

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Doctorado en Ciencias Aplicadas

Doctoranda
Ing. Qca. Yanina Susel AGUERRE

Contenedores biodegradables diseñados a partir de residuos urbanos, forestales y agroindustriales para el cultivo de plantas en vivero

Tesis de Doctorado presentada para obtener el título de “Doctor en Ciencias Aplicadas”

Directora
Dra. Graciela Beatriz GAVAZZO

Posadas, 2018



Esta obra está licenciada bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Universidad Nacional de Misiones
Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales.

**CONTENEDORES BIODEGRADABLES DISEÑADOS A
PARTIR DE RESIDUOS URBANOS, FORESTALES Y
AGROINDUSTRIALES PARA EL CULTIVO DE
PLANTAS EN VIVERO**

Por Ing. Qca. Yanina Susel AGUERRE

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y
Naturales de la Universidad Nacional de Misiones para optar al grado
académico de

DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS

Posadas, República Argentina

2018

Director
Dra. Graciela Beatriz GAVAZZO

TRIBUNAL EXAMINADOR (Resolución Consejo Directivo N°442-16)

Dr. José TURRADO SAUCEDO	Universidad Nacional de Guadalajara.
Dra. Mirtha MAXIMINO	Universidad Nacional del Litoral.
Dra. María VALLEJOS	Universidad Nacional de Misiones.

DEFENSA ORAL Y PÚBLICA (Resolución Consejo Directivo N° 717-18)

Posadas, 11 de Junio de 2018

**CONTENEDORES BIODEGRADABLES DISEÑADOS A PARTIR DE
RESIDUOS URBANOS, FORESTALES Y AGROINDUSTRIALES PARA EL
CULTIVO DE PLANTAS EN VIVERO**

Yanina Susel AGUERRE

Programa de Celulosa y Papel (PROCyP) - Instituto de Materiales de
Misiones (IMAM) con doble dependencia Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-Universidad
Nacional de Misiones (UNaM)

COMISIÓN DE SUPERVISIÓN (Resolución Consejo Directivo N°530-13)

Dra. Laura VILLALBA	Universidad Nacional de Misiones.
Dr. Fernando FELISSIA	Universidad Nacional de Misiones.
Dr. José TURRADO SAUCEDO	Universidad Nacional de Guadalajara.

CARRERA DE DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

Proyecto de Carrera N° 10933/11
Con reconocimiento de la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación
Universitaria (CONEAU) N° 344/11.

Dedicado a ellos que me dieron la vida y están conmigo en todo momento: a mi querida madre, Miriam Zeretzki y a la memoria de mi querido padre Jorge Aguerre, ejemplos de rectitud, humildad y perseverancia, mis guías incondicionales.

Agradecimientos:

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Comité Ejecutivo de Desarrollo e Innovación Tecnológica (CEDIT), por el financiamiento de mi Tesis Doctoral.

A la red RICARCOR, del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), por el financiamiento de la pasantía realizada en la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Al Dr. Jorge Hernán Sánchez Toro, por su cordialidad durante mi estadía, y por los conocimientos brindados.

A Biofábrica S.A. por la prestación de las instalaciones para el cultivo en vivero, en especial al Dr. Guillermo Salvatierra y al Ing. Ángel Balanda por el asesoramiento.

A mi Directora de Tesis, Dra. Graciela Beatriz Gavazzo, quien ha depositado en mí su confianza, y me ha guiado en este camino. Gracias por las oportunidades brindadas.

Al Dr. Fernando Esteban Felissia, excelente persona, profesional y buen colega, quien me ha enseñado, tanto a nivel científico como a nivel personal, y me ha ayudado incondicionalmente en el desarrollo experimental de mi tesis.

A la Dra. María Cristina Area, a quien admiro enormemente, quien me ha enseñado a enfocarme en los objetivos, y me ha aportado sus conocimientos incondicionalmente.

Al Sr. Carlos Eduardo Núñez, a quien agradezco por compartir conmigo sus conocimientos técnicos y sobre todo por sus consejos de la vida y su trato personal.

A los becarios de grado, Amelia, Roxana, Iván, Macarena, Luli, Nacho y Liliana, por su colaboración técnica en el desarrollo experimental de mi tesis.

A mis colegas y compañeros, Julieta, Julia, Romina, Javier, Nancy, Camila, Juan, Laura y Nicolás, quienes han sido parte de esta etapa, haciéndola más llevadera.

En especial a mis padres, Miriam Zeretzki y Jorge Aguerre, quienes son mi fortaleza y mi pilar de apoyo, a quienes debo todo lo que soy, mis guías incondicionales, quienes siempre han confiado en mí, quienes me han enseñado a luchar por mis ideales. A mi amado padre, que tristemente, en la última etapa de mi tesis partió al cielo, y desde allí me sigue acompañando.

A mi compañero de vida, Martín Ríos, quien me ha acompañado y apoyado en los buenos y malos momentos, quien me ha dado la fuerza para llegar al objetivo. Gracias amor por ayudarme a no bajar los brazos.

A Dios, quien ha permitido mi existencia, me ha bendecido, y me ha dado la fortaleza necesaria para atravesar los obstáculos del camino, quien me ha ayudado a seguir sin bajar los brazos hasta culminar esta etapa.

RESUMEN

La elevada generación de residuos se transformó en un problema social, ambiental y económico. Ante esta realidad surgió la idea de recuperar y reutilizar una fracción de residuos sólidos urbanos, forestales y agroindustriales, como recursos fibrosos, renovables y sostenibles, para diseñar un producto de innovación. El trabajo de investigación propone determinar las condiciones óptimas para el diseño de contenedores biodegradables aptos para el cultivo de plantas. Se utilizaron como materias primas, fibras secundarias de papel de diario, papel de oficina y cartón corrugado, solas o en mezclas con aserrín de pino, aserrín de eucalipto o bagazo de caña de azúcar. Las combinaciones se establecieron a partir de un diseño experimental de mezcla de vértices extremos. Se evaluó la idoneidad de las materias primas a partir de: caracterización química, evaluación de dimensiones morfológicas, evaluación de efectos fitotóxicos, determinación de la cinética de biodegradación, evaluación de propiedades de drenabilidad, evaluación de propiedades estructurales y mecánicas, y evaluación de parámetros reológicos. Se optimizó el diseño experimental considerando como requerimientos técnicos valores máximos de resistencia, rigidez y permeabilidad. Se formaron los contenedores biodegradables, siguiendo el diseño optimizado, utilizando el proceso de moldeado de pulpas, con una matriz de forma piramidal truncada. Se determinaron las condiciones óptimas de moldeado y la cinética de secado de los contenedores formados. Luego se determinó la calidad de estos a través de propiedades estructurales y mecánicas, absorción de agua, retención de agua del conjunto contenedor-sustrato y aptitud en vivero. Los contenedores biodegradables resultan adecuados para cultivos a corto plazo; las plantas cultivadas son de calidad, con menor desarrollo que aquellas cultivadas en contenedores plásticos. Las composiciones con aserrín y bagazo no resultaron factibles en las condiciones ensayadas. Del estudio se concluye que la composición óptima corresponde a una mezcla de pulpas de papel de oficina y de cartón corrugado en proporción 50:50. Estos contenedores son rígidos, resistentes y permeables, con baja capacidad de absorción de agua, y buen comportamiento en vivero. En condiciones óptimas de producción, se obtuvieron contenedores biodegradables propicios tanto para el sector viverístico de la provincia de Misiones, como para el medio ambiente.

