre del relleno sanitario de la Ciudad de México generó la necesidad de encontrar un conjunto de soluciones que, integradas, permitan minimizar el volumen de residuos que se envían a disposición final, a través de diferentes procesos de valorización y tratamiento. La aplicación de esta tecnología contribuiría de forma efectiva a la gestión integral de residuos, a través de un proceso vanguardista, simple y eficiente.



Objetivos



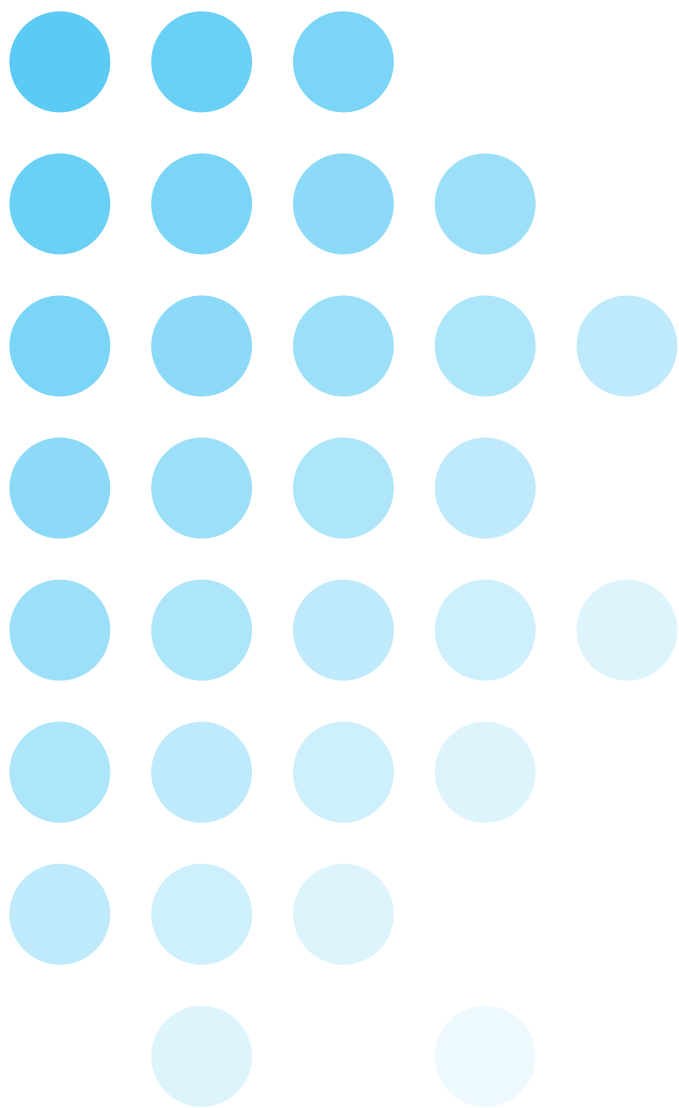
3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Demostrar la viabilidad de la degradación de pañales desechables mediante el hongo *Pleurotus ostreatus* a nivel planta piloto, a fin de obtener los parámetros adecuados para su transferencia al sistema productivo y de gestión de residuos.

3.2 Objetivos específicos

- Escalar el proceso que se ha desarrollado, el cual cuenta con protección industrial, para el tratamiento de los pañales producidos por un niño en un mes.
- Evaluar los procesos de acondicionamiento de los pañales.
- Evaluar el proceso de biodegradación en diferentes configuraciones.
- Comparar las eficiencias de degradación obtenidas con diferentes cosustratos.
- Evaluar la eficiencia de degradación con dos cepas de hongos.
- Seleccionar la mejor combinación de acondicionamiento, cosustrato y cepa.
- Evaluar el proceso de degradación mediante composteo
- Comparar los resultados de las dos formas de degradación
- Elaborar la propuesta metodológica para la instalación de una planta a mediana escala con el proceso que resulte más eficiente.



Marco Teórico



4. MARCO TEÓRICO

Para abordar el marco teórico de este trabajo, se han integrado los aspectos más importantes de la historia, composición e impacto ambiental de los pañales desechables, así como los dos tipos de tratamiento y aprovechamiento de los pañales propuestos en este estudio, que son el cultivo de *Pleurotus* y el composteo.

4.1 Pañales desechables

Los pañales desechables son un producto de consumo de aparición relativamente reciente en el mercado mundial, que fue introducido en la sociedad mexicana a finales de la década de los setenta, ha dejado de ser un artículo suntuario privativo de algunos estratos socioeconómicos para convertirse en artículo de primera necesidad y uso cotidiano, tanto en núcleos urbanos como suburbanos. Los pañales desechables son considerados como “basura” debido a que no se les somete a ningún tratamiento (Delfín, 2002).

4.1.1 Historia de los pañales desechables

La primera referencia de un pañal desechable hecho de celulosa con una almohadilla absorbente se atribuye a Pauistrom en 1942, en Suecia (Richer, 2014; Wallis, 2012; Women-inventors, 2008) En 1946 Marion Donova, una ama de casa de Estados Unidos, registró y patentó el primer pañal hecho de cortina de baño de plástico en la que se insertaba un pañal de tela convencional, incluyendo broches de metal o plástico para asegurarlo, a estos primeros pañales les llamó “boater” (Wallis, 2012). En 1947 George M. Schroder inventó el primer pañal con telas no tejidas, en el cual el núcleo absorbente estaba hecho de varias capas de papel de seda, el exterior era de una película plástica y podía absorber máximo 100 mL (Richer, 2014).

Durante la década de los 50 hubo pocos cambios en los pañales, las grandes compañías iniciaron sus trabajos de investigación sobre este producto. En 1961 la empresa Procter and Gamble lanzó el primer “pampers”, que es el nombre que se dio a un pañal rectangular hecho de rayón, tejido y plástico unidos con sujetadores de seguridad (Wallis, 2012). A partir de entonces iniciaron las grandes transformaciones del pañal para bebé. En los 70 se introdujeron cambios como las cintas de sujeción, cambió de forma rectangular a la forma de “reloj de arena” y se introdujeron los primeros elastómeros para un mejor ajuste. En 1978 llegaron a México los primeros pañales desechables (Richer, 2014; Wallis, 2012).

En 1982 se introdujo por primera vez el superabsorbente (SAP) y con esto nació una nueva generación de pañales de alto rendimiento, más delgados y con mayor capacidad de absorción. En los 90 se inició la fabricación de pañales diferenciados para niño y niña, por etapas, se introdujeron las cintas mecánicas de velcro y aparecieron los primeros pañales para adultos con incontinencia. Se mejoró el SAP, se agregaron acondicionadores de piel como Aloe Vera, indicadores de humedad, cintas frontales, decorados, en el 2003 se lanzaron los calzones entrenadores hechos de acetato de celulosa.



Del 2004 a la fecha los cambios más importantes realizados en los pañales han sido que el núcleo absorbente está hecho con una mayor cantidad de SAP, que los pañales se están haciendo con un ancho de chasis reducido, con elásticos laterales con el fin de reducir los costos y mejorar el ajuste al mismo tiempo (Richer, 2014; Wallis, 2012).

4.1.2 Composición de los pañales desechables

Actualmente los pañales desechables se elaboran con celulosa virgen como principal materia prima, polímeros absorbentes, telas de fibra de polipropileno, películas de polietileno de alta densidad y elásticos, además de aditivos como adhesivos, indicadores de humedad, cintas adheribles y materiales de empaque. Los principales materiales con los que se fabrican los pañales y sus características se describen a continuación (Richer, 2014):

Celulosa virgen

Proviene de los árboles de pino y se obtiene por un proceso de blanqueado de madera suave debido a que las fibras de este material son mucho más largas. Provee las propiedades más importantes en el pañal, como son: mayor capacidad y rapidez de absorción, resistencia mecánica, hidrofilia y estabilidad química.

Poliacrilato de sodio

También conocido como superabsorbente o SAP. Este polímero tiene la propiedad de actuar como neutralizador ante el pH de la orina debido a que es ácido, además de ayudar a mejorar la capacidad de retención de líquidos, permitiendo que el producto sea más delgado, con un mejor rendimiento y menos uso de celulosa.

Papel tissue

Este material se fabrica a partir de papel reciclado. Funciona como una capa envolvente del cuerpo absorbente y ayuda a que los líquidos no regresen a la superficie, formando una barrera entre el cuerpo absorbente y la cubierta del pañal. También es empleado como difusor de la humedad a lo largo y ancho del pañal, evitando que los líquidos se concentren en el centro.

Fibra de polipropileno

Este material se utiliza como cubierta, así que es la parte que entra en contacto directo con el cuerpo del consumidor. Tiene una textura suave, buena resistencia a la tensión y elongación, posee la cualidad de ser hidrofílica y una rápida absorción. También se emplea para construir las barreras antiescurrimiento del pañal.

Película de polipropileno

Se emplea como zona de adherencia de las cintas de ajuste. Conformar la parte frontal y normalmente es estampada para hacer más atractivo al pañal. Presenta una masa base cercana a los 20 g/m².



Película de polietileno

Se utiliza como la hoja posterior que impide que los líquidos se fugen del pañal, puede dar un aspecto similar a la tela, mediante la adición de una lámina de propileno.

Cloth-like

Se utiliza como cubierta inferior de los productos. Este laminado está formado por una película de polietileno (HDPE) de masa base cercana a 15 g/m² y fibra de polipropileno de masa base cercana a 12 g/m². La laminación del cloth-like es realizada con adhesivos y mediante sello térmico. Es en este material donde se colocan los adhesivos, es ideal debido a su elasticidad, buena permeabilidad y resistencia al desgarramiento.

Elásticos

Generalmente están hechos espuma de poliuretano o poliéster, caucho sintético o Lycra®, se utilizan para brindar una forma anatómica al pañal y para la construcción de las barreras anti-escurrimiento. También se utilizan para formar un resorte en la parte trasera del pañal y brindar mejor ajuste.

Cintas Adheribles

Se fabrican con polipropileno y adhesivos. Las más utilizadas son las adheribles, aunque también se emplean cintas tipo Velcro® para proporcionar un agarre mecánico o de tipo hook and loop (de gancho), según la calidad del pañal. Se utilizan para facilitar el reposicionamiento múltiple sin que se rompa, según la posición en la que se coloque puede ser una cinta frontal o cinta lateral.

Adhesivos

Se emplean polímeros termoplásticos que son sólidos a temperatura ambiente, conformados por diluyentes, polímeros, resinas, antioxidantes y algunos aditivos. Su aplicación se lleva a cabo a la temperatura de fundición y al enfriarse forman un recubrimiento suave al tacto.

Lociones

Con el fin de crear novedades para la diferenciación del producto, se añaden varias lociones tópicas para la hoja superior no tejida, entre otros: Aloe vera, vitamina E, vaselina, aceite de almendra, vitamina D, extracto de avena y jojoba.

Decorado e indicadores de humedad

Para una mayor diferenciación de productos, algunos pañales utilizan películas debajo de la lámina posterior de tipo tela decoradas. Algunos utilizan hasta nueve tintas con todo tipo de personajes. Algunas marcas también pueden incluir un indicador de humedad.

La composición exacta de un pañal infantil puede variar debido a la disponibilidad de marcas y modelos en el mercado, la **Figura 4-1**, muestra como está conformado un pañal de manera general.

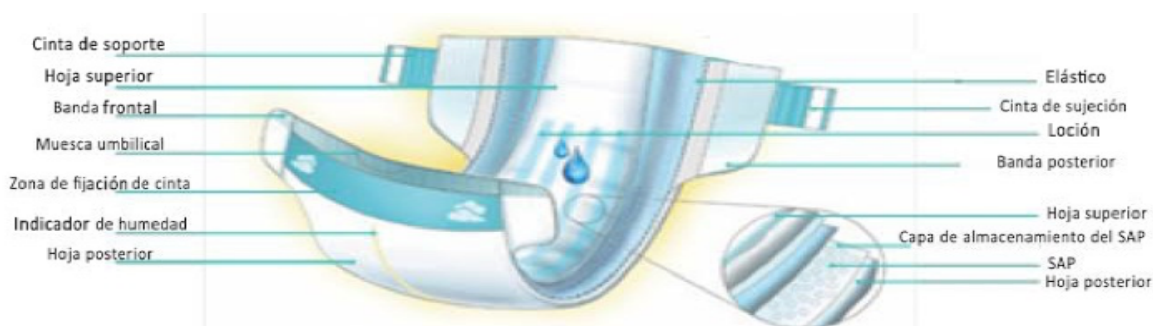


Figura 4-1 Componentes del pañal desechable.

Fuente: Helmes *et al.*, 2014

En general, la cantidad de celulosa y de poliacrilato de sodio están en función de la talla y la calidad del pañal, caso contrario al resto de los materiales, pues se emplea siempre la misma superficie o longitud para la fabricación de pañales de la misma talla. En la **Tabla 4-1** se enlista la cantidad típica requerida de cada uno de los componentes de un pañal infantil de talla mediana (García, 2012).

Tabla 4-1 Composición típica de un pañal infantil mediano.

Material	Cantidad aproximada (g)
Celulosa virgen	20.0
Fibra de polipropileno (doble barrera)	1.1
Fibra de polipropileno (cubierta)	3.0
Papel tissue	1.0 - 3.0
Cloth-like	4.0
Película de polipropileno	1.0
Poliacrilato de sodio	5.0 - 10.0
Cintas adheribles	1.5
Elásticos	0.1
Adhesivos	0.5
Masa total	37.0 - 44.0

4.1.3 Efectos ambientales de los pañales desechables

Los pañales desechables tienen diferentes impactos en el ambiente, los cuales se pueden evaluar en distintas etapas; durante su producción, en el período de comercialización y una vez que se convierten en residuos, en donde pueden tener los siguientes destinos: o bien entran a un sistema de tratamiento o se envían a sitios de disposición final o se van a espacios públicos donde afectan la estética del paisaje (Ayalon *et al.*, 2009; Meallem *et al.*, 2010).

Puig y Calaf (2009) mencionan los estudios realizados por la Environment Agency del Reino Unido en 2005, en los que se indica que los impactos ambientales más importantes generados por los pañales son los derivados de su proceso de fabricación y los causados por su disposición, ya sea en vertedero o por incineración. Los impactos causados por su comercialización,



transporte y uso se consideran poco importantes. A continuación se describen brevemente estos impactos.

a) Durante su producción:

- El componente mayoritario de los pañales es la celulosa que proviene de la pulpa de las coníferas. Los impactos ambientales asociados son la deforestación (si la celulosa proviene de bosques naturales) y el empobrecimiento del suelo (si proviene de plantaciones, debido a las especies de crecimiento rápido que se utilizan). Las plantas de obtención de celulosa son también muy contaminantes y consumen grandes cantidades de agua (EDANA, 2008).
- El SAP, componente mayoritario de los pañales, está formado por cristales de poliacrilato sódico, cuyo proceso de fabricación es el más contaminante de todos los procesos de fabricación de los materiales que componen los pañales. Su producción requiere grandes cantidades de agua, petróleo y gas natural; por otro lado, es la principal responsable de las emisiones de CO_2 , CH_4 , SO_2 y NO_2 en la producción de pañales desechables.
- Los otros componentes de los pañales desechables (polipropileno, poliestireno, gomas, adhesivos, plástico del empaquetado) son derivados del petróleo. Los principales impactos asociados a su utilización son las emisiones de CO_2 , CH_4 , SO_2 y NO_2 , así como el consumo de un recurso no renovable como el petróleo.
- Globalmente, en la fabricación de una tonelada de pañales para niños se consumen 1.167,82 kg de materiales manufacturados, 440 litros de agua y 723,9 kWh, generando aproximadamente 100 kg de residuos (Puig y Calaf, 2009).

b) Durante el período de comercialización y de uso:

- Los impactos sobre el medio debido al transporte, comercialización y uso de los pañales se reducen a los gastos energéticos y a las emisiones de gases causadas por los desplazamientos y al mantenimiento de las infraestructuras.

c) En su disposición y tratamiento:

- Los principales impactos ambientales están relacionados con el incremento en el calentamiento global, el daño a la capa de ozono, el uso de la tierra, las emisiones de metano y posibles lixiviados a las aguas subterráneas debido a la presencia de residuos orgánicos (Aumonier y Collins, 2005).
- La etapa de disposición genera sólo una pequeña contribución en los impactos ambientales de los pañales desechables, que se ha estimado entre 1 al 12% (Weisbrod y Van Hoof, 2012)
- Pueden lixiviar los productos químicos, contaminantes y agentes patógenos (Chipunza, 2012; Meseldzij *et al.*, 2013).



d) Cuando se convierten en residuos sin disposición o tratamiento:

- Si no existe un sistema de recolección se encuentran dispersos en todo el paisaje contaminando su entorno durante periodos muy largos (Pynthamil y Amarnath, 2011).
- Animales como perros y gatos, entre otros, pueden desenvolver o romper los pañales exponiendo la materia fecal que atrae a vectores biológicos, los cuales pueden transmitir diferentes enfermedades (Chipunza, 2012).
- Pueden ser enterrados por los usuarios, lo cual tiene efectos sobre el abastecimiento de agua como medio de filtración, los residuos eventualmente pueden mezclarse con el agua subterránea y la probabilidad de contaminar la fuente de agua potable por patógenos tales como bacterias y virus es muy alta (Stenstrom *et al.*, 2011).
- Pueden obstruir el drenaje, ya sea porque se encuentren cerca de sistemas de alcantarillas o bien porque en ausencia de un sistema de recolección hace que estos residuos se eliminen a través de los sanitarios (Chinyama y Toma, 2013).

Los impactos ambientales de los pañales varían dependiendo del lugar en el que se generen. En los países desarrollados, donde la eliminación de los residuos está más controlada, cuentan con sistema de gestión de residuos y una infraestructura que permita que ésta se lleve a cabo de manera adecuada, tendrá menores impactos. Por el contrario, los países en desarrollo siguen utilizando los métodos tradicionales de mezcla de residuos y su disposición en rellenos sanitarios.

4.2 Tratamiento biológico de residuos lignocelulósicos

La disposición de materiales orgánicos de desecho en el mundo cada día resulta más complicada ya que compuestos orgánicos de celulosa, hemicelulosa y lignina provenientes de residuos de aserríos, cosechas de diversos cultivos, de industrias (como la papelera, producción de licores, industria textil) y diferentes tipos de agroindustrias, entre otros, normalmente son descartados, debido al difícil manejo por el volumen que ocupan, alterando los ecosistemas variando temperaturas, suelos, aire y características generales del entorno (Benavides y Herrera, 2009).

El componente mayoritario del pañal desechable es la celulosa, material de lenta degradación en ambientes naturales, efecto que se ve aumentado por la forma común de disponer los pañales, envueltos en su capa plástica. Sin embargo la celulosa podría ser degradada en corto tiempo si es utilizada como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*, como se ha demostrado previamente (Espinosa *et al.*, 2011). La biodegradación de ese material puede hacerse aún más rápida y eficiente si se le combina con otros materiales de desecho que contengan lignina. Otra opción ensayada para la degradación de los pañales es el composteo, que al igual que la biodegradación por el hongo *Pleurotus* puede combinarse con materiales, como residuos de jardinería, para hacer más eficiente el proceso.



4.2.1 Degradación mediante el cultivo de hongos *Pleurotus*

El hongo *Pleurotus*, conocido comercialmente como “seta”, es el segundo hongo de importancia comercial a nivel mundial, sólo después del champiñón, *Agaricus bisporus*. Las setas crecen de manera natural en troncos en descomposición o artificialmente en diferentes materiales obtenidos como subproductos de las actividades agrícolas (Gaitán, et al., 2006) debido a su actividad lignocelulolítica (Guzmán *et al.*, 2008).

4.2.1.1 Fases de crecimiento de *Pleurotus*

El ciclo de vida de los hongos está dividido en dos fases: crecimiento vegetativo y reproductivo. El crecimiento vegetativo involucra un crecimiento lineal del micelio que ocurre disolviendo componentes complejos del sustrato en moléculas más simples y absorbiéndolas como nutrientes. Cuando se dan condiciones de baja temperatura, humedad alta, mucho oxígeno, y en algunos casos luz, el micelio cesa su crecimiento vegetativo y comienza a producir cuerpos fructíferos (crecimiento reproductivo), los cuales se conocen como “hongos” (estructura reproductora). El cultivo de hongos de manera comercial, normalmente se realiza en bolsas de plástico, puede considerarse como la práctica de obtener cuerpos fructíferos mediante la repetición artificial de estas dos fases de crecimiento (MushWorld, 2004) que se describen a continuación.

a) Fase oscura o incubación

La incubación es la fase que permite la colonización del sustrato por el hongo de preferencia a temperatura y humedad óptimas y en oscuridad. La mayoría de las cepas de *Pleurotus* crecen bien en temperaturas entre los 25 y 28°C, (Sánchez y Royse 2001). aunque algunas pueden resistir entre 20 y 30°C sin cambios aparentes (Guzmán *et al.*, 2008).

Al inicio de esta fase se requiere una concentración alta en CO₂, para estimular el crecimiento micelial (hasta niveles cercanos al 25%), pero pasados estos niveles, el CO₂ limita el desarrollo y es necesario facilitar el intercambio con aire fresco, por lo que a los 4 ó 5 días se deben perforar las bolsas en las que se sembró para facilitar el intercambio con aire fresco (Sánchez y Royse 2001).

Durante esta fase la humedad del sustrato no se controla, se trata de mantenerla tal y como ajustó en su preparación, que es de 60-70%.

b) Fase luminosa o Fructificación

Cuando el sustrato se encuentre completamente cubierto por el micelio de *Pleurotus*, las bolsas estarán listas para colocarse en condiciones de luz, con ello se efectúa el “estrés” sobre el micelio y provoca que se inicie la fructificación que dura aproximadamente de 7 a 15 días. Durante esta fase se debe tener un estricto control del intercambio de CO₂ por O₂, a través de la ventilación controlada, además de un riego constante de los sustratos y una humedad relativa del 80 a 90%.

Después de 15 a 20 días aparecen los primordios de las fructificaciones, sobre todo en los lugares cercanos a los cortes de la bolsa. Los primordios crecerán inmediatamente y durante unos 5 días producirán las fructificaciones normales (MushWorld, 2004).



4.2.1.2 Factores que influyen en el desarrollo de *Pleurotus ostreatus*

La formación y el crecimiento de los cuerpos fructíferos son sensibles a las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono, y el contenido de humedad en el sustrato. Un desequilibrio de estos factores puede inducir deformaciones de los cuerpos fructíferos (MushWorld, 2004). En la **Tabla 4-2** se muestran las condiciones ambientales del cultivo de *Pleurotus*.

La mayoría de los cultivos de *Pleurotus* pueden ser producidos en un corto periodo de tiempo, a bajo costo y en áreas reducidas. Además la implementación del cultivo de hongos a pequeña escala en países en desarrollo necesita una tecnología sencilla en condiciones poco sofisticadas y los sustratos pueden provenir de desechos de plantas sin ser suplementados. Benavides y Herrera (2009); Sánchez y Royse (2001) señalan que los materiales elegibles para ser utilizados en la preparación de sustratos para el cultivo de *Pleurotus* deben poseer el mayor número posible de propiedades positivas tales como: Disponibilidad en cantidad y continuidad, buen conocimiento de sus características físico-químicas, regularidad en su composición físico-química, precio ventajoso de adquisición, localización fácil y cercana, facilidad de transporte y manejo

Tabla 4-2 Condiciones ambientales del cultivo de *Pleurotus* (Guzmán *et al.*, 2008; MushWorld, 2004; Sánchez y Royse, 2002)

Parámetro	Observaciones
Temperatura	La temperatura óptima varía con las etapas de crecimiento de la especie e incluso entre cepas. El micelio crece bien entre 26-28°C y la fructificación tiene requerimientos diferentes dependiendo de la cepa: 25-30°C, 16-22 °C y 12-15°C.
Humedad relativa	La humedad relativa recomendada está entre 85-95%, suficiente para evitar que tanto el sustrato como los cuerpos fructíferos se deshidraten.
Iluminación	A diferencia del micelio, que no la requiere, los primordios se forman bajo luz. Las fases de formación y de crecimiento del hongo requieren 80-210 lux de luz y determinan el color del hongo y la longitud del tallo.
Oxigenación	Su ausencia provoca que los hongos se sofoquen. Los tallos del hongo se vuelven alargados y torcidos y el crecimiento es muy pobre. Una ventilación excesiva, sin embargo, causa fuertes pérdidas de agua, resultando en una humedad ambiente más baja y el sustrato más seco.
Concentración de CO ₂	Las concentraciones altas CO ₂ son una de las principales causas de anomalías de los cuerpos fructíferos. Se necesita una ventilación apropiada para reducir la concentración de CO ₂ . Sin embargo, una ventilación excesiva también induce a anomalías en los cuerpos fructíferos.
Riego (contenido de humedad en los sustratos)	El riego es muy importante después de la formación de los primordios, para mantener el contenido de humedad óptimo en el sustrato y obtener altos rendimientos. Las enfermedades normalmente aumentan con el exceso de riego. Un riego insuficiente reduce los rendimientos e induce formas anormales de los cuerpos fructíferos.



Tabla 4-3 Tipos de sustratos para cultivar los hongos

Clasificación	Sustratos
Pajas	Ajonjolí, arroz, cártamo, cebada, sorgo, trigo, avena y zacate en general
Rastrojos	Maíz, mijo, garbanzo, frijol
Pulpas	Café, cardamomo
Bagazos	Caña de azúcar, citronela, maguey tequilero, henequén, uva
Forestales	Aserrín, viruta, troncos y ramas
Otros	Papel, olote, tamo de maíz, hojas de piña, fibra de coco, lirio acuático, hojas y tallos de plátano, desechos de la industria textil.

Tradicionalmente el género *Pleurotus* ha sido cultivado sobre paja de cereales como trigo, arroz, avena y cebada (Martínez, 2002). En Asia, la paja de arroz es ampliamente aceptada como sustrato principal para cultivar hongo ostra. En Europa, la paja de trigo es el mejor sustrato para el cultivo de setas, debido a su contenido de proteína y a los altos rendimientos obtenidos (Mandeel *et al.*, 2005).

El uso de diferentes sustratos para el cultivo el género *Pleurotus* da lugar a diferentes rendimientos, lo que ha ocasionado un intenso estudio para poder obtener sustratos o mezclas que optimicen las eficiencias de cultivo. Las diferencias de productividad entre distintos materiales son atribuibles a la disponibilidad de nutrientes en los sustratos, además de que algunas combinaciones de sustratos ofrecen mejores rendimientos (Curvetto *et al.*, 2002). En la [Tabla 4-4](#) se muestran diferentes sustratos en los que se ha cultivado *Pleurotus ostreatus* en tiempos recientes.

Dentro de los ensayos que se han realizado agregando diferentes combinaciones de residuos para incrementar la eficiencia, se tienen los estudios realizados por Rashad y colaboradores (2009), quienes encontraron que la adición de paja de arroz a los residuos de pulpa de limón y residuos de papaya incrementó significativamente la producción. Al respecto, Rajak y colaboradores (2011), mencionan que para *P. sajor-caju* la combinación (kash, sabai y limón) y paja de arroz dio un rendimiento superior que las hierbas solas. Ellos concluyen que la sustitución de paja de arroz con las hierbas al 25% y 50% proporcionó mejores resultados que al 75% o 100% de estos materiales.

También se ha demostrado que la eficiencia del cultivo se puede incrementar si se da un pre-tratamiento, a través de la fermentación (Velázquez *et al.*, 2002) lo que además de hacer algunos de los nutrientes disponibles, también permite que se homogenice el material (Moda *et al.*, 2005). Cayetano y Bernabé en 2008 encontraron que la eficiencia biológica aumentó alrededor del 20-40% cuando se utilizan materiales fermentados. Así mismo, Hernández y colaboradores (2003), afirman que la producción se incrementó cuando el sustrato se fermentó durante un periodo de 2 a 3 días.



Tabla 4-4 Residuos lignocelulósicos usados para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Sustrato	Referencia
Paja de trigo con harina de soya	Vogel y Salmones, 2000
Pasto, pañal, posos de café, algodón, paja de trigo, penachos de piña	Delfín y Durán, 2003
Aserrín, paja de arroz, hojas de plátano, hojas de maíz, cáscaras de arroz, pasto	Obodai <i>et al.</i> , 2003
Paja de arroz y hojas de plátano	Bonatti <i>et al.</i> , 2004
Aserrín, paja de trigo y hojas	Shah <i>et al.</i> , 2004
Viruta de pino y paja de cebada	Pérez y Mata, 2005
Pulpa de café y paja de trigo	Salmones <i>et al.</i> , 2005
Astillas de álamo, astillas de eucalipto, paja de trigo	Varnero <i>et al.</i> , 2005
Pulpa de café	García, 2005
Rastrojo de maíz, rastrojo de sorgo y pasto bermuda	Rodríguez <i>et al.</i> , 2006
Tallos de jamaica, paja de arroz, hojas y tallos de plátano	
Pajas de trigo, mijo, soya y algodón	Dundar <i>et al.</i> , 2009
Hojas de olivo	Shabtay <i>et al.</i> , 2009
Paja de trigo, astillas de eucalipto, astillas de álamo, mezcla paja de trigo-eucalipto	Varner <i>et al.</i> , 2010
Hoja de plátano, paja de trigo, paja de cebada, rastrojo de maíz, pajilla de frijol	Romero <i>et al.</i> , 2010
Pulpa de remolacha, astillas de madera, palma, salvado de trigo, salvado de arroz, soya	Jafarpour <i>et al.</i> , 2010
Paja de trigo, pañal, orujo de uva	Espinosa <i>et al.</i> , 2011
Aserrín, cáscaras de yuca, residuos de algodón, hojas de plátano	Amuneke <i>et al.</i> , 2011
Residuos de ajo, residuos de maíz	Lechner y Albertó, 2011
Bagazo de caña, hojarasca de roble	Vargas <i>et al.</i> , 2012
Hojarasca de roble, bagazo de caña	Sudiany <i>et al.</i> , 2012
Cáscara de plátano, cáscara de papa, bagazo de caña	Rivera <i>et al.</i> , 2013
Bagazo de café, paja de trigo, paja de cebada, rastrojo de maíz, pajilla de frijol	Romero <i>et al.</i> , 2013
Paja de trigo	Jaramillo y Albertó, 2013
Capacho de uchuva, cáscara de arveja, tuza de maíz, avena	Fernández <i>et al.</i> , 2014
Papel blanco e impreso	Fernandes <i>et al.</i> , 2014

4.2.2 Tratamiento mediante composteo

El composteo es una forma de manejo de residuos sólidos en la cual los componentes orgánicos son biológicamente descompuestos de una manera controlada durante un periodo prolonga-



do, dando como resultado la degradación del contenido orgánico del material y una reducción importante de su volumen hasta convertirlo en un material de fácil aprovechamiento para las plantas, denominada composta. (Espinosa y Delfín, 2005). En términos generales el composteo se puede definir como una biotécnica donde es posible ejercer un control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica (Colomer y Gallardo, 2009).

El composteo es una forma en la que se reciclan elementos como el C, N, O, S, Ca, Fe y K necesarios para mantener los ciclos biogeoquímicos que ocurren en la naturaleza. El composteo, como tratamiento biotecnológico, reproduce de manera acelerada un fenómeno natural que ocurre en áreas boscosas: la descomposición de la materia orgánica y los residuos vegetales depositados en el suelo causada por la actividad metabólica de los microorganismos, particularmente bacterias, hongos y levaduras. En dicho proceso participan también algunos insectos, gusanos y lombrices (Espinosa y Delfín, 2005).

Al descomponerse la materia orgánica, una fracción mayoritaria se transforma en sustancias minerales simples como agua, bióxido de carbono, amoníaco, nitratos, fosfatos y sulfatos, en tanto que el resto forma complejos coloidales estables y resistentes a la acción microbiana, precursores del “humus”. Estos dos procesos en conjunto, la mineralización y la humificación, son responsables de la biodegradación de la materia orgánica y permiten la recuperación de nutrientes, en forma tal que pueden ser aprovechados por las plantas (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

La biodegradación empieza cuando en el medio hay condiciones favorables de humedad, temperatura y aireación para el desarrollo de los microorganismos nativos (principalmente hongos y bacterias) presentes en los residuos orgánicos y en el ambiente. Al inicio del proceso, cuando la relación entre volumen y superficie es grande, se genera una considerable cantidad de calor, debido a la actividad microbiana, que no puede disiparse porque la materia orgánica no es buena conductora del calor y, además, el alto contenido de humedad actúa como aislante. La cantidad de calor generada es proporcional a la masa (volumen) de residuos.

Una vez que los compuestos orgánicos fácilmente oxidables se han agotado, se inicia la colonización del sustrato por microorganismos mesofílicos aerobios. Las celulosas y las hemicelulosas son compuestos difíciles de degradar, por lo que una fracción se encuentra inalterada al final del proceso. Otro componente de la madera que no sufre cambios durante el composteo es la lignina, sustancia que sólo puede ser degradada por algunas especies de hongos mesofílicos.

Al disminuir la actividad metabólica, y con ello la generación de calor, el aire caliente del interior sube a la superficie y se difunde en el ambiente, posteriormente el proceso sufre un enfriamiento gradual hasta que alcanza la temperatura ambiente.

4.2.2.1 Factores que afectan al composteo

Todos los factores que afectan a los microorganismos repercuten en el proceso. Estos factores se verán influenciados por las condiciones ambientales y por las características de los residuos. Los parámetros fundamentales que regulan la calidad de la composta, y que deben considerarse en su proceso de producción son: la relación carbono/nitrógeno (C/N), el contenido de humedad de la materia prima, la temperatura, el pH y la aireación. La **Tabla 4-5** muestra un resumen de



los principales parámetros en el proceso (Colomer y Gallardo, 2007; Espinosa y Delfín, 2005; Tchobanoglous *et al.*, 1994).

Tabla 4-5 Principales Factores del proceso de composteo (Colomer y Gallardo, 2007; Espinosa y Delfín, 2005; Tchobanoglous *et al.*, 1994)

Parámetro	Importancia
Relación C/N	Es el parámetro más importante para que se desarrolle adecuadamente el proceso. Una C/N óptima garantiza que la mezcla de materiales contenga cantidad suficiente de carbono para que su oxidación genere la energía necesaria para el metabolismo microbiano. Así mismo, debe contener la cantidad de nitrógeno suficiente para la formación de nuevas células. Los microorganismos requieren 30 parte de carbono por 1 de nitrógeno, la relación óptima inicial suele estar entre 25 y 35.
Humedad	La actividad biológica requiere agua y a la vez la produce. El contenido óptimo de humedad para el crecimiento de los microorganismos durante el composteo es de 50 a 60%, por lo que una combinación adecuada de residuos, en muchos casos, asegura que la mezcla tenga la humedad necesaria. Humedades superiores desplazan el aire entre las partículas de la materia orgánica, con lo que el medio se volvería anaerobio. Humedades inferiores disminuyen la actividad microbiana, incrementando el tiempo del proceso e incluso lo detienen cuando son muy bajas.
Temperatura	Al inicio del proceso ocurre una fase termofílica (50 a 60°C), en la que se alcanza la mayor eficiencia de degradación. Temperaturas más elevadas inhiben la actividad biológica, aunque mejoran las condiciones higiénicas de la composta porque destruyen a los organismos patógenos. Con el agotamiento de los nutrientes y la desaparición de los termófilos, comienza el descenso de temperatura y con ello la fase mesofílica (35 a 45°C) en la que se utilizarán como nutrientes los materiales más resistentes a la biodegradación, tales como la lignina y celulosa. Finalmente cuando los materiales alcanzan la temperatura ambiente (15°C), se considera que el proceso de biodegradación ha concluido.
pH	La variación de pH es un indicador del avance del proceso de biodegradación. En procesos aerobios, los primeros días hay una disminución del pH provocada por la formación de ácidos orgánicos. Una vez terminada esa fase, el pH se eleva paulatinamente, hasta estabilizarse entre 7.5 y 8.
Aireación	La oxigenación se realiza mediante la aireación, actividad que disipa el calor, suministra oxígeno y desplaza al dióxido de carbono que se forma como resultado de la respiración de los organismos aerobios. Si la concentración de oxígeno es menor que 10 % en volumen, el metabolismo aerobio se detiene. La concentración óptima de oxígeno corresponde al intervalo de 15 a 20 %. Su consumo varía a lo largo del proceso, dependiendo de la temperatura, la humedad, el tiempo de degradación y la porosidad de la masa.
Partícula	Un proceso eficiente requiere una mezcla más o menos homogénea, por lo que es recomendable triturar los materiales antes de iniciar el proceso, reduciéndolos a fragmentos de 2 a 5 cm. A menor tamaño de partícula, mayor superficie expuesta y mayor velocidad de degradación. El tamaño de las partículas también afecta la textura y contribuye al control de la temperatura.



La composta es el producto final del proceso de descomposición controlada de la materia orgánica. Este proceso de degradación, denominado composteo, transforma los residuos en un material particulado, de color oscuro y aspecto homogéneo, con olor a tierra húmeda, que cuando se extiende en la superficie del suelo desempeña el papel de mejorador de suelo. La composta posee un inestimable valor pues se trata de la recuperación de materia orgánica a partir de los residuos orgánicos originados por la actividad humana, que en caso de no tener algún tipo de tratamiento contaminan el entorno (Espinosa y Delfín, 2005).

Generalmente la composta es usada como un acondicionador o mejorador de suelo que por su parecido con los abonos químicos es reconocido usualmente como abono orgánico. El producto seco terminado contiene nitrógeno orgánico, material carbonoso, fósforo, microorganismos benéficos, micronutrientes esenciales y entre 10 y 15 % de humedad. Es sabido que la materia orgánica es necesaria para el desarrollo y mantenimiento de la vida bacteriana, puesto que sin ésta las plantas no pueden asimilar los elementos minerales, retener humedad, o lograr su crecimiento óptimo.

4.2.2.2 Tecnologías de composteo

Las tecnologías usadas en el composteo pueden clasificarse de diferentes maneras. Según la movilidad del material a compostear, pueden ser dinámicos o estáticos, por la forma física en la que se disponen el material, se tendrían: pilas, trincheras, mesetas y zanjas entre otras. También se pueden clasificar en función del aislamiento del material siendo sistemas abiertos, semicerrados y cerrados (Moreno y Moral, 2011).

El composteo se puede realizar desde los tratamientos diseñados y contruidos en casa, colocando los residuos en diferentes recipientes o en hileras con volteo manual para aporte de oxígeno y en pilas estáticas aireadas mecánicamente (aireación forzada), hasta los procesos llevados a cabo en biorreactores que utilizan diseños y equipos patentados. (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

El objetivo del composteo es, además de transformar los residuos en composta, es conseguir las condiciones consideradas letales para patógenos, y elementos germinativos, tales como semillas y esporas (Bonmatí, 2008; Colomer y Gallardo, 2009; Tchobanoglous *et al.*, 1994).

a) Composteo en pilas

El composteo aerobio es el que se utiliza con mayor frecuencia para tratar la fracción orgánica de los RSU como son desechos de jardinería, fracción separada de los RSU, mezcla de RSU y lodos provenientes de plantas de tratamientos de aguas.

Composteo en pilas es la denominación que se le da a la masa de residuos cuando presenta una morfología y dimensiones determinadas, generalmente de tipo piramidal. Es el método más antiguo, en su forma más simple. De acuerdo al método de aireación utilizado, este sistema se subdivide además en pilas móviles y estáticas La **Tabla 4-6** muestra las tecnologías de composteo en pilas aerobias que existen.



Tabla 4-6 Principales tipos de composteo en pilas aerobias (Bonmatí, 2008; Colomer y Gallardo, 2009; Tchobanoglous *et al.*, 1994)

Tipo	Características
Pilas móviles	En este tipo de composteo la aireación y homogeneización se realiza por remoción y reconfiguración, es decir, por el movimiento de las pilas. Este sistema se puede construir formando el material orgánico en pilas de 2.5 a 3 m de alto y de 6 a 7 m de ancho en la base. Las dimensiones dependen del volumen de residuos a tratar y del equipo disponible para remover los residuos que se están composteando. Este proceso se mantiene en promedio a 55 °C.
Pilas aireadas estáticas	El método consiste en garantizar la oxigenación de una masa de composta mediante un sistema de aireación fijo (métodos Beltsville y Rutgers), de manera que permiten realizar una aireación forzada sin necesidad de movilizar las pilas. En la pila típica las dimensiones son de alrededor de 2.3 a 2.4 m. de alto y cada pila tiene un ventilador individual para tener un control de aireación efectivo. Un drenaje de plástico corrugado es usado para introducir aire mediante un tubo. El aire es introducido para proveer el oxígeno necesario para la conversión biológica y el control de la temperatura.

b) Composteo en reactores

Los residuos orgánicos son procesados en instalaciones que pueden ser estáticas o dinámicas, que se conocen como reactores. Un reactor es la unidad de proceso diseñada para llevar a cabo varias reacciones químicas. Esta definición generalmente implica un sistema bien delimitado, casi siempre en un recipiente cerrado, por lo general metálico: cilíndrico o rectangular, con líneas de entrada y salida claramente especificada y un estricto algoritmo de control para determinados parámetros (humedad, aireación). Los reactores móviles además, posibilitan la mezcla continua de los desechos mediante dispositivos mecánicos, con lo que se logra un proceso homogéneo en toda la masa en composteo.