Palabras clave: Contenedor biodegradable; pulpa moldeada; materiales lignocelulósicos; diseño de mezcla; reciclado.

ABSTRACT

The high waste generation was turned a social, environmental and economic problem. Given this reality came the idea to recovering and reusing a fraction of urban solids, forestry and agro-industrial waste, as fibrous, renewable and sustainable resources, to design an innovation product. The research aims to determine the optimal conditions to design biodegradable containers suitable for growing plants. Secondary fibers of old newspaper, office waste paper and old corrugating containers, pure or in mixtures with pine sawdust, eucalyptus sawdust or sugarcane bagasse, were used as raw materials. The combinations were established from an experimental design of type mixture of extreme vertices. The suitability of the raw materials was evaluated by: chemical characterization, morphological dimensions evaluation, phytotoxic effects evaluation, biodegradation kinetics determination, drainage properties evaluation, structural and mechanical properties evaluation, and rheological parameters evaluation. The experimental design was optimized considering as technical requirements maximum values of strength, stiffness and permeability. The containers biodegradables were formed following the optimized design using the pulp molding process, with a truncated pyramidal matrix. The optimum molding conditions and the drying kinetics of the formed containers were determined. Then, the quality of these was determined through structural and mechanical properties, water absorption, water retention of the container-substrate set and nursery aptitude. The biodegradable containers are suitable for short-term crops; the cultivated plants are of quality, with less development than those cultivated in plastic containers. Compositions with sawdust and bagasse were not suitable under the conditions tested. From the study it is concluded that the optimal composition corresponds to a mixture of secondary fibers of office waste paper and old corrugating containers in proportion 50:50. These containers are stiff, strong and permeable, with low water absorption capacity, and good behavior in nursery. In optimal production conditions were obtained containers biodegradables propitious as for the nursery sector of the province of Misiones as for the environment.

Keywords: Biodegradable containers; molded pulp; lignocellulosic materials; mixtures design; recycling.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen.....	vii
Abstract	viii
Tabla de contenidos	ix
Lista de tablas	xii
Lista de figuras	xiv
Lista de abreviaturas	xviii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Propuesta de trabajo	1
I.2. Objetivos	2
I.2.1. Objetivo general.....	2
I.2.2. Objetivos específicos	2
I.3. Hipótesis planteadas	2
I.4. Justificación.....	3
I.5. Plan de actividades a desarrollar	4
II. MARCO TEÓRICO.....	5
II.1. Problemática ambiental	5
II.2. Residuos sólidos.....	5
II.2.1. Residuos sólidos urbanos	5
II.2.2. Residuos industriales	8
II. 3. Nuevos productos de valor agregado	12
II.3.1. Contenedores para el cultivo de plantas en vivero	12
II.3.2. Materiales lignocelulósicos reciclados como materia prima para el diseño de contenedores biodegradables	16
II.4. Características y propiedades de materiales lignocelulósicos	18
II.4.1. Constituyentes fibrosos.....	18
II.4.2. Caracterización química.....	22
II.4.3. Propiedades de las fibras individuales	29
II.4.4. Propiedades de las pulpas	35
II.4.5. Propiedades físicas generales de papeles y cartones	37
II.4.6. Características y propiedades de fibras celulósicas recicladas.....	37
II.4.7. Comportamiento reológico de pulpas	46
II.4.8. Fitotoxicidad de materiales lignocelulosicos	52
II.4.9. Biodegradación de materiales lignocelulósicos	56
II.5. Diseño de contenedores biodegradables	61

II.5.1. Moldeado de pulpas celulósicas	61
II.5.2. Fundamentos del proceso de secado	68
II.6. Aptitud de contenedores biodegradables	72
II.6.1. Propiedades de contenedores biodegradables	72
II.6.2. Producción de plantas en contenedores	77
III. PARTE EXPERIMENTAL	81
III.1. Materias primas.....	81
III.1.1. Pulpas secundarias.....	81
III.1.2. Aserrín de madera	82
III.1.3. Bagazo de caña de azúcar	84
III.2. Métodos de caracterización y evaluación de propiedades de materiales lignocelulósicos	87
III.2.1. Caracterización química	87
III.2.2. Evaluación de dimensiones morfológicas	91
III.2.3. Evaluación de propiedades físicas.....	95
III.2.4. Evaluación de parámetros reológicos	107
III.2.5. Evaluación de efectos fitotóxicos.....	109
III.2.6. Evaluación de la cinética de biodegradación	116
III.3. Diseño de contenedores biodegradables.....	121
III.3.1. Ajuste de las condiciones del proceso de moldeado por succión	121
III.3.2. Matriz experimental base.....	124
III.3.3. Formación de contenedores biodegradables	125
III.3.4. Cinética de secado	126
III.4. Evaluación de calidad de contenedores biodegradables	127
III.4.1. Propiedades físicas generales.....	129
III.4.2. Evaluación de la aptitud en vivero	132
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	139
IV.1. Caracterización y evaluación de propiedades de materiales lignocelulósicos	139
IV.1.1. Caracterización química	139
IV.1.2. Dimensiones morfológicas de las fibras.....	141
IV.1.3. Propiedades físicas generales	145
IV.1.4. Comportamiento reológico de pulpas	155
IV.1.5. Efectos fitotóxicos.....	160
IV.1.6. Cinética de biodegradación de pulpas	169
IV.2. Diseño de contenedores biodegradables	175

IV.2.1. Contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos	175
IV.2.2. Cinética de secado.....	176
IV.3. Calidad de contenedores biodegradables	181
IV.3.1. Propiedades físicas generales	181
IV.3.2. Aptitud en vivero	188
V. CONCLUSIONES	203
V.1. Conclusiones individuales	203
V.1.1. Características y propiedades de materiales lignocelulósicos	203
V.1.2. Diseño de contenedores biodegradables	208
V.1.3. Calidad de contenedores biodegradables.....	209
V.2. Conclusión general.....	213
V.3 Continuidad del trabajo	214
PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO DE TESIS.....	215
PROYECTOS QUE FINANCIARON ESTE TRABAJO DE TESIS.....	217
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	218

LISTA DE TABLAS

Tabla II.1. Generación de RSU por provincia (2012).	6
Tabla II.2. Composición media de RSU generados en Argentina (2012).	6
Tabla II.3. Superficie de bosque implantado en Argentina (2011)	8
Tabla II.4. Tipos de contenedores biodegradables comerciales	15
Tabla II.5. Calidades de papeles y cartones reciclados.	21
Tabla II.6. Características químicas de los constituyentes.	22
Tabla II.7. Parámetros morfológicos característicos de las dimensiones de una fibra.	32
Tabla II.8. Cambios en las dimensiones de las fibras por efecto del reciclado.	44
Tabla II.9. Efecto del reciclado sobre la longitud de las fibras.....	44
Tabla II.10. Efecto del reciclado sobre el drenaje.....	44
Tabla II.11. Ecuaciones de estado de los comportamientos reológicos de fluidos. ..	47
Tabla II.12. Regímenes de suspensiones de fibras.....	51
Tabla II.13. Principales alteraciones en el ciclo vegetativo a causa de nutrientes...	53
Tabla II.14. Distribución de microorganismos en suelo.....	57
Tabla III.1. Distribución por tamaño de partícula.....	83
Tabla III.2. Clasificación por longitud de fibras de SCB	86
Tabla III.3. Condiciones de medición para analizador FQA.	95
Tabla III.4. Restricciones del diseño para cada matriz experimental	96
Tabla III.5. Matriz experimental base	97
Tabla III.6. Composición del sustrato orgánico.....	117
Tabla III.7. Variables de ajuste de las condiciones de moldeado	124
Tabla III.8. Matriz experimental optimizada.....	125
Tabla IV.1. Composición química de las materias primas de estudio.....	139
Tabla IV.2. Datos de la literatura de composición química de materiales lignocelulósicos	140
Tabla IV.3. Composición porcentual en peso del fraccionamiento de pulpas secundarias según longitud de fibra.....	141
Tabla IV.4. Datos de la literatura de composición porcentual en peso del fraccionamiento de pulpas secundarias según longitud de fibra	142
Tabla IV.5. Parámetros morfológicos obtenidos por análisis automático (FQA) ...	143
Tabla IV.6. Datos de la literatura de parámetros morfológicos de pulpas.....	145
Tabla IV.7. Propiedades estructurales y mecánicas: Diseño I	149
Tabla IV.8. Propiedades estructurales y mecánicas: Diseño II.....	150
Tabla IV.9. Propiedades estructurales y mecánicas: Diseño III.....	150

Tabla IV.10. Modelo ajustado para cada variable respuesta: Diseño I	152
Tabla IV.11. Modelo ajustado para cada variable respuesta: Diseño II	153
Tabla IV.12. Modelo ajustado para cada variable respuesta: Diseño III.....	153
Tabla IV.13. Combinación de niveles de factores experimentales que optimizan las respuestas	154
Tabla IV.14. Parámetros del modelo de Carreau-Yasuda para las diferentes pulpas y las diferentes consistencias de las suspensiones fibrosas evaluadas	160
Tabla IV.15. Macro y micronutrientes de extractos acuosos de materiales lignocelulósicos	161
Tabla IV.16. Concentraciones de macro y micronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal.....	163
Tabla IV.17. Conductividad y pH para extractos acuosos de materiales lignocelulósicos	163
Tabla IV.18. Fracción biodegradable estimada para pulpas secundarias	174
Tabla IV.19. Propiedades estructurales y mecánicas de contenedores biodegradables	181
Tabla IV.20. Retención de agua contenedor-sustrato A	184
Tabla IV.21. Retención de agua contenedor-sustrato B	185
Tabla IV.22. Retención de agua contenedor-sustrato C	186
Tabla IV.23. Valores medios de atributos morfológicos para menta	190
Tabla IV.24. Valores medios de atributos morfológicos para acelga.....	191
Tabla IV.25. Valores medios de atributos morfológicos para eucalipto	192
Tabla IV.26. Deterioro estructural de contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de eucalipto.....	201

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1. Cobertura porcentual de relleno sanitario por provincia (2016).	7
Figura II.2. Regionalización del sistema de rellenos sanitarios para Misiones.	7
Figura II.3. Subproductos de la industria maderera en Misiones (2012).	9
Figura II.4. Destino de los subproductos en Misiones (2012).	9
Figura II.5. Distribución y localización de ingenios azucareros en Argentina.	10
Figura II.6. Residuos y subproductos de la agroindustria azucarera (2000).	11
Figura II.7. Diseño de contenedores comerciales utilizados comúnmente en viveros	13
Figura II.8. Materiales lignocelulósicos reciclados para el diseño de contenedores biodegradables.	16
Figura II.9. Estructura de maderas de coníferas y latifoliadas.	20
Figura II.10. Sección transversal del tallo de monocotiledóneas.	20
Figura II.11. Constituyentes químicos	22
Figura II.12. Estructura de la molécula de celulosa.	23
Figura II.13. Enlaces de tipo puente de hidrógeno.	24
Figura II.14. Estructura micro y submicroscópica de la celulosa.	24
Figura II.15. Estructura de monosacáridos presentes en las cadenas de hemicelulosas.	25
Figura II.16. Precursores primarios de la lignina.	26
Figura II.17. Modelo de estructura de lignina predominante en coníferas.	27
Figura II.18. Estructura molecular de compuestos extractivos.	28
Figura II.19. Estructura simplificada de la pared celular de las fibras vegetales.	31
Figura II.20. Influencia de las longitudes de las fibras sobre las propiedades papeleras.	34
Figura II.21. Relación entre morfología de las fibras y formación de una hoja de papel.	35
Figura II.22. Cambios en las fibras de pulpas kraft durante el proceso de reciclado.	39
Figura II.23. Cambios en fibras de pulpas kraft durante las etapas de secado.	41
Figura II.24. Efectos que sufren las fibras debido al refinado.	42
Figura II.25. Efectos del refinado sobre las fibras.	43
Figura II.26. Efecto del reciclado sobre WRV.	45
Figura II.27. Efectos del reciclado sobre propiedades físicas.	46
Figura II.28. Diagrama de definición del flujo de cizalla o corte.	47
Figura II.29. Reograma de los comportamientos reológicos de fluidos.	47
Figura II.30. Degradación de la pared celular por hongos causantes de pudrición.	58
Figura II.31. Ejemplos de productos a base de pulpa moldeada	61