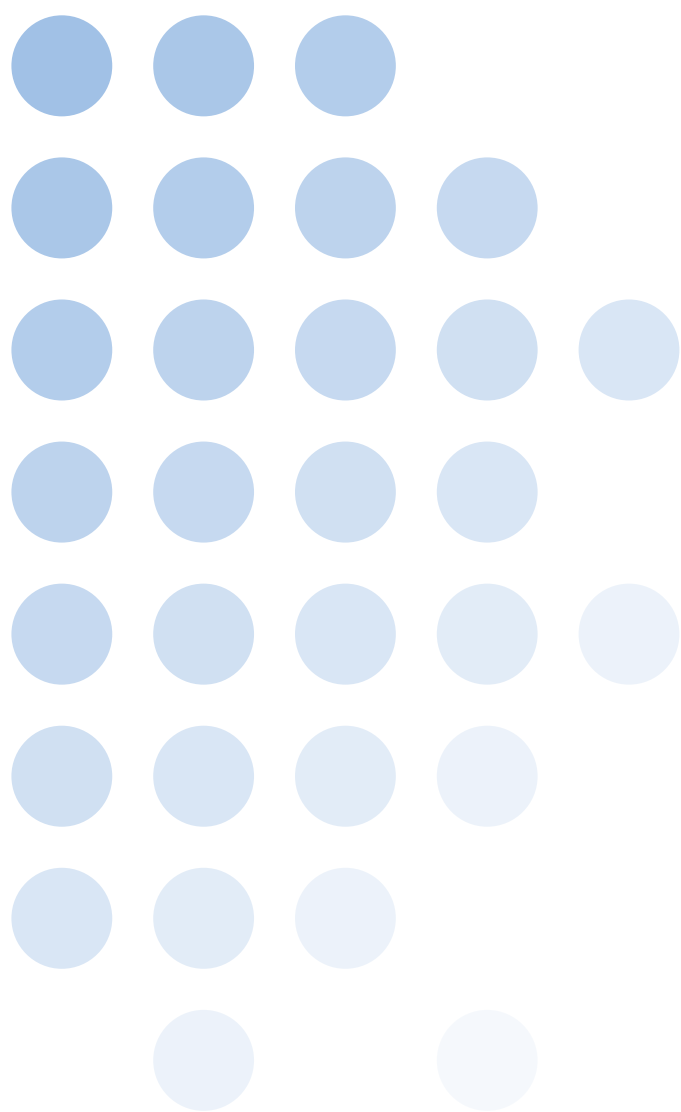
Los procesos de composteo en reactor trabajan bajo los mismos principios, al emplear microorganismos presentes en la materia orgánica para degradar los residuos hasta obtener el producto deseado. La diferencia de este sistema radica en que mediante el empleo de contenedores, se le brinda a los microorganismos todo lo que requieren para lograr su desarrollo óptimo, acelerando así su ciclo de vida. De esta forma se busca que el proceso se lleve a cabo en un tiempo mucho menor al requerido en un sistema de pilas (Colomer y Gallardo, 2009).

Una de las ventajas de realizar el proceso de composteo dentro de un reactor es que al tratarse de un entorno con las condiciones ambientales controladas, es posible realizar un monitoreo exacto del proceso de biodegradación y obtener datos que permitan homogeneizar las labores de composteo; lo que se traduce en una gran facilidad para trabajar el proceso a niveles industriales (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

Normalmente la composta que se produce en el interior del reactor no alcanza un correcto estado de maduración, por lo que finalizadas estas etapas activas biológicamente, el material es retirado del reactor y se almacena para que se cumpla la “maduración”. Los sistemas de composteo en reactores son casi siempre sistemas industriales. Se aplican en aquellas situa-



ciones donde diariamente se reciben volúmenes importantes de desechos, y para los cuales sería necesario disponer de superficies muy extensas. La principal ventaja que justifica su instalación es el control sobre los malos olores que se producen (Bonmatí, 2008).



Estado del arte

5. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan las opciones de tratamiento y disposición de los pañales desechables usados, así como los resultados reportados en estudios previos de su degradación de por *Pleurotus* y por su incorporación en un proceso de composteo.

En muchos países, especialmente en los que están en desarrollo, los pañales desechables se incluyen en los residuos sólidos urbanos para su posterior tratamiento o disposición, principalmente por incineración o el enterramiento en sitios de disposición final (Mirabella *et al.*, 2013), sin embargo estos tratamientos, de acuerdo con Yeh y colaboradores (2006), presentan algunos problemas a considerar antes de llevarlos a cabo (Figura 5-1).

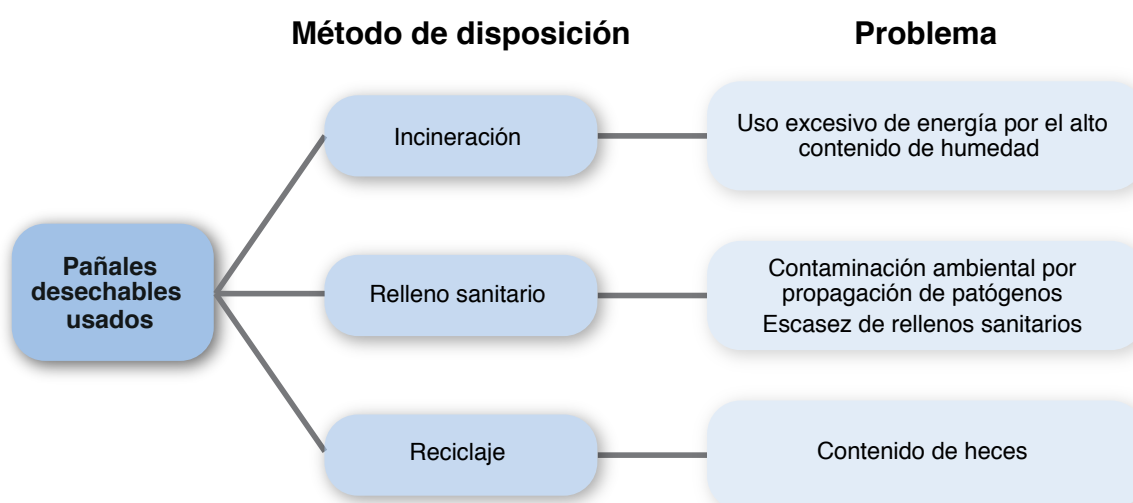


Figura 5-1 Métodos tradicionales de tratamiento de los pañales desechables usados y sus efectos negativos (Modificado de Yeh *et al.*, 2006)

A continuación se describen los métodos de disposición y tratamiento que actualmente reciben los pañales desechables.

5.1 Disposición en relleno sanitario

En México, al igual que muchos países en vías de desarrollo, una proporción significativa de los pañales desechables usados, tienen como destino los rellenos sanitarios. A pesar de ser una práctica común y de que autores como Yeh y colaboradores (2006) y Mirabella y colaboradores (2013), mencionan este tipo de disposición, no existe información disponible al respecto del comportamiento de los pañales dentro de los rellenos. Se sabe que al igual que otros residuos que se disponen en estos sitios y debido a su alto contenido de humedad, pueden lixiviar los productos químicos, contaminantes y enfermedades (Chipunza, 2012; Meseldzija *et al.*, 2013).



De los pocos estudios realizados se encuentra el de Light y colaboradores (1995), que estudiaron a nivel laboratorio las características de compactación de los pañales desechables en un relleno sanitario. Trabajaron con diferentes proporciones de una mezcla de pañales y residuos sólidos (0 a 15% de masa neta de los pañales desechables) y se compactaron en ocho pruebas ordenadas al azar, considerando la densidad de los residuos compactados bajo las presiones aplicadas como la variable de respuesta. El estudio concluyó que los pañales desechables no ocupan un espacio en el relleno que se pudiera destinar para otros materiales, simplemente rellenan los huecos alrededor de los elementos más rígidos cuando los pañales constituyen menos del 10% (peso húmedo) de la mezcla total. Este estudio también recomienda no excluir a los pañales desechables con una perspectiva de ahorro de volumen.

5.2 Opciones de tratamiento

5.2.1 Incineración

En algunos países de Europa y en Canadá, Estados Unidos y Japón los pañales son incinerados con el resto de los residuos urbanos no reciclables (Puig y Calaf, 2009), lo que permite incluso la recuperación de energía.

La composición de los pañales incluye varios polímeros y compuestos orgánicos y cuando se mezclan con otros residuos para incinerarse su combustión permite la producción de contaminantes tales como compuestos de CO y de cloro, incluso dioxinas, si no se controla adecuadamente, por lo que la incineración de estos residuos no es tan recomendable (Riber, 2007; Yeh *et al.*, 2006).

5.2.1.1 Composteo

El tratamiento de los pañales desechables mediante composteo es una práctica que se realiza de manera particular en varios países, en los que normalmente se compostean junto con residuos de jardinería y de alimentos. En los países en los que se ha implementado el composteo, los pañales desechables usados se recogen separados y se transportan a una planta de tratamiento, donde son triturados y sometidos al proceso de composteo.

En Nueva Zelanda en 2008 se utilizaron sistemas que permitieron compostear 450,000 pañales en 5 meses, los plásticos que no se compostearon se separan mediante cribado (BioCycle, 2008). Debido al éxito del sistema en 2011 la empresa Environcomp ofreció un servicio de recolección de pañales desechables en sitios y contenedores específicos y también un servicio de bolsas especiales para composteo en casa y en 2012 abrió la segunda planta con capacidad para tratar 1.000 toneladas al año, de pañales desechables usados y otros productos higiénicos (Environcomp, 2011).

En el 2011 en el Reino Unido se probó un sistema de recolección en las que los pañales se colocaban en bolsas diferenciadas para poder hacer la recolección separada, con las cuáles se producía composta, además, aquí los plásticos fueron utilizados en nuevos productos como componentes de plástico o como un ingrediente en materiales compuestos. Las fibras se reciclaron en cartón y los biosólidos de los pañales se enviaron a la alcantarilla (Environcomp,



2011). En 2013 la empresa Knowaste ofreció el servicio de recolección y composteo de pañales desechables a particulares (Knowaste, 2013).

En Holanda se instaló una planta como las que ya mencionaron, pero resultó ser demasiado grande y el costo se elevó considerablemente por lo que cerraron la planta. En un estudio que realizaron en 2007 compararon la recolección selectiva con la incineración, con composteo, con posterior bio-digestión y el proceso de reciclaje de Knowaste y llegaron a la conclusión que la incineración es la opción más atractiva (Freyberg, 2012).

En Canadá la empresa Green Bin Organics Program ofrece un servicio subsidiado de recolección en sitios y contenedores específicos, composteo de residuos orgánicos y sanitarios (Green Bin Organics Program, 2013).

En varias ciudades de Estados Unidos existen diferentes compañías que ofrecen el servicio particular de recolección y composteo de pañales, en la [Tabla 5-1](#) se presentan los nombres de algunas compañías y el tipo de servicio que ofrecen.

Tabla 5-1 Principales empresas identificadas como referencia de tratamiento por composteo (Sotelo-Navarro, 2014)

País	Empresa	Observaciones
Estados Unidos	Atlanta Diaper Service Blessed Bums Do Good Diapers Earth Baby Ivy's Diaper Service Pish Posh Diaper Co. Tuny Tots Diaper Service	Servicio de recolección y composteo de pañales desechables a particulares (Atlanta Diaper Service, 2013; Blessed Bums, 2011; Do Good Diapers, 2011; Earth Baby, 2008; Ivy's Diaper Service, 2011; Tiny Tots Diaper Service, 2011; Pish Posh Diaper Co, 2013).

Una nueva propuesta de tratamiento biológico de los pañales es la de Yeh y colaboradores (2006), que proponen la degradación de los pañales mediante la acción de los microorganismos que se encuentran en las virutas de los árboles de criptomeria. Los ensayos se realizaron a nivel laboratorio para comparar diferentes condiciones al agregar algas y una enzima para acelerar la reacción, la tasa de descomposición de los pañales obtenida fue superior al 38%. Estos resultados permitieron obtener un modelo que propusieron para acelerar de biodegradación del pañal (Yeh *et al.*, 2006).

5.2.1.2 Reciclaje y valorización energética

La posibilidad de reciclar los componentes de los pañales desechables se basa en separar sus diferentes componentes. Existen compañías que realizan esto, esterilizan el pañal, desactivan el superabsorbente, separan los plásticos y las fibras.

La pulpa restante se convierte en fibra. Los plásticos ya separados se muelen y se transforman en pellets. La planta piloto que tiene la patente del proceso puede procesar arriba de 100, 000



toneladas de pañales/año - Patente USA número: 5558745 (Conway *et al.*, 1996) y Patente USA número 0292401 A1 (Grimes, 2010).

Se ha encontrado que técnicamente es posible cierto tipo de reciclaje, la principal limitación es el alto costo económico de la recolección y manejo de pañales desechables, ya que constituyen un porcentaje muy bajo de los residuos sólidos municipales (Conway *et al.*, 1996; Grimes, 2010). El proceso de reciclaje comprende una primera etapa de remojo en una solución acuosa para eliminar partículas y/o materia soluble de los productos a tratar y la separación no destructiva de los constituyentes. El producto obtenido se trata con dos soluciones que incluyen el blanqueo y agentes antimicrobianos. Finalmente, los plásticos y el material celulósico se recuperan en corrientes separadas.

Torrijos y colaboradores (2013), proponen, tomando como base la patente mencionada el desviar los pañales usados de los flujos de residuos sólidos urbanos y los métodos clásicos de eliminación, como la incineración o el depósito en rellenos, mediante el diseño de un enfoque original que supone el reciclado de material y valorización energética.

El tratamiento propuesto por Torrijos y colaboradores (2013), de los pañales desechables usados consta de la recuperación de la fracción de plástico para ser reciclada como materia prima y de su fracción biodegradable (BFD) para la producción de energía mediante co-digestión anaerobia con lodos de aguas residuales. A escala laboratorio obtuvieron un rendimiento de metano de la BFD de 280 ml CH₄/g SV alimentados, y con ello mostraron que la co-digestión de la BFD con lodos activados es técnicamente factible.

5.2.1.3 Degradación de pañales por *Pleurotus*

Como ya mencionó en la UAM Azcapotzalco existe desde 1992 una línea de investigación que busca alternativas de tratamiento que permitan degradar los pañales desechables usados. Uno de los métodos estudiados es la degradación del pañal por *Pleurotus*.

En particular se pueden mencionar los experimentos realizados bajo la modalidad de cultivo en bolsa. En 1992, había en el mercado pañales con o sin superabsorbente (gel), ambos tipos fueron utilizados en los primeros ensayos. Los resultados indicaron una mayor degradación con los pañales sin gel, con el 23.5% de reducción en el volumen del sustrato (Nava *et al.*, 1992).

A partir de la incorporación de gel a los pañales desechables, que era ya comercialmente una práctica común, se trabajó sólo con pañales con gel. Se logró una disminución del 90% en volumen y del 88% en masa del sustrato. La eficiencia biológica fue del 34%. En este ensayo, el pañal usado fue reducido a fragmentos y se iniciaron las primeras mezclas con otros residuos (Espinosa *et al.*, 1999).

Otro resultado fue una patente sobre el proceso (Espinosa y Delfín, 1997) en la que se presenta un método para el tratamiento de pañales. Los estudios han continuado, del 2000 al 2005 se realizaron ensayos utilizando mezclas de pañales desechables con otros residuos que proporcionaran estructura y aportaran lignina al sustrato, requisitos necesarios para el cultivo ya que el pañal no contribuye a ninguno de ellos. Entre los residuos que se utilizaron se encuentran: orujo



de uva, paja, pasto, posos de café, corona de piña y cascarilla de girasol. En estos experimentos, las reducciones de volumen y de masa fueron variables, pero en todos los casos superiores al 80%. La eficiencia biológica osciló entre límites amplios, desde el 0 hasta el 30% (Delfín y Durán, 2003; Espinosa y Delfín, 2005; Espinosa *et al.*, 2006).

Desde los primeros experimentos, se demostró que era factible degradar el pañal a través del cultivo de setas. Es importante mencionar que la etapa con más cambios tecnológicos en los pañales ha coincidido con el desarrollo de la investigación realizada en la UAM Azcapotzalco.

La eficiencia biológica obtenida es baja si se compara con la de los sustratos agroindustriales convencionales (en que se obtiene como mínimo 100%) y muestra fluctuaciones amplias, aunque para fines de este proyecto, el dato de eficiencia biológica tiene poca importancia debido a que la producción de setas no es el objetivo primordial. Pese a lo mencionado antes, se ha confirmado que los hongos cultivados en el residuo de pañal desechable presentan las mismas características bromatológicas que los que se cultivan en sustratos comerciales y que están libres de agentes patógenos, por lo que su consumo no representa un riesgo.

5.2.1.4 Degradación de pañales por composteo

La degradación de pañales desechables usados mediante composteo ha sido estudiada por diferentes investigadores. Colón y colaboradores (2011), compostearon pañales con la fracción orgánica separada de los residuos sólidos municipales (FORM) en pilas a escala completa y compararon las características de la composta obtenida en el composteo de FORM sin pañales. El comportamiento de los parámetros habituales (temperatura, contenido de oxígeno, de humedad y de materia orgánica) y de la actividad biológica (medida como índice de la respiración) fue similar en ambas pilas. Las compostas obtenidas fueron idénticas en términos de estabilidad, madurez y fitotoxicidad y no mostraron la presencia de microorganismos patógenos. Sin embargo, la composta procedente de FORM con un 3% de los pañales desechables presentó un nivel ligeramente más alto de zinc, que puede evitar el uso de grandes cantidades de pañales mezclados con FORM.

Colón y colaboradores (2013), llevaron a cabo un estudio a gran escala de composteo de la fracción orgánica de residuos municipales (FORM), recogidos puerta a puerta, empleando un 3% en masa de pañales composteables o biodegradables. Los resultados obtenidos demostraron que tanto el proceso de composteo como el producto final obtenido (composta) no se alteran por la presencia de los pañales. La evaluación de la composta obtenida, incluyendo nutrientes y metales pesados, contenido de patógenos y la estabilidad corresponden a una composta de alta calidad. La principal conclusión de este estudio fue que la recogida de la FORM con pañales composteables puede ser una nueva forma de transformar estos residuos en composta de alta calidad.

Dentro de la línea de investigación para la degradación de pañales en la UAM Azcapotzalco también se han realizado trabajos en composteo, éstos se iniciaron desde el 2000.

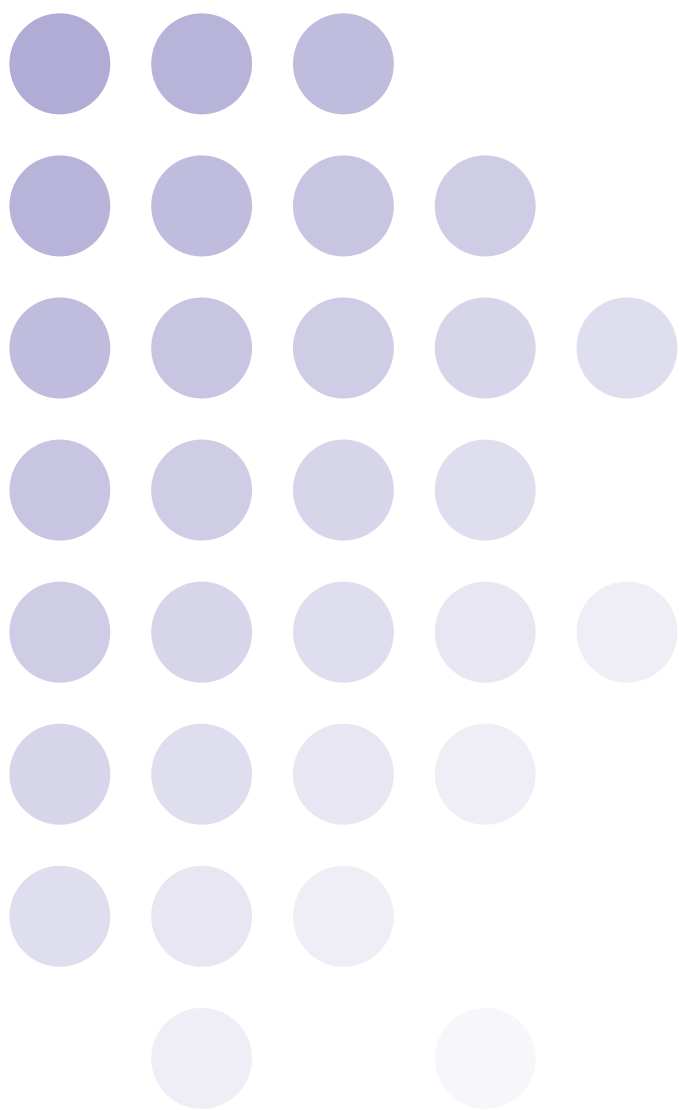
Espinosa y colaboradores (2000), incorporaron dos porcentajes distintos (10 y 20% en volumen) de pañal desechable a residuos de jardinería que fueron sometidos a composteo en pila, durante 12 semanas. La temperatura, pH, materia orgánica y relación C/N tuvieron el comportamien-



to que se considera normal en procesos de composteo aerobio. El polímero superabsorbente parece haber favorecido la retención de humedad en el sustrato, como se deduce del bajo consumo de agua, en comparación con una composta testigo. La elevación de temperatura garantiza la eliminación de patógenos posiblemente presentes en los desechos del pañal. La reducción de volumen fue de 65 y 50 %, en los sustratos con 10 y 20% de pañal, respectivamente. Se obtuvo alrededor de 45%, en masa, de composta cuya apariencia, color, olor y textura son considerados indicadores de buena calidad.

Espinosa y colaboradores (2003), compostearon 3 diferentes concentraciones de pañales en mezcla con residuos de jardinería y aserrín, empleando un reactor de 200 L tipo DANO y obtuvieron una degradación mayor al 50%. Se recomendó disminuir la concentración del aserrín empleado para evitar condiciones anaerobias, los componentes plásticos del pañal pudieron separarse por tamizado, los resultados obtenidos permitieron presentar un modelo de reacción del proceso.

Finalmente como se ha revisado, la problemática de los pañales desechables usados es muy seria en México y especialmente crítica en la Ciudad de México por la alta densidad poblacional y por ende la generación de residuos, y además porque a raíz de la clausura del sitio de disposición de Bordo Poniente en 2011, aún no se cuenta con un nuevo relleno sanitario. Este problema es sumamente serio ya que no se cuenta con programas avanzados de separación de residuos; la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal obliga a los habitantes a separar y entregar selectivamente sus residuos orgánicos e inorgánicos y dentro de estos últimos los residuos sanitarios entre los que se encuentran los pañales desechables usados que se disponen sin ningún tratamiento junto con los demás residuos.



Metodología

6. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló en el laboratorio del Área de Tecnologías Sustentables, de la UAM-Azcapotzalco.

6.1 Diseño de la investigación

El proyecto fue planeado en cuatro etapas básicas, tal como se muestra en la **Figura 6-1**:

1. Cálculo para el escalamiento del proceso de degradación de los pañales desechables usados producidos por un niño en un mes.
2. Degradación de pañales mediante el cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus*.
3. Degradación de pañales mediante composteo.
4. Comparación de los resultados en ambos procesos y desarrollo de una propuesta metodológica para la aplicación en una planta a mediana escala.

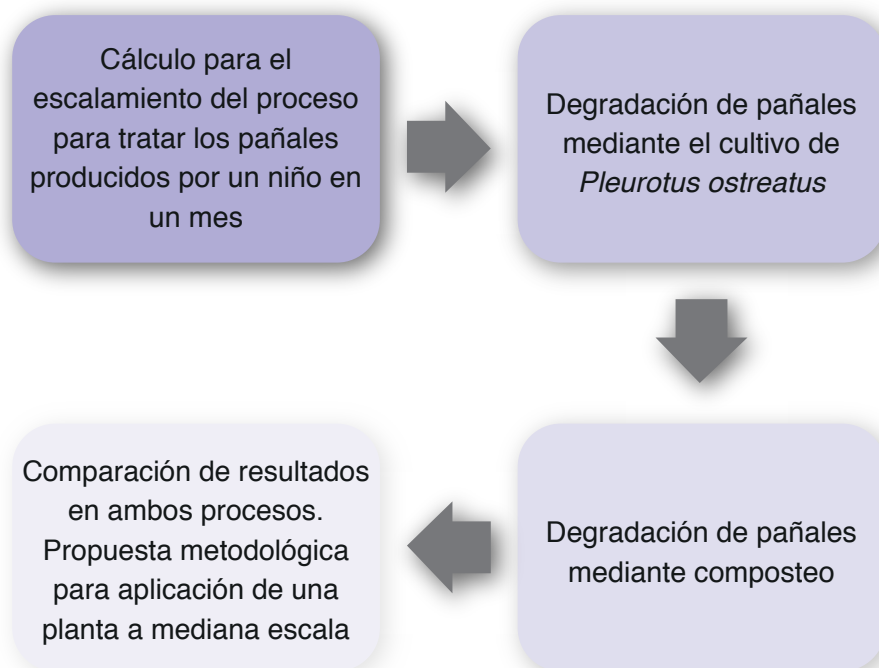


Figura 6-1 Diseño general de la investigación

Para el logro de los objetivos y desarrollo de la investigación se propuso la metodología experimental que se presenta en la **Figura 6-2**.

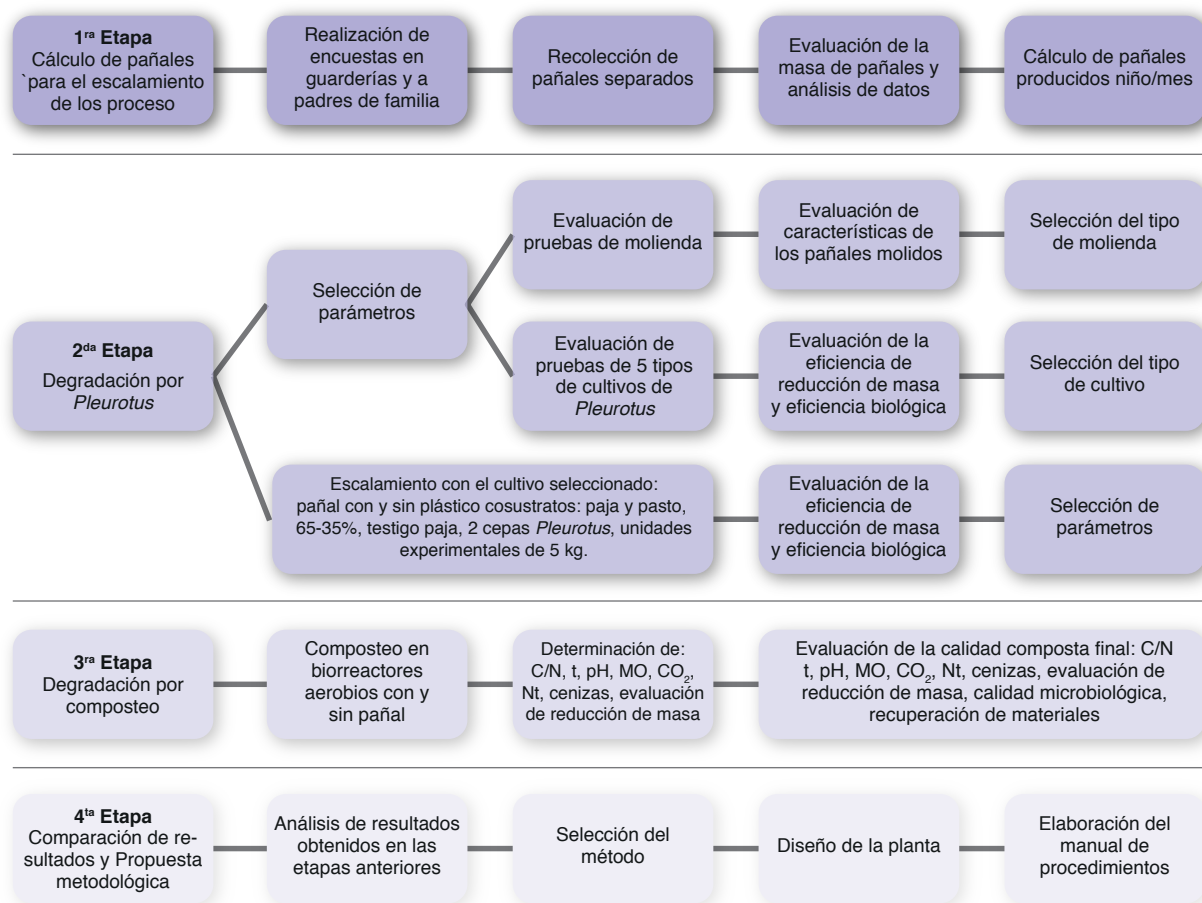


Figura 6-2 Diseño de la metodología

6.2 Etapa 1. Diseño y cálculo para el escalamiento del proceso

La primera etapa del proyecto consistió en realizar los cálculos requeridos para determinar la masa de pañales producidos por un niño en un mes. Para su cumplimiento se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Acopio de información sobre uso de pañales
- Recolección, determinación de la masa de pañales y análisis de datos
- Cálculos para el escalamiento

6.2.1 Acopio de información sobre uso de pañales

Con el fin de determinar el número y masa de pañales usados por un niño en un mes, se localizaron guarderías cercanas a la UAM-Azcapotzalco en las que pudiera obtenerse información sobre el número y tipo de pañales empleados por los infantes de cero a dos años diariamente,



así como muestras de los mismos para determinar su masa promedio. Una vez localizadas las guarderías se realizó la solicitud formal de apoyo. Las guarderías participantes pertenecen, en su mayoría, al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). El listado de las mismas se presenta en la **Tabla 6-1**.

Para determinar el número de pañales usados por un niño en un día se diseñó y aplicó una encuesta a los padres de familia usuarios de las guarderías participantes. La encuesta consistió de tres preguntas sencillas y rápidas de contestar. El formato utilizado para la encuesta se muestra en el **ANEXO A**.

Se entregaron 600 encuestas en las guarderías el primer día del muestreo y se recogieron el último día de recolección, para ayudar a la difusión se colocó un aviso en los filtros de entrada invitando a los padres de familia a participar con sus respuestas.

Tabla 6-1 Guarderías participantes en el proyecto

Guardería	Dirección	Dependencia
1. G-0036 / Tlalnepantla	Paseo de los Jinetes s/n, Col. Las Arboledas, C.P. 54026, Tlalnepantla, Estado de México	IMSS
2. G-0037 / Tlalnepantla	Viveros de Asís s/n, Col. Viveros de la Loma, C.P. 54080, Tlalnepantla, Estado de México	IMSS
3. G-0045 / Tlalnepantla	Av. Sor Juana Inés de la Cruz s/n, Col. Viveros del Río, C.P. 54060, Tlalnepantla, Estado de México	IMSS
4. G-0047 / Tequesquihuac	Av. Bomberos s/n, Col. Unidad Habitacional IMSS Tequesquihuac, C.P. 54030, Tequesquihuac, Estado de México	IMSS
5. U-0600 / CENDI, S.C	Terromote N.7, Col. Bellavista, C.P. 54710, Cuautitlán Izcalli, Estado de México	Afiliada al IMSS
6. U-1329 / Cuautitlán	Venustiano Carranza Mz. 17, Lt. 12, No. 18, N. Lt. 11 y 12, Col. Lázaro Cárdenas, C.P. 54850, Cuautitlán, Estado de México	Afiliada al IMSS
7. G-0018 / Miguel Hidalgo	Calzada México Tacuba N. 501, Col. Popotla, C.P. 11400, Miguel Hidalgo, Distrito Federal	IMSS
8. U-0599 / Pirámide-Tenayuca	Moctezuma N. 12, Col. San Bartolo Tenayuca, C.P. 54150, Tlalnepantla, Estado de México	Afiliada al IMSS
9. Escuela Kids Zone	Hacienda de Narvarte 60, Col. Prados del Rosario, 02410, Azcapotzalco, Distrito Federal	Particular
10. Aqua Kids U-715	Rio Bamba N. 765, Col. Lindavista, CP Gustavo A Madero, Distrito Federal	Afiliada al IMSS



6.2.2 Determinación de la masa de pañales y análisis de datos

Se separaron los pañales que contenían sólo orina para la determinación de la masa promedio. En la mayoría de los casos, este proceso se llevó a cabo en cada una de las salas de las guarderías, en bolsas previamente etiquetadas. La recolección se realizó durante cuatro días, posteriormente las bolsas con pañales se trasladaron al laboratorio.

Para la medición de las masas de los pañales recolectados se empleó una báscula digital marca ADAN modelo QBW-30 K. Se obtuvo la masa total de pañales por sala y se eligieron 10 pañales al azar de cada sala para obtener la masa promedio. Posteriormente se elaboraron las gráficas correspondientes con los datos obtenidos en los muestreos.

6.2.3 Cálculo para el escalamiento

La información para calcular el promedio de pañales usados por niño en un día, y determinar la proporción de pañales que contienen únicamente orina se obtuvo a través de las encuestas ya que fue una de las preguntas específicas. Con los datos obtenidos se hizo la extrapolación para obtener el cálculo de pañales producidos por un niño en un mes.

6.3 Etapa 2. Degradación por *Pleurotus*

Durante esta etapa se adaptó el equipamiento para el volumen a trabajar, tanto en las etapas de molienda como de esterilización de los pañales. También se seleccionó la configuración más apropiada para las nuevas dimensiones. Lo anterior se realizó a través de una prueba en la que se comparó el % de reducción de masa y volumen en el cultivo de *Pleurotus* en 5 diferentes configuraciones de cultivo, en bolsas rectangulares (tradicional), bolsas cilíndricas, charolas de plástico, mallas cilíndricas y estructuras rígidas de PVC. A partir de los mejores resultados obtenidos se seleccionó la forma de cultivo para el escalamiento.

6.3.1 Molienda

Para el cultivo de *Pleurotus* se requiere que los sustratos estén fragmentados y homogéneos, para ofrecer una mayor área de contacto, y con ello favorecer el proceso de degradación (Guzmán *et al.*, 2008). Dada la composición heterogénea de los pañales y por la forma en que se integran durante la fabricación dan como resultado un material difícil de moler.

El cultivo de *Pleurotus* requiere de un sustrato homogéneo, en el que los trozos de pañal sean de aproximadamente 5 x 5 cm. A lo largo de la investigación se han ensayado diferentes métodos para fragmentar los pañales, mediante desmenuzamiento manual, con tijeras o moliéndolos; sin embargo, este trabajo se ha realizado siempre a nivel laboratorio (Espinosa y Delfín, 2005).

En el mercado nacional no existe oferta de molinos específicos para pañales usados, por ello se evaluó el desempeño de los tres molinos con que se contaba en la institución para fragmentar los pañales; al tratarse de diferentes tipos de equipos, pudo evaluarse la viabilidad del empleo de las diferentes tecnologías de molienda. Se utilizaron un molino de martillos marca Agro Avante, un molino de aspas sin marca y una astilladora marca Bear & Cat modelo 70080.



Todos ellos fueron limpiados con agua a presión antes de usarlos y se manejaron según las instrucciones de los fabricantes.

Dado que esta prueba se llevó a cabo únicamente para elegir el equipo más eficiente en la molienda, se emplearon dos tipos de pañal: pañales usados sólo con residuos líquidos, recolectados en el Centro de Desarrollo Infantil (CENDI) 1 de la UAM Azcapotzalco y pañales proveniente de la merma de fábrica. Estos últimos son desechados durante el proceso de fabricación que se comercializan en forma de pacas, después de un proceso de trituración que da como resultado una mezcla heterogénea.

En las pruebas iniciales se utilizaron los pañales usados. Sin embargo, dado que la generación de pañales en el CENDI no era suficiente para las pruebas, y por la facilidad de contar con el material, las siguientes pruebas fueron con pañales de merma, que fueron triturados sólo en la astilladora Bear & Cat, ya que fue la que presentó el mejor desempeño. En todas las pruebas de degradación posteriores se emplearon pañales usados conteniendo orina.

En los casos en los que los molinos no molieron el pañal en un primer intento, se repitió la molienda con los mismos pañales para ver si se mejoraba el proceso.

6.3.2 Selección del tipo de cultivo

En estudios previos se han evaluado dos formas diferentes de cultivar el hongo *Pleurotus*, para la degradación de los pañales desechables usados; el cultivo en bolsa tradicional y en cama, pero estos trabajos se han realizado siempre a nivel laboratorio (Espinosa *et al.*, 1999).

Dado que el objetivo de este proyecto es el escalamiento a mediana escala se consideró importante evaluar diferentes formas de cultivo para encontrar la más adecuada para incrementar el volumen de residuos que pueden degradarse.

Se evaluaron cinco diferentes formas de cultivo: bolsa cilíndrica, red cilíndrica, bolsa rectangular tradicional, tubería de PVC y charolas de plástico. Para cada uno se montaron cinco unidades experimentales (UE), excepto en el caso del tubo de PVC que tuvo cuatro UE. En la [Tabla 6-2](#) se describen las unidades experimentales que se evaluaron durante la selección de la forma de cultivo.

En la [Tabla 6-3](#), se presenta el diseño experimental y la codificación para cada una las unidades experimentales.

Tabla 6-2 Descripción de las unidades experimentales

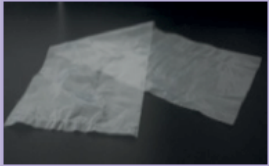
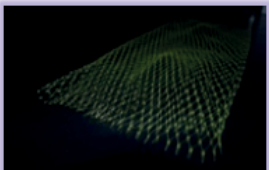
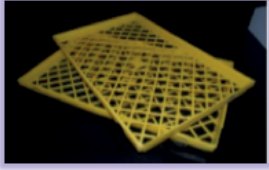
Tipo de unidad experimental	Imagen
Bolsa cilíndrica (BC): se utilizaron bolsas rectangulares de polietileno de 51.7 cm de largo x 18.2 cm de ancho, que al llenarse tomaban forma cilíndrica	
Malla cilíndrica (CR): en esta configuración se utilizó la red de plástico cortada en tramos de 55.5 cm de largo x 24 cm de ancho que se anudaron en uno de los extremos para formar una bolsa	
Bolsa tradicional (BT): se utilizaron bolsas de polietileno de alta densidad de 60.6 cm de largo x 41.7 cm de ancho	
Estructura rígida de PVC: se cortó por la mitad un tubo de PVC de cuatro pulgadas de diámetro por 102 cm de largo, en el que se hicieron perforaciones de dos pulgadas de diámetro	
Charolas (CH): se emplearon charolas de plástico de 38 cm de ancho x 60 cm de largo x 4 cm de altura	

Tabla 6-3 Diseño experimental y codificación consecutiva

Configuración	Clave y número consecutivo de las unidades experimentales
Bolsa cilíndrica	BC-1, BC-2, BC-3, BC-4, BC-5
Malla cilíndrica	CR-6, CR-7, CR-8, CR-9, CR-10
Bolsa tradicional	BT-11, BT-12, BT-13, BT-14, BT-15
Estructura de PVC	PVC-16a, PVC-16b, PVC-17a, PVC-17b
Charolas	CH-18, CH-19a, CH-19b, CH-20a, CH-20b



6.3.3 Preparación del sustrato paja-pañoal

Como sustrato para el cultivo del hongo se utilizó una mezcla de pañoal y paja de trigo. La proporción del sustrato pañoal-paja seleccionada fue de 65%-35% en masa seca, determinada con base en los resultados de estudios anteriores (Espinosa *et al.*, 2011). Los pañoales utilizados fueron de la merma del proceso de producción y la paja se adquirió en una paca de 12 kg de paja de trigo de color amarillo brillante, sin contaminación. Para utilizar los sustratos, se requirió acondicionarlos por medio de los procesos de molienda, ajuste de humedad y esterilización. La molienda de los pañoales se realizó en una astilladora *Bear&Cat*. La paja no requirió de fragmentación.

6.3.3.1 Ajuste de humedad

Para el crecimiento óptimo del hongo se requiere una humedad mínima de sustrato del 60%, por lo cual es necesario ajustar dicho parámetro.

La paca de paja de trigo se dividió y colocó en recipientes diferentes para remojarla durante 24 horas con agua corriente. Posteriormente, se depositó en una bolsa de tela porosa para dejarla escurrir durante cinco horas. Se registró su masa antes de remojarla y después de escurrirla.

Dado que se trabajó con pañoales que no habían sido utilizados, éstos presentaban un bajo contenido de humedad. Los pañoales se dividieron en dos lotes de 4.456 Kg cada uno, y se adicionó agua hasta obtener una consistencia adecuada; al primer lote se le agregaron 23.855 kg de agua y al segundo 23.561 kg de agua.

La mezcla pañoal-paja se realizó manualmente con ambos materiales húmedos, homogenizando y distribuyendo el SAP¹ húmedo desde el fondo del recipiente. Posteriormente, se empacaron porciones de 4 kg de mezcla en bolsas de polietileno para someterlas a esterilización.

6.3.3.2 Esterilización

Las bolsas con los diferentes sustratos se esterilizaron durante 15 minutos en una autoclave vertical modelo CV-300 a 121° C. Para verificar el proceso se colocaron 2 cm de cinta indicadora. Las bolsas se pesaron antes y después de esterilizar, posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se refrigeraron hasta el momento del montaje de los sistemas de cultivo.

6.3.4 Siembra

Para inocular los sustratos se utilizó una cepa de *Pleurotus ostreatus* BPR-81 obtenida comercialmente, empleando semilla de sorgo como soporte para el crecimiento del micelio del hongo. La inoculación del sustrato con el micelio del hongo se conoce como siembra.

La siembra se llevó a cabo en un área estéril en las instalaciones del laboratorio de Tecnologías Sustentables. En cada unidad experimental se colocaron 1000 g de sustrato pañoal-paja (**Figura**

¹ Polímero superabsorbente (SAP, por sus siglas en inglés).



6-3), pesados en una báscula marca ADAN modelo QBW-30. Posteriormente se inoculó con 50 g de semilla de sorgo invadida con micelio de *Pleurotus*. El procedimiento de siembra para cada forma de cultivo se desglosa a continuación.



Figura 6-3 Masa del sustrato

Bolsa cilíndrica, malla cilíndrica y bolsa tradicional.

Las bolsas y las mallas se limpiaron individualmente con alcohol etílico comercial (96% vol) y se colocó una capa de sustrato distribuyéndolo en el fondo. En seguida, se esparció el micelio sobre la capa de sustrato (**Figura 6-4**), alternando una capa de sustrato y una capa de micelio. Una vez que se terminó de sembrar, cada bolsa se cerró con un nudo en la parte superior sin dejar aire y se registró la masa. Las mallas se colocaron dentro de una bolsa cilíndrica para evitar pérdidas del sustrato.



Figura 6-4 Distribución del sustrato y el micelio

Estructura rígida de PVC.

Se envolvió la parte inferior del tubo con plástico para evitar que el sustrato saliera por los orificios del mismo. Se colocó una división a la mitad para tener dos unidades experimentales en cada segmento de tubo de PVC, y se colocaron dos capas de sustrato y dos de micelio. Posteriormente los tubos se envolvieron con plástico (**Figura 6-5**) para evitar contaminación y favorecer la invasión. Por último, se registró la masa.



Figura 6-5 Siembra en tubos de PVC



Charolas de plástico.

Se colocó una bolsa de plástico en la parte inferior de cada charola para evitar la pérdida de sustrato y al igual que en el tubo de PVC, sólo se distribuyeron dos capas de sustrato y dos de semilla. Al final se colocaron las charolas dentro de bolsas de plástico para evitar su contaminación y se registró la masa final (**Figura 6-6**).



Figura 6-6 Siembra en charolas de plástico

6.3.5 Fase oscura

Una vez sembradas las unidades experimentales de los cinco tipos de cultivo se colocaron en el cuarto oscuro sobre un anaquel metálico (**Figura 6-7**) para iniciar la fase oscura, en la que ocurre la invasión del micelio en el sustrato e inicia la degradación del mismo.



Figura 6-7 Distribución de las unidades experimentales

Después de cinco días las bolsas se perforaron para permitir el intercambio de CO_2 . Se usó una navaja desinfectada con alcohol y se realizaron cuatro perforaciones en cada unidad experimental. Se registraron las condiciones de temperatura y humedad ambientales. Esta fase concluyó cuando el sustrato fue completamente invadido por el micelio.

6.3.6 Fase luminosa

Después de que el micelio invadió el sustrato las unidades pasaron a la fase luminosa. A las redes cilíndricas, tubos de PVC y charolas se les retiró el plástico para permitir que los hongos crecieran. En el caso de las bolsas cilíndricas se dejaron cuatro extremos de tiras plásticas para que funcionaran como soporte. Las bolsas tradicionales se abrieron, y se colocaron debajo del sustrato para evitar la pérdida del mismo.



Con el fin de mantener la humedad, las unidades experimentales se regaron diario por aspersión directa con ayuda de un atomizador y una regadera de jardinería. Además, con el fin de evitar la contaminación de los sustratos, cada tercer día se limpiaron el piso y el anaquel con una solución de agua con cloro. La contaminación que se presentó en las distintas configuraciones se controló cortando con una navaja desinfectada el área afectada del sustrato.

Después de que los primeros hongos crecieron se realizó la cosecha inicial, para lo cual se usó un cuchillo desinfectado con alcohol, se cortó cada seta desde su base y se registró su masa. El proceso de cosecha se repitió cuando hubo crecimiento en cada unidad experimental, hasta que ya no se desarrollaron nuevos cuerpos fructíferos.

Durante los primeros días de la fase luminosa y al final de la fructificación se midió la concentración de CO₂ en el área de cultivos, tomando lecturas durante tres minutos mediante la interfase LabQuest (Vernier). También se registró la temperatura y la humedad relativa por medio de un registrador de datos EasyLog®.

6.3.7 Evaluación del proceso

6.3.7.1 Determinación de reducción de masa

La reducción de masa se determinó a partir de la masa seca del sustrato (pañal-paja) al momento de la siembra y la masa seca del mismo al final de la experimentación. La masa seca inicial se calculó a partir del porcentaje de humedad que contenían tanto el pañal como la paja al momento de la siembra. La masa seca final se obtuvo directamente después de que los sustratos se secaron a temperatura ambiente considerando, en los casos necesarios, la masa que tuvo que retirarse en las diferentes etapas, ya sea por contaminación o por muestreo. La diferencia entre la masa seca inicial y la final se consideró como la reducción de masa y se expresó en porcentaje, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Reducción de masa} = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100$$

En donde:

Mi es la masa inicial en seco de los sustratos (pañal-paja) al momento de la siembra

Mf es la masa final en seco, de los sustratos (pañal-paja) al final de la experimentación

6.3.7.2 Determinación de la eficiencia biológica

La eficiencia biológica del cultivo se determinó mediante la relación entre la masa fresca de los hongos obtenidos y la masa seca del sustrato utilizado, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia biológica} = \frac{\text{Masa fresca del hongo}}{\text{Masa seca del sustrato}} \times 100$$



6.3.7.3 Análisis estadístico de selección de cultivo

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para cada configuración y la interacción con las demás con ayuda del programa *Statgraphics Centurion XVII*. Se hizo también un análisis de varianza (ANOVA) para relacionar la influencia de las configuraciones en la reducción de masa del proceso y en la eficiencia biológica de los sustratos. Con los resultados obtenidos se seleccionó la forma de cultivo más adecuada para su escalamiento.

6.3.8 Escalamiento del proceso de cultivo

Para el escalamiento, de acuerdo con el diseño de la metodología experimental (**Figura 6-2**) y con base en los resultados obtenidos al probar 5 formas de cultivo para *Pleurotus*, para el escalamiento se seleccionó el cultivo en bolsa cilíndrica ya que fue el que presentó mejores resultados y ventajas. La metodología de escalamiento utilizada, es la misma que la descrita en el apartado 6.3.2. Selección de la forma de cultivo, con el debido ajuste en masa para el escalamiento y algunas modificaciones realizadas a partir de la experiencia adquirida en dicho ensayo.

6.3.8.1 Diseño del escalamiento para el cultivo seleccionado

Para el escalamiento del proceso de cultivo, se realizó el diseño del experimento para el tratamiento de los pañales producidos por un niño en un mes que se presenta en la **Tabla 6-4**. Sólo se utilizaron pañales desechables de bebé conteniendo líquidos (orina), cuya separación se realizó in situ por el personal de las guarderías que los donaron (**Tabla 6-1**), para efectos de control fueron revisados al momento de su recepción en el laboratorio y posteriormente se refrigeraron hasta su acondicionamiento.

Como cosustratos se emplearon paja de trigo y pasto, se adquirió una paca de paja de trigo de 12 kg y el pasto fue de poda de áreas verdes. Se utilizaron bolsas de 5 kg, 65% pañal (3.25 K) y 35% cosustrato paja o pasto (1.75 K), con 40 unidades experimentales, para el cual se requirieron 130 kg de pañales usados que fueron inoculados con dos cepas de *Pleurotus ostreatus*, variedad gris BPR-81 y variedad blanca BPR-5. Como testigos se emplearon paja y de pasto, 5 unidades experimentales de cada uno.

Tabla 6-4 Diseño del escalamiento para el cultivo seleccionado

Diseño experimental							
Cepa BPR-81				Cepa BPR-5			
Con plástico		Sin plástico		Con plástico		Sin plástico	
65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*	65% pañal + 35% paja 5 ue*
Testigos: paja y pasto = 10 ue							
Total 50 ue							

*ue Unidades experimentales



6.3.8.2 Preparación de los sustratos

Para utilizar los sustratos, se requirió acondicionarlos por medio de los procesos de molienda, ajuste de humedad y esterilización.

Separación de plástico y molienda de los pañales

La molienda de los pañales se realizó en una astilladora marca Vermeer modelo BC 1000 XL (**Figuras 6-8 y 6-9**), este es un equipo que se utiliza para astillar troncos y ramas, de mayor capacidad y más eficiente que los molinos probados con anterioridad, pero que no estaba disponible cuando se realizaron las pruebas iniciales de molienda. Al igual que a la otra astilladora probada anteriormente a este equipo se le acopló una bolsa de Lycra® a la salida, para evitar que el material se dispersara durante la molienda. La paja y el pasto no requirieron de fragmentación.



Figura 6-8 Astilladora Vermeer



Figura 6-9 Pañales en la entrada de la astilladora

La preparación para las unidades experimentales sin plástico se realizó de forma manual, separándolo antes de molerlo, cortando la parte superior e inferior del pañal para retirar toda la parte interna del mismo (**Figura 6-10**).



Figura 6-10 Separación manual del plástico de los pañales



Ajuste de humedad

El ajuste de humedad de los sustratos al 60%, se realizó de la siguiente manera:

La paca de paja de trigo se pesó en seco, se dividió y colocó en recipientes para remojarla durante 24 horas con agua corriente (**Figura 6-11**). Posteriormente, se depositó en una bolsa de tela porosa para dejarla escurrir durante cinco horas. Se registró su masa después de escurrirla.



Figura 6-11 Paja en remojo

En el caso del pasto fue necesario secarlo bajo el sol (**Figura 6-12**) y posteriormente tamizarlo (**Figura 6-13**) ya que estaba mezclado con hojarasca y con tierra.



Figura 6-12 Secado de pasto



Figura 6-13 Tamizado del pasto

El pasto limpio se pesó y se le agregó agua para ajustar la humedad. La cantidad de agua agregada para las mezclas pasto/pañal fue del 875 g para 875 g de pasto seco, dando como resultado 1750 g de pasto húmedo. La cantidad de agua adicionada al pasto para las mezclas fue menor porque los pañales contenían humedad de la orina.



Para los testigos se adicionaron 2750 g de agua y 2250 g de pasto seco para completar los 5 kg de las unidades experimentales.

Para verificar la humedad inicial se tomaron muestras cada uno de los sustratos y se mezclaron para obtener una muestra compuesta a la que se le midió el contenido de humedad.

Para las mezclas se pesaron 1750 g de cada cosustrato (paja o pasto) en masa húmeda y 3250 g de pañal (**Figuras 6-14 y 6-15**).

Los cosustratos y el pañal se mezclaron, por separado, y se homogeneizaron manualmente (**Figura 6-16**).

Se midió el volumen del sustrato en un recipiente de acero inoxidable con medidas 39.5 x 54 x 38.5 cm. En la **Figura 6-17** se muestra el recipiente utilizado para medir el volumen del cosustrato inicial.

Posteriormente los sustratos se empacaron en bolsas de polipapel para someterlos a esterilización (**Figura 6-18**).



Figura 6-14 Pesaje del cosustrato paja



Figura 6-15 Pesaje del cosustrato pasto



Figura 6-16 Mezclado manual del cosustrato con el pañal



Figura 6-17 Recipiente con el que se midió volumen



Figura 6-18 Bolsas con cosustrato y pañal para esterilizar



Esterilización

Las bolsas con los diferentes sustratos se esterilizaron durante 1 hora en una autoclave vertical modelo CV-300 a 121°C. Para verificar el proceso se colocaron 2 cm de cinta indicadora, posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se refrigeraron hasta el momento de la siembra.

6.3.8.3 Siembra

Las dos cepas de *Pleurotus ostreatus*, variedad gris BPR-81 y variedad blanca BPR-5 que se utilizaron para inocular los sustratos se obtuvieron comercialmente. La siembra se llevó a cabo en un área estéril, utilizando una campana de flujo laminar vertical. En cada unidad experimental se colocaron 5 kg de los sustratos pañal-paja o pañal-pasto, o de los testigos paja o pasto, pesados en una báscula marca ADAM modelo QBW-30. Posteriormente se inocularon con 500 g de semilla de sorgo invadida con micelio de las dos variedades de *P. ostreatus* (Figura 6-19), según el diseño experimental.

Se utilizaron bolsas de polietileno de 51.7 cm de largo x 18.2 cm de ancho, que al llenarse tomaban forma cilíndrica (Figura 6-20). Se limpió cada bolsa con alcohol etílico comercial y se colocó una capa de sustrato distribuyéndolo en el fondo. En seguida, se esparció el micelio sobre la capa de sustrato, alternando una capa de sustrato y una capa de micelio. Una vez que se terminó de sembrar, cada bolsa se cerró con un nudo en la parte superior sin dejar aire y se registró la masa.



Figura 6-19 Pesaje de micelio



Figura 6-20 Forma cilíndrica de bolsas

6.3.8.4 Unidades experimentales

Se realizaron 5 réplicas para cada condición experimental. La codificación para cada una de las unidades experimentales se muestra en la Tabla 6-5 que incluye primero el color de la variedad de la cepa utilizada blanca (B) o gris (G), el sustrato paja (JA) o pasto (TO) la presencia o ausencia de plástico (CP o SP) y el número de réplica correspondiente.



Tabla 6-5 Codificación de Unidades Experimentales

<i>Pleurotus ostreatus</i> Variedad Blanca BPR-5	Sustrato	<i>Pleurotus ostreatus</i> Variedad Gris BPR-81
BJASP-1	Paja sin plástico 1	GJASP-1
BJASP-2	Paja sin plástico 2	GJASP-2
BJASP-3	Paja sin plástico 3	GJASP-3
BJASP-4	Paja sin plástico 4	GJASP-4
BJASP-5	Paja sin plástico 5	GJASP-5
BJACP-1	Paja con plástico 1	GJACP-1
BJACP-2	Paja con plástico 2	GJACP-2
BJACP-3	Paja con plástico 3	GJACP-3
BJACP-4	Paja con plástico 4	GJACP-4
BJACP-5	Paja con plástico 5	GJACP-5
BJAT-1	Testigo paja 1	GJAT-1
BJAT-2	Testigo paja 2	GJAT-2
BJAT-3	Testigo paja 2	GJAT-3
BJAT-4	Testigo paja 2	GJAT-4
BJAT-5	Testigo paja 2	GJAT-5
BTOSP-1	Pasto sin plástico 1	GTOSP-1
BTOSP-2	Pasto sin plástico 2	GTOSP-2
BTOSP-3	Pasto sin plástico 3	GTOSP-3
BTOSP-4	Pasto sin plástico 4	GTOSP-4
BTOSP-5	Pasto sin plástico 5	GTOSP-5
BTACP-1	Pasto con plástico 1	GTOCP-1
BTACP-2	Pasto con plástico 2	GTOCP-2
BTACP-3	Pasto con plástico 3	GTOCP-3
BTACP-4	Pasto con plástico 4	GTOCP-4
BTACP-5	Pasto con plástico 5	GTOCP-5
BTOT-1	Testigo pasto 1	GTOT-1
BTOT-2	Testigo pasto 2	GTOT-2
BTOT-3	Testigo pasto 3	GTOT-3
BTOT-4	Testigo pasto 4	GTOT-4
BTOT-5	Testigo pasto 5	GTOT-5

6.3.8.5 Fase oscura

Las unidades experimentales sembradas se colocaron en el cuarto oscuro sobre un anaquel metálico (**Figura 6-21**) para iniciar la invasión del micelio en el sustrato.

Después de cinco días de incubación se perforaron las bolsas (en condiciones estériles) para permitir el intercambio de CO_2 . Se usaron tijeras desinfectadas con alcohol y mechero. Se realizaron ocho perforaciones en cada unidad experimental (**Figura 6-22**).

Una vez que el micelio colonizó el sustrato de tal manera que ya no se distinguía ni su aspecto ni su coloración inicial y se veía como una masa compacta de superficie homogénea blanco - algodónosa (**Figura 6-23**), las bolsas se colocaron en condiciones de luz, para que se iniciara la fructificación.



Figura 6-21 Distribución de las unidades experimentales

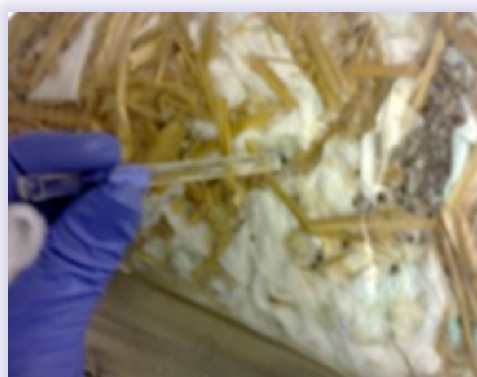


Figura 6-22 Perforación de bolsas



Figura 6-23 Sustrato colonizado por el micelio

6.3.8.6 Fase luminosa

Al término de la fase oscura las unidades experimentales se trasladaron a las instalaciones para la fase luminosa. Para permitir tanto el crecimiento adecuado de los hongos como para el intercambio de CO_2 las bolsas de polietileno se cortaron dejando únicamente 4 tiras a los costados para dar soporte al sustrato (**Figura 6-24**). Para facilitar el riego se diseñó y colocó un sistema con una manguera perforada en la parte superior de los estantes.



a) paja



b) pasto

Figura 6-24 Unidades experimentales en la fase luminosa:

Las unidades experimentales que contenían cosustrato pasto o paja más pañal sin plástico se colocaron dentro de una red (**Figura 6-25**) para evitar que la pérdida de sustratos.

Cuando se desarrollaron los cuerpos fructíferos, éstos se cortaron seleccionando los más grandes y dejando los pequeños, para permitir que aumentaran su tamaño y masa en los días posteriores (**Figura 6-26**).



Figura 6-25 Unidad experimental en red



Figura 6-26 Hongos listos para cosechar

Para cortar los hongos maduros se utilizó una navaja desinfectada y se tomó el hongo o racimo de la parte más baja, jalándolo para desprenderlo y teniendo cuidado de no desprender el sustrato. Posteriormente se pesó en una balanza analítica OHAUS modelo CS 5000 (**Figura 6-27**) y registró su masa.



Figura 6-27 Masa del hongo cosechado

Durante todo el proceso, fase oscura y luminosa, se monitorearon la temperatura y humedad ambientales con una USB registrador de datos con 18 lecturas por día. El CO_2 se midió cada tercer día con una interfase LabQuest de Vernier.

6.3.8.7 Evaluación del proceso

La evaluación del proceso se realizó a través de la reducción de masa, la reducción de volumen y la eficiencia biológica tal, y como se describen en la sección 6.3.7. Adicionalmente se realizó la cuantificación de materiales no degradados como se describe a continuación.

Cuantificación de materiales residuales no degradados

Al finalizar el tiempo del cultivo, las unidades experimentales se dejaron secar a temperatura ambiente y una vez secas se separaron, manualmente, los materiales residuales, como restos de los diferentes componentes del pañal y los cosustratos, los que pudieron separarse se pesaron para determinar su porcentaje de degradación.

6.3.8.8 Análisis estadístico para el escalamiento del proceso de cultivo

Se realizó un análisis estadístico con el programa *Statgraphics Centurion XVII* para determinar qué cosustrato y qué variedad de *Pleurotus ostreatus* presentó mejores resultados en términos de degradación.

6.3.9 Comparación de los parámetros utilizados en los dos experimentos de cultivo

Con el fin de establecer claramente las diferencias entre las condiciones experimentales de los dos ensayos con el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, se realizó una comparación de los parámetros utilizados en el cultivo a nivel laboratorio y a mediana escalas.



Tabla 6-6 Comparación de parámetros en los experimentos de cultivo

Parámetro	Laboratorio	Mediana escala
Molienda	Astilladora Beer & Cat	Astilladora Vermeer BC 1000
Forma de cultivo	Bolsa cilíndrica, malla cilíndrica, bolsa tradicional, estructura de PVC	Bolsa cilíndrica
Tamaño UE	1 kg	5 kg
Esterilización	Autoclave 15 minutos	Autoclave 30 minutos
Variedad del hongo	<i>Pleurotus ostreatus</i> BPR-81	<i>Pleurotus ostreatus</i> BPR-81 <i>Pleurotus ostreatus</i> BPR-5
Tipo de pañal usado	Nuevo de merma de fabricación	Usados sólo con orina
Cosustrato(s)	Paja	Paja y pasto

6.4 Etapa 3. Degradación por composteo

La evaluación de la degradación de pañales por composteo se retomó el trabajo realizado por Sotelo en 2014, en el que se realizó la metodología experimental que se ilustra en la **Figura 6-28**. El proceso se llevó a cabo mediante biorreactores de 200 L, empleando residuos de jardinería con pañal y sin pañal como sustrato.

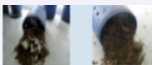
Sustratos	Caracterización	Biorreactores	Monitoreo	Producto final
- Pañal - Hoja seca - Hoja fresca - Pasto - Mulch	- pH - Nitrógeno total - Cenizas - Materia orgánica - Relación C/N - Humedad	 con pañal sin pañal 	- pH - Nitrógeno total - Cenizas - Materia orgánica - Relación C/N - Humedad - Temperatura - CO₂ - Microbiológicos	- Tamizado  - Cuantificado de pañales no degradados - Calidad - pH - Humedad - Materia orgánica - Nitrógeno total - Relación C/N - Coliformes totales (Número más probable) - Coliformes fecales (Número más probable) - Mesófilas aerobias (Unidades formadoras de colonias)

Figura 6-28 Metodología experimental para el composteo (Adaptado de Sotelo, 2014)

Para el composteo se emplearon pañales desechables conteniendo sólo orina y residuos de jardinería de la UAM-A. Se montaron 4 biorreactores aerobios, a los cuales se introdujeron los residuos perfectamente mezclados, en las siguientes proporciones: 55% pasto, 10% hojas



frescas, 5% de hojas secas y 30% de mulch para los testigos y a los otros dos biorreactores se les agregó un 30 % en masa de pañal usado triturado. La duración de la prueba fue de 3 meses.

El proceso fue monitoreado a través de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Al concluir el composteo se evaluó la calidad de la composta obtenida, se determinó la reducción de masa y volumen y se cuantificó la cantidad de residuos de pañal no degradados, para conocer el porcentaje de degradación de pañales.

6.5 Etapa 4. Comparación de resultados y propuesta metodológica

Esta etapa se dividió en tres fases: a) comparación de los resultados de los procesos de cultivo y composteo, b) diseño de la planta a mediana escala para la degradación de pañales y c) elaboración del manual de procedimientos.

a) Comparación de resultados de los procesos

Para la comparación de los resultados de la degradación de pañales obtenidos tanto por el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, como por el composteo en biorreactores, que permitiera seleccionar el proceso más eficiente, se evaluaron los siguientes aspectos cualitativos y cuantitativos:

- Eficiencia de degradación de pañales, medida como el porcentaje de reducción en masa
- Insumos requeridos
- Acondicionamiento: forma de preparación de los sustratos, molienda, ajuste de humedad y esterilización
- Operación: montaje, control de condiciones ambientales, monitoreo, riego y volteo
- Infraestructura: necesidades de equipo y material, instalaciones y mobiliario
- Tiempos de degradación y duración del proceso
- Productos finales: cantidad y calidad de los productos finales de cada proceso
- Materiales residuales: composición y cantidad

Con base en los resultados obtenidos se realizó un resumen de las ventajas y desventajas de ambos procesos, considerando los parámetros más relevantes, para seleccionar el proceso más eficiente que fue el que se consideró para el diseño de la planta.

b) Propuesta metodológica para el diseño de la planta a mediana escala

Después de seleccionar el proceso más eficiente para degradar pañales desechables usados, éste se utilizó para realizar el diseño de una planta para tratar la masa de pañales con orina, que 100 niños de entre cero y dos años, generan en un mes.

El diseño se conformó de los siguientes elementos:

Descripción del proceso: recepción y acopio de residuos, acondicionamiento de residuos, proceso de degradación, acondicionamiento final y evaluación de la calidad del producto obtenido.

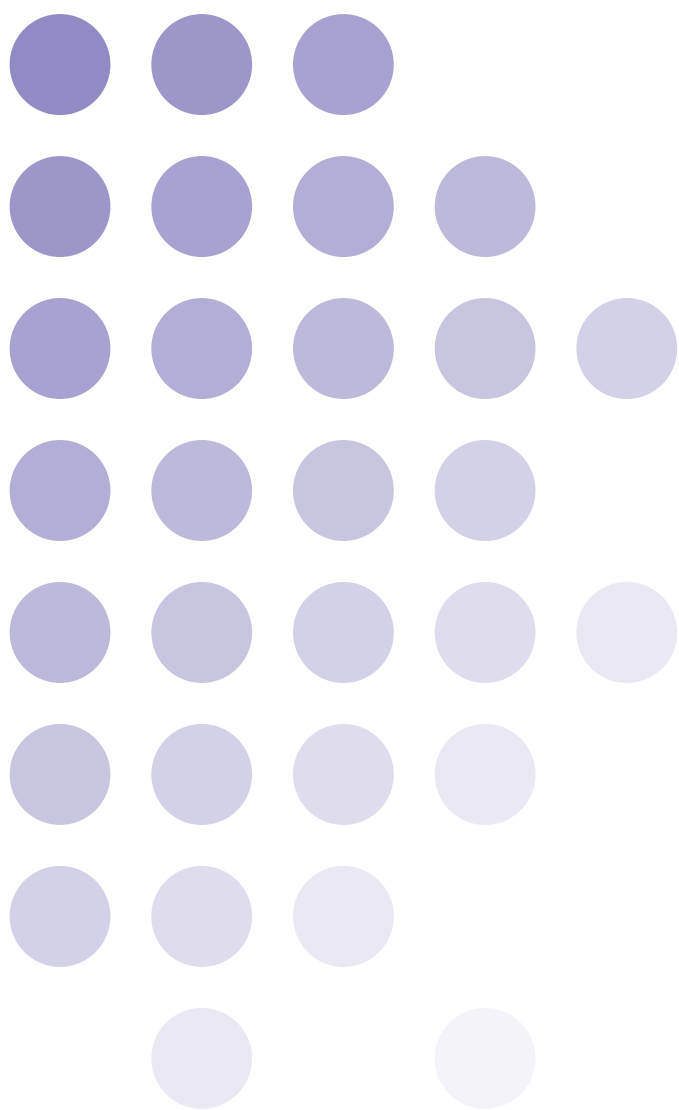


Diseño de la planta: capacidad, distribución, incluyendo dimensiones y necesidades de equipo e infraestructura.

Organización: administración de la planta, necesidades de personal, horario.

c) Manual de procedimientos

El manual se elaboró para proporcionar una descripción detallada de los procedimientos, que permitan que la planta opere de manera adecuada.



Resultados

7. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación se presentan en cuatro etapas de acuerdo con el diseño establecido.

7.1 Etapa 1. Cálculo de la masa de pañales para el escalamiento de los procesos

Para la determinar la masa de pañales con orina producidos por un niño se realizaron diferentes actividades cuyos resultados se presentan a continuación.

7.1.1 Acopio de información sobre uso de pañales

Las respuestas a las solicitudes de apoyo que se dirigieron a las autoridades de las guarderías para conocer el número de pañales empleados por infantes de 0-2 años, así como para obtener muestras para determinar su masa promedio, fueron positivas en todos los casos. La recolección de pañales y su traslado al laboratorio se realizó del 8 al 12 de abril del 2013.

De las 600 encuestas entregadas se recibieron 116 contestadas por parte de los padres de familia usuarios de las guarderías., lo cual quiere decir que se obtuvo respuesta del 20% de los padres de familia. La información obtenida sobre el número de pañales usados por un niño diariamente se presenta en la **Figura 7-1**. De acuerdo con estos datos se obtuvo que los niños entre 1 y 24 meses usan en promedio 6.9 pañales al día. Los datos completos obtenidos de las encuestas se presentan en el **ANEXO A**.

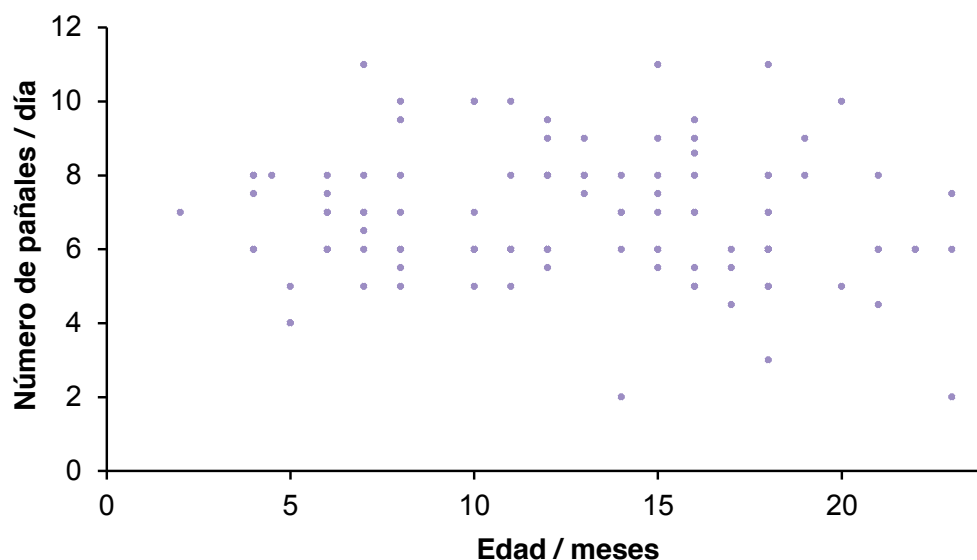


Figura 7-1 Número de pañales usados/ niño/ día

Para conocer el número de pañales con orina, se usaron los datos de la encuesta y se restaron del total empleados por niño por día, la diferencia corresponde al número de pañales con eva-



cuaciones. Los resultados muestran que de los 6.9 pañales que en promedio usan los niños al día, 4.6 son pañales sólo con orina y 2.3 con evacuaciones (**Figura 7-2**).

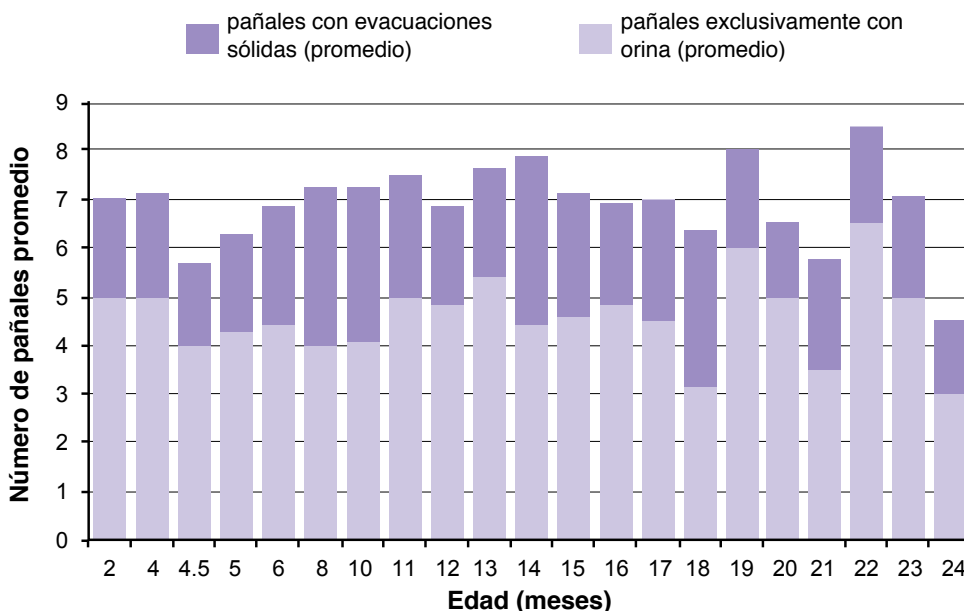


Figura 7-2 Número de pañales/ niño/ día y proporción de ellos con orina o con materia fecal

7.1.2 Masa de los pañales y análisis de datos

La masa total de pañales con orina acopiados fue de 236 kg, provenientes de las salas de lactantes y maternal, con niños cuyas edades van de 40 días a 2 años y corresponden a los cinco días de la recolección. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 7-1**.

Los datos obtenidos de los 10 pañales elegidos al azar por sala, para determinar la masa promedio por pañal se muestran de manera resumida en la **Tabla 7-2**. Puede observarse una correlación clara entre la edad y la masa promedio de los pañales, derivada tanto del tamaño mayor de los mismos como del volumen más alto de orina generada. Los datos completos por sala se muestran en el **ANEXO A**.

De acuerdo con estos resultados la masa promedio de los pañales es de 101.7 gramos valor mucho menor si se compara con el reportado de 210 gramos (ENT, 2007). Esta importante diferencia puede deberse al origen de las muestras analizadas, ya que en este estudio se obtuvieron de guarderías mientras que en el otro estudio fueron muestras del sistema de recolección municipal, que incluían pañales tanto con orina, como con materia fecal. Por otro lado también puede considerarse que al estar en las guarderías los cambios son más frecuentes, ya que existen horarios programados para esto, por lo que la cantidad de orina en los pañales es menor, por lo tanto pesan menos. En contraste, en los hogares se trata de aprovechar la máxima capacidad de absorción de los pañales realizando la menor cantidad de cambios posibles.



Tabla 7-1 Masa total de pañales recolectados por tipo de sala

Sala	Masa (kg)	Sala	Masa (kg)	Sala	Masa (kg)
Lactantes	2.56	Lactantes	4.28	S/Sala	2.21
Lactantes	1.14	Lactantes	2.39	S/Sala	15.67
Lactantes	1.03	Lactantes	4.26	S/Sala	5.80
Lactantes	2.50	Lactantes	5.71	S/Sala	2.12
Lactantes	0.90	Lactantes	2.85	S/Sala	1.90
Lactantes	1.47	Lactantes	4.51	S/Sala	5.52
Lactantes	1.29	Lactantes	4.40	S/Sala	1.91
Lactantes	0.41	Lactantes	3.51	S/Sala	1.21
Lactantes	4.18	Maternal	4.21	S/Sala	4.76
Lactantes	4.68	Maternal	0.94	S/Sala	4.94
Lactantes	1.19	Maternal	2.23	S/Sala	4.57
Lactantes	1.99	Maternal	4.45	S/Sala	3.40
Lactantes	3.96	Maternal	3.70	S/Sala	6.68
Lactantes	2.75	Maternal	2.87	S/Sala	4.95
Lactantes	3.10	Maternal	5.72	S/Sala	2.76
Lactantes	2.04	Maternal	1.36	S/Sala	6.34
Lactantes	1.70	Maternal	1.12	S/Sala	3.34
Lactantes	3.85	Maternal	2.77	S/Sala	2.63
Lactantes	5.97	Maternal	1.21	S/Sala	5.62
Lactantes	2.12	Maternal	0.83	S/Sala	2.06
Lactantes	1.77	Maternal	0.74	S/Sala	5.53
Lactantes	2.33	S/Sala	1.06	S/Sala	4.20
Lactantes	5.09	S/Sala	2.19	S/Sala	12.90
Total 236.3 k					

*S/Sala: pañales sin sala de procedencia identificada

Tabla 7-2 Masa promedio de pañales con orina por tipo de sala

Tipo de sala	Rango de edad	Masa promedio / pañal
Lactante	45 días - 1 año	89.5 g $\pm$ 20.07
Maternal	1 año - 2 años	119.0 g $\pm$ 24.6
S/Sala	45 días - 2 años	96.5g $\pm$ 19.5



7.1.3 Cálculo base para el escalamiento

En promedio un niño genera 6.9 pañales al día de los cuales 4.6 (el 66.6%) contienen sólo orina y 2.3 contienen evacuaciones (33.3%), esto significa que la mayor proporción de los pañales generados corresponden a orina. Con base en esta consideración y de acuerdo con los objetivos planteados inicialmente, los cálculos para el escalamiento se realizaron empleando los datos de pañales sólo con orina, este cálculo se presenta en la **Tabla 7-3**.

Tabla 7-3 Cálculo para el escalamiento

Parámetro	Valor
Promedio de pañales / día / niño	6.9
Promedio de pañales con orina / día / niño	5
Masa promedio de pañales con orina	101.7 g
Masa promedio de pañales con orina / niño / día	508.5 g
Masa promedio de pañales con orina / niño / mes	15,255 g

De acuerdo a los resultados obtenidos un niño genera por mes 15.255 kg de pañales con orina, por lo que, de acuerdo con los objetivos de este trabajo, se requiere diseñar un sistema que pueda tratar esa cantidad de pañales.

7.2 Etapa 2. Degradación por cultivo de *Pleurotus*

En esta etapa primero se realizaron las pruebas para seleccionar los parámetros para realizar el escalamiento y el equipo más adecuado para la molienda del pañal. Posteriormente se ensayaron cinco diferentes formas de cultivo de *Pleurotus ostreatus* y con base en los resultados obtenidos se realizó el escalamiento del cultivo.

7.2.1 Molienda

Los resultados de las pruebas de molienda realizadas en los tres equipos disponibles utilizando pañales desechables usados y pañales de merma se presentan a continuación.

7.2.1.1 Pruebas con pañales desechables usados

Molino de martillos

La molienda en el molino de martillos fue poco eficiente, el aspecto y conformación de los pañales después de su procesamiento en el molino no varió de manera significativa, incluso se observó que algunos pañales salieron del molino enteros, sin mostrar fragmentación, como se observa en la **Figura 7-3**. En otros casos algunos pañales se desgarraron un poco, también se observó que los plásticos se atoraban mucho en el cabezal del equipo.



Figura 7-3 Pañal triturado en el molino de martillos

El resultado de la molienda en este equipo es hasta cierto punto esperado, ya que este molino está diseñado para otro tipo de materiales; sin embargo es un equipo con el que se cuenta y en el que ya se había realizado algunas pruebas anteriormente.

Molino de aspas

La molienda realizada en el molino de aspas fue un poco mejor que la obtenida con el molino de martillos, sin embargo, la fragmentación del pañal tampoco fue eficiente ya que los pañales mostraron resultados muy heterogéneos, algunas partes se molían pero otras sólo se rasgaban y forman tiras (**Figura 7-4**).



Figura 7-4 Pañal triturado en el molino de aspas

A pesar de haber molido el pañal al menos tres veces se observó que el chasis² salía apenas rasgado. Lo anterior puede deberse a que el diseño del equipo no permite que el material permanezca el tiempo suficiente en contacto con las aspas para tener una molienda más homogénea.