Figura II.32. Diagrama de flujo para la elaboración de productos de pulpa moldeada.	63
Figura II.33. Proceso de secado en túnel.....	65
Figura II.34. Proceso de secado en molde.....	65
Figura II.35. Formación de enlaces por puente hidrógeno entre fibras.....	69
Figura II.36. Fases del secado de productos papeleros.	71
Figura III.1. Diagrama de flujo para obtención de pulpas secundarias	81
Figura III.2. Diagrama de flujo del proceso de acondicionamiento de aserrines	82
Figura III.3. Microfotografías de hojas de laboratorio a base de mezclas de ONP/PS	84
Figura III.4. Diagrama de flujo del proceso de obtención de bagazo de caña de azúcar	85
Figura III.5. Microfotografías de hojas de laboratorio a base de mezclas de ONP/SCB	86
Figura III.6. Diagrama de flujo del procedimiento de caracterización química.....	87
Figura III.7. Diagrama de flujo de evaluación de dimensiones morfológicas	91
Figura III.8. Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de propiedades físicas.	95
Figura III.9. Medición de las propiedades de resistencia a la tracción del papel. ..	103
Figura III.10. Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de parámetros reológicos	108
Figura III.11. Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de efectos fitotóxicos.....	109
Figura III.12. Diagrama de flujo del procedimiento de determinación de la cinética de biodegradación	117
Figura III.13. Caracterización de un material orgánico en función a la fracción biodegradable.	120
Figura III.14. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de contenedores biodegradables.....	121
Figura III.15. Equipo de moldeado por succión	123
Figura III.16. Secadero de túnel de flujo paralelo	127
Figura III.17. Diagrama de flujo de evaluación de la calidad de contenedores biodegradables.....	127
Figura III.18. Ensayo de resistencia a la compresión de contenedores	131
Figura III.19. Capacidad de retención de agua del conjunto contenedor-sustrato .	131
Figura III.20. Invernaderos utilizados para el cultivo de las especies de ensayo ...	133
Figura III.21. Contenedores biodegradables, contenedores de PP y portacontenedores	134
Figura III.22. Ejemplificación del procedimiento general de cultivo	135

Figura IV.1. Microfotografías de fibras secundarias obtenidas por clasificación ..	142
Figura IV.2. Longitud de fibra por microscopía	143
Figura IV.3. Grado de drenado	145
Figura IV.4. Tiempo de drenado	147
Figura IV.5. Valor de retención de agua	148
Figura IV.6. Medias para esfuerzo de fluencia como función del tipo de pulpa secundaria con intervalos de confianza del 95% por LSD	156
Figura IV.7. Medias para esfuerzo de fluencia como función de la consistencia de la suspensión fibrosa con intervalos de confianza del 95% por LSD	156
Figura IV.8. Interacción entre pulpas secundarias-consistencia para el esfuerzo de fluencia con intervalos de confianza del 95% por LSD	157
Figura IV.9. Viscosidad aparente como función de la velocidad de cizalla para las diferentes pulpas secundarias y consistencias	159
Figura IV.10. Viscosidad a velocidad de cizalla cero como una función de la consistencia para las diferentes pulpas secundarias	159
Figura IV.11. Crecimiento normal y anormal de plántulas	165
Figura IV.12. Comparación del crecimiento de plántulas en los diferentes extractos acuosos.....	165
Figura IV.13. Porcentaje de semillas germinadas usando extractos de residuos lignocelulósicos	166
Figura IV.14. Longitud media de radícula usando extractos de residuos lignocelulósicos	167
Figura IV.15. Índice de germinación usando extractos de residuos lignocelulósicos	168
Figura IV.16. Materiales degradados biológicamente.....	170
Figura IV.17. Cinética de degradación: pérdida de peso en función al tiempo	171
Figura IV.18. Cinética de degradación: contenido de sólidos volátiles en función al tiempo	172
Figura IV.19. Cinética de degradación: contenido de lignina en función al tiempo	173
Figura IV.20. Cinética de degradación: contenido de carbohidratos en función al tiempo	174
Figura IV.21. Contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos	176
Figura IV.22. Curvas de secado	177
Figura IV.23. Curvas de velocidad de secado.....	179
Figura IV.24. Correlación entre propiedades de resistencia hojas de 150 g/m ² y contenedores biodegradables	183
Figura IV.25. Plantas cultivadas en contenedores biodegradables	194
Figura IV.26. Estructura radicular en función al tipo de contenedor utilizado	196

Figura IV.27. Traspasso de las raíces por las paredes de contenedores biodegradables	197
Figura IV.28. Desarrollo de algas y hongos en paredes de contenedores biodegradables.....	198
Figura IV.29. Deterioro estructural de paredes de contenedores biodegradables...	200