² El término chasis se refiere al cuerpo del pañal elaborado con película de polietileno, fibra de polipropileno y elásticos, excluyendo el cuerpo de celulosa.



Astilladora

Este equipo presentó un mejor desempeño en la molienda. Cabe resaltar que esta astilladora se encontraba en mejor estado que los otros molinos y que las cuchillas estaban afiladas, sin que esto sea la razón de su eficiencia, más bien se debe al tipo de cuchillas y al diseño mismo del equipo. Además, las dimensiones y conformación de este equipo permiten que el pañal entre en contacto directo con el mecanismo de cuchillas logrando una reducción del tamaño inicial. Sin embargo, los trozos más largos midieron aún 20 cm de largo y 5 cm de ancho. En la **Figura 7-5** se muestran algunos ejemplos de los trozos, y se observa que la molienda no separó los componentes.



Figura 7-5 Aspecto de la celulosa (izquierda) y del chasis (derecha), del pañal triturado en la astilladora

7.2.1.2 Pruebas con pañales de merma

Después de evaluar la molienda en los equipos descritos y al no obtener el tamaño deseado al final del proceso, se decidió realizar una segunda prueba. Para ello se empleó el pañal resultado de la merma de proceso, debido a su disponibilidad y a la necesidad de realizar muchas pruebas en un periodo corto de tiempo.

En esta etapa los pañales semitriturados que se adquirieron, se molieron por segunda vez en la astilladora, con algunas modificaciones en el proceso; el material se dispersó y se introdujo manualmente en el equipo, permitiendo que recirculara en el mecanismo de cuchillas durante 5 o 10 segundos. Para impedir que el material se dispersara durante la molienda y saliera disparado del equipo, se acopló una bolsa de Lycra® a la salida del mismo, que se vaciaba cada vez que se llenaba de material molido (**Figura 7-6**).



Figura 7-6 Molienda de pañal de merma



En la **Figura 7-7** se observa la distribución de tamaños de los trozos de chasis y el aspecto de la celulosa. El material triturado presentó una textura más homogénea y una reducción de tamaño favorable para la siembra.

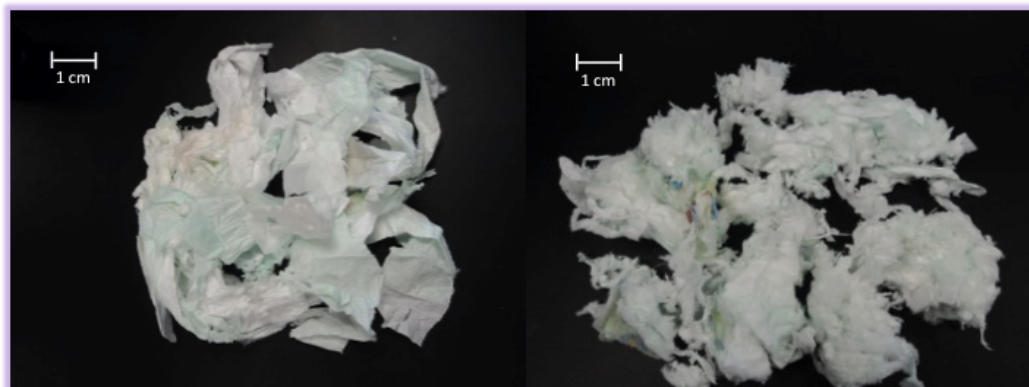


Figura 7-7 Aspecto de material antes (izquierda) y después (derecha) de la molienda

En la **Figura 7-8**, se aprecia que antes de la molienda en la bolsa quedaron espacios vacíos en algunas partes y el material se encontraba más disperso. El material después de la molienda alcanzó un volumen ligeramente mayor, ya que la celulosa se esponjó durante el proceso. A pesar de que el volumen se incrementó, fue más fácil compactar manualmente el material triturado.



Figura 7-8 Volumen del material antes (izquierda) y después (derecha) de la molienda

La masa inicial de material de merma fue de 59.33 kg y la masa al finalizar la molienda fue de 56.20 kg. Las pérdidas totales fueron de 3.13 kg lo que representa el 5 % de la masa inicial y están asociadas principalmente a la fuga en el momento del cambio de la bolsa y, en menor proporción, a los restos adheridos en la parte interna de la máquina.

La cantidad de gasolina que consumió la trituradora fue aproximadamente 3 L durante cuatro horas continuas. La velocidad de trabajo alcanzó los 10 kg de pañal de merma por hora. A partir de este resultado se decidió utilizar la astilladora para los procesos posteriores de molienda.



7.2.2 Formas de cultivo

La búsqueda de diferentes formas de cultivo incluyó la selección de materiales sencillos, disponibles, prácticos e incluso reutilizables, para probar el más eficiente en la degradación de los pañales por el cultivo de *Pleurotus*.

7.2.2.1 Unidades experimentales

Las cinco formas de cultivo utilizadas fueron: bolsas cilíndricas, redes cilíndricas, bolsas rectangulares, tubos de PVC y charolas de plástico, se consideraron cinco unidades experimentales de cada tipo, que se prepararon conforme se describe en la metodología.

7.2.3 Preparación del sustrato paja pañal

El sustrato se preparó con el 65% de pañal de merma y 35 % de paja de trigo en masa seca. Durante el acondicionamiento se obtuvieron los siguientes resultados.

7.2.3.1 Ajuste de humedad

Paja

La masa seca de la paja fue de 4 kg y la masa final húmedo fue de 13.622 kg, esto representa un contenido de 70.63% de humedad final en la paja. La cantidad de paja utilizada se estableció de acuerdo al volumen ganado después del remojo y el volumen requerido para el envasado. Se trabajó con las dos quintas partes de la paca inicial (4.8 kg de paja seca) y a partir de esta cantidad se calculó la cantidad de pañal requerida para obtener una relación pañal-paja de 65%-35% en masa seca. Para 4.8 kg de paja seca (que equivalen a 11.544 kg de paja húmeda) se requirió 8.914 kg de pañal seco.

Pañal

La cantidad necesaria de pañal seco se dividió en dos lotes iguales y la humedad del material triturado se ajustó rociando pequeñas cantidades de agua para homogenizar la textura de la celulosa. En el primer lote se mezclaron 23.855 kg de agua con 4.456 kg de pañal y en el segundo lote se agregaron 23.561 kg de agua a 4.456 kg de pañal. Al final de este acondicionamiento, la humedad del pañal fue de 84.17%.

El cálculo para el ajuste de humedad se realizó de manera teórica, sin embargo dada la heterogeneidad de los pañales desechables es muy complicado lograr una humedad uniforme, hay partes de los pañales muy húmedas y otras totalmente secas, esto también está en función de la cantidad de superabsorbente que contenga el pañal y del contenido inicial de humedad en el mismo, por eso esta operación se realiza de acuerdo a cómo se observe la consistencia del material.

Lo que se busca es tener una consistencia que a simple vista no tenga partes secas, debe sentirse mojado al tacto, si se aprieta con la mano no debe escurrir líquido y sobre todo debe mezclarse bien para que si se lixivia el agua se absorba por la celulosa y no

se formen “bolsas de agua” en el fondo por la acumulación de gel superabsorbente. En general es recomendable no agregar agua sobre el gel, a menos que el pañal esté seco.

7.2.3.2 Esterilización

El proceso de esterilización se llevó a cabo adecuadamente, en todos los casos las cintas indicadoras de condiciones estériles dieron positivo. La humedad del sustrato completo antes de la esterilización fue del 81.13% y el porcentaje de humedad final a la salida de la autoclave fue del 81.62%. Las bolsas esterilizadas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se colocaron en refrigeración hasta el momento de la siembra. Cabe mencionar que al refrigerar las muestras mezcladas y húmedas, pierden agua por escurrimiento, permitiendo que la humedad final de la mezcla sea cercana al 60 %.

En la **Figura 7-9**, se muestra el desarrollo completo del proceso de acondicionamiento de los sustratos, así como la composición después de cada operación.

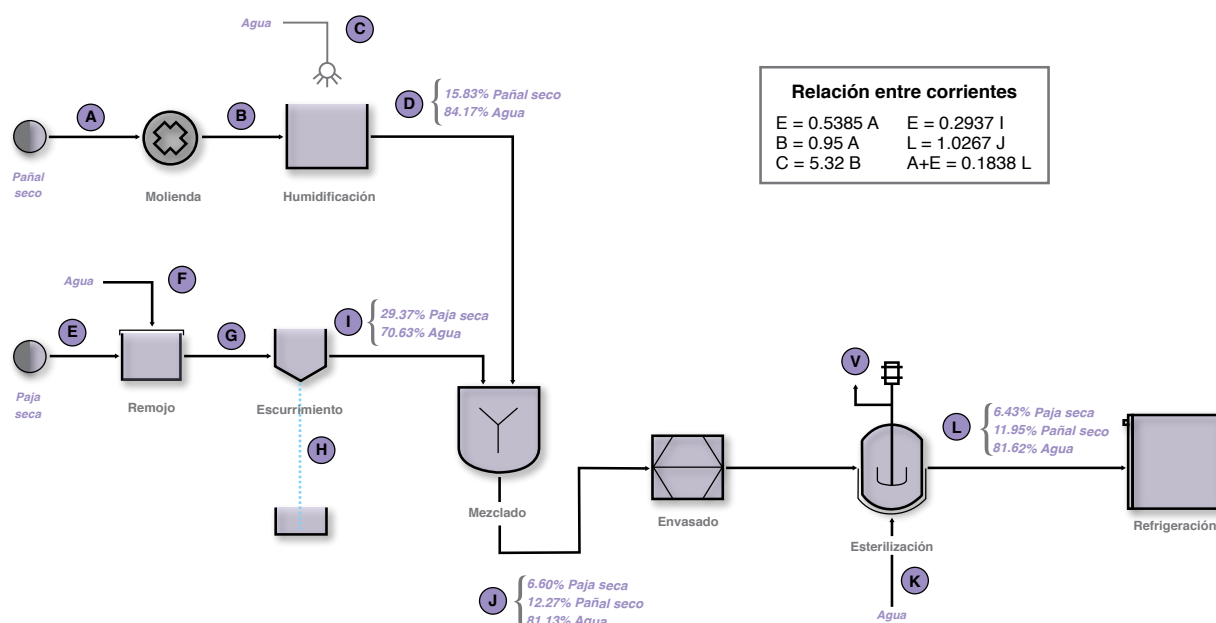


Figura 7-9 Diagrama de flujo del proceso de acondicionamiento del sustrato

Dónde:

- | | |
|--|--|
| A: masa de pañal seco | H: masa de agua escurrida |
| B: masa después de la molienda | I: masa final de la paja, escurrida |
| C: masa del agua adicionada al pañal | J: masa de la mezcla de paja y pañal húmedos |
| D: masa final del pañal húmedo | K: masa ganada por la esterilización de la mezcla |
| E: masa de la paja seca | V: vapor de agua |
| F: masa del agua adicionada a la paja | L: masa final del sustrato mezclado |
| G: masa final de paja con agua | |



7.2.4 Siembra

Después de siete días de refrigeración, se observó que una parte de la humedad del sustrato se había condensado en el fondo de cada bolsa, por lo que fue necesario determinar el contenido de la humedad de tres muestras del sustrato final a fin de evaluar las condiciones para la siembra. Se pesaron 7.43 g de sustrato y se introdujeron en una estufa marca RIOSA a 60 °C hasta masa constante, la humedad fue del 62.85 %.

El proceso de siembra se realizó el mismo día para todas las unidades experimentales, en condiciones estériles, las masas obtenidos después de la siembra fueron de 1050 g, correspondientes a 1000 g de sustrato y 50 g de semilla de *Pleurotus ostreatus* BPR-81.

7.2.5 Fase oscura

Las bolsas se revisaron cada tres días para verificar si había contaminación, la fase se dio por concluida cuando la mayor parte de las bolsas presentaron invasión del sustrato (Figura 7-10).



Figura 7-10 Unidades experimentales invadidas por el micelio

Esta fase duró 27 días durante los cuales se registró la temperatura y humedad del cuarto oscuro, verificándose la existencia de condiciones adecuadas para el cultivo. El promedio de la temperatura ambiental fue de 20 °C. El rango de temperatura recomendable para esta cepa es de 25°C - 30 °C para esta fase, lo que indica que en general la temperatura se mantuvo por debajo de los valores recomendados.

En las tardes se presentó el mayor % de humedad, debido a la evaporación del agua que se regaba. Los valores recomendados para este parámetro están entre 50 y 70 %; puede observarse que no siempre se alcanzaron las condiciones deseadas.

7.2.6 Fase luminosa y fructificación

Entre el 3er. y 5to. día de estar en la fase luminosa aparecieron los primeros cuerpos fructíferos (Figura 7-11) y el día 22 se realizó la primera cosecha (Figura 7-12).



Figura 7-11 Aparición de primeros cuerpos fructíferos



Figura 7-12 Cuerpos fructíferos listos para la cosecha

Durante el cultivo se realizaron varias cosechas, en la **Tabla 7-4** se muestra el número de cosechas que se realizó en cada forma de cultivo.

Tabla 7-4 Número de cosechas en los diferentes cultivos

Forma de cultivo	Bolsa cilindro	Cilindro red	Bolsa tradicional	Tubo de PVC	Charola de plástico
Número de cosechas en cada réplica	5	3	4	3	3
	4	4	5	2	4
	4	5	3	2	1
	5	5	2	2	6
	3	3	3	-	1
Promedio	4.2	4	3.4	2.25	3



Los cultivos de tubería de PVC, charolas de plástico y red cilindro, que tuvieron una mayor área de contacto directo con el ambiente, presentaron mayor contaminación de color negro. A manera de control y con ayuda de una navaja desinfectada, se retiraron las partes del sustrato que mostraban mayor contaminación.

En la **Figura 7-13** se muestra el registro de la temperatura en el periodo de la fase luminosa, todos los puntos describen el comportamiento de la temperatura durante el día. El promedio de la temperatura fue de 19.22 °C con una desviación estándar de 1.75, que se encuentra dentro del rango óptimo de temperatura, 15-19 °C.

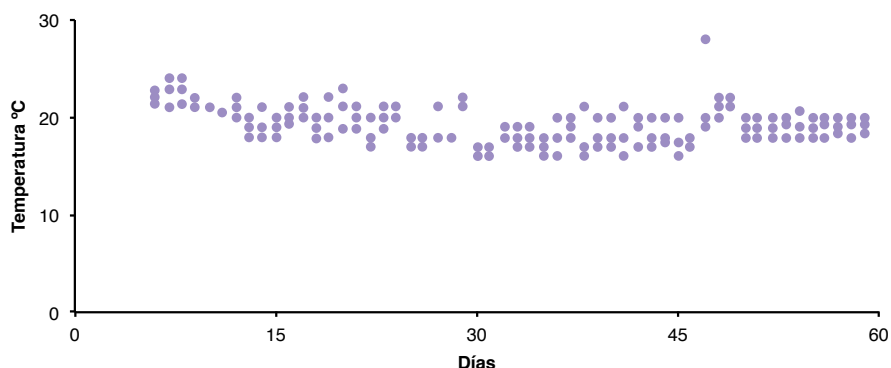


Figura 7-13 Temperatura en la fase luminosa

Las variaciones de humedad durante la fase luminosa se muestran en la **Figura 7-14** se observa que por las mañanas la humedad oscilaba entre 60 % y 66 %, pero conforme avanzaban las horas, la humedad aumentaba en algunos casos hasta el 100 %. Por lo que, al finalizar del día se dejaba la puerta abierta durante la noche, para permitir la ventilación del cuarto. El porcentaje promedio de humedad registrado fue del 85% con una desviación estándar de 1.82, que se encuentra dentro del rango óptimo de 85-90%.

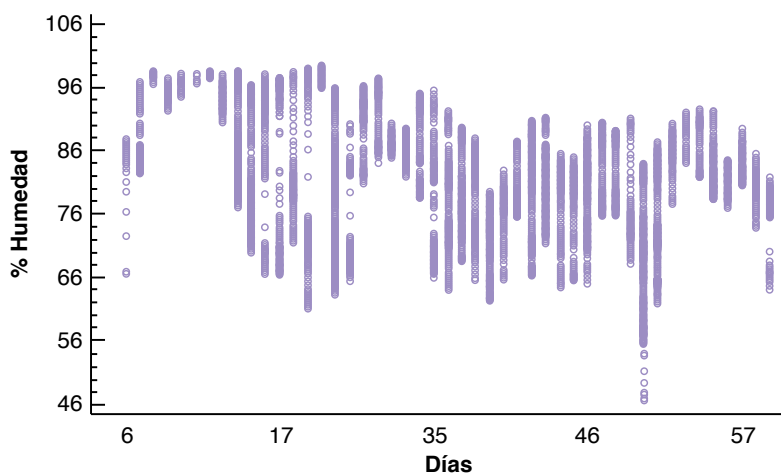


Figura 7-14 Humedad ambiental en la fase luminosa



7.2.7 Evaluación del proceso

La evaluación del proceso se realizó a través de la reducción de masa del sustrato utilizado y de la eficiencia biológica en los cinco formas de cultivo.

7.2.7.1 Reducción de masa

Al concluir la fase luminosa se pesaron todas las réplicas de las diferentes formas de cultivo. En la **Figura 7-15** se muestra el porcentaje de reducción en masa seca en el sustrato paja-pañoal. Los resultados obtenidos se encuentran entre 60.5 % y 48.7 %, siendo el valor más alto para la bolsa tradicional, seguido del tubo de PVC con 57.7 %, después la bolsa-cilindro red y charolas de plástico con 53.3% y por último la bolsa cilindro con 48.7 %.

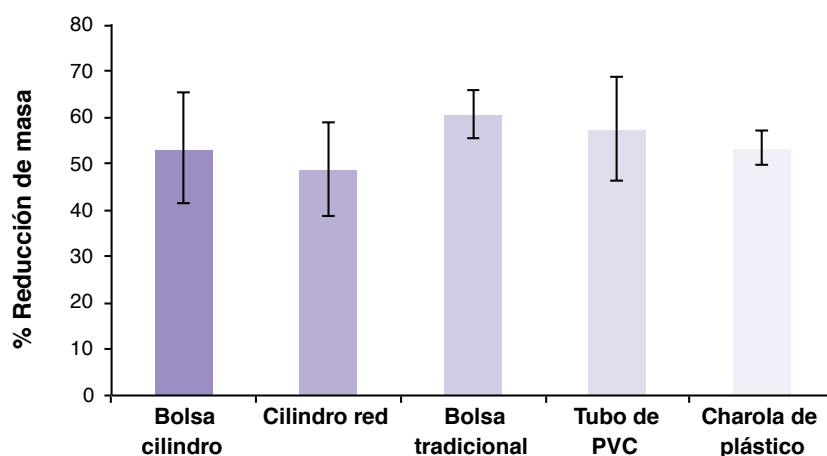


Figura 7-15 Reducción de masa en base seca

Con excepción de la bolsa cilindro, todas las configuraciones mostraron un alto grado de contaminación, lo cual puede interpretarse como una degradación llevada a cabo no sólo por *Pleurotus*, sino por la acción combinada con los hongos contaminantes.

7.2.7.2 Eficiencia biológica

La mayor eficiencia biológica (producción de hongos a partir del sustrato) se obtuvo en la configuración de bolsa tradicional con 34.62 %, seguido de bolsa cilindro con 31.62 % (**Figura 7-16**).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en experimentos previos y son bajos con respecto a los obtenidos comercialmente. Dado que el objetivo del proyecto es la degradación de los pañales desechables, esta producción de biomasa se considera como un beneficio adicional del proceso, al generar un alimento de alto contenido nutritivo.

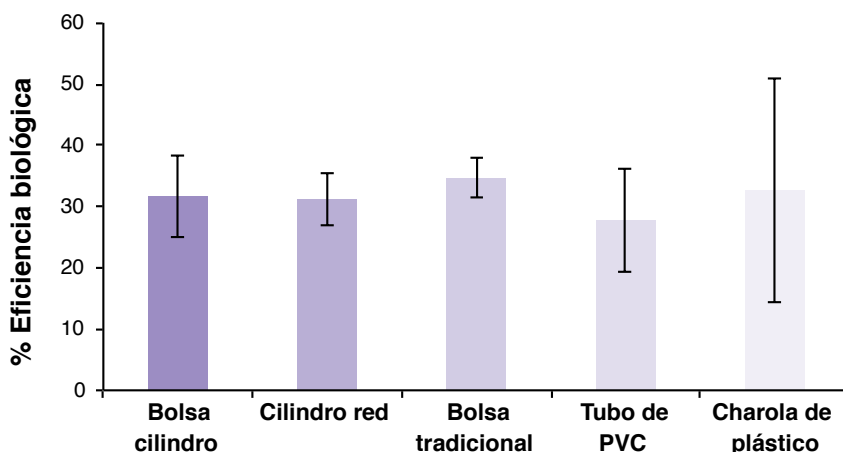


Figura 7-16 Eficiencia biológica por forma de cultivo

7.2.7.3 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para evaluar si existen diferencias significativas entre las cinco formas de cultivo con relación a la reducción de masa y a la eficiencia biológica. A continuación se presentan los resultados obtenidos y en el **ANEXO B** se muestra el análisis estadístico completo.

Reducción de masa

De acuerdo al análisis estadístico (ANOVA), el factor configuración (BC, CR, CH, PVC, BT) es estadísticamente significativo sobre el % reducción de masa con un 95.0% de nivel de confianza, por lo que se procedió a determinar las pruebas de múltiple rangos (LSD de Fisher). Este análisis arrojó cuatro grupos con medias globales significativamente diferentes, el primero la configuración BC con una media global de 48.74, el segundo, las configuraciones CR y CH con medias globales de 53.3 y 53.32 respectivamente, el tercero, las configuraciones PVC con una media global de 57.7 y por último el cuarto con BT con una media global de 60.48.

Eficiencia biológica

De acuerdo con el ANOVA el factor configuración (BC, CR, CH, PVC, BT), no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el % de eficiencia biológica, con un 95.0% de nivel de confianza. Debido a que el valor -P es mayor que 0.05.

7.2.7.4 Resumen de resultados de las cinco formas de cultivo

Los resultados mostraron que existe diferencia significativa entre las formas de cultivo en términos de la reducción de masa de los sustratos, pero que no es significativa en la eficiencia biológica. Con base en lo anterior y en la facilidad de implementación del proceso, se decidió utilizar



la bolsa cilindro, dado que ofrece una mayor área disponible para la invasión de *Pleurotus* en los sustratos, además de presentar menor contaminación.

7.2.8 Escalamiento del proceso de cultivo

Las pruebas con las cinco formas de cultivo permitieron establecer los parámetros y las condiciones para su escalamiento de 1 a 5 kg, a continuación se presentan los resultados obtenidos.

7.2.8.1 Recolección y adquisición de los sustratos

Los pañales recolectados de las 10 guarderías en general presentaron una buena separación en origen, ya que se encontraron muy pocos pañales con heces fecales. La paja pudo adquirirse fresca, de buen color y sin contaminación, el pasto empleado quedó listo después del secado y tamizado al que se sometió (**Figura 7-17**).



Figura 7-17 Cosustratos: a) paja, b) pasto

7.2.8.2 Preparación de sustratos

Los resultados de la preparación y acondicionamiento de los sustratos se describen a continuación.

Separación de plástico y molienda de los pañales

La separación del plástico del pañal se realizó retirando el plástico antes de la molienda ya que esto resultó más rápido, fácil y eficiente, y permitió obtener toda la parte absorbente, como se muestra en la **Figura 7-18 b**).

La molienda de los pañales se realizó satisfactoriamente ya que se obtuvo el tamaño adecuado para mezclarlos con los cosustratos paja y pasto (**Figura 7-19**). La molienda pudo realizarse en 3 horas y la trituración de los pañales en su mayoría fue homogénea.



Figura 7-18 a) pañal recolectado de guarderías, b) pañal sin plástico



Figura 7-19 Pañal triturado

Mezcla de cosustratos y ajuste de humedad

Los cosustratos paja y pasto se mezclaron con los pañales con orina en relación másica 35% cosustrato - 65 % pañal. La **Tabla 7-5** muestra el promedio de los resultados del porcentaje de humedad inicial de los sustratos utilizados.

Tabla 7-5 Promedio del % humedad inicial en los sustratos utilizados

Sustrato	Codificación	% Humedad inicial (promedio $\pm$ desviación estándar)
Testigo paja	JAT	75.3 $\pm$ 1.2
Paja con plástico	JACP	55.66 $\pm$ 4.57
Paja sin plástico	JASP	67.29 $\pm$ 4.59
Testigo pasto	TOT	58.90 $\pm$ 0.9
Pasto con plástico	TOCP	59.80 $\pm$ 4.85
Pasto sin plástico	TOSP	61.42 $\pm$ 3.59



Esterilización

La esterilización de todas las bolsas se llevó a cabo de manera correcta ya que la cinta indicadora, utilizada para verificar el proceso, presentó las líneas negras que lo confirman, tal como se muestra en la **Figura 7-20**.

La esterilización también ayudó a suavizar el cosustrato, lo que facilitó la manipulación en la siembra.



Figura 7-20 Esterilización correcta, cinta indicadora con líneas negras

7.2.8.3 Siembra

La semilla utilizada en la siembra fue sorgo invadido por las variedades de *Pleurotus ostreatus*, variedad gris BPR-81 y variedad blanca BPR-5, su manipulación fue sencilla ya que, con sólo presionar un poco se podía esparcir fácilmente en todo el sustrato (**Figura 7-21**).



Figura 7-21 Siembra del sustrato paja

El cosustrato de pasto fue más fácil de sembrar que el de paja, ya que tenía un tamaño más manejable lo que facilitó el llenado de las bolsas.



7.2.8.4 Fase oscura

Durante la fase oscura, mientras que el micelio colonizaba los cosustratos se observó crecimiento de otros hongos que se consideraron como contaminación (**Figura 7-22**), se retiró la parte del sustrato contaminado, y se registró la masa del material retirado para realizar las correcciones correspondientes en los cálculos finales.



Figura 7-22 Contaminación en las unidades experimentales, cosustrato paja

Algunas unidades presentaron contaminación en forma de polvo negro, se observó que *Pleurotus* lo empezó a “aislar”, rodeando con el micelio la contaminación, por lo que, se decidió no eliminar dicha contaminación (**Figura 7-23**).

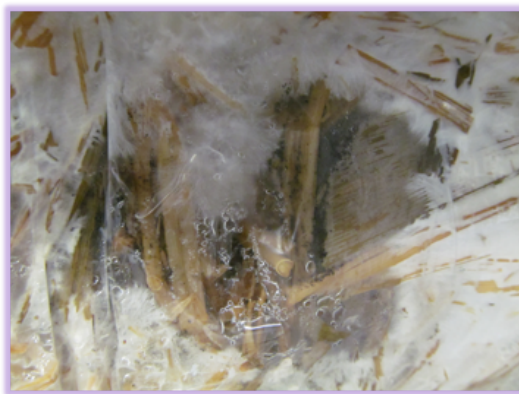


Figura 7-23 Aislamiento de la contaminación por *Pleurotus*

En el caso de las unidades experimentales con el cosustrato pasto la contaminación fue tan severa que se tuvieron que eliminar 6 unidades completas (BTOT-1, BTOT-4, BTOSP-1, BTOSP-2, BTOSP-3, GTOCP-5).

La **Figura 7-24** muestra la gráfica de la temperatura registrada durante esta fase, se observa que durante los primeros 40 días, la temperatura promedio registrada fue de 29°C, después



descendió hasta 22°C. Durante la fase de invasión el rango de temperatura recomendable para esta cepa es de 25°C - 30°C. Guzmán y colaboradores (2008); Cayetano y Bernabé (2008) y Espinosa y colaboradores (2011), reportan temperaturas similares durante esta fase, lo que indica que la mitad del proceso se mantuvo en el rango adecuado y después disminuyó a valores un poco menores de los recomendados. Sin embargo, Rivera y colaboradores (2013), y García (2005), también reportan valores de 22° C e incluso menores. La baja en la temperatura se debe probablemente a que durante este tiempo hubo una acumulación en la concentración de CO₂ y fue necesario airear la habitación, por lo que la temperatura disminuyó.

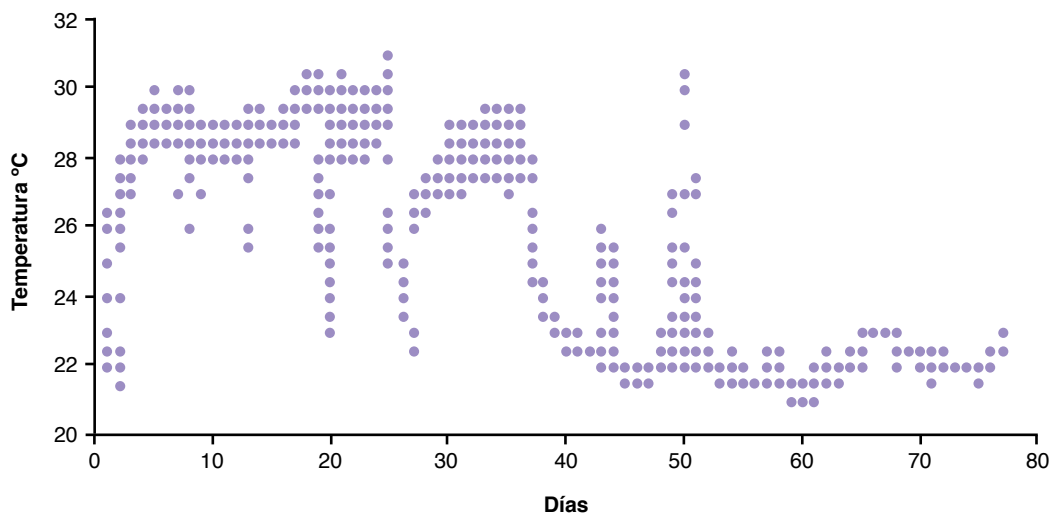


Figura 7-24 Temperatura durante la fase oscura

El porcentaje de humedad durante la fase oscura osciló entre 40 y 70% (**Figura 7-25**) con un promedio de 59% que es muy cercano al valor recomendado de 60% y que coincide con lo reportado por Delfín y Durán (2003) y Espinosa y colaboradores (2011), al trabajar con sustratos y condiciones similares.

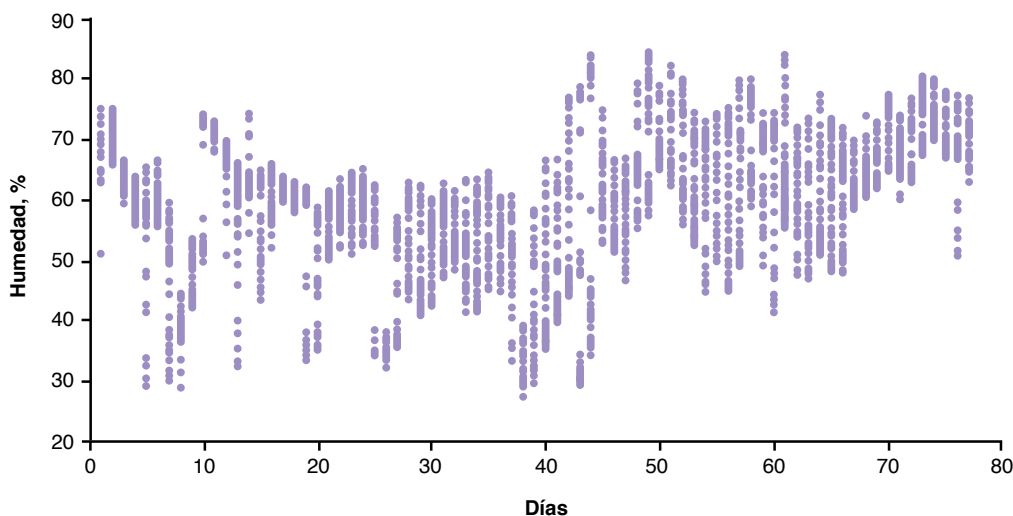


Figura 7-25 Humedad ambiental durante la fase oscura



7.2.8.5 Fase luminosa

Esta fase duró 90 días, los valores de temperatura se encontraron alrededor de 21°C (**Figura 7-26**) coincidiendo con lo reportado con García (2005). Los valores promedio de humedad fueron del 60% (**Figura 7-27**). Durante esta fase los hongos iniciaron el desarrollo de los cuerpos fructíferos (**Figura 7-28**).

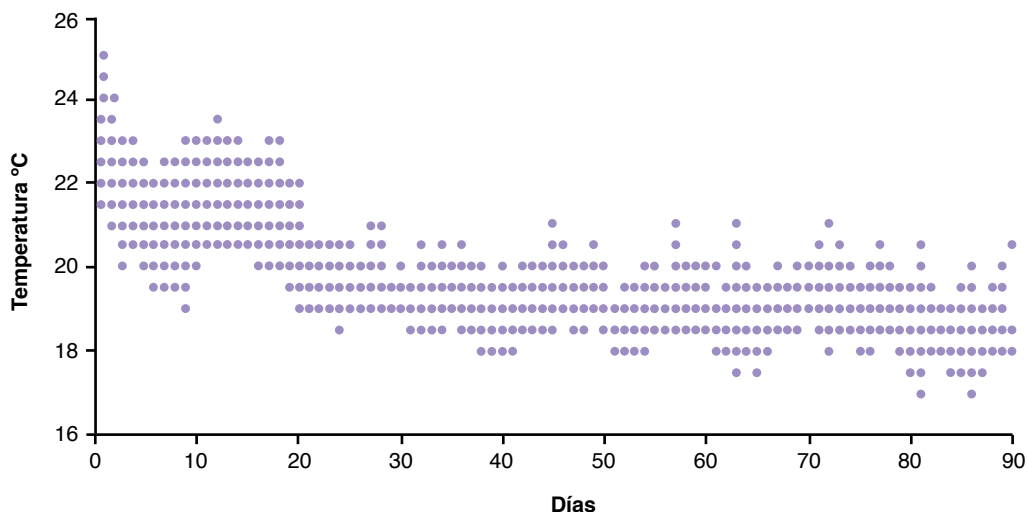


Figura 7-26 Temperatura durante la fase luminosa

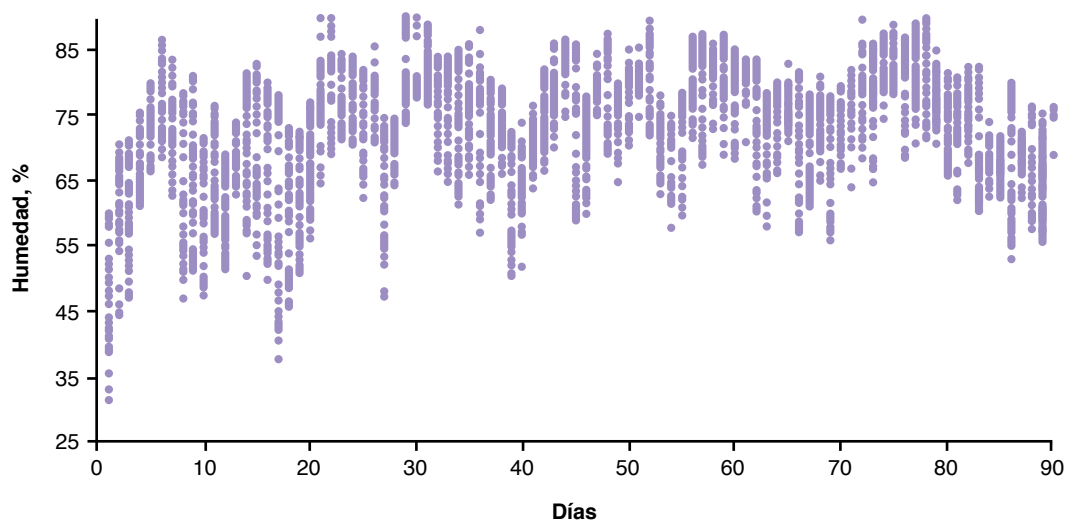


Figura 7-27 Humedad ambiental durante la fase luminosa



Figura 7-28 Unidades experimentales en fase luminosa

Cosechas

El crecimiento de las dos variedades de *Pleurotus* en los testigos de paja fue favorable, ya que se obtuvieron hongos de 12 cm de diámetro (**Figura 7-29**) y se realizaron en promedio 4 cosechas en cada unidad experimental.



Figura 7-29 Setas del testigo de paja

Sin embargo, las setas que crecieron en las unidades experimentales de paja con pañales, con y sin plástico, presentaron un diámetro mucho menor que el de los testigos, entre 2 y 4 cm, hubo unidades experimentales en las que no se cosechó. Al comparar entre las dos variedades de *Pleurotus* utilizadas, en la variedad blanca (BPR-5), se obtuvieron cosechas en los tres sustratos: testigo paja (BJAT), paja sin plástico (BJASP) y paja con plástico (BJACP), aunque en estas dos últimas las cosechas fueron menores de 60 g. Sin embargo, con la variedad gris (BPR-81) sólo se cosechó en el testigo paja (GJAT).



En las unidades experimentales con el cosustrato pasto, durante el período de fructificación se observó que crecieron algunos primordios pero su crecimiento se detuvo por lo que no se pudieron cosechar (**Figura 7-30**).



Figura 7-30 Crecimiento de primordios en cosustrato pasto

Se realizaron dos cosechas en ambos tipos de sustratos pasto-paño así como en los testigos, en el caso de los sustratos pasto sin plástico no se presentan resultados debido a que a pesar de que hubo cuerpos fructíferos, éstos no crecieron, y después de uno o dos días se desprendían del sustrato. Al igual que en el sustrato paja, las unidades en las que hubo una mayor producción de setas fueron los testigos, con valores mayores a 400g.

Como puede observarse, tanto en el cosustrato paja como en el pasto, los testigos obtuvieron los mejores resultados de producción de setas aunque en general los valores de producción son muy bajos. Se observa también que la mezcla pasto-paño sin plástico parece tener un efecto negativo sobre las dos variedades probadas ya que no se presentó crecimiento.

El tiempo de experimentación se alargó lo más posible para obtener el mayor número de cosechas y permitir la mayor degradación de los paños, en contraste con los cultivos comerciales que generalmente esperan sólo las dos primeras cosechas. García, (2005) y Fracchia y colaboradores (2009), reportan 4 cosechas mientras que Rivera y colaboradores (2013); Cayetano y Bernabé (2008); Amuneke y colaboradores (2011); Vargas y colaboradores (2012) y Romero y Rosales (2003), entre otros, reportan 3 cosechas.

En trabajos realizados utilizando paños desechables, Delfín (2002), no obtuvo fructificaciones mientras que Espinosa (2002), obtuvo 2 cosechas y observó que los tiempos de fructificación eran muy lentos comparados con los de los sustratos comerciales.

7.2.8.6 Evaluación del proceso

La evaluación del proceso incluyó la reducción de masa, la reducción de volumen y la eficiencia biológica durante el cultivo.



Determinación de la reducción de masa

La determinación de la reducción de masa en base seca se calculó a partir de la masa inicial y el porcentaje de humedad de cada sustrato al momento de la siembra. La masa final se obtuvo directamente, al concluir la experimentación, después de que los sustratos residuales se secaron a temperatura ambiente. En la **Figura 7-31** se muestra el porcentaje de reducción en masa en el sustrato paja-paño, en donde el mayor porcentaje de reducción corresponde a los testigos con ambas variedades de *Pleurotus*, para el caso de BJAT 86.52% y para GJAT 82.31%, el sustrato con menor reducción de masa fue BJASP con el 41.18 %.

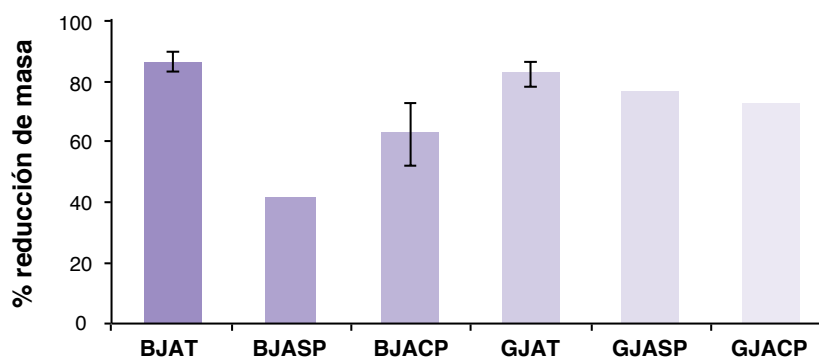


Figura 7-31 Reducción de masa en el sustrato paja-paño

En la **Figura 7-32** se muestran los porcentajes de reducción de masa promedio en el sustrato pasto-paño, con los valores de mayor porcentaje de reducción en el sustrato pasto-paño sin plástico para las dos variedades utilizadas, BTOSP con el 64.42% y para GTOSP el 61.65%. El testigo GTOT obtuvo el menor % de reducción con el 52.66%.

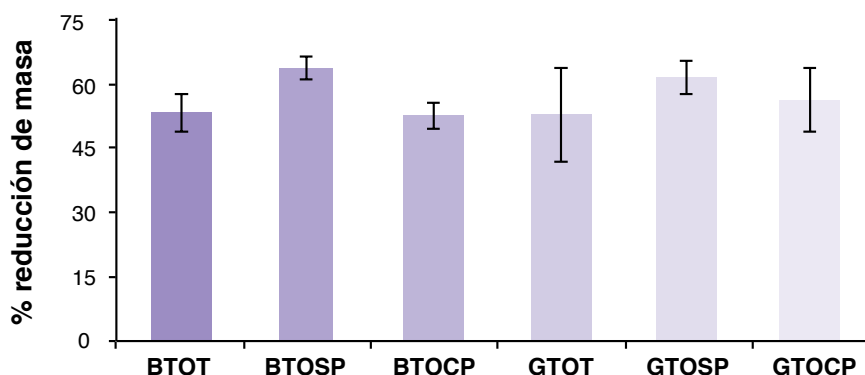


Figura 7-32 Reducción de masa en el sustrato pasto-paño

Determinación de la reducción de volumen

El volumen inicial se midió justo antes de esterilizar y el volumen final después de realizar la última cosecha, para que el contenido de humedad no influyera en la determinación. La **Figura 7-33**, muestra el porcentaje de reducción promedio de volumen para el sustrato pa-



ja-pañal, se observa que todas las unidades experimentales obtuvieron valores mayores al 67%, BJASP con el 67% y GJASP con el 67.2%, excepto GJACP que obtuvo un 34.5 %. Los testigos BJAT y GJAT mostraron el 80.89 % y 75.22 % de reducción de volumen respectivamente.

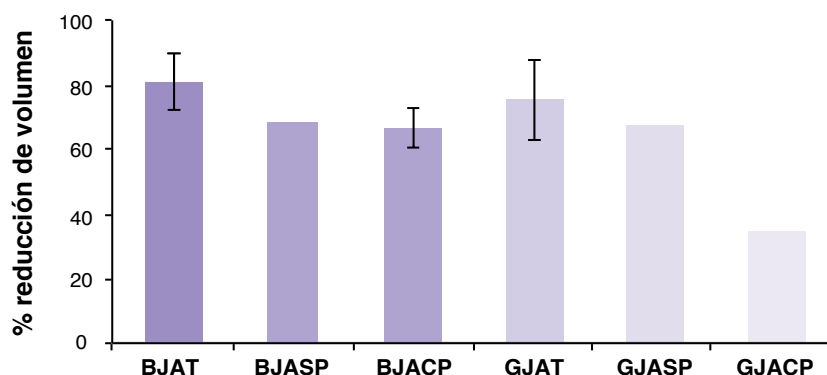


Figura 7-33 Reducción de volumen en el sustrato paja-pañal

Los resultados en los sustrato pasto-pañal (Figura 7 34) mostraron menores porcentajes de reducción que en el sustrato paja. El BTOT con el 64.3%, obtuvo la mayor reducción, seguido por GTOSP con el 60.20% mientras que GTOCP con el 39.69%.obtuvo el menor porcentaje.

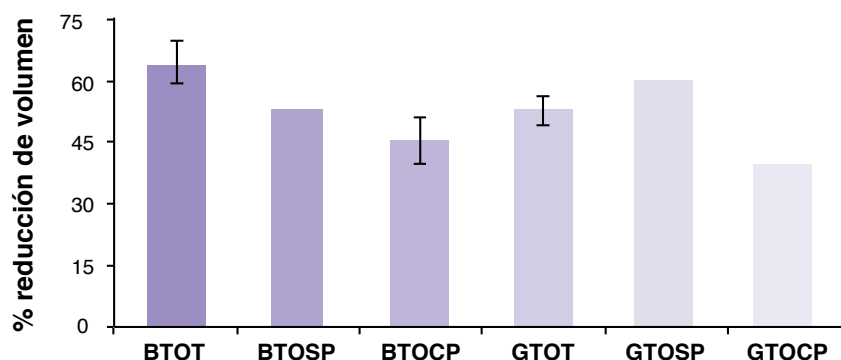


Figura 7-34 % Reducción de volumen en el sustrato pasto-pañal

Determinación de la eficiencia biológica

Los valores obtenidos en eficiencia biológica fueron muy bajos si se comparan con la producción comercial de las setas, que es cercana al 100%. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 7-35** para el sustrato paja-pañal y en la Figura 7 36 para pasto-pañal, se observa que el mayor porcentaje de eficiencia biológica se obtuvo en los testigos paja y pasto con las variedades blanca y gris. En el caso de la variedad blanca BPR-5, se cosechó en las tres mezclas propuestas, con eficiencias de: BJAT con el 29 %, BJASP con el 0.71% y BJACP con el 1.75%, sin embargo, para la variedad gris BPR-81, sólo fue para GJAT con el 14.64%.

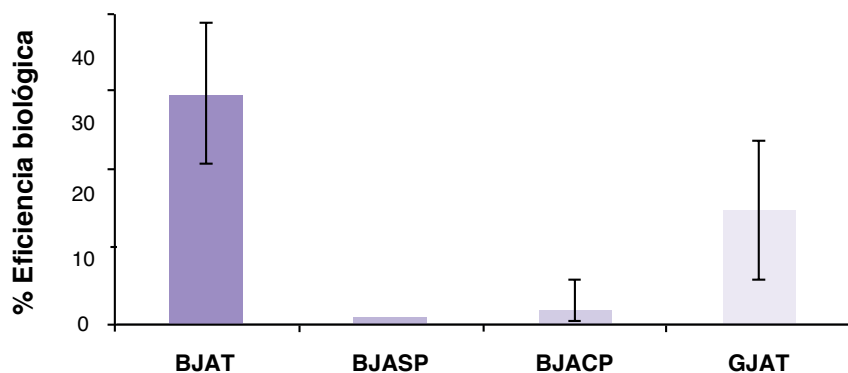


Figura 7-35 Eficiencia biológica en el sustrato paja-pañoal

En el cosustrato pasto el porcentaje de eficiencia biológica fue mayor en los testigos: GTOT con el 14.03% y BTOT con el 12.71%. Las eficiencias menores: GTOCP con el 2.82% y BTOCP con el 9.23%, cabe señalar, que en las mezclas BTOSP y GTOSP no hubo producción de hongos (**Figura 7-36**).

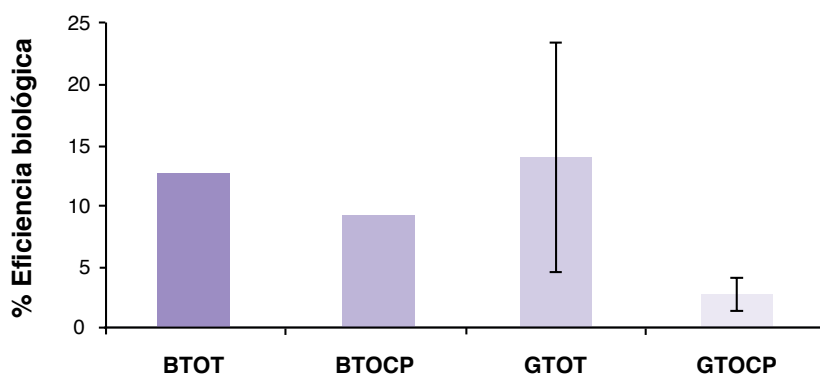


Figura 7-36 Eficiencia biológica en el sustrato pasto-pañoal

Cuantificación de materiales residuales no degradados

Los resultados de la masa de pañoal que pudo separarse al final de la experimentación se muestran en las **Tablas 7-6** y **7-7** para paja y pasto respectivamente, en todos los casos se trata de valores promedio. Cuando no se incluye la desviación estándar es porque sólo se obtuvo un valor de la unidad experimental.

Tabla 7-6 Masa de pañoales recuperados al final del experimento con el cosustrato paja

Unidad experimental	Masa inicial del pañoal en seco (g)	Masa final del pañoal en seco (g)	% Degradación de pañoal
BJACP	1300	836.06	35.69 ± 16.35
BJASP	1300	-----	-----
GJACP	1300	603.9	53.55
GJASP	1300	-----	-----



Como puede observarse para el cosustrato paja sólo hay resultados para las unidades que conservaron el plástico, con valores de degradación del pañal que van del 36 al 53%. En el caso de las unidades sin plástico no existen valores dado que, o las unidades se retiraron del proceso por contaminación o los materiales residuales se encontraban tan adheridos entre sí que no pudieron separarse.

Tabla 7-7 Masa de pañales recuperados al final del experimento con el cosustrato pasto

Unidad experimental	Masa inicial del pañal en seco (g)	Masa final del pañal en seco (g)	% Degradación de pañal
BTOCP	1300	1016.66	21.79 ± 2.79
BTOSP	1300	436.8	66.40 ± 30.75
GTOCP	1300	1095.15	15.76 ± 4.01
GTOSP	1300	414.1	68.18 ± 9.81

Para el cosustrato pasto se recuperaron residuos de pañales en todas la unidades experimentales, con resultados contrarios a los observados en la paja, aquí las menores eficiencias de degradación de pañal correspondieron a las unidades con plástico, 21.8 y 15.8 %, mientras que las unidades sin plástico tuvieron porcentajes de degradación superiores al 60%.

Como se puede observar los resultados de la cuantificación de materiales residuales presentan una gran variación dando valores del triple o cuádruple del porcentaje de degradación, que se debe a las enormes diferencias que se obtuvieron en las masas finales de cada material recuperado. Tal y como se mencionó la separación fue difícil ya que los materiales se encontraban adheridos y no se distinguían, lo que implica que los resultados sean poco confiables y deben interpretarse con las reservas pertinentes.

7.2.8.7 Análisis estadístico

A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico realizado en relación a la reducción de masa, reducción de volumen y eficiencia biológica. Los datos completos se presentan en el **ANEXO C**.

Reducción de masa

De acuerdo con el ANOVA realizado existe una diferencia estadísticamente significativa entre los cosustratos paja y pasto, con relación al porcentaje de reducción de masa, con un 95.0% de nivel de confianza. Posteriormente se realizó la prueba de múltiples rangos (LSD de Fisher) con la que se determinó que las medias globales, para el pasto 56.10 y para la paja 72.76, son significativamente diferentes.

Reducción de volumen

El análisis estadístico ANOVA, mostró que los cosustratos (paja y pasto) y los sustratos (con plástico y sin plástico) son menores que 0.05, lo que quiere decir que el tipo de co-



sustrato tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el porcentaje de disminución de volumen con un 95.0% de nivel de confianza.

La eficiencia de reducción de volumen, se atribuye a los dos cosustratos paja y pasto, de acuerdo con el análisis estadístico se encontró que son diferentes los cosustratos por lo que no fue necesario realizar las Pruebas de Rangos Múltiples (LSD de Fisher), las cuales indican si existen diferencia significativa entre estos factores.

En el caso del factor sustrato sí se realizó la prueba de Rangos Múltiples (LSD de Fisher) y de acuerdo con estas pruebas se encontró que entre el testigo y el cosustrato pañal sin plástico no existen diferencias estadísticamente significativas, mientras que, en el cosustrato pañal con plástico sí existen diferencias (con respecto a las media globales; para el testigo de 68.09, para el cosustrato pañal sin plástico de 65.86 y para el cosustrato pañal con plástico de 50.08).

Eficiencia biológica

Los resultados del análisis estadístico del tipo de sustrato (testigo, pañal con plástico y pañal sin plástico) mostraron que existe un efecto estadísticamente significativo sobre el % de eficiencia biológica con un 95.0% de nivel de confianza. Al realizar la prueba de Múltiples Rangos para % Eficiencia biológica por sustrato se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. Se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el sustrato pañal con plástico y pañal sin plástico, lo que marca la diferencia son los testigos, esto se justifica porque en los testigo se obtuvo mayor cantidad de masa cosecha.

7.2.8.8 Resumen de resultados obtenidos en el escalamiento del cultivo

En la **Tabla 7-8** se presenta el resumen de los resultados promedio obtenidos en las determinaciones para el cosustrato paja, en donde se observa que la variedad blanca de *Pleurotus* obtuvo los valores más altos en todas las determinaciones en los testigos mientras que la variedad gris no se cosechó en ninguno de los dos sustratos de pañal con y sin plástico. El porcentaje de degradación del pañal se presentó sólo en las unidades con plástico siendo la variedad gris la que tuvo la mayor eficiencia con el 53%.

Tabla 7-8 Resumen de los resultados finales para paja

Sustrato	Paja Testigo		Paja con pañal sin plástico		Paja con pañal con plástico	
Variedad de hongo	BPR-5 (Blanca)	BPR-81 (Gris)	BPR-5 (Blanca)	BPR-81 (Gris)	BPR-5 (Blanca)	BPR-81 (Gris)
% Reducción de masa	86.52 ± 2.31	82.31 ± 3.69	41.18	76.93	62.67 ± 10.08	72.65
% Reducción de volumen	80.89 ± 8.75	75.23 ± 12.37	68.26	67.20	67.00 ± 5.76	34.51
% Eficiencia biológica	29.78 ± 9.10	14.64 ± 8.97	0.71	-----	1.75 ± 3.93	-----
% Degradación de pañal	-----	-----	-----	-----	35.69 ± 16.35	53.55



En la **Tabla 7-9** se muestran los resultados promedio obtenidos en las determinaciones del cosustrato pasto, se observa un comportamiento diferente al cosustrato paja, sin embargo, tanto en la reducción de masa como en la de volumen los valores más altos corresponden a la variedad blanca. Para la degradación de pañal los mejores valores corresponden a los sustratos sin plástico.

Tabla 7-9 Resumen de los resultados finales para pasto

Sustrato	Pasto Testigo		Pasto con pañal sin plástico		Pasto con pañal con plástico	
Variedad de hongo	BPR-5 (Blanca)	BPR-81 (Gris)	BPR-5 (Blanca)	BPR-81 (Gris)	BPR-5 (Blanca)	BPR-81 (Gris)
% Reducción de masa	53.25 ± 4.28	52.66 ± 10.58	64.42 ± 2.84	61.65 ± 3.58	53.31 ± 2.72	56.64 ± 7.45
% Reducción de volumen	64.56 ± 9.30	52.66 ± 11.03	52.82 ± 0.73	60.21 ± 5.58	45.34 ± 12	39.69 ± 21.28
% Eficiencia biológica	12.71	14.03 ± 9.42	-----	-----	9.23	2.82 ± 1.31
% Degradación de pañal	-----	-----	66.40	68.18 ± 9.81	21.79 ± 2.79	15.76 ± 4.01

De acuerdo con el análisis estadístico (**ANEXO C**) el factor cosustrato (paja, pasto) tiene un efecto estadísticamente significativo con un 95.0% de nivel de confianza en la reducción de masa y en la reducción de volumen. En el caso del acondicionamiento de los dos sustratos de pañal con y sin plástico, no se obtuvieron datos suficientes para evaluar estadísticamente, el efecto en la producción de hongos. Lo que concuerda con lo que se observa en las **Figuras 7-35** y **7-36** ya que las dos variedades de *Pleurotus* no pudieron degradar eficientemente, por lo que no crecieron y no hubo producción.

Reducción de masa

De acuerdo con los datos obtenidos se encontró que los valores de reducción de masa para todos los tratamientos van desde 41.18% hasta 86.52%. Delfín y colaboradores (2003), al trabajar con diferentes sustratos combinados con pañal desechable no obtuvo resultados de la degradación ya que las unidades experimentales tuvieron que retirarse por problemas de contaminación. Llama la atención que en los trabajos reportados en cultivos utilizando pañal, éste es el único en el que no se reporta reducción de masa. Por otro lado los resultados aquí obtenidos son muy alentadores respecto a esta experiencia.

Por su parte Espinosa y colaboradores (2011), al trabajar con pañales con y sin plástico, molidos o desmenuzados, enriquecidos con orujo de uva en unidades experimentales de 500 g, encontró porcentajes de reducción en masa desde 51% hasta 88%, lo cual coincide con los obteniendo aquí, con la diferencia de la escala del proceso, 10 veces mayor.

Los valores en reducción de masa indican que el proceso de degradación de pañales, presentó buenas eficiencias, siendo las mejores las obtenidas en la variedad blanca con el cosustrato paja al trabajar con y sin plástico con eficiencias del 72 y 76% (**Tabla 7-6**). La presencia de plástico es un factor que debe considerarse en el escalamiento del proceso ya que su separación se realizó manualmente, mientras que el trabajar con plástico ahorraría esta operación y la diferencia entre las eficiencias finales es mínima.



Reducción de volumen

En cuanto a los valores obtenidos en la reducción de volumen se pueden comparar con los de Espinosa y colaboradores (2011), 60% - 92% al trabajar con pañales, mientras que los obtenidos en este trabajo son de 34 a 68 % en los sustratos con pañales, coincide que los valores mayores se obtuvieron en los sustratos que conservaron el plástico, pero con diferencias mínimas, la reducción de volumen es mayor en el trabajo previo en donde se trabajó a una escala menor.

Eficiencia biológica

La eficiencia biológica (EB) obtenida en todos los tratamientos es baja si se compara con la obtenida en otros residuos que se han utilizado como sustratos, Vargas y colaboradores (2012), obtuvieron una EB de 221 % en bagazo de caña, y Bautista y colaboradores (1998), 281% en corona de piña.

El resultado obtenido en el testigo paja de trigo, empleado por ser el sustrato comercial en el que se cultivan las setas, fue de 29.7% y es comparable sólo con los resultados de Varnero y colaboradores (2010), de 32.94%; Espinosa y colaboradores (2011), 36.4% y Delfín (2002) 23%, ya que Salmones y colaboradores (2005), reportan 50.2 y 54.2 en dos variedades de *Pleurotus ostreatus*, mientras que los valores más altos son los reportados por Romero y colaboradores (2003), con 119%, Romero y colaboradores (2010), con 129 % y Bautista y colaboradores (1998), con 281 %.

Para el testigo pasto el valor más alto obtenido es de 14.09%, Delfín (2002) obtuvo 28%, y 11% al ensayar con dos cepas de *Pleurotus*. Por su parte Rodríguez y colaboradores (2006), reportaron EB de entre 88 y 126% para este mismo sustrato.

Para el caso de pañal con los cosustratos paja y pasto, se obtuvo una EB de 1.75% para paja- pañal con plástico y de 9.23 % pasto-pañal con plástico, menores a los obtenidos por Espinosa y colaboradores (2011), en los que el pañal enriquecido con orujo de uva obtuvo una eficiencia de 14%. Delfín (2002), no obtuvo cosecha en sustratos con pañal desechable.

Considerando algunos sustratos que pudieran compararse por su composición con el pañal, Fernandes y colaboradores (2014), al ensayar con sustratos de papel blanco y papel impreso, obtuvieron EB de 10.3 y 14.9% respectivamente.

De acuerdo con lo mencionado por muchos de los autores ya citados, la producción de cuerpos fructíferos, reportada como eficiencia biológica está directamente relacionada con el tipo de cepa utilizada, la composición del sustrato y las condiciones experimentales. Los valores obtenidos son realmente bajos, pero se debe recordar que el objetivo de este trabajo no es la producción de setas si no la degradación de los pañales desechables: es claro que usarlos como sustratos del cultivo de *Pleurotus* no va a producir grandes cantidades de biomasa, pero sí se obtienen buenos resultados de degradación.



Por otro lado los valores de EB obtenidos en los testigos paja y pasto indican que algunos de los factores involucrados con la producción, sea la cepa, o las condiciones ambientales no son las adecuadas y que podrían ensayarse con otras cepas o variando las condiciones ambientales, por ejemplo la temperatura y mejor control del CO₂, con lo que podrían obtenerse EB más altas.

Las eficiencias obtenidas en reducción de masa en el escalamiento del cultivo son alentadoras y perfectibles, ya que si existe un mejor control de las condiciones del cultivo podrían obtenerse mayores porcentajes de degradación de pañales.

Considerando que los tiempos de esta experimentación son largos comparados con los reportados por Salmones y colaboradores (2005), con 36 días, Vogel y Salmones (2000) con 37 días, puede valorarse que si la degradación más importante de los pañales ocurre en la etapa de invasión, como lo reportó Espinosa y colaboradores (2011), puede considerarse la posibilidad de interrumpir el proceso en esta etapa y reiniciar el proceso o bien complementarlo con algún otro proceso como el composteo, por ejemplo.

Degradación del pañal

La degradación del pañal sólo pudo cuantificarse en algunos sustratos, ya que varias unidades se retiraron durante el proceso y en otras fue imposible realizar la separación manualmente, debido a que los materiales estaban muy adheridos o se podían confundir. Los mejores valores de degradación corresponden al cosustrato pasto cuando se acondiciona sin plástico y se utiliza la cepa BPR-81 con 68.18%.

Al comparar estos resultados con los de Espinosa en 2002, que reportó porcentajes de degradación de 85% para unidades sin plástico y de 68% para unidades con plástico, se encontró para el primer valor existe una diferencia importante, sin embargo el último valor es igual al aquí obtenido.

En términos prácticos el mejor acondicionamiento para la degradación del pañal podría ser el de pañal con plástico con el cosustrato paja, con la variedad BPR81, ya que eliminaría la necesidad de retirar el plástico y presenta una degradación superior al 50%.

7.3 Etapa 3. Degradación por composteo

A continuación se presentan y analizan los resultados de las pruebas experimentales del proceso de composteo en biorreactores realizadas por Sotelo (2014).

Con base en la caracterización de los sustratos se utilizó la siguiente proporción: 55% pasto, 10% hojas frescas, 5% de hoja seca y 30% de mulch, que fue la composición utilizada para los testigos. Para los otros biorreactores a esta mezcla se le agregó un 30 % de pañal desechable, lo cual modificó la composición quedando de 42.3% de pasto, 7.7% de hoja fresca, 3.8% de hoja seca, 23.1% de mulch y 23.1% de pañal.



7.3.1 Monitoreo del proceso en los biorreactores

El monitoreo consistió en la medición de los parámetros de temperatura, humedad, CO₂, y pH.

7.3.1.1 Temperatura

El registro de los valores de la temperatura a lo largo del proceso, se observó un rápido incremento de la temperatura al inicio del proceso que corresponde a la fase termofílica, con valores superiores a 55°C, esto debido a la intensa actividad microbiana al realizar la degradación de los residuos, la cual produce calor y garantiza la eliminación de microorganismos patógenos. Posteriormente se registró una disminución de la temperatura e inicia la fase mesofílica en la que se alcanzaron valores alrededor de los 35 °C. Finalmente la temperatura se estabilizó alrededor de los 22 °C. Esto corresponde al comportamiento típico de un proceso de composteo (Barrena *et al.*, 2006; Pognani *et al.*, 2012; Ruggieri *et al.*, 2008). En general, se obtuvieron patrones similares durante el composteo en los biorreactores con y sin pañales.

La temperatura es la variable clave del proceso de composteo, dado que puede afectar el tipo de microorganismos que se desarrollan (Hubbe *et al.*, 2010). Tchobanouglos y colaboradores (1994), que se han enfocado en estudiar los cambios de temperatura durante el proceso, recomiendan manejar el sistema a 50 ó 55° C inicialmente hasta llegar a 60°C en donde la temperatura baja debido al agotamiento de los materiales celulósicos. Vikman y colaboradores (2002), encontraron que las fibras de pulpa se degradan más eficientemente a temperaturas de entre 35 y 50°C mientras que el papel kraft blanqueado se degrada a 58°C. Los resultados de estos autores coinciden con los obtenidos en los biorreactores.

7.3.1.2 Humedad a capacidad de campo

La humedad a lo largo del proceso fluctuó entre 50 y 60% en los cuatro biorreactores, valores que corresponde a los recomendados para un composteo eficiente (Moreno y Moral, 2008). La presencia de agua es muy importante, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante el proceso (Moreno y Moral, 2008). El agua facilita la descomposición de la materia a través de la actividad microbiana y mejora las condiciones para la fijación del nitrógeno en la composta (Hubbe *et al.*, 2010). La humedad de la masa de composteo debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa (Miyatake y Iwabuchi, 2006), para que permita la circulación tanto del oxígeno (ya que el proceso debe desarrollarse en condiciones aerobias), como la de otros gases producidos en la reacción. Por el contrario, si la humedad es baja se disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso es más lento.

Los rangos de humedad óptimos reportados, varían dependiendo de los materiales a compostear y van desde 40% a 70%. Las recomendaciones por autor son Tchobanoglous y colaboradores (1994), 50 a 60 %, Petric y colaboradores (2009), humedad inicial del 69%, Bueno y colaboradores (2011), 40% y Zhang y colaboradores (2009), mantener por debajo del 65%. De acuerdo con estos rangos los valores obtenidos fueron adecuados para la realización del proceso y coinciden con los obtenidos por Colon y colaboradores (2013), de 40-60% al trabajar con composteo de



pañales en una planta de composteo. En el **ANEXO D (Figura D- 1)** se muestran los resultados del monitoreo por medio de registradores de datos USB.

7.3.1.3 CO₂

Los resultados del monitoreo del volumen de CO₂ producido en el proceso mostraron tres fases, la primera corresponde a los primeros días con poca producción debido a que la actividad microbiana estaba iniciando. Una segunda fase en la que la emisión de CO₂ aumentó de manera importante indicando una mayor actividad biológica y por lo tanto una mayor degradación y finalmente una tercera fase se observó una disminución debida principalmente a la sucesión microbiana que ocurre en el proceso que tiende a estabilizarse.

El comportamiento del CO₂ se encuentra relacionado con las temperaturas que alcanza, el proceso ya que durante la degradación las fuentes de carbono se fraccionan (Sánchez-Monedero et al., 2011) (Sánchez-Monedero, 2011). La descomposición en el proceso evoluciona debido a las pérdidas de carbono, principalmente en forma de CO₂ como producto metabólico, de manera que el contenido de carbono del material composteable disminuye con el tiempo (Raj y Antil, 2011). Se observa que los cuatros biorreactores tuvieron un comportamiento similar.

7.3.1.4 pH

Los valores del pH se mantuvieron en valores alcalinos a lo largo del proceso, este comportamiento se puede considerar como esperado ya que en la caracterización individual de los sustratos el pH en todos los casos fue superior a 8, excepto en el pasto y en la mezcla inicial fue de 8.18 para el testigo y 8.55 para el biorreactor con pañal. El iniciar con pH alto propició que el proceso desde su inicio se mantuviera en valores alcalinos, superiores a 8 y se mantuvo constante hasta el final.

Los valores de pH recomendados para iniciar el proceso son 4.2 a 7.2 (Dickenson *et al.*, 1991) o de 7 a 7.5 (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Hultman (2009), reporta que la producción de los ácidos láctico y acético durante la degradación inicial de la biomasa a menudo conduce un pH de 4.2 a 5.5. En casos en que el material a compostear sea muy ácido, a veces se recomienda añadir pequeñas cantidades de cal o cenizas (Dickenson et al., 1991).

Durante el composteo los valores de pH fluctúan entre 5.5 y 9. La utilización microbiana de los ácidos orgánicos, la proteólisis (degradación de proteínas) y la mineralización de nitrógeno con liberación de amoníaco durante la fase termófila, conducen a un incremento gradual del pH hasta alcanzar valores de 9 (Moreno y Moral, 2008). Posteriormente los valores de este parámetro pueden regresar a condiciones cercanas a la neutralidad y empezar su proceso de maduración (Hultman, 2009). Este incremento del pH durante el proceso muchas veces es tomado como una evidencia de composteo exitoso.

Los valores de los pH obtenidos en el proceso de composteo con y sin pañal, se encuentran dentro de los reportados por los autores arriba mencionados y permiten suponer que la acidogénesis, que normalmente se da al inicio del proceso, fue muy pequeña y por lo tanto, fue poco apreciable o no ocurrió.



También coincide con lo mencionado por Saludes y colaboradores (2008), quienes reportan que cuando se presentan condiciones excesivas de alcalinidad pueden promover la liberación del gas amonio. Para contrarrestar tal efecto, Ekinci y colaboradores (2000), reportaron que puede minimizarse por la adición de sulfato de aluminio o con un material ácido.

Por su parte Castrillón y colaboradores (2006), explican que en la composta terminada, el pH puede estar entre 8 y 9, valor que coincide con el aquí obtenido, debido a las pérdidas de CO₂ por la respiración de los microorganismos. También menciona que posteriormente los niveles de pH se estabilizan en valores cercanos a la neutralidad. Cuando esta estabilización no se alcanza se considera un parámetro indicativo de falta de madurez del producto.

Considerando lo anterior con el valor del pH de la composta obtenida, se puede inferir que este parámetro puede ser mejorado aumentando el periodo de estabilización del producto final.

7.3.2 Evaluación del proceso

A continuación se describen los resultados de los parámetros que permitieron hacer la evaluación del proceso.

7.3.2.1 Parámetros fisicoquímicos

Se evaluó materia orgánica, nitrógeno y C/N, la **Tabla 7-10** muestra los resultados obtenidos, los datos presentados son valores promedio, calculados a partir de muestras analizadas por triplicado y posteriormente se discute cada parámetro.

Tabla 7-10 Materia orgánica, nitrógeno, C/N durante el composteo (valores promedio)

Tiempo (semana)	% Materia orgánica		% Nitrógeno		C/N	
	Sin pañal	Con pañal	Sin pañal	Con pañal	Sin pañal	Con pañal
0	83.53	85.10	0.82	0.93	59.22	53.18
16	66.28 ± 7.8	67.42 ± 1.5	3.74 ± 0.2	3.54 ± 0.04	10.28 ± 0.5	11.06 ± 0.3

Materia orgánica

El contenido de materia orgánica inicial fue mayor a 80% y disminuyó a medida que avanzó el proceso, alcanzando un valor final de 66.28% para los biorreactores sin pañal y 67.42% para los que contenían pañal, un descenso promedio de 20% como puede observarse en la **Tabla 7-10**. Esta disminución se explica ya que los componentes fácilmente degradables se consumen primero en el proceso, (Hubbe *et al.*, 2010). Los valores obtenidos están dentro de los límites normales para este parámetro, según lo descrito por Zucconi y De Bertoldi (1987), durante el composteo la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; que pueden llegar a representar casi el 20 % de la masa total composteada.



Colón y colaboradores (2013), al trabajar con composteo en planta de pañales, encontraron que la materia orgánica disminuyó de manera continua obteniendo también una reducción del 20% que coincide con los valores obtenidos.

Nitrógeno

El contenido de nitrógeno durante el proceso pasó por 3 fases, al principio un ligero aumento, seguido de una etapa casi constante durante la mayor parte del proceso, para terminar con un incremento importante hacia el final del proceso (**Tabla 7-10**). Se observa el mismo tipo de comportamiento para todos los biorreactores, este incremento se explica por la conservación y reciclado del contenido inicial de nitrógeno, aunado al consumo de carbono presente en los sustratos, que los microorganismos requieren en mayor proporción. Además como lo explica Ruiz en 2011, el contenido de N al principio del proceso es bajo, reflejado por una relación C/N elevada.

Uno de los grandes retos en el composteo es minimizar la pérdida del nitrógeno gaseoso. El nitrógeno está principalmente almacenado en los tejidos de los organismos vivos o muertos. Las sustancias orgánicas eventualmente sufren un rompimiento debido a los procesos enzimáticos dando como resultado la producción de amonio. Bajo condiciones alcalinas, el ión amonio se convierte en gas y puede escapar a la atmósfera si no es recapturado. La humedad y las bajas temperaturas en las capas exteriores de la composta generalmente pueden retener el amonio. En condiciones aerobias gran parte del amonio puede ser convertido en nitritos por bacterias y posteriormente puede convertirse en nitrato por otro tipo de bacterias (nitrificación).

Los resultados finales del contenido de nitrógeno indican que las condiciones en el proceso, a pesar de ser predominantemente alcalinas, permitieron que no se perdiera nitrógeno en forma de amonio si no que se recapturara, por lo que la concentración aumentó.

Relación C/N

Los valores iniciales de la C/N fueron de 59.22 y de 53.18 para los biorreactores con y sin pañal respectivamente. Estos altos valores, debidos a la composición de los sustratos, tienden a disminuir, principalmente por el consumo del carbono y, a alcanzar los límites establecidos para obtener un producto final de buena calidad, (**Tabla 7-10**). Dado que el carbono y nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica es importante que exista una relación equilibrada entre ambos elementos, ya que una relación C/N muy elevada, disminuye la actividad biológica. Los valores finales obtenidos fueron de 10.28 para los biorreactores sin pañal y de 11.06 para los que contenían pañal.

Colón y colaboradores (2013), compostearon residuos de alimentos y de jardinería, con 3% de pañales composteables con una C/N inicial de 23, y una C/N final de 11.64 y 14.62; puede observarse que ellos partieron de una C/N inicial mucho menor que la aquí ensayada (> 50), existe también una gran diferencia del % de pañal que trataron, 3% vs 30% y que las C/N finales fueron mayores a las aquí obtenidas. En otro estudio los mismos investigadores (Colón *et al.*, 2010) obtuvieron una relación C/N final de 16 después de compostear pañales en mezcla con la fracción orgánica de los residuos urbanos y de 15 para las pilas sin pañal, también mayor a la C/N aquí obtenida.



A pesar de la diferencia con los estudios de Colón y colaboradores tanto en 2010 como en 2013, ya que ellos trabajaron en pilas de una planta de composta, puede observarse que existe similitud con los valores obtenidos en ambos procesos. La diferencia más relevante entre los estudios de composteo realizado con pañales radica en el porcentaje de pañales tratado, Colón y colaboradores trabajaron con 3% de pañales, mientras que en este estudio se agregó cerca del 30%, lo que habla de la buena eficiencia del sistema en biorreactores, ya que las relaciones finales obtenidas son menores.

La relación C/N ha sido usada por distintos investigadores como índice de estabilidad o madurez de la composta. Así, Bernai y colaboradores (1998), proponen un valor inferior a 20 para esta relación, mientras que Iglesias y Pérez (1989), consideran que dicha relación debe ser inferior a 12 en una composta madura. Por lo general, una composta se considera madura cuando la relación C/N es menor de 20 concordando con la NADF-020-AMBT-2011 (GODF, 2012). De acuerdo con lo antes mencionado la composta obtenida tiene una C/N adecuada, tanto para la literatura como en la establecida en la normatividad.

7.3.2.2 Parámetros microbiológicos

Los resultados del análisis microbiológico para coliformes, totales y coliformes fecales a lo largo del proceso se muestran, en la **Tabla 7-11**. Se observa que al inicio existe una gran cantidad de microorganismos que va disminuyendo, debido al incremento de la temperatura, conforme avanza el proceso hasta llegar a una estabilización, este comportamiento está de acuerdo con que lo citan Moreno y Moral, (2008). Estos autores también mencionan que la fase de crecimiento activo de los microorganismos ocurre cuando la mayor cantidad de nutrientes está disponible para posteriormente, tener una fase de maduración con una disminución tanto de la actividad microbiana como de nutrientes disponibles.

Tabla 7-11 Coliformes totales y fecales durante el composteo

Tiempo (semanas)	Coliformes totales (NMP/g)		Coliformes fecales (NMP/g)	
	Con pañal	Sin pañal	Con pañal	Sin pañal
0	110000	1100	2400	1100
16	680	215	590	165

Los coliformes fecales generalmente se relacionan como indicadores de contaminación pero de acuerdo con Mandigan y colaboradores (2004), los coliformes se introducen en gran número al ambiente por las heces de humanos y animales, por tal motivo suele deducirse que la gran mayoría son de origen fecal, sin embargo existen muchos coliformes de vida libre no patógenos.

La cantidad de coliformes fecales presentes en los biorreactores es menor que los valores de la norma local NADF-020-AMBT-2011, por lo que el producto final obtenido cumple dicha normatividad. Los estudios realizados por Colón y colaboradores tanto en 2010, como en 2013, también indicaron que en la composta final los coliformes no fueron detectados o se detectaron en can-



tidades no significativas, por lo que ellos concluyen en ambos casos que la composta obtenida está libre de patógenos.

7.3.2.3 Reducción de masa

El promedio de reducción de masa al final del composteo, fue del 53.3% en los biorreactores testigos y 58.9% en los biorreactores con pañal. A pesar de tener poca diferencia en la reducción de masa entre ambos tratamientos, la presencia del pañal desechable incrementó la cantidad de celulosa disponible, que es más fácil de degradar que la lignina aportada por los residuos de jardinería, que es una estructura muy compleja y difícil de biodegradar, logrando una mayor reducción.

La reducción de masa no es un parámetro de referencia en el proceso de composteo, por lo que existen pocos trabajos que lo refieran. Espinosa y colaboradores (2003), al compostear pañales en biorreactores con 10, 20 y 30% de pañal, obtuvo reducciones de masa mayores al 50%, comparables con las que se obtuvieron en este ensayo.

7.3.2.4 Reducción de volumen

El comportamiento es similar en los biorreactores testigo y en los que contenían pañal, siendo ligeramente más bajo para los que no contenían pañal, 64.4% y 61.5% respectivamente. Esto puede deberse a que los pañales al principio presentan una estructura voluminosa que ocupa espacio, especialmente se ha observado que después de la molienda los pañales se “esponjan” y que al ser degradados su volumen disminuye de manera importante, además de que su degradación es más rápida que la de los residuos con alto contenido de lignina como es el caso del mulch.

7.3.2.5 Cuantificación de materiales residuales no degradados.

En la **Tabla 7-12** se indican las masas iniciales y finales de cada reactor, así como el porcentaje de degradación de los materiales recuperados en el proceso de tamizado.

Tabla 7-12 Masa inicial y final de los pañales en los biorreactores

Sustrato	Masa inicial (kg)	Masa final (kg)	% de degradación
Pañal	15	1.9	87

Dado que no se observó celulosa ni SAP, se sugiere la realización de pruebas de ecotoxicidad para evaluar si este componente está presente y si puede ser tóxico para alguna especie vegetal. De acuerdo con los valores obtenidos, la degradación final de los pañales desechables fue de 87% en el composteo en biorreactores.

7.3.2.6 Caracterización y evaluación de la composta de la composta

La caracterización final de la composta obtenida durante el proceso desarrollado en los biorreactores fue comparada con la NMX-FF-109-SCFI-2008 (DOF, 2008) que es la norma que regula



la elaboración de lombricomposta en México, y con la norma NADF-020-AMBT-2011 (GODF, 2012) que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta.

Los parámetros de humedad, C/N, nitrógeno, fósforo y los coliformes de la composta final obtenida, se encuentran dentro de los rangos establecidos por ambas normas, lo que habla de una buena calidad de la composta obtenida, con un elevado contenido de materia orgánica y con valores de nitrógeno dentro del rango establecido. La relación estimada C/N es adecuada para una composta final. Destaca un valor de pH alcalino para la composta, debido a los materiales utilizados en la experimentación.

Finalmente se debe considerar que los análisis se realizaron recién concluido el proceso, por lo que faltaría considerar que un tiempo más largo de maduración podría ayudar a regular el pH y a reducir la relación C/N.

7.3.3 Resumen de resultados obtenidos en el proceso de composteo

Con la finalidad de evaluar la eficiencia de tratamiento respecto a la degradación de los pañales se elaboró la **Tabla 7-13** que muestra el resumen de los resultados promedio obtenidos.

Tabla 7-13 Resultados finales promedio de la fase experimental

Parámetro	Biorreactores	
	Sin pañal	Con pañal
Reducción de masa (%)	53.3	58.9
Reducción de volumen (%)	61.5	64.4
Degradación del pañal (%)	-----	87

La degradación del pañal, medida como reducción de masa fue 87 % lo cual habla de que el proceso es muy eficiente y que el resultado es alentador ya que además de degradar el pañal y los residuos de jardinería se puede producir composta de buena calidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos al realizar el análisis estadístico se concluye que no existen diferencias significativas en el composteo en biorreactores, con y sin pañales desechables usados. Esto indica que los parámetros de control, monitoreo y calidad de la composta obtenida no se afectan por la presencia del pañal, por lo que este tipo de sistema es una buena alternativa para el tratamiento de estos residuos.