LISTA DE ABREVIATURAS

- ASTM (American Society for Testing and Materials): Normas de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
- BHKP (Bleached Hardwood Kraft Pulp): Pulpa kraf blanqueada de latifoliada
- BKP (Bleached Kraft Pulp): Pulpa kraf blanqueada
- BSKP (Bleached Softwood Kraft Pulp): Pulpa kraf blanqueada de conífera
- CTMP (Chemi Thermo Mechanical Pulp): Pulpa quimitermomécanica
- ES (Eucalyptus Sawdust): Aserrin de eucalipto
- HPLC (High Performance Liquid Chromatography): Cromatografía líquida de alta eficacia
- HR: Humedad relativa
- ISO: Organización Internacional de Normalización
- LAP (Laboratory Analytical Procedure): Procedimientos analíticos de laboratorio
- OCC (Old Corrugater Container): Pulpas de cartones corrugados reciclados
- ONP (Old Newspaper): Pulpas de papeles de diario reciclados
- OWP (Office Waste Paper): Pulpas de papeles de oficina reciclados
- P: Fracción que pasa por un tamiz
- PGW (Pressurized Ground Wood): Pulpa mecánico a la piedra presurizada
- PS (Pine Sawdust): Aserrín de pino
- R: Fracción que queda retenida en un tamiz
- RCT (Ring Crush Test): Resistencia a la compresión en anillo
- RSU: Residuo sólido urbano
- sbs: sobre base seca
- SCB (Sugar Cane Bagasse): Fibras de bagazo de caña de azúcar
- SGW (Stone Ground Wood Pulp): Pulpa mecánico a la piedra
- smi: sobre muestra inicial
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry): Normas de Asociación Técnica de la Industria de Celulosa y Papel
- TMP (Thermo Mechanical Pulp): Pulpa termomecánica
- UBHKP (Unbleached Hardwood Kraft Pulp): Pulpa kraf sin blanquear de latifoliada
- UBSKP (Unbleached Softwood Kraft Pulp): Pulpa kraf sin blanquear de conífera

I. INTRODUCCIÓN

I.1. PROPUESTA DE TRABAJO

En las últimas décadas, la alta concentración de población en las zonas urbanas y el creciente nivel de desarrollo e industrialización han incrementado en gran medida la producción de residuos sólidos urbanos, forestales y agroindustriales. Estos residuos generalmente terminan en vertederos o son quemados a cielo abierto, contaminando el medio ambiente. Ante esta realidad es necesario desarrollar una estrategia para potenciar el aprovechamiento de los residuos, dando valor agregado a los mismos.

En este marco, la presente investigación está orientada a evaluar la factibilidad de reutilizar una fracción de, residuos sólidos urbanos, residuos forestales y residuos agroindustriales, como materias primas para diseñar nuevos productos “contenedores biodegradables aptos para el cultivo de plantas”. Se propone, diseñar contenedores biodegradables plantables, de composición alternativa a los actualmente utilizados, considerando como materia prima base, pulpas de papel de diario, papel de oficina y cartón corrugado reciclados, solas, combinadas entre sí, o combinadas con aserrín de pino, aserrín de eucalipto o bagazo de caña de azúcar, a partir del proceso de moldeado de pulpas. Además, se propone evaluar la aptitud de dichos contenedores para el cultivo de plantas, determinando las características, comportamiento e interacción de las materias primas, las condiciones de moldeado, propiedades físicas del contenedor, uso y comportamiento en vivero.

Se conoce como contenedores biodegradables a aquellos contenedores elaborados sin materiales contaminantes derivados del petróleo, como las fibras vegetales (cáscara de arroz, papeles reciclados, turba, fibra de madera, paja de arroz, fibra de coco, yute, etc.) o los materiales procesados (bioplásticos, etc.), que se descomponen rápidamente cuando se entierran en el suelo o cuando son compostados (Beeks & Evans, 2013b, 2013a; Evans et al., 2015; Evans, Taylor, & Kuehny, 2010). Generalmente se clasifican como plantables o compostables (Cypher & Fulcher, 2015a; Evans & Hensley, 2004; Evans et al., 2010; Mooney, 2009). Se utilizan en viveros dedicados a la germinación y cultivo de especies forestales, hortícolas, florícolas, frutícolas, entre otras.

La tecnología de moldeado es una óptima alternativa de valorización de materiales lignocelulósicos; admite distintas calidades de pulpas, solas o en mezcla con

materiales particulados o fibrosos; permite diseñar productos de estructura semirrígida, tridimensional, de formas variadas, y para diversas aplicaciones (Kirwan, 2005; Frank A. Paine, 1991).

I.2. OBJETIVOS

I.2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar las condiciones óptimas para el diseño de contenedores biodegradables aptos para el cultivo de plantas en vivero a partir de residuos sólidos urbanos, forestales y agroindustriales, utilizando el proceso de moldeado de pulpa.

I.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar características químicas de materiales lignocelulósicos.
- Evaluar dimensiones morfológicas de materiales lignocelulósicos.
- Evaluar propiedades físicas generales de materiales lignocelulósicos.
- Evaluar parámetros reológicos de materiales lignocelulósicos.
- Evaluar efectos fitotóxicos de materiales lignocelulósicos.
- Evaluar la cinética de biodegradación de materiales lignocelulósicos.
- Evaluar y seleccionar las condiciones óptimas de moldeado.
- Diseñar contenedores biodegradables a base de pulpas de papel de diario, papel de oficina y cartón corrugado reciclado, solas o en mezclas, con aserrín de pino, aserrín de eucalipto o bagazo de caña de azúcar.
- Evaluar la cinética de secado de contenedores biodegradables.
- Evaluar propiedades físicas generales de contenedores biodegradables.
- Evaluar la aptitud en vivero de contenedores biodegradables: durabilidad, desarrollo de algas y hongos en paredes y, crecimiento de plantas.

I.3. HIPÓTESIS PLANTEADAS

Para este trabajo se presume que:

- Los materiales lignocelulósicos reciclados son componentes funcionalmente atractivos para el diseño de contenedores biodegradables.
- Los materiales lignocelulósicos presentan diferentes comportamiento químico, físico, mecánico y reológico.

- Los materiales lignocelulósicos pueden tener elementos fitotóxicos, presentes en mayor o menor grado, que inhiban o afecten el crecimiento de vegetales, según sea su composición.
- Los materiales lignocelulósicos pueden tener diferentes velocidades de biodegradación en suelo según sea su composición.
- Los materiales lignocelulósicos presentan diferente comportamiento y diferente interacción durante el proceso de moldeado.
- Los contenedores biodegradables podrán presentar diferente comportamiento durante el proceso de secado, según sea la composición del material.
- Los contenedores biodegradables pueden presentar diferentes propiedades físicas según su composición.
- Los contenedores biodegradables pueden presentar diferente comportamiento durante su uso en vivero; la composición puede influir en su aptitud para el cultivo.

I.4. JUSTIFICACIÓN

La investigación permitirá seleccionar la mejor alternativa de diseño de un nuevo producto “contenedor biodegradable” y así justificar el desarrollo futuro de un plan de negocios para su elaboración e inserción en el mercado. El diseño de contenedores biodegradables a partir de residuos sólidos urbanos, forestales y agroindustriales, es una óptima alternativa para contribuir a la reducción de la contaminación ambiental en el país; permite disminuir la cantidad de residuos depositados a cielo abierto o en vertederos; minimiza el uso de materiales contaminantes utilizados para la elaboración de contenedores plásticos, así como la cantidad de residuos generados en vivero debido a los descartes de estos últimos. Para la industria de vivero tendrá beneficios económicos muy favorables, ya que permiten un buen desarrollo de la planta aumentando la calidad de los plantines, no requieren trasplante lo cual disminuye la mortandad de plantines por causa de estrés, así como la mano de obra y el tiempo de trabajo. En la Argentina, la industria viverística, es una actividad de gran importancia, con gran desarrollo tecnológico, por lo cual la producción de contenedores biodegradables influirá positivamente en el sector. En la región tendrá un gran impacto en la propagación de plantas nativas e implantadas. Viveros de la

zona, cómo Biofábrica Misiones S.A., han manifestado su interés en los resultados de este trabajo.

I.5. PLAN DE ACTIVIDADES A DESARROLLAR

- Búsqueda bibliográfica. Obtención de datos y antecedentes.
- Acondicionamiento de las materias primas:
 - Pulpado de papeles y cartones reciclado.
 - Distribución granulométrica de aserrines. Selección de la fracción óptima considerando proporción granulométrica vs capacidad de formación.
 - Desintegración mecánica de bagazo de caña. Selección de la fracción óptima considerando fracción desfibrada vs capacidad de formación.
- Caracterización y evaluación de las propiedades de materiales lignocelulósicos:
 - Caracterización química de los materiales lignocelulósicos.
 - Evaluación de las dimensiones morfológicas de pulpas secundarias.
 - Evaluación las propiedades de drenabilidad y las propiedades estructurales y mecánicas de los materiales a partir de hojas de laboratorio elaboradas según diseño experimental de mezcla. Optimización de las variables.
 - Evaluación de parámetros reológicos de las materias primas.
 - Evaluación del posible efecto fitotóxico de las materias primas.
 - Evaluación de la cinética de biodegradación de pulpas secundarias.
- Diseño de contenedores biodegradables a partir de materiales lignocelulósicos:
 - Evaluación y selección de las condiciones óptimas de moldeado.
 - A partir del diseño experimental optimizado, elaboración de contenedores, de dimensiones similares a los utilizados en vivero.
 - Determinación de la cinética de secado.
- Evaluación de la aptitud en vivero:
 - Evaluación de propiedades físicas.
 - Evaluación de la durabilidad, desarrollo de algas y hongos en paredes y crecimiento morfológico de plantas.

II. MARCO TEÓRICO

II.1. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Pocos problemas son tan comunes a todos los países, cualquiera sea su sistema económico y su nivel de desarrollo, como la degradación del medio ambiente y la vinculación que tiene la gestión de los residuos con la misma. El aumento de la concentración de núcleos de población en zonas urbanas, el creciente desarrollo industrial y el incremento de la adquisición de bienes impulsados por la cultura consumista junto a la cultura de “usar y tirar”, han conllevado a la generación de grandes volúmenes de residuos sólidos. Los residuos generados por las sociedades primitivas se descomponían naturalmente, pero hoy día, debido a los excesivos volúmenes, la naturaleza no alcanza a descomponerlos y se acumulan originando grandes focos de contaminación, deterioro de recursos naturales e insalubridad, con problemas sanitarios, socioeconómicos y medioambientales.

Para revertir esta problemática, una solución posible es aplicar un sistema de gestión de los residuos que incluya, mecanismos de reducción en la generación de residuos en origen, reciclaje con el fin de recuperar e incorporar los residuos a un proceso productivo para dar origen a nuevos productos de valor agregado, y vertido controlado de aquellos residuos que no se pueden recuperar (Salazar, 2016). Ello permitirá disminuir la acumulación de residuos y la contaminación del medioambiente, optimizando los recursos naturales, cada vez más escasos, con la disminución de su consumo (Casanova, 2006; Cuadros, 2008; C. Flores, 2009).

II.2. RESIDUOS SÓLIDOS

Se conoce como residuo sólido a aquellos materiales, en estado sólido o semisólido, que fueron generados por una actividad productiva o de consumo y que han dejado de ser de utilidad, por lo cual, son abandonados o descartados en forma permanente (Elias, 2009; C. Flores, 2009; Tchobanoglous, Theissen, & Vigil, 1994).

II.2.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

La Ley 13.592 (Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina, 2006), define como residuo sólido urbano (RSU) a *“aquellos elementos, objetos o sustancias generados y desechados producto de actividades realizadas en los*

núcleos urbanos y rurales, comprendiendo aquellos cuyo origen sea doméstico, comercial, institucional, asistencial e industrial no especial asimilable a los residuos domiciliarios”.

En Argentina, se generan aproximadamente 37.520 toneladas diarias de RSU, cuya distribución por provincias se detalla en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Generación de RSU por provincia (2012).

Provincias	Población (hab.)	GPC (kg/hab. d)	RSU Total (t/d)
Buenos Aires	18.435.229	2,361	20.881
Catamarca	347.615	0,735	255
Córdoba	3.227.603	1,011	3.264
Corrientes	865.100	0,814	704
Chaco	403.845	0,777	314
Chubut	442.103	0,903	399
Entre Ríos	1.138.506	0,790	899
Formosa	443.509	0,651	289
Jujuy	625.616	0,740	463
La Pampa	312.140	0,850	265
La Rioja	304.796	0,738	225
Mendoza	1.471.771	1,003	1.477
Misiones	812.613	0,641	521
Neuquén	491.994	0,898	442
Río Negro	565.729	0,862	488
Salta	1.086.017	0,820	890
San Juan	637.454	0,891	568
San Luis	388.881	0,813	316
Santa Cruz	215.972	0,823	178
Santa Fe	3.177.295	1,006	3.043
Santiago del Estero	672.354	0,829	557
Tierra del Fuego	111.614	0,705	79
Tucumán	1.243.540	0,761	1.002

Fuente: (Observatorio Nacional para la Gestión de RSU, 2012b)

Estos RSU están compuestos principalmente por, desechos alimenticios, papeles y cartones, plásticos y, residuos de poda y jardinería, cuyas composiciones medias se detallan en la Tabla II.2.

Tabla II.2. Composición media de RSU generados en Argentina (2012).