7.4 Etapa 4. a) Comparación entre los dos sistemas para la degradación de pañales

Con la finalidad de cumplir con uno de los objetivos de este proyecto y de seleccionar el mejor tratamiento para la degradación de los pañales desechables usados, se realizó una comparación de los resultados obtenidos al utilizarlos como sustrato para el cultivo del hongo *Pleurotus* y los obtenidos por composteo en biorreactores, a continuación se presentan las tablas que muestran dicha información.



7.4.1 Eficiencia de degradación de pañales

En la **Tabla 7-14** se presenta una comparación entre la eficiencia de degradación de pañales por *Pleurotus* y por composteo, en todos los casos se trata de valores promedio, considerando, para el caso del cultivo, la presencia o ausencia de plástico.

Tabla 7-14 Porcentaje promedio de degradación de pañales en cultivo y por composteo

Parámetro comparativo de reducción en los sustratos que contenían pañales	Cultivo con pañal sin plástico	Cultivo con pañal con plástico	Composteo en biorreactores
% Masa	61.06 ± 14.82	61.31 ± 8.49	58.9 ± 0.07
% Volumen	65.7 ± 12.7	46.95 ± 14.90	64.4 ± 0.00
% Degradación del pañal	67.29 ± 1.25	31.70 ± 16.78	87 ± 4.25

Se puede observar que los valores obtenidos en la reducción de masa en todos los casos son mayores al 50 %, y que los resultados entre ambos procesos son prácticamente iguales.

En el caso del porcentaje de reducción de volumen hay una variación importante entre los tratamientos por cultivo de *Pleurotus*, lo cual, como ya se mencionó, tiene que ver incluso con la forma de medir este parámetro. Al comparar estos resultados con los del composteo, los valores de este último son muy parecidos a los del cultivo sin plástico, siendo ambos los que presentan mejores valores de reducción.

La evaluación de la degradación de pañales por cultivo con las dos cepas empleadas y ensayadas con sustratos con y sin pañal desechable obtuvo valores promedio diferentes, 31.70 y 67.29 respectivamente. Estos resultados hablan de una baja eficiencia del cultivo para degradar pañales para el caso del pañal con plástico.

Por otro lado los valores de degradación obtenidos por composteo son muy altos y consistentes, ya que hay duplicidad de resultados y la calidad de la composta obtenida es un buen indicador de que el proceso se realizó adecuadamente, por lo que es un método que logra una buena eficiencia de degradación, 87%, de los pañales y que en el comparativo realizado aparece como la mejor opción.

7.4.2 Insumos, operación e infraestructura, eficiencia y materiales residuales

En la **Tabla 7-15** se presenta un resumen de la comparación entre diferentes aspectos de los procesos de composteo y del cultivo de *Pleurotus*.

Al analizar ambos procesos, en cuanto a insumos, se observa que son muy parecidos, aunque el cultivo requiere de un mayor acondicionamiento de los sustratos, por la esterilización y el ajuste de humedad, además de la obtención de las cepas.

En la operación, el montaje de ambos procesos es similar sólo en lo relativo a molienda y a la preparación de los sustratos. En el cultivo la siembra debe realizarse en condiciones estériles,



además la invasión y fructificación, requieren vigilancia del proceso y control de las variables. Para el caso del composteo, una vez que los sustratos están listos, se mezclan y se ajusta el contenido de la humedad. En suma, el montaje del cultivo exige condiciones más estrictas que el composteo.

En infraestructura, el cultivo demanda condiciones más controladas y equipo más especializado que el composteo, mientras que los tiempos de degradación son muy parecidos en ambos procesos.

A pesar que este proyecto no tiene como objetivo obtener productos finales, sino encontrar el tratamiento más adecuado para la degradación de pañales, un beneficio adicional de este estudio es la obtención tanto de setas como de composta. Los hongos obtenidos son pocos, los valores de eficiencia biológica promedio son muy bajos, cerca del 15%, además de que se cosecharon sólo cuerpos fructíferos de tamaño pequeño. En contraste, la composta obtenida cumple con la mayor parte de los valores establecido en la normatividad mexicana, sólo está un poco arriba en los valores de pH, por lo que puede considerarse un producto de buena calidad.

Tabla 7-15 Comparación de los insumos, operación e infraestructura utilizados en el cultivo y en el composteo

Composta	Cultivo
Insumos	
Pañales desechables usados, residuos de jardinería; pasto, hojas (frescas y secas) mulch. El pasto y las hojas no requieren de acondicionamiento	Pañales desechables usados, paja o pasto. Cepas identificadas y certificadas.
Operación	
Molienda, registro de la masa, monitoreo (humedad, temperatura), análisis fisicoquímicos y microbiológicos, volteo manual.	Molienda, ajuste de humedad del cosustrato utilizado (paja y pasto), esterilización, siembra en espacio estéril, registro de la masa, control de temperatura, luz, humedad, CO ₂ por medio de aireación. Revisión continua para control de contaminación.
Infraestructura	
Reactores, área techada, molinos, balanzas, palas, mangueras, bioldos, equipo y material de laboratorio.	Cuartos con control de temperatura y humedad, molinos, autoclave, campanas de flujo laminar, bolsas, balanzas, sistema de riego, anaqueles de acero inoxidable, ventiladores.
Tiempos de degradación	
Alrededor de 16 semanas	Alrededor de 16 semanas
Productos finales	
Composta madura de buena calidad	Hongos frescos, de tamaño pequeño
Materiales residuales	
Residuos no degradados principalmente mulch, residuos de pañales y plásticos.	Cosustratos no degradados, residuos de pañales, principalmente plásticos



7.4.3 Ventajas y desventajas de los procesos

La **Tabla 7-16** muestra un resumen de las ventajas y desventajas del proceso de composteo en comparación con el cultivo de *Pleurotus*, mostrando aquellos parámetros que se consideran más relevantes.

Se observa que de manera general el proceso de composteo presenta más ventajas que el cultivo, tanto en la operación del proceso como en la eficiencia de degradación. Quizá la desventaja más importante del cultivo es la necesidad de contar con la infraestructura que permita controlar las condiciones ambientales para un buen desarrollo de los hongos y por ende de la degradación de los pañales, lo cual al pensar en el escalamiento del proceso parece un reto muy importante por los costos que implica.

El composteo en biorreactores, por el contrario, aparece como un alternativa atractiva, puede pensarse en considerar cada biorreactor como una unidad de una planta que puede ser escalable de acuerdo a las necesidades de tratamiento de este residuo, con la gran ventaja de producir composta de buena calidad y tratar simultáneamente residuos de jardinería, lo que significaría una disminución importante de los residuos generados en nuestro país.

Tabla 7-16 Ventajas y desventajas de los procesos de cultivo y biorreactores

Proceso	Ventajas	Desventajas
Cultivo	Los cosustratos no requieren fragmentación. Se obtiene un producto final con alto valor alimenticio, pero en poca proporción.	Se utilizan residuos agroindustriales que no siempre pueden adquirirse fácilmente. Existe un alto riesgo de contaminación. El monitoreo en la fase luminosa debe realizarse varias veces al día. Requiere vigilancia constante para controlar la contaminación y para revisar el crecimiento de los hongos para cosecharlos. Requiere de espacios con temperatura y humedad controlada y de condiciones de mucha higiene. La separación de productos y residuos debe realizarse manualmente y no es sencilla ya que los materiales quedan adheridos.
Biorreactores	Se utilizan residuos de jardinería que son de fácil adquisición, dependiendo de la época del año. El monitoreo del proceso es sencillo. La separación de productos y residuos finales puede realizarse por tamizado ya sea manual o mecanizado. Los materiales residuales se identifican fácilmente y podrían reciclarse. La composta final obtenida es de buena calidad.	Requiere de espacios amplios. Requiere de volteos manuales diarios al principio y después más espaciados.



Con base en los resultados obtenidos hasta el momento, las siguientes etapas de este estudio considerarán el composteo en biorreactores como la mejor opción para la degradación de pañales desechables usados y serán la base para la elaboración de la propuesta metodológica para la instalación de una planta a mediana escala.

7.5 Etapa 4. b) Propuesta metodológica para el diseño de la planta a mediana escala

En esta sección se describe el proceso para degradar pañales, definido a partir de los mejores resultados obtenidos experimentalmente, que son la base para la propuesta de la planta de composteo para pañales infantiles desechables mezclados con residuos de jardinería. También se presenta la distribución y organización administrativa de la planta. El sistema propuesto es modular para permitir su escalamiento de acuerdo con las necesidades y capacidad de la instancia interesada en su aplicación.

7.5.1 Descripción del proceso

El proceso de degradación se realiza mediante el composteo en biorreactores de los pañales desechables usados, mezclados con residuos de jardinería. Los microorganismos presentes en la materia orgánica degradan los residuos en forma aerobia hasta obtener composta.

La principal ventaja del empleo de biorreactores es que se puede tener un mejor control de las condiciones del proceso, lo que permite que los microorganismos se desarrollen de manera óptima y aceleren su actividad, llevando a cabo la degradación en un tiempo menor que el que se emplea en un sistema de pilas.

La **Figura 7-37** muestra el diagrama de flujo del proceso de biodegradación que se definió después de la experimentación realizada. Éste comprende cinco etapas: 1) Recepción y acopio de los residuos, 2) Acondicionamiento, 3) Proceso de composteo, y acondicionamiento final y 4) La evaluación de la calidad de la composta obtenida, las cuales se describen a continuación.

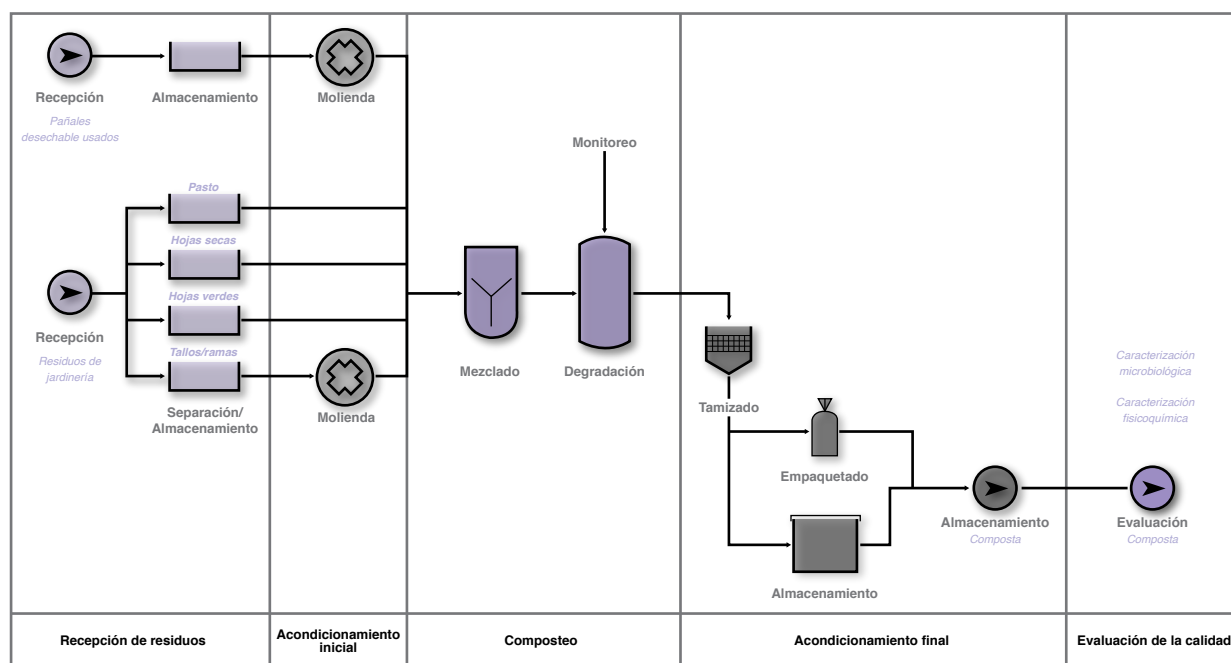


Figura 7-37 Proceso de biodegradación de pañales desechables

7.5.2 Obtención, recepción y acopio de residuos

Se propone que la obtención de los residuos se lleve a cabo a través del sistema de recolección del municipio que requiera el servicio de biodegradación de pañales. Para ello será necesario que la separación de los pañales se lleve a cabo desde la fuente de generación. Los residuos ya separados se recibirán, se pesarán y se acopiarán en las instalaciones de la planta de tratamiento.

La recepción de los residuos se llevará a cabo diariamente en el área de recepción y acopio. Los residuos deberán recibirse y almacenarse libres de otros materiales que no sean pañales o residuos de jardinería.

La recepción diaria proporcionará suficiente tiempo entre un montaje y otro para garantizar que el personal lleve a cabo la operación y control de calidad del lote anterior simultáneamente con el acondicionamiento y montaje del nuevo lote.

7.5.3 Acondicionamiento de los residuos

El acondicionamiento de los residuos se realizará de la siguiente manera: los pañales desechables deberán ser triturados, para garantizar que el material biodegradable que contienen quede expuesto. El pasto, las hojas verdes y secas se emplearán tal como se reciban de la recolección. Los troncos se triturarán, las ramas y tallos se triturarán sólo si su tamaño es mayor a 15 cm. Los residuos ya triturados se almacenarán en el área de acopio que les corresponde.



7.5.4 Composteo

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de composteo, se pueden procesar 11.5 kg de pañal desechable con 38.5 kg de residuos de jardinería. Esta proporción genera una relación inicial carbono-nitrógeno (C/N) adecuada, y permite obtener una composta de buena calidad. La tabla 7-17 muestra el ejemplo de combinación de residuos calculados para un total de 50 kg, que es la masa que puede contener un biorreactor de 200 L.

Tabla 7-17 Materiales a emplear en el proceso de biodegradación de pañales desechables

Material	Composición de la mezcla	Masa requerida en cada biorreactor
Pasto fresco	42%	21 kg
Pañales desechables	23%	11.5 kg
Mulch	23%	11.5 kg
Hoja fresca	8 %	4 kg
Hoja seca	4 %	2 kg
Total	100 %	50 kg

Los residuos acondicionados se mezclarán según la relación másica de la **Tabla 7-17** y se depositarán en los biorreactores. La degradación ocurrirá en un periodo de tres meses. Durante este tiempo se requerirá vaciar la mezcla de los biorreactores, voltear y airear diariamente los primeros quince días. Posteriormente la aireación se realizará cada dos semanas para garantizar que el proceso se lleve a cabo en las mejores condiciones de oxigenación y homogeneización.

Para mezclar y voltear el contenido de los biorreactores se podrán emplear amasadoras eléctricas, aunque también se podrá realizar de manera manual para disminuir los costos de operación. Los biorreactores se transportarán entre las áreas de acondicionamiento y de degradación, con ayuda de montacargas.

Durante la degradación, se deberá realizar el monitoreo diario de la temperatura, el pH, la humedad y la generación de CO₂, durante los primeros 15 días y el resto del proceso al menos dos veces por semana, como lo marca la norma ambiental (GODF, 2012) de acuerdo con la **Tabla 7-18**.

Tabla 7-18 Parámetros de monitoreo del proceso de composteo (GODF, 2012)

Parámetro	Frecuencia
Temperatura Humedad CO ₂	Diario
pH	Diario durante los primeros 7 días, posteriormente cada 15 días.



7.5.5 Acondicionamiento de la composta

Cuando el proceso de degradación concluya, la composta final obtenida se tamizará, para separar los residuos plásticos y otros materiales provenientes del chasis de los pañales desechables. Posteriormente, se empacará en bolsas de papel de 1 kg para su venta individual, con la información del lote correspondiente o se depositará en contenedores para la venta a granel, que se almacenarán en el área respectiva.

7.5.6 Pruebas de calidad

Para cumplir con la norma NADF-020-AMBT-2012, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal (GODF, 2012), se realizarán las pruebas de calidad al producto final obtenido que se muestran en la **Tabla 7-19**, las cuales deberán efectuarse en un laboratorio certificado.

Tabla 7-19 Pruebas de calidad en la composta obtenida (GODF, 2012)

Parámetro	Frecuencia
Conductividad eléctrica Estabilidad (diferencia de temperatura con el ambiente)	Por lote
Carbono total, Nitrógeno total Relación C/N, Macronutrientes (N,K,P) Materia orgánica	Cada 6 meses
Fitotoxicidad Elementos traza (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) Coliformes fecales, Salmonella Huevos de helminto	Una vez al año

7.6 Diseño de la planta de tratamiento

La propuesta de la planta de tratamiento se realizó considerando la masa de pañales generados por 100 niños/día. Esto facilitaría su escalamiento en cualquiera de las delegaciones del Distrito Federal o municipios en otras entidades. El diseño, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de pañales desechables se basa en las especificaciones de la norma local NADF-020-AMBT-2012 (GODF, 2012).

7.6.1 Capacidad de la planta

El cálculo de la capacidad de la planta se basa en que un niño genera al mes 15.255 kg de pañales con orina, ya que usa 4.6 pañales al día con una masa promedio de 101.7 g/ pañal. Si esta generación se redondea a 5 pañales diarios, se tiene una masa de 508.5 g de pañales/día por niño. Con base en esa información, los cálculos para la masa generada por 100 niños/día y el número de biorreactores requeridos para su tratamiento se presentan en la **Tabla 7-20**.



La **Tabla 7-21** muestra un resumen de la masa a tratar y el número de biorreactores requeridos por día, semana, mes y tres meses, que es el tiempo que dura el tratamiento.

La capacidad de esta planta de tratamiento es de 7.5 ton/mes de una mezcla de residuos de jardinería y de pañales desechables, o sea una capacidad suficiente para ingresar 1.725 ton/mes de pañales desechables. La planta está diseñada para 450 biorreactores distribuidos en 15 bloques, cada bloque tendrá 3 niveles y cada nivel 10 biorreactores. Dado que para el día 45 del proceso se espera que el volumen de la mezcla de residuos se reduzca a la mitad, en términos prácticos la planta puede operar con la misma capacidad con menos biorreactores.

La propuesta es fijar una cantidad base de pañales a tratar, que en este caso es la masa de pañal con orina que generan 100 niños en un mes. Si se quiere aumentar la cantidad de residuos a tratar, el diseño de la planta lo permitiría incrementando el número de bloques, es decir, es una planta modular que puede crecer de acuerdo con las necesidades.

Tabla 7-20 Cálculo de masa tratada de pañales/día y número de biorreactores

Concepto	Fórmula	Resultado
Pañales		
Masa promedio de pañales con orina producidos por un niño al mes	$= \left(0.1017 \frac{\text{kg pañal}}{\text{niño}} \right) * \left(5 \frac{\text{pañal}}{\text{día} - \text{niño}} \right) * 30 \text{ días}$	15.255 kg pañal / niño
Masa de pañales con orina producidos por 100 niños al mes	$= (15.255 \text{ kg pañal} / \text{niño} * 100 \text{ niños})$	1525.5 kg pañal
Masa de pañales de 100 niños a tratar / día	$= \frac{1525.5 \text{ kg}}{30 \text{ días}}$	50.85 kg / día
Masa de pañales a tratar por biorreactor		11.5 kg
Biorreactores		
Número de biorreactores / día	$= \frac{50.85 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{11.5 \frac{\text{kg}}{\text{biorreactor}}}$	4.42 = 5 $\frac{\text{biorreactores}}{\text{día}}$
Masa de pañales a tratar / día	$= 11.5 \frac{\text{kg pañal}}{\text{biorreactor}} * 5 \text{ biorreactores}$	57.5 kg
Residuos de jardinería		
Masa de residuos de jardinería / biorreactor		38.5 kg
Masa de residuos de jardinería para 5 biorreactores por día	$= 38.5 \frac{\text{kg}}{\text{biorreactor}} * 5 \frac{\text{biorreactor}}{\text{día}}$	192.5 kg



Tabla 7-21 Resumen de la masa a tratar y número de biorreactores

	Día	Semana	Mes	3 meses (duración total del proceso)
Pañales	57.5 kg	402.5 kg	1,725 kg	5,175 kg
Residuos de jardinería	192.5 kg	1,347.5 kg	5,775 kg	17,325 kg
Masa total	250 kg	1,750 kg	7,500 kg	22,500 kg
Número de biorreactores	5	35	150	450

7.6.2 Distribución de la planta

De acuerdo con la norma ambiental, la planta de tratamiento debe tener al menos tres secciones: recepción de insumos, trituración y formado de mezclas, maduración y almacenamiento (GODF, 2012). En la **Figura 7-38** se esquematiza la distribución de la planta de tratamiento propuesta, en una superficie de 590 m².

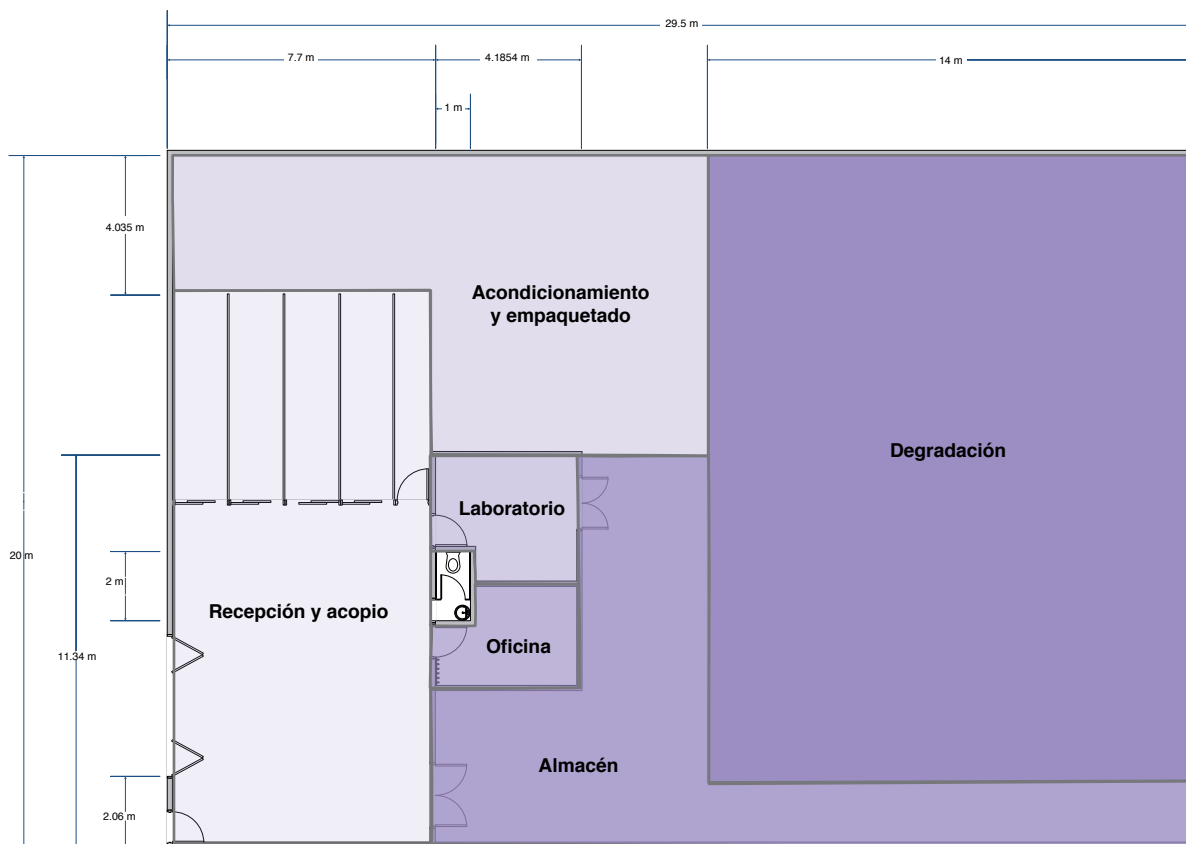


Figura 7-38 Distribución de la planta de tratamiento de pañales desechables

A continuación se describen las áreas de la planta propuesta.



7.6.2.1 Área de recepción y acopio de residuos

En esta área se recibirán diariamente los residuos. Existirá un espacio en esta sección para pesar y cuatro áreas de acopio para: 1) pañales desechables, 2) pasto fresco, 3) ramas y tallos o mulch, y 4) hojas verdes y secas.

7.6.2.2 Área de acondicionamiento y empaquetado

Esta área se utilizará para realizar varias actividades del proceso, como la molienda de los residuos, el mezclado inicial, el volteo, el tamizado y empaquetado del producto final, por lo que aquí estarán la mayoría de los equipos necesarios, como molinos, básculas, bioldos, palas, equipo de limpieza y amasadoras entre otros. Dado que el transporte de los biorreactores se realizará con ayuda de montacargas no existirán muros entre esta área y la de degradación con el objetivo de facilitar el transporte de los mismos.

7.6.2.3 Área de degradación

Es el área más grande de la planta y estará orientada de manera que facilite las maniobras de los montacargas para transportar los biorreactores desde cualquiera de los tres niveles. No tendrá muros y habrá suficiente espacio entre los bloques de biorreactores para permitir que se realice el monitoreo del proceso y los traslados al área de acondicionamiento para el volteo.

Como ya se mencionó, el diseño modular de la planta tendrá una distribución en 15 bloques, cada bloque es un conjunto de 30 biorreactores, que se forma a partir de 10 biorreactores a nivel de piso sobre los que podrían apilarse 20 más, formando tres niveles dando un total de 450 biorreactores.

Con esta disposición, si se requiere incrementar la capacidad de la planta, sólo será necesaria la tercera parte de la superficie deseada, ya que el resto se cubre con los otros dos niveles.

7.6.2.4 Laboratorio

El laboratorio de la planta de tratamiento contará con los espacios de trabajo y equipos necesarios para realizar las pruebas que se requieren para: caracterizar los residuos que se reciben (pH, cenizas, nitrógeno, materia orgánica y C/N), monitorear el proceso (pH, temperatura, humedad y CO₂) y preparar las muestras que se enviarán a un laboratorio certificado para evaluar la calidad del producto terminado. Los equipos necesarios se muestran en la [Tabla 7-22](#).

7.6.2.5 Almacén

El almacén contará con anaqueles para las bolsas de venta individual y para los contenedores para la venta a granel. La superficie que ocupará esta área será mayor a la que se empleará para almacenar la composta producida para facilitar las maniobras de los montacargas.



7.6.2.6 Oficina

La oficina contará con el mobiliario y equipo que requiera el trabajo administrativo de la planta. En la oficina se llenarán los formatos de la recepción de los residuos. Si la venta individual se realiza en la planta de tratamiento, el cobro del producto se realizará en esta sección.

7.6.2.7 Maquinaria, equipo y mobiliario

En la **Figura 7-39** se muestra el lay-out de la planta de tratamiento y en la **Tabla 7-22** se enlistan toda la maquinaria, los equipos y el mobiliario requeridos para la misma.

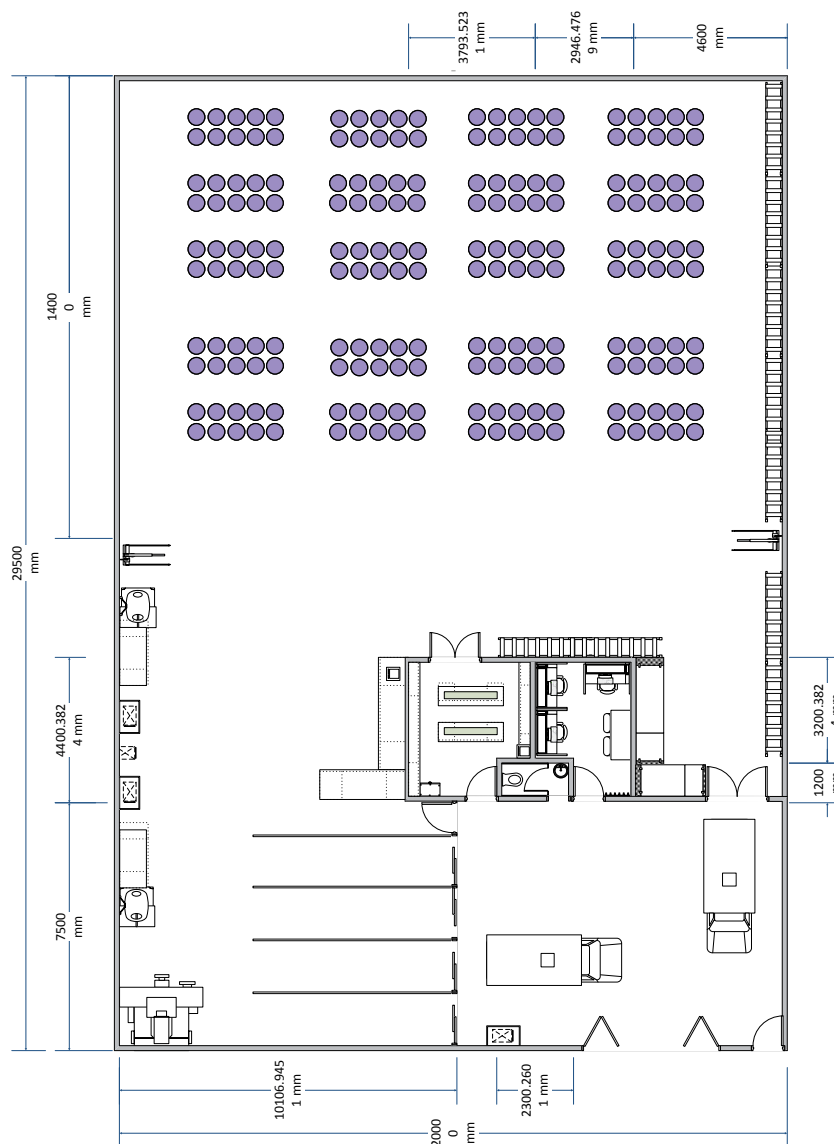


Figura 7-39 Lay-out de la planta de tratamiento



Tabla 7-22 Maquinaria, equipo y mobiliario requeridos en la planta de tratamiento

Área	Equipo	Cantidad
Recepción y acopio	Báscula digital de plataforma 200 kg	1
	Palas	2
	Bioldos	2
	Cajas de plástico de 70L	5
	Mesa y silla	1
Acondicionamiento y empaquetado	Molino de cuchillas No. 18	1
	Amasadora para 100 kg	1
	Báscula digital de plataforma 200 kg	2
	Contenedores cilíndricos de 200 L	450
	Balanza 1 kg	1
	Tamiz No. 20	4
	Hidrolavadora a presión	1
	Montacargas	1
	Mesas de trabajo	4
	Equipo de limpieza	
Maduración	Contenedores cilíndricos de 200 L	450
	Estructuras para los contenedores	24
	Montacargas	2
	Mesas de trabajo	1
Almacén	Anaqueles	10
	Contenedores horizontales de 1000 L	2
	Herramienta en general	
Laboratorio	Mesas de trabajo	4
	Estantes para reactivos y material	1
	Balanza para determinación de humedad	1
	Balanza analítica	1
	Medidor de pH	5
	Termómetros	2
	Medidor de CO ₂	5
	Medidor de humedad	1
	Medidor de conductividad	5
	Equipo para la determinación de nitrógeno	10
	Mufla	1
	Material de laboratorio	
	Reactivos	
	Sillas	3
Oficina	Computadoras de escritorio	2
	Impresora multifuncional	1
	Centros de cómputo individuales	2
	Archiveros	1
	Mesa de trabajo	1
	Sillas	2



7.7 Organización

El horario de la planta de tratamiento será de lunes a domingo de 9:00 a 17:00 h. Los puestos de trabajo y requisitos de vacantes se describen a continuación.

Jefe de operación. Tiempo completo

Escolaridad: pasante de licenciatura, preferentemente Ingeniería Ambiental, Química Biología o Industrial.

Experiencia: tratamiento o gestión de RSU.

Responsabilidades: coordinar la gestión de los residuos y del producto terminado. Organizar la operación y reparto de actividades. Atender las actividades administrativas. Asesorar a los asistentes de operación durante el proceso. Capacitar sobre el uso de la maquinaria y equipos a los asistentes de operación.

Analista de laboratorio. Tiempo completo

Escolaridad: pasante de licenciatura, preferentemente QFB, QBP, Ingeniería Ambiental, Biología o Química.

Experiencia: análisis fisicoquímicos, análisis microbiológicos.

Responsabilidades: realizar las pruebas de monitoreo y calidad durante el proceso y al producto terminado. Asistir a los asistentes de operación para los muestreos. Elaborar informes sobre el monitoreo del proceso y la caracterización del producto terminado.

Asistente de operación. Tiempo completo

Escolaridad: secundaria concluida.

Experiencia: no requerida.

Responsabilidades: Recibir, separar y acondicionar los residuos. Mezclar, montar y airear los biorreactores. Tamizar y empaquetar el producto terminado. Asistir al analista de laboratorio.

Asistente de operación (Operador del montacargas). Tiempo completo

Escolaridad: secundaria concluida

Experiencia: operación de montacargas y vehículos de transporte.

Responsabilidades: transportar los residuos mediante los montacargas a las diferentes secciones de la planta. Cargar y descargar los biorreactores para su transporte y reacomodo. Asistir al resto de los asistentes de operación en el mezclado o aireación. Almacenar el producto terminado.



Intendente. Tiempo completo

Escolaridad: primaria concluida.

Experiencia: no requerida.

Responsabilidades: limpiar el área de recepción de residuos. Mantener las instalaciones libres de residuos y contaminación.

7.8 Etapa 4. c) Manual de procedimientos de la planta de composteo de pañales desechables usados

A continuación se describen detalladamente los procedimientos que deberán realizarse para que la planta de composteo de pañales funcione de manera adecuada. Los residuos utilizados en este proceso son pañales infantiles desechables usados conteniendo orina y residuos de jardinería.

7.9 Recepción y almacenamiento de los residuos

- I. Realizar una inspección visual de las condiciones de recepción de los residuos.
- II. Recibir sólo pañales conteniendo orina, que deberán conservarse tal y como se desechan (envueltos en su capa exterior) (ver **Figura 7-40**).
- III. Verificar que los residuos de jardinería estén formados por pasto, hoja seca, hoja fresca, pasto, ramas y/o troncos (ver **Figura 7-41**).
- IV. Permitir que el operador del camión recolector deposite los residuos en el área correspondiente.
- V. Separar los residuos en caso de que vengan mezclados.
- VI. Llenar cajas plásticas de 70 L con los residuos por separado y pesarlos en la báscula ubicada en la sección de Recepción y acopio.
- VII. Registrar la masa de los residuos ingresados en el formato correspondiente.
- VIII. Acomodar los residuos en la sección correspondiente con ayuda de palas o bioldos.
- IX. Registrar las observaciones en el formato de recepción de materia prima (**ANEXO F**).



Figura 7-40 Pañales desechables usados



Figura 7-41 Pasto fresco, hoja seca, hoja fresca y mulch

7.10 Acondicionamiento de materia prima

7.10.1 Funcionamiento de la trituradora

Las instrucciones siguientes se refieren a la trituradora Vermeer BC 1000 (**Figura 7-42**), en caso de utilizar otro equipo se requerirá ajustar este procedimiento.



- I.** Verificar el nivel de aceite y de combustible, llenar los tanques si es necesario.
- II.** Colocar el control del regulador entre las posiciones lento y rápido.
- III.** Colocar el control del cebador en la posición de cebador.
- IV.** Arrancar el motor activando la llave de contacto. Soltar la llave inmediatamente cuando el motor arranque y mover el regulador a posición rápida.
- V.** Acoplar la trituradora, empujando lentamente la manija del embrague hacia abajo.
- VI.** Llevar el control del cebador, gradualmente, a la posición “off” (apagado) después de que el motor arranque y se caliente. Se puede operar la máquina durante el período de calentamiento, pero puede ser necesario dejar el cebador parcialmente activado hasta que el motor se caliente.
- VII.** Apagar la trituradora, moviendo el regulador a la posición de velocidad mínima lenta y desacoplar la manija del embrague.
- VIII.** Permitir que el motor marche a la velocidad mínima durante 30 a 60 segundos; parar el motor llevando el regulador a la posición “baja” o apagar el encendido
- IX.** Permitir que la máquina se detenga por completo

7.10.2 Molienda de los residuos

- I.** Poner en marcha la trituradora y dejar que se caliente el motor.
- II.** Llenar una caja plástica con pañales desechables y transportarla hasta la sección de acondicionamiento.
- III.** Colocar una bolsa de tela a la salida de la trituradora que conecte con el recipiente en el que se recibirán los pañales para evita el material se pierda (Ver **Figura 7-42**).
- IV.** Depositar manualmente los pañales a la entrada de la trituradora, empujar con lentitud los pañales hacia las cuchillas con ayuda de tablas de madera, permitiendo que el equipo los triture por completo(Ver **Figura 7-43**).
- V.** Recibir el material en un recipiente que permita su fácil transporte (**Ver Figura 7-43**).
- VI.** El tamaño del pañal al final del proceso de molienda deberá ser aproximadamente de 5 cm x 5 cm.
- VII.** Llevar el material triturado a la sección correspondiente y repetir el procedimiento desde el punto II.
- VIII.** Repetir el procedimiento a partir de la molienda de ramas y troncos para obtener el mulch, se recomienda realizar su molienda después de la del pañal con la finalidad de limpiar la máquina.



Figura 7-42 Trituradora con adaptador para molienda de pañales



Figura 7-43 Entrada de los pañales al proceso de molienda y pañales triturados

7.11 Preparación y montaje de biorreactores

7.11.1 Perforación de los contenedores cilíndricos

Esta operación sólo se realiza antes del primer uso de cada contenedor.

- I.** Colocar horizontalmente un contenedor cilíndrico en una mesa de trabajo.
- II.** Marcar, cada 14 cm., dos costados opuestos del contenedor, utilizando un flexómetro y un marcador.
- III.** Colocar un cortador circular de 4 cm de diámetro y la broca correspondiente en un taladro eléctrico.
- IV.** Realizar las perforaciones siguiendo las marcas iniciales, de manera que los orificios estén separados 10 cm uno del otro como, en la **Figura 7-44**.
- V.** Cambiar el cortador cilíndrico por uno de 2 cm y perforar la tapa del contenedor siguiendo el patrón de la **Figura 7-44**.

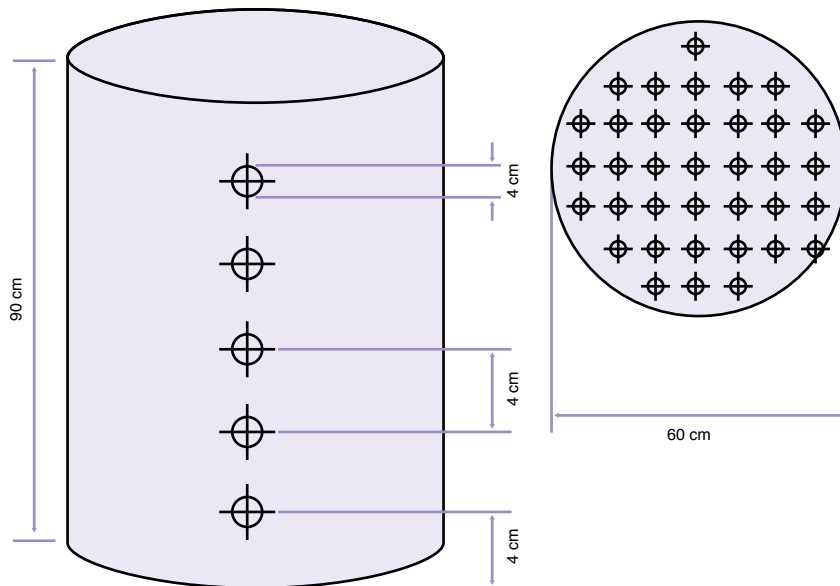


Figura 7-44 Perforación de contenedores cilíndricos y tapas

7.11.2 Montaje de los biorreactores

- I.** Pesar en cajas plásticas las siguientes cantidades de residuos ya triturados: 11.5 kg de pañal desechable, 21 kg de pasto, 11.5 kg de mulch, 4 kg de hoja fresca y 2 kg de hoja seca. Transportar estas cajas a la sección de Acondicionamiento y empaquetado.
- II.** Colocar el pasto, el mulch, la hoja fresca y la hoja seca en una amasadora y accionarla para que forme una mezcla homogénea.
- III.** Agregar el pañal desechable a la mezcla de residuos de jardinería, y continuar mezclando.
- IV.** Medir la humedad de la mezcla y si es necesario ajustar la humedad a 60%, agregando el agua necesaria.
- V.** Verter manualmente la mezcla perfectamente homogénea en un contenedor cilíndrico evitando que se compacte.
- VI.** Colocar la tapa del contenedor ajustando las abrazaderas metálicas.
- VII.** Registrar en una etiqueta el número del lote de la siguiente manera: iniciales del nombre del operador, la fecha y la hora de llenado, sin espacios, número de bloque correspondiente. Colocar la etiqueta en una parte visible del contenedor, y deberá removerse una vez que termine el tratamiento de cada lote.
- VIII.** Transportar cada biorreactor hasta la sección de degradación y acomodarlo en las estructuras metálicas con ayuda del montacargas.