Componentes	% Peso en Peso
Papeles y cartones	13,8
Plásticos	14,6
Vidrio	3,11
Metales	3,68
Materiales textiles	4,54
Madera	1,13
Goma, cuero, corcho	1,26
Materiales de construcción y demolición	2,12
Residuos de poda y jardín	10,0
Residuos peligrosos y patológicos	0,22
Desechos alimenticios	38,8
Otros (electrónicos, pilas, aerosoles, etc)	6,75

Fuente: Adaptado de (Observatorio Nacional para la Gestión de RSU, 2012b)

Tratamiento y/o disposición final de los RSU

Entre los posibles métodos de tratamiento y disposición final de RSU se encuentran: vertederos o basurales a cielo abierto, rellenos sanitarios, incineración o tratamientos de recuperación y reciclaje. En Argentina, si bien cada vez más ciudades utilizan los rellenos sanitarios como sistemas de tratamiento y disposición final de sus RSU (Figura II.1), aún hay regiones que no disponen de esta tecnología y sus residuos terminan en veraderos o basurales a cielo abierto.

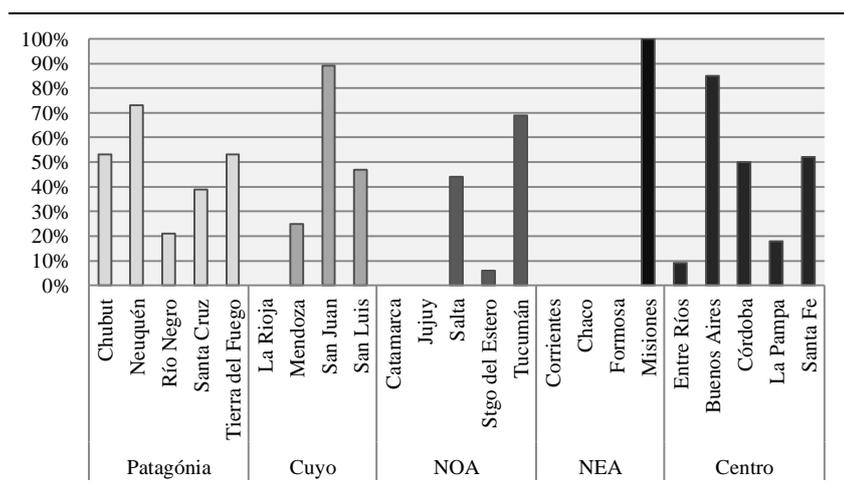


Figura II.1. Cobertura porcentual de relleno sanitario por provincia (2016).

Fuente: Adaptado de (Observatorio Nacional para la Gestión de RSU, 2016)

En el caso de la provincia de Misiones, desde el año 2001, el tratamiento de los RSU, está a cargo de la empresa AESA Misiones S.A., la cual dispone los residuos en dos rellenos sanitarios (Figura II.2), uno de ellos ubicado en la localidad de Fachinal y el otro en la localidad de Caraguatay.



Figura II.2. Regionalización del sistema de rellenos sanitarios para Misiones.

Fuente:(Observatorio Nacional para la Gestión de RSU, 2012a)

Este sistema logró, en varias localidades, eliminar los vertederos o basurales a cielo abierto y concentrar los RSU en rellenos sanitarios, lugar seguro, libre de efectos nocivos para el ambiente, dado que en estos, la disposición está sometida a rigurosos controles de contaminación y generación de vectores. Sin embargo, con dicho sistema de disposición, se está desperdiciando la posibilidad de reutilizar aquellos materiales reciclables que luego de un tratamiento se pueden incluir en un nuevo ciclo de producción dando origen a nuevos productos; generando valor agregado.

II.2.2. RESIDUOS INDUSTRIALES

La ley 25.612 (Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina, 2002) define como residuo sólido industrial a *“cualquier elemento, sustancia u objeto en estado sólido, obtenido como resultado de un proceso industrial, por la realización de una actividad de servicio, o por estar relacionado directa o indirectamente con la actividad, incluyendo eventuales emergencias o accidentes, del cual su poseedor productor o generador no pueda utilizarlo, se desprenda o tenga la obligación legal de hacerlo”*.

II.2.2.1. Residuos de industrias forestales

Argentina cuenta con una superficie total de 33.200.000 hectáreas de bosque nativo y una superficie de 1.200.000 hectáreas de bosque implantado (Ministerio Relaciones Exteriores Comercio Internacional y Culto, 2011). De la superficie total de bosque implantado, un 60% corresponde a especies de coníferas, fundamentalmente *Pinus elliotii* y *Pinus taeda*, y un 25% corresponde a eucaliptos, fundamentalmente *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna* (Ministerio Relaciones Exteriores Comercio Internacional y Culto, 2011). La superficie de bosque implantado, en función a las principales especies forestadas, se puede observar en la Tabla II. 3.

Tabla II.3. Superficie de bosque implantado en Argentina (2011)

Región/ provincia	Coníferas (ha)	Eucaliptos (ha)	Salicáceas (ha)	Otras (ha)
Misiones	337.100	27.700	0	55.900
Corrientes	263.500	101.800	0	1.500
Entre Ríos	12.300	92.300	16.100	13.400
Buenos Aires	7.300	39.100	47.900	8.100
Patagonia	56.200	0	19.000	700
Noroeste argentino	6.600	16.400	100	1.000
Resto	37.700	14.900	29.400	1.300
Total (ha)	717.700	292.200	112.500	81.900

Fuente: (Ministerio Relaciones Exteriores Comercio Internacional y Culto, 2011)

En Argentina, la industria forestal, cuenta con gran diversidad de establecimientos dedicados a producciones forestales, los cuales van desde la producción de madera aserrada y tableros, hasta la producción de celulosa (Uasuf & Hilbert, 2012). En el año 2009 se consumieron un total de 3.400.000 toneladas de rollizos, principalmente de las especies de pino (64,66%) y de eucalipto (21,47%), correspondiendo el 49% del consumo total de rollizos a la región Mesopotámica (Uasuf & Hilbert, 2012).

Subproductos de la industria de la madera en Misiones

En Misiones, los subproductos de la industria de la madera alcanzan un total de 2.101.494 toneladas anuales (Uasuf & Hilbert, 2012), valores distribuidos principalmente entre chips, costaneros y aserrín (Figura II.3).