7.11.3 Aireación y volteo

- I.** Transportar cada biorreactor hasta la sección de Acondicionamiento y empaquetado con ayuda del montacargas.
- II.** Destapar el biorreactor y vaciar su contenido en una amasadora con el montacargas.
- III.** Accionar la amasadora durante 10 min o hasta que el contenido haya sido mezclado perfectamente.
- IV.** Vaciar la mezcla en el mismo contenedor, colocar la tapa y regresar el biorreactor a la estructura metálica
- V.** Repetir este procedimiento diariamente con cada biorreactor durante los primeros 15 días del proceso. Posteriormente, realizar la aireación cada dos semanas.

7.12 Monitoreo

El monitoreo se realizará simultáneamente con los volteos y además se elegirá, al azar, un biorreactor de cada bloque para el registro diario de los parámetros que se requieran.

7.12.1 pH

- I.** Realizar esta prueba al inicio del proceso, a los 7 días y, posteriormente, cada 15 días, cuando se realice el volteo.
- II.** Tomar una muestra de 50 g de la mezcla directamente de la amasadora en el momento de la aireación.
- III.** Pesar 10 g de la muestra y colocarlos en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- IV.** Adicionar 90 mL de agua desionizada con ayuda de una probeta de 100 mL.
- V.** Mezclar perfectamente y dejar reposar 30 min.
- VI.** Medir el pH con un medidor de electrodo.
- VII.** Repetir el procedimiento a partir del punto ii, de manera que se obtenga la medición de pH de la muestra inicial por triplicado.
- VIII.** Registrar los tres valores, calcular el promedio y la desviación estándar.

7.12.2 Temperatura

- I.** Insertar un termómetro de vástago en uno de los orificios del biorreactor.
- II.** Registrar la temperatura en la bitácora correspondiente y retirar el termómetro.
- III.** Repetir el procedimiento en los 5 orificios del biorreactor y en un orificio central de la tapa.
- IV.** Elegir un biorreactor por bloque al azar y medir la temperatura diariamente durante todo el proceso de degradación
- V.** Registrar los cinco valores, calcular el promedio y la desviación estándar.



7.12.3 Humedad

- I. Insertar un medidor de humedad de vástago en uno de los orificios del biorreactor.
- II. Registrar la humedad en la bitácora correspondiente y retirar el medidor de humedad.
- III. Repetir el procedimiento en los 5 orificios del biorreactor y en un orificio central de la tapa.
- IV. Elegir un biorreactor por bloque al azar y medir la humedad diariamente durante todo el proceso de degradación.
- V. Registrar los cinco valores, calcular el promedio y la desviación estándar.

7.12.4 CO₂

- I. Introducir un tubo de PVC de una pulgada de diámetro y 1 m de alto en el centro del biorreactor.
- II. Colocar el medidor de CO₂ (electrodo) dentro del tubo de PVC y sujetar con la mano para evitar que caiga (Figura 7-45).
- III. Verificar que la lectura de CO₂ emitido se estabilice y registrar el valor leído en la bitácora correspondiente.
- IV. Elegir un biorreactor por bloque al azar y medir la concentración de CO₂ diariamente durante todo el proceso de degradación.



Figura 7-45 Medición de CO₂

7.13 Evaluación de la calidad de la composta

- I. Verificar la textura y apariencia de la composta al final del proceso:
 - a) Material particulado de color oscuro, con olor agradable a tierra.
 - b) Conformado por partículas finas y homogéneas no compactadas.
 - c) Contenido de humedad comparable al de una toalla exprimida.
 - d) Sin generación de calor.
 - e) Propiedades constantes a lo largo del tiempo.



- II. Evaluar la calidad de la composta obtenida a partir de los valores y los métodos de análisis de la NADF-020-AMBT-2011 (GODF, 2012). La **Tabla 7-23** presenta los valores para cada parámetro, para los tres tipos de composta que se pueden obtener.

Tabla 7-23 Resumen de los parámetros y valores que debe cumplir una composta (modificado de la NADF-020-AMBT-2011)

Parámetro	Tipos de composta		
	A	B	C
Uso recomendado	Sustrato en viveros y sustituto de tierra para maceta	Agricultura ecológica y reforestación	Paisaje y áreas verdes urbanas y reforestación
Humedad	20 - 35% en peso		25-45% en peso
pH	6.7 - 7.5	6.5 - 8	
Conductividad eléctrica	< 4 dS/m	< 8 dS/m	< 12 dS/m
Materia orgánica	> 20% MS		> 25% MS
Carbono total Nitrógeno total % MS	Debe indicarse en la etiqueta el resultado del último análisis realizado		
Relación C/N	< 15	< 20	< 25
Macronutrientes (NPK) en % MS	De 1 a 3% en cualquiera de ellos y su suma $\leq 7\%$: portará la leyenda "Composta - mejorador de suelos". Si cualquiera excede 3% o la suma es mayor a 7% debe portar la leyenda "Composta para nutrición vegetal" y se indicarán las cantidades para cada macronutriente		
Granulometría	≤ 10 mm	≤ 30 mm	
Fitotoxicidad (IG)	IG $\geq 85\%$	IG $\geq 75\%$	IG $\geq 60\%$
Diferencia de temperatura con el ambiente medida a profundidad ≥ 50 cm	≤ 10 °C		≤ 15 °C



7.13.1 Humedad

Medir la humedad del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (de la federación DOF, 2002).
- b)** Método AS-05: Contenido de humedad del suelo (de la federación DOF, 2002).
- c)** Sólidos totales y agua, secado a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ (Sadzawka et al., 2005).
- d)** Method 03.09 (TMECC y Composting, 2001).

7.13.2 pH

Medir el pH del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Norma Mexicana NMX-AA-025-1984, determinación del pH-Método potenciométrico (DOF, 1992).
- b)** Suspensión en agua 1:5 (Sadzawka et al., 2005).
- c)** Method 04.11 (TMECC y Composting, 2001).

7.13.3 Conductividad eléctrica

Medir la conductividad eléctrica del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Método AS-18, Medición de la conductividad eléctrica (de la federación DOF, 2002).
- b)** Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (de la federación DOF, 2002).
- c)** Extracto 1:5 (Sadzawka et al., 2005).
- d)** Method 04.10 (TMECC y Composting, 2001).

7.13.4 Materia orgánica

Analizar el contenido de materia orgánica del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Método AS-07, Contenido de materia orgánica (de la federación DOF, 2002).
- b)** Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (7.1.7) (de la federación DOF, 2002).
- c)** Pérdida por calcinación a 550°C (Sadzawka et al., 2005).
- d)** Method 05.07-A (TMECC y Composting, 2001).

7.13.5 Carbono total

Calcular a partir del resultado de la materia orgánica (Sadzawka et al., 2005).



7.13.6 Nitrógeno total

Analizar el contenido de nitrógeno total del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Método AS-25, Nitrógeno total por procedimiento de digestión (de la federación DOF, 2002).
- b)** Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (de la federación DOF, 2002).
- c)** Digestión Kjeldahl, destilación de NH_3 y titulación (Sadzawka et al., 2005).
- d)** Method 04.02-A (TMECC y Composting, 2001).

7.13.7 Relación C/N

Calcular la relación C/N del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Norma Mexicana NMX-AA-067-1985.-Protección al Ambiente- Contaminación del suelo- Residuos Sólidos Municipales- Determinación de la relación Carbono/Nitrógeno (de la federación DOF, 1992).
- b)** Relación carbono/nitrógeno (Sadzawka et al., 2005).
- c)** Method 05.02-A (TMECC y Composting, 2001).

7.13.8 Macronutrientes (PK)

Fósforo

Medir el fósforo del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Norma Oficial Mexicana NOM-020-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (de la federación DOF, 2002).
- b)** Espectrofotometría de absorción o emisión atómica (Sadzawka et al., 2005).

Potasio

Medir el potasio del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (de la federación DOF, 2002).
- b)** Espectrofotometría de absorción o emisión atómica (Sadzawka et al., 2005).

7.13.9 Elementos traza

Medir los elementos traza del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:



- a)** 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 (DOF, 2003).
- b)** Espectrofotometría de absorción atómica (Sadzawka et al., 2005).
- c)** Method 04.06 (TMECC, 2001).

7.13.10 Coliformes fecales

Medir los coliformes fecales del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** 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 (DOF, 2003).
- b)** Method 07.01- B (TMECC, 2001).

7.13.11 Salmonella

Analizar si existe Salmonella en el producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** 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 (DOF, 2003).
- b)** Method 07.02 (TMECC y Composting, 2001).

7.13.12 Huevos de helmintos viables

Analizar si el producto final contiene huevos de helmintos viables con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** 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 (DOF, 2003).
- b)** USEPA Modificado, Instituto Pasteur Lille (Roussel et al., 2003).

7.13.13 Estabilidad

Medir la estabilidad del producto final con base en alguno de los siguientes métodos:

- a)** Método en campo diferencia de la medición de temperatura a una profundidad ≥ 50 cm en 5 intervalos de 24 horas (GODF, 2012)
- b)** Auto calentamiento Method 05.08-D (TMECC y Composting, 2001)

7.13.14 Madurez evaluada por Fitotoxicidad

Evaluar la madurez del producto final por fitotoxicidad con base en alguno de los siguientes métodos:



- a)** Method 05.05-A (TMECC y Composting, 2001)
- b)** Método propio con base en: (Tiquia, 2000; Zucconi et al., 1981)

7.14 Acondicionamiento final del producto

7.14.1 Verificación final del producto

- I.** Verificar el cumplimiento de las características establecidas en el numeral 6.4.1 de la norma NADF-020-AMBT-2011.
- II.** Tamizar la composta que cumpla con la norma vigente para su distribución o comercialización, indicando el tipo de composta del que se trata.
- III.** Almacenar el producto final que no cumpla con la norma para darle un periodo de maduración complementario.

7.14.2 Tamizado

- I.** Colocar en una mesa de trabajo un biorreactor que contenga composta madura.
- II.** Tomar con una pala una porción de composta y colocarla sobre un tamiz.
- III.** Agitar vigorosamente sobre una caja plástica con el fin de separar los residuos plásticos, recibir y almacenar la composta tamizada.
- IV.** Retirar los residuos plásticos del tamiz y colocarlos en un recipiente para este fin.
- V.** Separar del tamiz los materiales orgánicos no degradados, para reincorporarlos al inicio del proceso.

7.15 Empaquetado del producto final

7.15.1 Venta individual

- I.** Colocar una bolsa de papel sobre la balanza de 3 kg y tarar a cero.
- II.** Pesar dentro de la bolsa 1 kg de composta tamizada.
- III.** Colocar una etiqueta con el número de lote y las características de la composta.
- IV.** Acomodar las bolsas resultantes en una caja plástica.
- V.** Transportar la composta empaquetada a la sección de Almacenamiento para acomodarla en los anaqueles.

7.15.2 Disposición a granel

- I.** Transportar la composta tamizada a la sección de almacenamiento para vaciarla en los contenedores horizontales, con ayuda de un montacargas
- II.** Colocar al contenedor una etiqueta con el número de lote y las características de la composta.



7.16 Etiquetado del producto

- I. Etiquetar las bolsas de composta de acuerdo con lo especificado en la Norma Oficial Mexicana NOM-050-SCFI-2004, Información Comercial - Etiquetado General de Productos (de la federación DOF, 2004) y colocar además la siguiente información:
 - a) Tipo de composta.
 - b) Clasificación por contenido de nutrientes que puede ser: composta para nutrición vegetal o mejorador de suelo.
 - c) % Humedad a la fecha de empaque.
 - d) pH
 - e) Conductividad eléctrica.
 - f) Diferencial de temperatura con el ambiente a la fecha de empaque.
 - g) % de N, P y K en caso de ser composta para nutrición vegetal.
 - h) Resultados del último análisis realizado de materia orgánica, carbono total, nitrógeno total, C/N y elementos traza.

7.17 Venta o entrega de producto

La composta debidamente embolsada y etiquetada estará lista para ser entregada a los interesados a través de su venta o donación. Se deberá llevar un control de dicha entrega o venta y es recomendable aclarar cualquier duda sobre su uso. Estos procedimientos se llevarán a cabo en la oficina de la planta.

7.17.1 Venta individual

- I. Seleccionar una bolsa para su venta y verificar que la etiqueta con la información del lote se encuentre completa y bien llenada.
- II. Entregarla al cliente.
- III. Recibir el dinero en efectivo y depositarlo en la caja registradora de la oficina.
- IV. Entregar al cliente el talón de venta impreso de la registradora.

7.17.2 Venta a granel

- I. Llenar, con ayuda de una pala, una caja plástica con la composta requerida para el cliente.
- II. Pesar la caja en la báscula de la sección de Recepción y acopio. Registrar la masa sin la caja en el formato correspondiente.
- III. Vaciar la composta pesada en el contenedor del cliente.
- IV. Recibir el dinero en efectivo y depositarlo en la caja registradora de la oficina.
- V. Entregar al cliente el talón de venta impreso de la registradora.



7.18 Manejo de residuos

- I. Tomar los componentes no biodegradables del pañal desechable como los plásticos, resortes y algunas telas, que se separaron durante el proceso de tamizado.
- II. Separar y clasificar por tipo de residuos y almacenarlos hasta su envío a reciclaje.
- III. Manejar cualquier otro tipo de residuos, de acuerdo con la legislación que aplique.

7.19 Mantenimiento

Para el mantenimiento del equipo se sugiere realizar rigurosamente las actividades para el mantenimiento preventivo para evitar en lo posible llegar al mantenimiento correctivo. El mantenimiento se realizará conforme al manual del usuario de cada equipo, de acuerdo con los procedimientos que se presentan a continuación.

7.19.1 Montacargas

- I. Verificar las condiciones generales del equipo en cada uso.
- II. Solicitar, cada ocho meses, el servicio de mantenimiento que incluye cambio de empaques, líquido hidráulico, cambio de juego de sellos y resortes, ajuste de carro, nivelación de uñas de apoyo, desarmado, limpieza, ensamblado, pintura y lubricación, cambio de bronce para pistón de levante.

7.19.2 Trituradora

Cada uso

- I. Verificar en cada uso el aceite del motor y el tanque de combustible, llenar o reemplazar si es necesario.
- II. Verificar cada tuerca y perno interno y externo, ajustar con la herramienta necesaria si presentan holguras.
- III. Verificar la presión de los neumáticos y ajustar a 30 psi si es necesario.
- IV. Verificar las conexiones de la batería antes del arranque.

Cada 8 horas de uso

- I. Verificar la holgura del bloque de picado y vuelva a aplicar un par de torsión de 75 lb-pie.
- II. Verificar el estado de las cuchillas troceadoras, verificar el filo y afilarlas con el esmeril de banco si es necesario y vuelva a aplicar un par de torsión de 25 lb-pie.
- III. Verificar el estado de las cuchillas trituradoras, limpiar y afilar si es necesario.
- IV. Limpiar toda la máquina con hidrolavadora y dejar secar por completo.



Cada 25 horas de uso

- I.** Verificar el estado de la correa de accionamiento. En función del estado de la correa, ajustarla o reemplazarla según convenga.
- II.** Verificar la alineación y la tensión de la correa o banda de transmisión, así como la polea.

Cada 50 horas de uso

- I.** Lubricar las boquillas de engrase.

Cada año

- I.** Desacoplar, verificar y volver a colocar los cojinetes de la rueda.
- II.** Cambiar si es necesario.

7.20 Revolvedoras

- I.** Verificar las condiciones generales del equipo en cada uso.
- II.** Realizar la limpieza completa de la máquina con ayuda de la hidrolavadora y lubricar las partes móviles mensualmente.
- III.** Exentar de mantenimiento las flechas de acero inoxidable.
- IV.** Evaluar el funcionamiento de las chumaceras cada año y medio, y reemplazarlas si es necesario.
- V.** Verificar que la tornillería se encuentre libre de oxidación y cambiarla si es necesario

7.21 Equipos de laboratorio

7.21.1 Medidor de pH

- I.** Realizar una calibración diaria del equipo.
- II.** Presionar la tecla Menú y seleccionar la opción de Calibrate.
- III.** Colocar el electrodo en la solución patrón de pH = 4 y dejar que la lectura se estabilice. Presionar la tecla continuar.
- IV.** Retirar el electrodo de la solución, enjuagarlo con agua desionizada e introducirlo a la solución patrón de pH = 10. Dejar que la lectura se estabilice y presionar la tecla continuar.
- V.** Registrar en la bitácora correspondiente el valor de SLOPE que arroja el equipo.
- VI.** Retirar el electrodo de la solución, enjuagarlo con agua desionizada e introducirlo a la solución patrón de pH = 7.
- VII.** Medir el valor de pH de la solución y registrarla en la bitácora correspondiente.



7.21.2 Medidor de conductividad

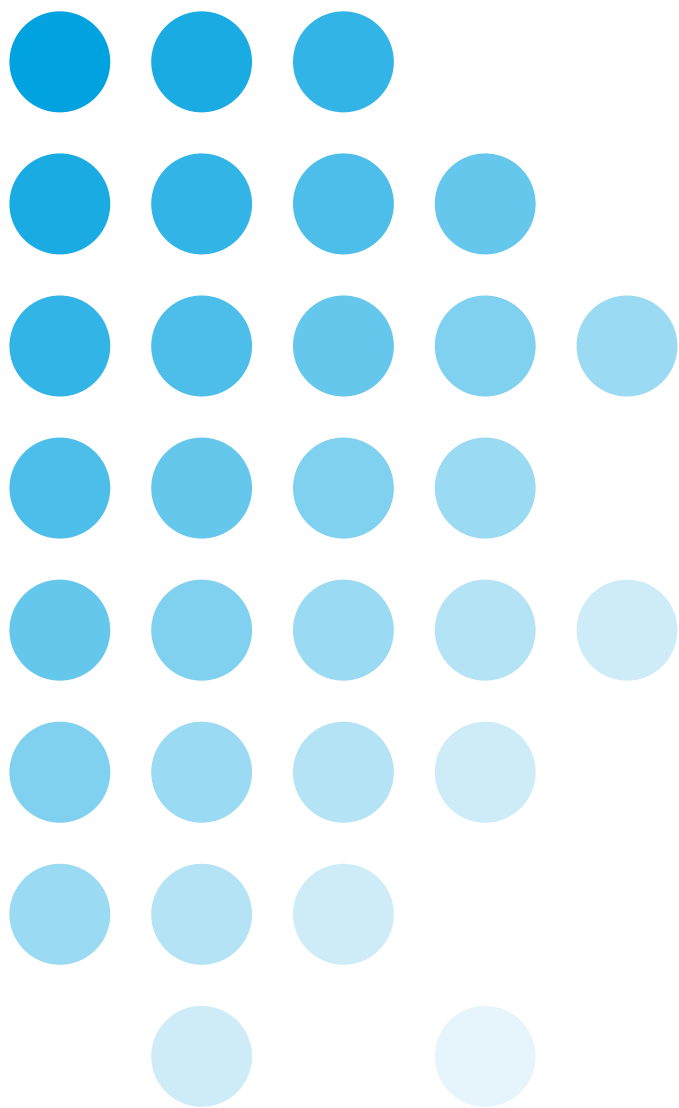
- I.** Realizar una calibración diaria del equipo.
- II.** Presionar la tecla Menu y seleccionar la opción de Calibrate.
- III.** Colocar el electrodo en la solución patrón de 100 mS y dejar que la lectura se estabilice. Presionar la tecla continuar.
- IV.** Teclear el valor de 100.00 mS en la pantalla del conductímetro y presionar la tecla Enter.

7.21.3 Medidor de CO₂

- I.** Realizar la calibración del equipo siguiendo las instrucciones del proveedor.

7.21.4 Básculas

- I.** Solicitar anualmente el servicio de calibración con el proveedor de las básculas.
- II.** Solicitar el servicio de cambio de batería cada dos años con el proveedor de las báscula.



Conclusiones



8. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio se presentan de acuerdo con los objetivos planteados y con base en los resultados obtenidos.

- **Escalar el proceso de degradación de pañales por *Pleurotus ostreatus* para el tratamiento de los pañales producidos por un niño en un mes.**

Dado que los pañales conteniendo sólo orina son los que se generan en mayor proporción, 66%, sólo se consideraron estos. Se encontró que un niño genera 15.255 kg de pañales con orina en un mes.

Durante la recopilación de los datos se contó con el apoyo de guarderías tanto de instituciones oficiales como de particulares. Esto puede interpretarse como una buena señal para que en un futuro éstos sean centros que proporcionen los pañales de manera separada ayudando a que su tratamiento pueda realizarse y evitando que se mezclen con el resto de los residuos.

- **Evaluar los procesos de acondicionamiento de los pañales.**

Los resultados obtenidos para el acondicionamiento de los pañales para ser degradados mediante el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, indican que los pañales deben molerse envueltos de la forma en que generalmente se desechan, sin retirar el plástico. La presencia del plástico en la conformación de los sustratos no tiene un efecto estadísticamente significativo, lo que permite simplificar el proceso.

- **Evaluar el proceso de biodegradación en diferentes configuraciones.**

Los ensayos con las cinco formas de cultivo mostraron que todos son viables para el escalamiento del proceso, sin embargo si se considera la disponibilidad de materiales y la optimización del espacio, el cultivo tradicional en bolsa rectangular y el de bolsa-cilindro se perfilan como las alternativas más interesantes. Una ventaja de ésta última es que ofrece una mayor superficie de contacto que puede redundar en una mayor degradación del sustrato además de que las bolsas podrían colgarse y aprovechar mejor los espacios.

- **Comparar las eficiencias de degradación obtenidas con diferentes cosustratos y con las dos cepas de hongos.**

Para el escalamiento del cultivo realizado en unidades experimentales de 5 kg en bolsas cilíndricas, se concluye que los mejores resultados, en la reducción de masa corresponden a la cepa BPR -81 variedad gris, en la reducción de volumen a la cepa BPR-5 variedad blanca ambos en el cosustrato paja y la mejor eficiencia biológica se obtuvo con la cepa BPR-5 variedad blanca en el cosustrato pasto.



El 60 % de eficiencia de reducción de masa obtenido con el cosustrato pasto puede ser una buen alternativa de aprovechamiento de este residuo, que podría tener una mayor disponibilidad en ambientes urbanos.

Los mejores valores de degradación del pañal corresponden al cosustrato pasto cuando se acondiciona sin plástico y se utiliza la cepa BPR-81 con 68.18%. En términos prácticos el mejor acondicionamiento para la degradación del pañal podría ser el de pañal con plástico con los cosustrato pasto o paja, con la variedad BPR81, ya que eliminaría la necesidad de retirar el plástico y presenta una degradación superior al 50%.

- **Seleccionar la mejor combinación de acondicionamiento, cosustrato y cepa.**

La mejor combinación de acondicionamiento es moler el pañal, sin retirar el plástico, mezclarlo con el cosustrato paja, ajustar la humedad a 60%, emplear bolsas cilíndricas y utilizar la cepa de *Pleurotus ostreatus* BPR -5 (variedad blanca).

- **Evaluar el proceso de degradación mediante composteo.**

Los resultados obtenidos en el proceso de composteo por medio de biorreactores mostraron que la degradación de los pañales, medida como la reducción de masa, fue del 87% y que la calidad de la composta final es buena.

El comportamiento del proceso se mantuvo dentro de las condiciones generales establecidas para el composteo aerobio. Los parámetros de temperatura, humedad, C/N y CO₂, tuvieron el comportamiento esperado. Los valores del pH fueron altos durante el proceso por lo que la composta final es alcalina, dicho parámetro puede evaluarse con pruebas de ecotoxicidad para establecer si afecta o no el crecimiento de especies vegetales y definir su aplicación.

Esta investigación ha permitido establecer que la incorporación de pañales desechables usados en el composteo de residuos orgánicos permite degradarlos mediante este tratamiento. Con ello se sientan las bases para un aprovechamiento de este tipo de residuos a través del reciclaje biológico de su componente principal y de la recuperación de los plásticos que lo componen, contribuyendo a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos.

- **Comparar los resultados de las dos formas de degradación**

Al comparar los resultados de degradación de pañales desechables usados obtenidos mediante *Pleurotus ostreatus* y mediante composteo, se encontró que el proceso de composteo fue más eficiente por lo que se concluye que es la mejor opción.

- **Elaborar la propuesta metodológica para la instalación de una planta a mediana escala con el proceso que resulte más eficiente.**

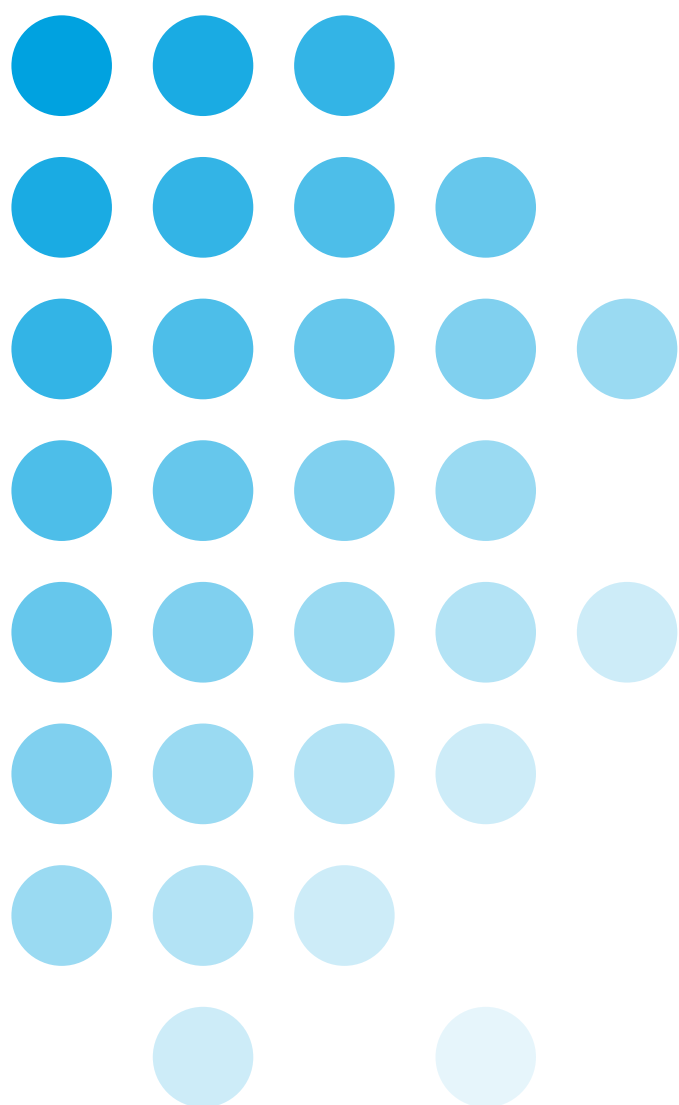
Con el fin de obtener los parámetros adecuados para su transferencia al sistema productivo y de gestión de residuos y de acuerdo con los resultados obtenidos se realizó el diseño



de una planta para la degradación de pañales desechables usados mezclados con residuos de jardinería, mediante composteo aerobio en biorreactores. El diseño de la planta se basa en los pañales con orina generados al mes por 100 niños, en los resultados obtenidos experimentalmente y en los criterios de la norma vigente en la Cd. de México. Se incluye la distribución de la planta, los requerimientos para su operación, tanto de equipo como humanos, así como los procedimientos y los métodos para el control de calidad de la composta obtenida. La planta propuesta, de tipo modular para permitir su escalamiento, cuenta con una superficie de 590 m² y con una capacidad de tratamiento de 7.5 t de residuos por mes, de los cuales 1.7 t son pañales desechables usados.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que en la evaluación de la biodegradación de pañales desechables usados, el composteo en biorreactores es la mejor opción para su tratamiento, ya que obtuvo valores de degradación más altos. La propuesta de una planta de tratamiento de pañales por composteo, aparece como una alternativa atractiva para las instancias interesadas en tratar los pañales desechables y los residuos de jardinería a través de un proceso flexible, que podría implementarse desde pequeñas comunidades hasta municipios. Esto contribuye a la solución de una problemática importante ya que esta planta permitiría el reciclaje de materiales y nutrientes que de otro modo quedaría en los rellenos sanitarios, con la ventaja adicional de producir una composta de buena calidad.

Una opción muy atractiva para la futura implementación de la planta como la aquí propuesta sería la de incluir pañales conteniendo tanto orina como heces, el riesgo por la presencia de patógenos podría controlarse si se garantiza que el proceso alcance temperaturas superiores a 50°C por al menos 4 días. Esta opción permitiría el tratamiento de los pañales sin necesidad de seleccionarlos, pero se requiere realizar los ensayos correspondientes.



Referencias bibliográficas

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amuneke, E.H., Dike, K.S., and Ogbulie, J. N. (2011). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* : An edible mushroom from agro base waste products. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*, 1 (3), 1–14.
- Aumônier, S., & Collins, M. (2005). *Life cycle assessment of disposable and reusable nappies in the UK*. Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
- Ayalon, O., Goldrath, T., Rosenthal, G., & Grossman, M. (2009). Reduction of plastic carrier bag use: An analysis of alternatives in Israel. *Waste Management*, 29, 2025–2032.
- Barrena, R., Canovas, C., & Sánchez, A. (2006). *Prediction of temperature and thermal inertia effect in the maturation stage and stockpiling of a large composting mass*. *Waste Management*, 26 (9), 953–959. doi:10.1016/j.wasman.2005.07.023
- Bautista, J., Franco, B. L., Martínez, S., Gamiño, S., & Ocaña, R. (1998). Valor nutritivo de setas (*Pleurotus ostreatus*) cultivadas en desechos de aguacate y piña. *Acta Universitaria*, 7 (2), 41–52.
- Benavides, J., & Herrera, J. (2009). *Reconocimiento de las características del género Pleurotus spp. y sus aplicaciones*. (Universidad Católica de Manizales, Ed.). Manizales, Caldas, Colombia.
- Bernai, M. P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63 (1), 91–99. doi:10.1016/S0960-8524(97)00084-9
- BioCycle. (2008). Green Ribbon Award for New Zealand composter. *ByoCicle*, junio, 6.
- Bonatti, M., Karnopp, P., Soares, H. M., & Furlan, S. A. (2004). Evaluation of *Pleurotus ostreatus* and *P. sajor-caju* nutritional characteristics when cultivated on different lignocellulosic wastes. *Food Chemistry*, 88, 425–428.
- Bonmatí, A. (2008). Gestión y tratamiento de residuos sólidos urbanos. In P. Andrés & R. Rodríguez (Eds.), *Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica* (Documenta., pp. 215–250). Girona (España).
- Bueno Marquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2011). Factores que afectan el proceso de compostaje. In *Compostaje* (p. 570). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Castrillón, O., Bedoya, O., & Montoya, D. (2006). Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. *Producción + Limpia*, 1, 87–98.



- Cayetano-Catarino, M. Bernabé-González, T. (2008). Cultivo de *Pleurotus* sobre residuos de las cosechas de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) y plátano (*Musa paradisiaca*). *Revista Mexicana de Micología*, 26, 57–60.
- Chinyama, A., & Toma, T. (2013). Understanding the poor performance of urban sewerage systems: A case study of Coldstream High Density suburbs, Chinhoyi, Zimbabwe. *Urban Planning and Design Research (UPDR)*, 1 (3), 45–51.
- Chipunza, P. (2012). Diarrhoea: We have a role to play.
- Colomer, M. J. F., & Gallardo, I. A. (2009). *Tratamiento y gestión de residuos sólidos* (LIMUSA.), México.
- Colón, J., Mestre-Montserrat, M., Puig-Ventosa, I., & Sánchez, A. (2013). Performance of compostable baby used diapers in the composting process with the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 33 (5), 1097–103. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.018
- Colón, J., Ruggieri, L., Sánchez, A., González, A., & Puig, I. (2011). Possibilities of composting disposable diapers with municipal solid wastes. *Waste Management & Research : The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29 (3), 249–259. doi:10.1177/0734242X10364684
- Conway, M., Jooste, F., & Smith, M. (1996). Treatment of absorbent sanitary paper products. USA.
- Curvetto, N. R., Figlas, D., Devalis, R., & Delmastro, S. (2002). Growth and productivity of different *Pleurotus ostreatus* strains on sunflower seed hulls supplemented with N-NH₄⁺ and/or Mn(II). *Bioresource Technology*, 84 (2), 171–176. doi:10.1016/S0960-8524(02)00013-5
- De la federación DOF, D. O. (1992). NMX-AA-067-1985. Determinación de la relación Carbono/ Nitrógeno. 6 de Noviembre de 1992.
- De la federación DOF, D. O. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. 31 de Diciembre de 2002.
- De la federación DOF, D. O. (2004). NOM-050-SCFI-2004. Información comercial-Etiquetado general de productos. 1 de Junio de 2004.
- Delfín Alcalá I., & Durán, de B. C. (2003). Biodegradación de residuos urbanos lignocelulósicos por *Pleurotus*. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 19 (1), 37–45.
- Delfín Alcalá I., Espinosa, V. R. M., Turpin, M. S., & Hernández, O. M. A. (2000). Biodegradación del pañal desechable. *Memorias Del XXIV Congreso Latinoamericano de Química, Lima, Perú*.



- Delfín Alcalá, I. (2002). *Estudios de biodegradación de residuos celulósicos y lignocelulósicos: pasto, paja, algodón y residuo celulósico de pañal desechable*. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dickenson, N., Richard, T., & Kozlowski, R. (1991). *Composting to reduce the waste stream- A Guide to small Scale Food and Yard Waste composting*. (I. Cooperative Extension, Ed.). New York: 152 Riley-Robb Hall.
- DOF, D. O. de la federación. (1992). NMX-AA-025-1984, determinación del pH-Método potenciométrico. 6 de Noviembre de 1992.
- DOF, D. O. de la federación. (2003). NOM-004-SEMARNAT-2002, protección ambiental - Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. 15 de Agosto de 2003.
- DOF, D. O. de la federación. NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta)-Especificaciones y métodos de prueba (2008).
- Dundar, A., Acay, H., & Yildiz, A. (2009). Effect of using different lignocellulosic wastes for cultivation of *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. on mushroom yield, chemical composition and nutritional value. *African Journal of Biotechnology*, 8 (4), 662–666. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-62749124884&partnerID=tZOtx3y1>
- Durán, M. A., Garcés, R. M., Velasco, A. R., Marín, E. J. C., Gutiérrez, L. R., Moreno, G. A., & Delgadillo, H. N. A. (2013). Mexico city's municipal solid waste characteristics and composition analysis. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29 (1), 39–46.
- EDANA. (2008). *Sustainability Report 2007-2008. Absorbent Hygiene Products*. Reporte técnico. EDANA. Bruselas, Bélgica.
- Ekinci, K., Keener, H. M., & Elwell, D. L. (2000). Composting Short Paper Fiber with Broiler Litter and Additives: Part I: Effects of Initial pH and Carbon/Nitrogen Ratio On Ammonia Emission. *Compost Science & Utilization*, 8 (2), 160–172. doi:10.1080/1065657X.2000.10701761
- ENT. (2007). *Projecte Pilot d'introducció de bolquers reutilitzables a llars d'infants de Sant Cugat del Vallès. Memòria final de projecte. Ajuntament de Sant Cugat del Vallès*. Agència de Residuos de Catalunya.
- Environcomp. (2011). Disponible en: <http://www.envirocomoglobal.com>. Visitado: Agosto, 2014.
- Espinosa Valdemar R. M., & Delfín Alcalá I. (2005). Composteo: reaprovechamiento de la materia orgánica. *Arborea*, 14 (15), 27–36.
- Espinosa Valdemar R. M., Delfín Alcalá I., Turpin, S., & Contreras, J. L. (2003). Kinetic Study of Batch Biodegradation of Diapers. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CHEMICAL REACTOR ENGINEERING*, 1 (1), 1542–6580. doi:10.2202/1542-6580.1082



- Espinosa Valdemar R. M., & Delfín Alcalá I. (1997). Método para el tratamiento de pañales desechables usados.
- Espinosa Valdemar R. M., Delfín Alcalá I., Turpin, M. S., & Hernández, O. M. A. (1999). Minimización de pañales desechables. *Memorias Del VI Congreso Interamericano Sobre El Medio Ambiente, Monterrey*.
- Espinosa Valdemar, R. M. (2002). *Estudio comparativo del desarrollo de Pleurotus ostreatus utilizando como sustratos pañales desechables y paja*. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México.
- Espinosa Valdemar, R. M., Turpin, S., & Delfín Alcalá I. (2006). Cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando como sustrato pañal desechable. *Memorias Del 2° International Meeting on Environmental Biotechnology and Engineering, México D.F.*
- Espinosa Valdemar R. M., Delfín Alcalá I., Parra-Gallegos, A., Rodríguez- Hernández, A., & Bravo-Villegas, R. (2000). Minimización del residuo de pañal desechable. *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental de AIDIS*.
- Espinosa Valdemar R. M., Turpin Marion S., Delfín Alcalá I., & Vázquez Morillas A. (2011). Disposable diapers biodegradation by the fungus *Pleurotus ostreatus*. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 31 (8), 1683–8. doi:10.1016/j.wasman.2011.03.007
- Fernandes, Â., Barros, L., Martins, A., Herbert, P., & Ferreira, I. C. F. R. (2014). Nutritional characterisation of *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) P. Kumm. produced using paper scraps as substrate. *Food Chemistry*, 169, 396–400. doi:10.1016/j.foodchem.2014.08.027
- Fernández-Rodríguez, F., Ruilova-Cueva, M. B., & Hernández-Monzón, A. (2014). programa para el diseño de mezclas de residuos agrícolas para el cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus*. *Tecnología Química*, XXXIV(2), 128–136.
- Fracchia, S., Rickert, A.-A., & Terrizzano, E. (2009). Cultivo de una cepa comercial de *Pleurotus ostreatus* en desechos de *Simmondsia chinensis* y *Jatropha macrocarpa*. *Revista Mexicana de micología*, 29, 37–42.
- Freyberg, T. (2012). Nappy recycling. *Waste, Management World*, 14–19.
- Gaitán, H. R., Salmones, D., Pérez, R., & Mata, G. (2006). *Manual práctico del cultivo de setas: aislamiento, siembra y producción*. (A. C. Instituto de Ecología, Ed.). Xalapa, Veracruz. Retrieved from http://www1.inecol.edu.mx/inecol/libros/manual_setas.pdf
- García, Q. F. (2005). Líneas de investigación y recursos bibliográficos sobre setas y hongos. *Observatorio Medioambiental*, 8, 293–303.
- García, R. M. A. (2012). *Pañales desechables características y fabricación*. Reporte interno UAM-A México, D. F.



- García-Quiroga, F. (2005). Líneas de investigación y recursos bibliográficos sobre setas y hongos. *Observatorio Medioambiental*, 8, 293–303.
- GODF, G. oficial del D. F. (2012). NADF-020-AMBT-2012, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la compost. Retrieved from http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf.
- Green Bin Organics Program. (2013). Disponible en: <http://www.toronto.ca/greenbin/>. Consultado: Agosto, 2014.
- Grimes, D. (2010). Methods for separation and conditioning of products containing super absorbent polymers. Google Patents. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US8436058>
- Guzmán, G. M. G., Salmenes, D., Soto-Velazco, C., & Guzmán-Dávalos, L. (2008). *El cultivo de los hongos comestibles, con especial atención a especies tropicales y subtropicales en esquilmos y residuos agro-industriales*. (Instituto Politécnico Nacional, Ed.).
- Helmes, T. C., O'Connor, R., Sawyer, L., & Young, S. (2014). Disposable diaper absorbency: improvements via advanced design. *Clinical Pediatrics*, 1 (4).
- Hernández, D., Sánchez, J. E., & Yamasaki, K. (2003). A simple procedure for preparing substrate for *Pleurotus ostreatus* cultivation. *Bioresource Technology*, 90, 145–150.
- Hubbe, M. A., Nazhad, M., & Sanchez, C. (2010). Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review. *BioResources*, 5 (4), 2808–2854.
- Hultman, J. (2009). *Microbial diversity in the municipal composting process and development of detections methods*. University of Helsinki, Finland.
- Iglesias, J. E., & Pérez, G. V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biological Wastes*, 27, 115–142.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2011 http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/mexvista/2011/mex_2011.pdf. Fecha de consulta: 29 noviembre 2012.
- INEGI (2013-a), Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Fabricación de pañales desechables y productos sanitarios mensuales, [En línea] [Fecha de consulta: 24 de junio del 2013]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/default.aspx?idserPadre=1160129000900002000400700020020500500030#D10400100001000100090>



- INEGI (2014), Instituto Nacional de Estadística y Geografía. generación - tipo de residuo - 2000-2012 - nacional, fecha de consulta 4 de octubre de 2014 <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb311&s=est&c=33223>
- Jafarpour, M., Jalali Zand, A., Dehdashtizadeh, B., & Sh, E.-B. (2010). Evaluation of agricultural wastes and food complements usage on growth characteristics of *Pleurotus ostreatus*. *Afr. J. Agri. Res*, 5, 3291–3296.
- Jaramillo, M. S., & Albertó, E. (2013). Heat treatment of wheat straw by immersion in hot water decreases mushroom yield in *Pleurotus ostreatus*. *Rev Iberom Micol.*, 30(12), 125–129.
- Knowaste. (2013). Disponible en: <http://www.knowaste.com>. Consultado: Agosto, 2014.
- Lechner, B. E., & Albertó, E. (2011). Search for new naturally occurring strains of *Pleurotus* to improve yields. *Pleurotus albidus* as a novel proposed species for mushroom production. *Revista Iberoamericana de Micología*, 28 (4), 148–154.
- Light, K. L., Chirmuley, D. G., & Ham, R. K. (1995). A laboratory study of the compaction characteristics of disposable diapers in a landfill. *Resources, Conservation and Recycling*, 13 (2), 89–96. doi:10.1016/0921-3449(94)00013-U
- Mandeel, Q. A., Al-Laith, A. A., & Mohamed, S. A. (2005). Cultivation of oyster mushrooms (*Pleurotus spp.*) on various lignocellulosic wastes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21 (4), 601–607.
- Mandigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2004). *Brock. Biología de los microorganismos*. (M. T. Mandigan, J. M. Martinko, & J. Parker, Eds.). Paris.
- Martínez, C. D. (2002). Mushroom Biotechnology in Tropical America. *The International Journal of Mushroom Sciences*, 3, 9–20.
- Meallem, I., Garb, Y., & Cwikel, J. (2010). Environmental Hazards of Waste Disposal Patterns - A Multimethod Study in an Unrecognized Bedouin Village in the Negev Area of Israel. *Archives of Environmental and Occupational Health*, 65 (4), 230–237.
- Meseldzija, J., Poznanovic, D., & Frank, R. (2013). Assessment of the differing environmental impacts between reusable and disposable diapers. *Dufferin Research*.
- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2013). Life cycle assessment of bio-based products: a disposable diaper case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (5), 1036–1047. doi:10.1007/s11367-013-0556-6
- Miyatake, F., & Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 97, 961–965.



- Moda, E. M., Horii, J., & Fillet-Spoto, M. H. (2005). Edible mushroom *Pleurotus sajor-caju* production on washed and supplemented sugarcane bagasse. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62 (2), 127–132.
- Moreno, C. J., & Moral, H. R. (2008). *Compostaje*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- MushWorld. (2004). *Mushroom Growers' Handbook 1: Oyster Mushroom Cultivation*. (MushWorld, Ed.). Seoul, Korea.
- Nava, L. E., Espinosa, V. R. M., & Delfín, A. I. (1992). Tratamiento de pañales desechables mediante cultivo de hongos comestibles. *Memorias Del VIII Congreso Nacional SMISAC, Cocoyoc, M* (México).
- Obodai, M., Cleland-Okine, J., & Vowotor, K. A. (2003). Comparative study on the growth and yield of *Pleurotus ostreatus* mushroom on different lignocellulosic by-products. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30 (3), 146–149.
- Orta, M. T., Saucedo, G., & Tovar, L. R. (2012). *Generación de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México durante 2008-2009, Incluye los generados en la central de abasto del D. F.* (UNAM, IPN, & UAMX, Eds.). México D. F.
- Pendry, L. F., Mewse, A. J., & Burgoyne, C. B. (2012). Environmentally friendly parenting: are cloth nappies a step too far? *Young Consumers*, 13 (1), 5–19.
- Pérez, R., & Mata, G. (2005). Cultivo y selección de cepas de *Pleurotus ostreatus* y *P. pulmonarius* en viruta de pino: obtención de nuevas cepas y evaluación de su producción. *Revista Mexicana de Micología*, 20, 53–59.
- Petric, I., Šestan, A., & Šestan, I. (2009). Influence of initial moisture content on the composting of poultry manure with wheat straw. *Biosystems Engineering*, 104 (1), 125–134. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.06.007
- Po, R. (1994). Ware abasorbent polymers. A patent survey. *J. Macromol. Sci.*, 2, 607–662.
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2012). A complete mass balance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant. *Waste Management (New York, N. Y.)*, 32 (5), 799–805. doi:10.1016/j.wasman.2011.12.018
- PROFECO. (2003). Estudio de calidad de los pañales desechables. *Revista Del Consumidor Septiembre*, 32–44.
- PROFECO. (2011). Estudio de calidad: pañales desechables, la misión antiescurrimientos. *Revista Del Consumidor*, 415, 52–67.
- Puig, V. I., & Calaf, F. M. (2009). *Pañales reutilizables como estrategia de prevención de residuos. Reporte técnico*. Cataluña, España.



- Pynthamil, S. R., & Amarnath, J. (2011). Study on the composition of municipal solid waste in Kanchipuram Municipality. *International Journal on Applied Bioengineering*, 5 (1), 40–43.
- Raj, D., & Antil, R. S. (2011). Evolution of maturity and stability of compost prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology*, 102, 2868–2873.
- Rajak, S., Mahapatra, S. C., & Basu, M. (2011). Yield, Fruit Body Diameter and Cropping Duration of Oyster Mushroom (*Pleurotus sajor caju*) Grown on Different Grasses and Paddy Straw as Substrates. *European Journal of Medicinal Plants*, 1 (1), 10–17.
- Rashad, M. M., Abdou, H. M., Mahmoud, A. E., & Nooman, M. U. (2009). Nutritional Analysis and Enzyme Activities of *Pleurotus Ostreatus* Cultivated on *Citrus limonium* and *Carica papaya*. *Wastes. Aust. J. Basic & Appl. Sci*, 3 (4), 3352–3360.
- Riber, C. (2007). *Evaluation of Waste Specific Environmental Impacts from Incineration*. Technical University of Denmark.
- Richer Investment Diaper Consulting Services. (2005). Carlos Richer: Investment Diaper Consulting Services. Recuperado el 29 de Septiembre de 2014, desde <http://c.richer.tripod.com/>
- Rivera-Omen, L., Martínez-Mamián, A., & Morales-Velasco, S. (2013). Evaluación de residuos agrícolas como sustrato para la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Revista Luna Azul*, 37.
- Rodríguez, M. R., González, G. R., Ruiz, L. M. A., García, L. P. M., Ruiz, M. J., Zamora, N. J. F., & Salcedo, P. E. (2006). Perspectivas de producción de hongos comestibles (*Pleurotus spp.*) en la región nordeste del Estado de Nuevo León. *SCIENTIA-CUCBA*, 8 (2), 162–169.
- Romero, L., & Rosales, M. (2003). Las setas algunas generalidades. <http://setascultivadas.com/articulojunio2003.html>.
- Romero, O., Huerta, M., Damián, M. A., Macías, A., Tapia, A. M., Parraguirre, J., & Juárez, J. (2010). Evaluation of the productive capacity of *Pleurotus ostreatus* using dehydrated banana leaves (*Musa paradisiaca*). *Universidad de Costa Rica*, 34, 53–63.
- Romero-Arenas, O., Hernández Treviño, I., Conrado Parraguirre Lezama, J. F., Marquez Specia, M. N., & Amaro Leal, J. L. (2013). Evaluación de bagazo de café como sustarto en la producción de *P. ostreatus*. *Revista Mexicana de Agronegocios*, XVII (Junio-diciembre), 472–481.
- Roussel S., Simonart t., Gireaudot MF., I. P. de L. (2003). Método para la detección y numeración de huevos viables de Helminthos en bio-sólidos (lodo tratado, lodo no tratado y composteado, en compost y en suelo). In *Método I - Parasitología de lodos*. Francia.



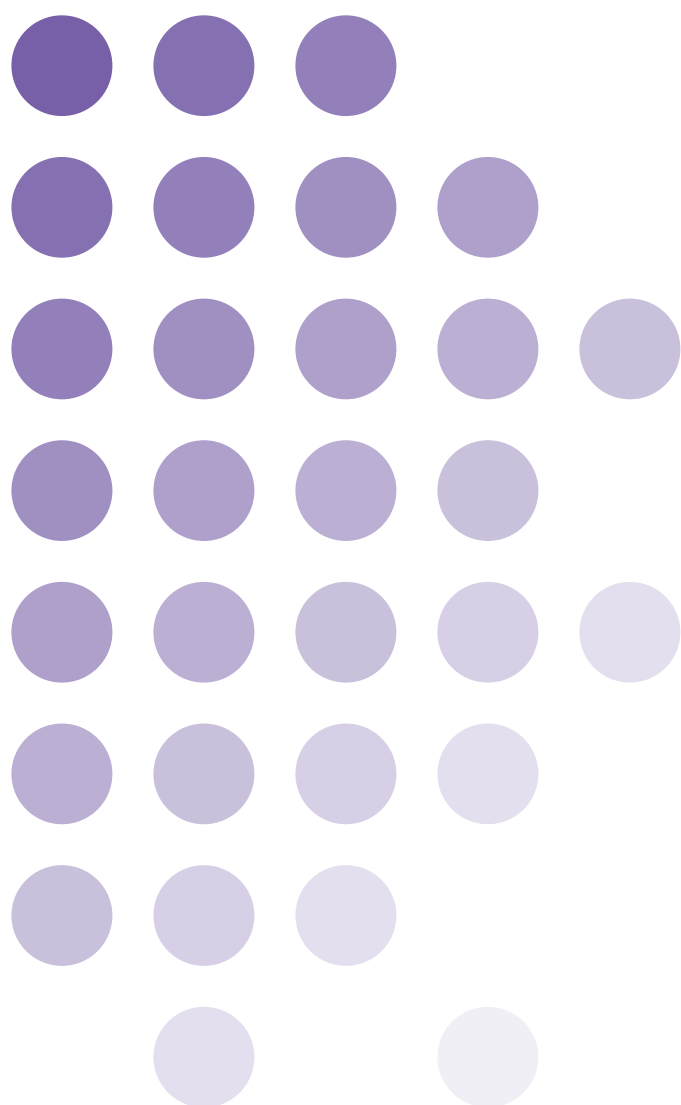
- Ruggieri, L., Gea, T., Mompeó, M., Sayara, T., & Sánchez, A. (2008). Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste. *Biosystems Engineering*, 101 (1), 78–86. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.05.014
- Ruiz, F. J. F. (2011). *Ingeniería del compostaje*. Texcoco, México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Sadzawka R., A., M.A. Carrasco R., R. G. Z. y M. L. M. G. (2005). Métodos de análisis de compost. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. In *Serie Actas N° 30* (p. 142). Santiago, Chile.
- Salmones, D., Mata, G., & Waliszewski, K. . (2005). Comparative culturing of *Pleurotus sp.* on coffee pulp and wheat straw; biomass production and substrate biodegradation. *Bioresour Technol*, 96 (5), 537–544.
- Saludes, R. B., Iwabuchi, K., Miyatake, F., Abe, Y., & Honda, Y. (2008). Characterization of dairy cattle manure/wallboard paper compost mixture. *Bioresource Technology*, 99 (15), 7285–7290. doi:10.1016/j.biortech.2007.12.080
- Sánchez, J. E., & Royse, D. J. (2001). *Biología y el cultivo de Pleurotus spp.* México, D.F: ECOSUR_ LIMUSA.
- Sánchez-Monedero, M., Serramiá, N., Civantos, C., Fernández-Hernández, A., & Roig, A. (2011). Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere*, 81 (1), 18–25. doi:DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.07.022
- SEDEMA (2014) Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/temas-ambientales/programas-generales/residuos-solidos>.
- SEDUE. (1998). *Políticas y estrategias en el manejo de los residuos municipales e industriales en México*. México D. F.
- SEMARNAT- INECC. (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos en México.
- SEMARNAT-SINGIR. (2014). Sistema nacional para la información para gestión integral de residuos sólidos.
- Shabtay, A., Hadar, Y., Eitam, H., Brosh, A., Orlov, A., & Tadmor, Y. (2009). The potential of *Pleurotus*-treated olive mill solid waste as cattle feed. *Bioresource Technology*, 100, 6457–6464.
- Shah, Z. A., Ashraf, M., & M. Ishtiaq-Ch. (2004). Comparative study on cultivation and yield performance of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) on different substrates (wheat straw, leaves, saw dust). *Pakistan Journal of Nutrition*, 3 (3), 158–160.



- Sotelo-Navarro, P. X. (2014). *Composteo de pañales desechables usados mediante biorreactores aerobios y pilas aireadas*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D. F.
- Stenstrom, T. A., Seidu, R., Ekane, N., & Zurbrugg, C. (2011). Microbial Exposure and Health Assessments in Sanitation Technologies and Systems.
- Sudiany, V. P., Hoyos, J. L., & Mosquera, S. A. (2012). Uso de hojarasca de roble y bagazo de caña en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 10 (1), 136–145.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos* (Mc. Graw H.). Madrid, España.
- Tiquia, S. M. (2000). Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig – on – litter system. In P. R. Warman & B. R. Taylor (Eds.), *Proceedings of the International Composting Symposium, C*.
- TMECC, T. M. for E. of C. and C. (2001). *The United States Composting Council*. N.Y., USA.
- Torrijos, M., Sousbie, P., Rouez, M., Lemunier, M., Lessard, Y., Galtier, L., Steyer, J. P. (2013). Treatment of the biodegradable fraction of used disposable diapers by co-digestion with waste activated sludge. *Waste Management*, 34 (3), 669–675.
- Vargas, P. S., Hoyos, J., & Mosquera, S. A. (2012). Uso de hojarasca de roble y bagazo de caña en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 10 (1), 136–145.
- Vargas-Sudiany, P., Hoyos, J.-L., & Mosquera, S.-A. (2012). Uso de hojarasca de roble y gabazo de caña en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 10 (1), 136–145.
- Varnero, M.-T., Quiroz, M.-S., & Álvarez, C.-H. (2010). Utilización de Residuos Forestales Ligno-celulósicos para Producción del Hongo Ostra (*Pleurotus ostreatus*). *Información Tecnológica*, 21 (2), 13–20. doi:10.1612/inf.tecnol.4154it.09
- Varnero, T. M., Quiroz, M. S., & Álvarez, C. H. (2005). Utilización de Residuos Forestales Ligno-celulósicos para Producción del Hongo Ostra (*Pleurotus ostreatus*). *Información Tecnológica*, 21 (2), 13–20. doi:10.1612/inf.tecnol.4154it.09
- Velázquez-Cedeño, M. A., Mata, G., & Savoie, J. M. (2002). Waste-reducing cultivation of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius* on coffee pulp: changes in the production of some lignocellulolytic enzymes. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 18, 201–207.
- Vikman, M., Karjomaa, S., Kapanen, A., Wallenius, K., & Itävaara, M. (2002). The influence of lignin content and temperature on the biodegradation of lignocellulose in composting con-



- ditions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59 (4-5), 591–598. doi:10.1007/s00253-002-1029-1
- Vogel, F., & Salmones, D. (2000). Análisis comparativo de la productividad de cepas de *Pleurotus spp.* cultivadas en una planta comercial. *Rev. Iberoam. Micol.*, 17, 138–141.
- Wallis, I. (2012). 50 Best Business Ideas That Changed the World. *Jaico Publishing House*.
- Weisbrod, A. V., & Van Hoof, G. V. (2012). LCA-measured enviromental improvements in Pampers® diapers. *International Journal Life Cycle Assess*, 17, 145–153.
- Women-inventors (2008), “Marion Donovan: Inventor of Disposable Diapers”, [En línea][Fecha de consulta: 11 de marzo del 2013] Disponible: <http://www.women-inventors.com/Marion-Donovan.asp>.
- Yeh, Y., Waseda, U., Fukuoka, Ogai, H., Yui, R., & Morita, H. (2006). Modeling of waste disposal system for disposable diapers. In *IEEE Conference on Computer Aided Control System Design 2006 IEEE International Conference on Control Applications 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. (pp. 3330–3335).
- Zadrazil, F., Compare, G., & Maziero, R. (2004). Biology, cultivation and utilization of *Pleurotus* Species. In: Romaine, C.P., C.B. Keil, D.L.Rinker, D.J. Royse. *Proceedings of the 16th International Congress on the Science and Cultivation of Edible and Medicinal Fungi, The Pennsy*, 383–391.
- Zhang, W., Lau, A. K., & Wen, Z. S. (2009). Preventive control of odor emissions through manipulation of operational parameters during the active phase of composting. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 44 (5), 496–505. doi:10.1080/03601230902935451
- Zucconi, F. D., & De Bertoldi, M. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste.
- Zucconi, F., Monaco, A., & Forte, M. (1981). germination and growth test for assessing compost maturity. *En: Compost Science & Utilization*, 7 (3), 33–37.



Anexo A



ANEXO A



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana

Azcapotzalco

9-Abril-2013

Estimados padres de familia:

Durante la semana del 8 al 12 de abril, nuestra guardería estará apoyando el proyecto de investigación **Planta Piloto para la degradación de pañales desechables**, que se desarrolla en la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, con el fin de encontrar alternativas para el tratamiento para estos residuos. Por ello, solicitamos su amable colaboración para responder la siguiente encuesta. Por favor, en caso de tener más de un hijo que use pañales, llenen una encuesta por cada uno.

Edad de su hijo: _____

Número de pañales que usa en un día: _____

¿Cuántos de estos contienen sólo orina? _____

Marca que adquiere normalmente: _____

A nombre de la UAM- A, agradecemos su colaboración. Si tiene dudas sobre este estudio, no dude en contactar a través del correo rmev@correo.azc.uam.mx

Figura A-1 Encuesta aplicada a padres de familia



Tabla A-1 Resultados de encuestas aplicadas a padres de familia

Edad (meses)	Pañales por día	Con orina	Sin orina	Marca	Edad (meses)	Pañales por día	Con orina	Sin orina	Marca	Edad (meses)	Pañales por día	Con orina	Sin orina	Marca
2	7	5	2	S/M	11	6	6	0	Kleen Bebé	16	9	5	4	Kleen Bebé
4	7.5	7	0.5	Huggies	11	10	6	4	Kleen Bebé	16	5	3.5	1.5	Huggies
4	6	4	2	Kleen Bebé	11	6	4	2	Kleen Bebé	16	7	5	2	Kleen Bebé
4	6	5	1	Huggies	11	5	3	2	Kleen Bebé	16	8.6	4.5	4.1	Kleen Bebé
4	8	3	5	S/M	11	8	6	2	Kleen Bebé	16	5.5	4	1.5	Kleen Bebé
4	8	6	2	Kleen Bebé	11	6	5	1	Pampers	17	5.5	3	2.5	Kleen Bebé
4.5	8	6	2	Huggies	12	8	6	2	Pampers	17	6	4.5	1.5	Huggies
5	5	4	1	Kleen Bebé	12	6	4	2	Bebyto	17	4.5	2	2.5	Bbtips
5	4	2	2	Kleen Bebé	12	8	6	2	Huggies	18	6	4	2	Huggies
5	4	2	2	Suabebé	12	9.5	7	2.5	Kleen Bebé	18	5	1.5	3.5	Huggies
6	6	5	1	Bbtips	12	6	3	3	Pampers	18	3	2	1	Kiddis
6	7	4	3	Kleen Bebé	12	6	3	3	Kiddis	18	6	4	2	Bebyto
6	6	4	2	Huggies	12	6	5	1	Kleen Bebé	18	8	4	4	Bbtips
6	7	5	2	Huggies	12	8	6	2	Bebyto	18	11	0	11	Kleen Bebé
6	6	4	2	Pampers	12	9	6	3	Kleen Bebé	18	7	5	2	Huggies
6	8	6	2	Pampers	12	5.5	4.5	1	Huggies	18	8	6	2	Huggies
6	7.5	3.5	4	Kleen Bebé	19	9	9	0	Pampers	18	6	4	2	Kleen Bebé
7	8	5.5	2.5	Kleen Bebé	19	8	4	4	Huggies	18	7	6	1	Costco
7	7	5	2	Kleen Bebé	13	8	5	3	Kleen Bebé	18	6	3	3	S/M
7	6.5	4	2.5	Huggies	13	9	3	6	Kleen Bebé	18	6	4	2	Kleen Bebé
7	7	4.5	2.5	Kleen Bebé	13	7.5	4.5	3	Kleen Bebé	18	5	3	2	Kleen Bebé
7	6	3	3	S/M	13	8	5	3	Kleen Bebé	18	6	4	2	Kleen Bebé
7	11	4	7	Kleen Bebé	14	7	5	2	Kleen Bebé	20	5	2	3	Kiddis
8	5	3	2	Huggies	14	2	2	0	Kleen Bebé	20	10	9	1	Huggies
8	6	3	3	Huggies	14	6	3	3	Huggies	21	6	4	2	Kleen Bebé
8	7	4	3	Kleen Bebé	14	7	5	2	Kleen Bebé	21	4.5	3	1.5	S/M
8	6	3	3	Kleen Bebé	14	8	5	3	Bebyto	21	8	5.5	2.5	Kleen Bebé
8	9.5	8	1.5	Huggies	15	11	9	2	Kleen Bebé	21	6	3.5	2.5	Biobaby
8	10	7	3	Kleen Bebé	15	8	4.5	3.5	Kleen Bebé	22	6	3	3	Kleen Bebé
8	8	5	3	Pampers	15	6	4	2	Kleen Bebé	22	6	4	2	Huggies
8	5.5	3.5	2	Huggies	15	9	4	5	Kleen Bebé	23	2		2	Kleen Bebé
10	5	2	3	Pampers	15	6	4	2	Huggies	23	6		6	Huggies
10	6	4	2	Huggies	15	7.5	5.5	2	Huggies	23	7.5	4	3.5	Huggies
10	6	2	4	Huggies	15	7	5.5	1.5	Kleen Bebé	24	8	6	2	Huggies
10	10	7	3	Kleen Bebé	15	5.5	4.5	1	Kleen Bebé	24	8	5	3	Huggies
10	6	3	3	Kleen Bebé	16	8	6	2	Kleen Bebé	24	4	3	1	Huggies
10	7	5	2	Huggies	16	5	3	2	Kleen Bebé					
10	10	6	4	Kleen Bebé	16	9.5	6	3.5	S/M					



Tabla A-2 Masa de pañales con orina por tipo de sala

Sala	Pañal (gramos)										Promedio
Lactantes	70.00	113.80	75.40	99.80	77.50	142.90	171.80	131.10	215.80	195.50	129.36
Lactantes	36.50	49.00	40.60	61.50	109.60	41.90	93.60	70.90	47.40	84.10	63.51
Lactantes	50.30	66.60	87.40	88.20	57.80	41.50	106.60	71.10	76.70	95.60	74.18
Lactantes	75.90	62.60	62.80	51.60	61.90	75.10	78.30	36.60	60.10	30.00	59.49
Lactantes	61.30	162.70	104.90	90.80	102.30	-	-	-	-	-	104.40
Lactantes	92.80	45.00	68.90	92.30	108.50	67.80	64.10	50.00	57.30	113.80	76.05
Lactantes	75.10	137.80	73.30	40.00	90.80	51.30	102.10	68.10	45.10	81.70	76.53
Lactantes	60.00	65.00	130.00	138.00	-	-	-	-	-	-	98.25
Lactantes	52.60	117.40	56.20	162.30	58.30	113.00	76.80	70.80	93.30	112.50	91.32
Lactantes	97.40	85.10	71.30	183.00	55.80	97.30	94.30	61.80	98.30	56.00	90.03
Lactantes	58.80	41.80	57.10	57.20	83.90	53.60	79.60	54.60	33.90	83.40	60.39
Lactantes	61.90	51.30	101.40	55.30	40.90	157.90	121.40	100.50	91.20	124.50	90.63
Lactantes	66.20	60.50	52.70	99.90	171.10	99.70	41.10	71.50	60.30	67.80	79.08
Lactantes	47.90	84.40	41.80	46.20	118.60	62.30	58.30	132.40	77.40	104.70	77.40
Lactantes	32.10	60.70	64.90	85.10	116.40	35.10	110.50	89.70	216.10	175.60	98.62
Lactantes	67.50	95.10	95.00	63.20	94.30	117.00	96.90	72.90	137.50	126.80	96.62
Lactantes	38.80	49.90	65.70	174.70	74.00	42.60	77.50	56.90	99.90	86.50	76.65
Lactantes	50.00	48.00	131.50	122.60	92.50	41.50	72.40	76.50	87.50	37.60	76.01
Lactantes	99.20	72.70	147.70	118.60	71.60	181.30	166.40	82.90	162.30	170.60	127.33
Lactantes	114.30	141.30	59.90	98.80	98.90	79.20	67.10	119.60	87.50	134.50	100.11
Lactantes	59.00	84.90	92.20	58.10	66.80	59.10	62.10	130.20	50.50	63.10	72.60
Lactantes	99.40	94.40	171.30	189.40	41.30	56.50	147.60	56.10	39.90	128.70	102.46
Lactantes	82.30	54.50	98.70	70.10	200.00	40.30	65.20	107.20	64.90	103.00	88.62
Lactantes	64.20	58.80	46.60	91.10	62.30	59.80	72.60	71.80	59.40	53.80	64.04
Lactantes	62.40	85.00	192.10	128.60	73.00	189.50	89.60	146.70	89.70	179.60	123.62
Lactantes	148.90	58.20	71.00	76.90	143.60	69.20	84.10	121.80	104.00	53.30	93.10
Lactantes	191.00	93.70	153.60	70.60	102.10	147.50	161.80	58.00	122.80	80.70	118.18
Lactantes	69.90	86.60	93.70	83.10	92.90	126.40	98.20	65.90	69.90	226.30	101.29
Lactantes	72.00	112.20	93.60	64.20	95.40	97.40	66.60	57.00	74.00	117.60	85.00
Lactantes	95.40	78.90	121.70	110.90	47.40	230.40	82.70	91.30	98.90	292.40	125.00
Lactantes	44.90	51.50	78.70	35.60	57.40	34.40	72.90	61.40	70.60	39.80	54.72
Maternal	114.70	150.40	57.50	70.00	42.10	37.20	218.20	90.70	62.60	212.50	105.59
Maternal	113.70	39.10	104.90	116.20	119.50	120.40	120.90	75.60	121.10	-	103.49
Maternal	90.40	45.50	88.90	77.80	156.80	119.20	110.60	109.50	133.10	70.20	100.20
Maternal	82.60	76.00	95.60	132.30	91.50	343.20	62.80	104.40	43.60	67.80	109.98
Maternal	224.00	182.30	62.40	137.40	79.30	115.60	95.00	123.80	111.60	138.40	126.98
Maternal	188.00	100.80	186.50	94.40	83.10	206.20	96.40	154.10	60.20	58.70	122.84
Maternal	118.50	144.40	161.40	131.60	169.80	268.30	176.60	121.10	132.00	171.10	159.48
Maternal	153.40	165.80	130.80	138.20	81.20	65.30	125.30	97.20	68.40	68.50	109.41
Maternal	78.00	81.70	91.80	91.50	79.60	122.50	81.80	141.80	131.90	97.90	99.85
Maternal	91.10	37.50	100.50	123.60	132.80	105.40	49.10	42.20	48.40	57.30	78.79



Sala	Pañal (gramos)										Promedio
Maternal	108.70	128.20	245.80	127.70	85.00	188.00	78.20	250.20	-	-	151.48
Maternal	120.50	180.50	155.20	218.20	147.50	128.50	-	-	-	-	158.40
Maternal	104.80	128.50	143.80	152.80	96.90	99.20	-	-	-	-	121.00
S/Sala	144.20	42.20	74.10	143.60	65.70	163.80	42.10	142.00	68.80	116.70	100.32
S/Sala	53.30	101.50	44.80	74.90	68.10	65.00	60.00	131.10	92.80	57.40	74.89
S/Sala	53.70	81.50	74.20	130.30	104.20	97.00	179.30	107.60	50.20	47.00	92.50
S/Sala	55.80	89.80	53.80	167.00	88.60	57.30	75.30	57.50	230.60	69.50	94.52
S/Sala	86.10	91.60	50.90	156.00	137.10	51.30	53.20	72.40	54.90	65.80	81.93
S/Sala	84.50	95.40	73.50	190.20	35.70	119.80	49.00	86.90	77.30	118.80	93.11
S/Sala	126.10	58.90	44.50	53.10	36.00	121.40	61.50	63.80	66.60	99.60	73.15
S/Sala	179.60	135.50	66.40	207.30	268.90	116.20	123.50	126.30	171.20	75.80	147.07
S/Sala	63.00	71.80	97.90	98.60	216.10	115.20	104.30	149.70	58.00	66.20	104.08
S/Sala	94.20	96.20	81.80	124.60	100.20	95.00	62.80	50.30	106.00	64.80	87.59
S/Sala	61.80	59.00	47.70	80.40	74.40	158.10	130.70	131.30	99.10	73.60	91.61
S/Sala	87.20	61.00	90.30	118.80	37.50	168.70	101.20	51.20	46.10	73.20	83.52
S/Sala	40.10	113.40	93.10	177.30	40.40	99.30	53.00	137.50	45.30	50.70	85.01
S/Sala	98.50	112.70	141.90	145.10	61.00	47.80	97.10	207.60	61.00	88.90	106.16
S/Sala	163.30	102.00	84.60	115.40	150.40	58.90	43.70	106.60	246.70	88.70	116.03
S/Sala	160.70	116.70	44.90	91.10	46.10	74.70	60.10	153.10	159.90	54.40	96.17
S/Sala	175.00	55.00	219.00	116.70	89.40	57.70	112.60	83.70	40.60	57.00	100.67
S/Sala	73.30	135.50	77.00	96.80	178.00	100.20	131.70	51.70	71.40	139.20	105.48
S/Sala	200.20	112.30	139.00	112.60	126.10	101.10	108.50	197.90	130.50	104.90	133.31
S/Sala	103.60	40.50	151.10	86.60	39.90	97.00	38.00	45.40	86.50	52.30	74.09
S/Sala	40.60	73.40	80.60	76.30	107.90	95.70	108.20	64.30	80.20	58.50	78.57
S/Sala	131.80	134.80	60.30	96.60	189.80	47.10	78.80	129.60	164.30	228.80	126.19
S/Sala	64.30	83.10	77.00	76.30	282.70	155.20	87.10	131.90	98.20	95.90	115.17
S/Sala	110.90	51.70	114.30	55.50	42.30	92.80	69.00	48.80	83.20	78.10	74.66
S/Sala	69.40	81.20	36.30	49.00	34.20	97.00	111.90	68.60	49.90	164.80	76.23



ANEXO B

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA FORMAS DE CULTIVO

Reducción de masa

La **Tabla B-1**, se muestra el análisis de varianza que descompone la variabilidad de % reducción de masa en contribuciones debidas a varios factores (la configuración: BC, CR, CH, PVC, BT). Se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. El valor-P es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre % reducción con un 95.0% de nivel de confianza. Por lo que se procedió a determinar las pruebas de múltiple rangos.

Tabla B-1 Análisis de varianza para % reducción de masa- suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Configuración	399.645	4	99.9113	4.14	0.0141
RESIDUOS	458.948	19	24.1552		
TOTAL (CORREGIDO)	858.593	23			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La **Tabla B-2** se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se identificaron 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla B-2 Método: 95.0 porcentaje LSD (Fisher)

Configuración	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
BC	5	48.74	2.19796	X
CR	5	53.3	2.19796	XX
CH	5	53.32	2.19796	XX
PVC	4	57.7	2.45739	XX
BT	5	60.48	2.19796	X



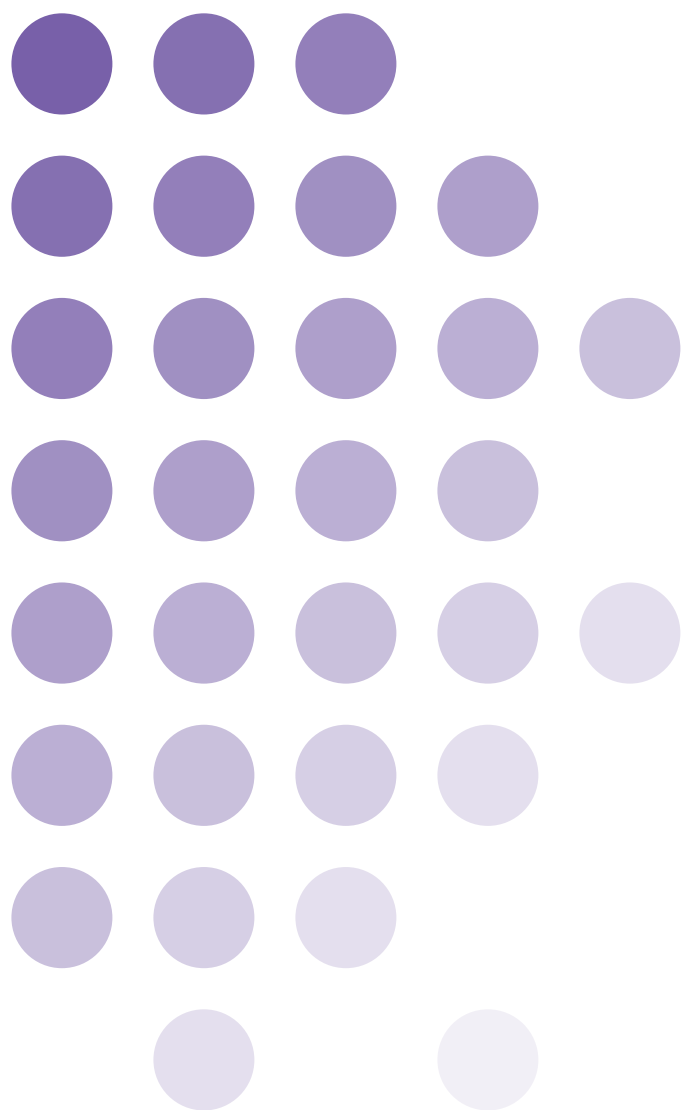
Eficiencia biológica

En la **tabla B-3**, se muestra la ANOVA que descompone la variabilidad del % de Eficiencia biológica en contribuciones debidas a varios factores (Configuración: BC, CR, CH, PVC, BT). Se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, los factores no tienen ningún efecto estadísticamente significativo sobre el % de Eficiencia biológica con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla B-3 Análisis de varianza para eficiencia biológica - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Configuración	166.683	4	41.6707	0.77	0.5579
RESIDUOS	1027.94	19	54.1022		
TOTAL (CORREGIDO)	1194.62	23			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual



Anexo C

ANEXO C

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA ESCALAMIENTO

% Reducción de masa

La **Tabla C-1** ANOVA descompone la variabilidad de % reducción de masa en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que un valor-P es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre % reducción de masa con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla C-1 Análisis de varianza para % reducción de masa - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Configuración	2399.62	1	2399.62	10.83	0.0023
B: Especie	133.359	1	133.359	0.60	0.4431
C: Sustrato	460.039	2	230.019	1.04	0.3648
RESIDUOS	7755.61	35	221.589		
TOTAL (CORREGIDO)	11353.1	39			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

% Disminución de volumen

La **Tabla C-2** ANOVA descompone la variabilidad de % Disminución de volumen en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre % Disminución de volumen con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla C-2 Análisis de varianza para % disminución de volumen - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Configuración	2159.0	1	2159.0	16.05	0.0003
B: Especie	418.014	1	418.014	3.11	0.0869
C: Sustrato	2454.54	2	1227.27	9.12	0.0007
RESIDUOS	4574.04	34	134.531		
TOTAL (CORREGIDO)	10733.5	38			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual



La **Tabla C-3** aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se identificaron 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

**Tabla C-3 Pruebas de múltiple rangos para % disminución de volumen por sustrato
método: 95.0 porcentaje LSD**

Sustrato	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
CP	13	50.0878	3.35794	X
SP	9	65.86	4.04392	X
T	17	68.0994	2.81878	X

% eficiencia biológica

La **Tabla C-4** ANOVA descompone la variabilidad de % eficiencia biológica en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que un valor-P es menor que 0.05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre % eficiencia biológica con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla C-4 Análisis de varianza para % eficiencia biológica - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Configuración	5.11844	1	5.11844	0.07	0.8008
B: Especie	280.634	1	280.634	3.62	0.0766
C: Sustrato	1526.87	2	763.437	9.84	0.0019
RESIDUOS	1163.82	15	77.588		
TOTAL (CORREGIDO)	2900.68	19			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

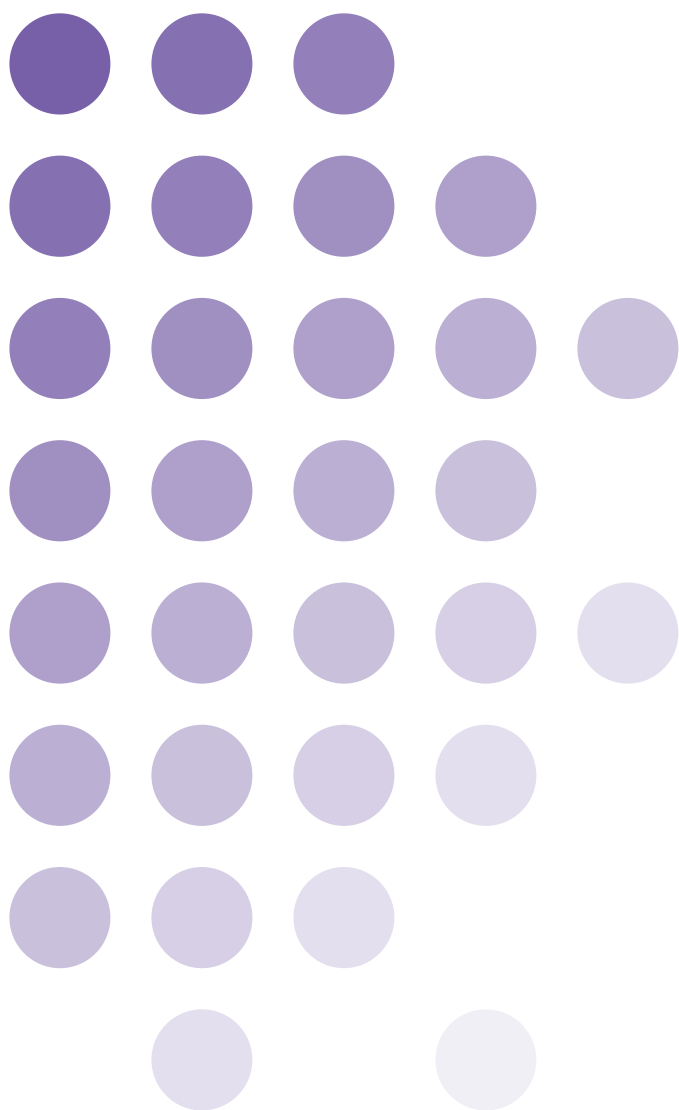
La **Tabla C-5** aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias, se identificaron 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos



niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

**Tabla C-5 Pruebas de múltiple rangos para % eficiencia biológica por sustrato
método: 95.0 porcentaje LSD**

Sustrato	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
SP	1	-4.20904	9.15373	X
CP	6	1.91289	3.67473	X
T	13	20.2748	2.63537	X



Anexo D

ANEXO D

Formato de Recepción de residuos

Formato de recepción de residuos

PLANTA DE TRATAMIENTO PARA PAÑALES USADOS MEDIANTE COMPOSTEO	FECHA:
Registro de recepción de materia prima	FOLIO:

Tipo de materia prima	Cumple requisitos		Masa (kg)	
	SI	NO		
Pañal de bebé con residuos líquidos				
Hojas secas				
Hojas verdes				
Pasto				
Ramas				

Nombre y firma de quien recibe

Nombre y firma de quien entrega la materia prima