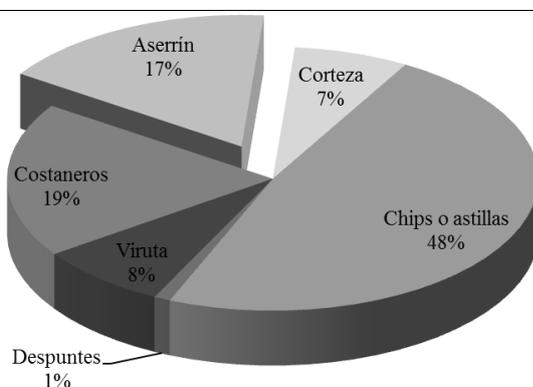


Figura II.3. Subproductos de la industria maderera en Misiones (2012).

Fuente: Adaptado de (Uasuf & Hilbert, 2012)

Actualmente, si bien, una gran proporción de los subproductos generados en la industria forestal, son reutilizados por otras industrias, aún, algunos subproductos, terminan depositados en pilas, ocupando grandes volúmenes del terreno o, incinerados en quemadores o a cielo abierto (Figura II.4).

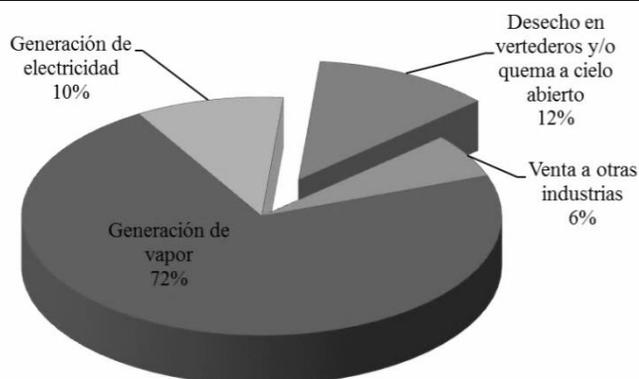


Figura II.4. Destino de los subproductos en Misiones (2012).

Fuente: Adaptado de (Uasuf & Hilbert, 2012).

Aquellos residuos que terminan en vertederos y/o incinerados, ocasionan pérdidas económicas, problemas de contaminación ambiental y deterioro de los recursos naturales, por lo cual, es importante la implementación de un sistema de gestión forestal sostenible, que permita recuperar y reutilizar dichos residuos, generando valor agregado, con beneficios socioeconómicos y ambientales.

II.2.2.2. Residuos de industrias agrícolas: Sector azucarero

El sector azucarero ocupa un lugar de gran importancia en la agroindustria Argentina. Además de ser la agroindustria más antigua del país, es una de las principales actividades económicas y sociales de las provincias del noroeste (Tucumán, Jujuy y Salta) y litoral (Misiones y Santa Fe) (INTA, 2016).

En Argentina, el azúcar se obtiene a partir del procesamiento industrial de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*); gramínea de cultivo plurianual, emparentado con el sorgo y el maíz; en cuyo tallo se acumula un jugo que contiene entre 16-20% de azúcares, 10-14% de fibra y 65-75% de agua (DAR, 2013). La cadena de valor se centra básicamente en, una actividad primaria, producción de caña de azúcar y zafra, y una actividad secundaria, elaboración industrial de azúcar y subproductos (alcohol, energía, papel, bioetanol, etc.) (Anino & Pizzo, 2016; D. Pérez et al., 2007). Las plantaciones ocupan una superficie total de 344.000 hectáreas, de las cuales, el 71% corresponde a la provincia de Tucumán, el 19% a la provincia de Jujuy, el 9% a la provincia de Salta y el 1% a las provincias de Misiones y Santa Fe (DAR, 2013). El procesamiento se lleva a cabo en 23 ingenios azucareros (D. Pérez et al., 2007), distribuidos en las provincias del noroeste (Figura II.5).

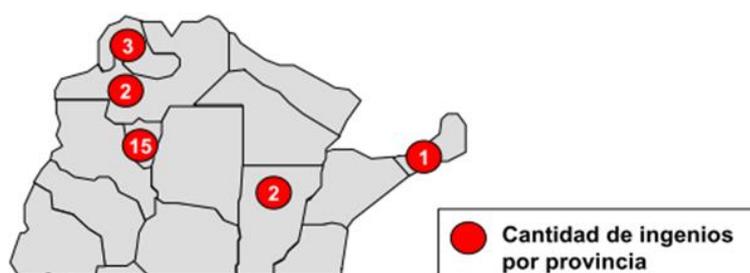


Figura II.5. Distribución y localización de ingenios azucareros en Argentina.

Fuente: (UIA, 2007)

Residuos y subproductos de la agroindustria azucarera

La agroindustria azucarera, en su proceso productivo, genera gran cantidad de residuos y subproductos, muchos de los cuales tienen gran valor agregado; encontrándose entre los principales residuos y subproductos sólidos, residuos agrícolas (cogollos, vainas, hojas y trozos de cañas), bagazo, cachaza, melaza y sacarosa. A partir de una hectárea de caña de azúcar se obtienen aproximadamente 100 toneladas de materia prima verde (N. Aguilar, Galindo, Fortanelli, & Contreras, 2009; ICIDCA, 2000; Velázquez, 2012). La proporción de los principales residuos y subproductos generados en la producción de azúcar, tomando como base el procesamiento de 100 toneladas de caña, se puede observar en la Figura II.6.

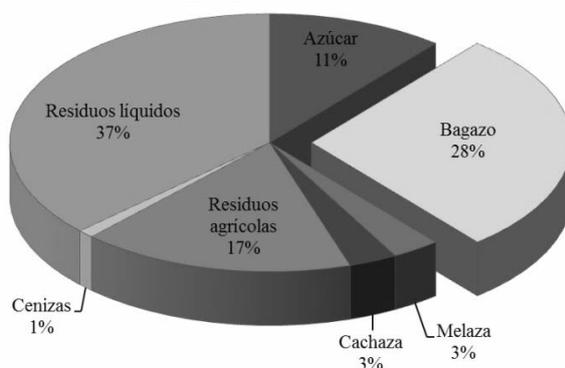


Figura II.6. Residuos y subproductos de la agroindustria azucarera (2000).

Fuente: Adaptado de (ICIDCA, 2000)

Los residuos generados en la industria azucarera, cuando el tratamiento y/o disposición final no son adecuados, son potenciales contaminantes del medio ambiente. Sin embargo, considerando que estos residuos son de naturaleza orgánica, biodegradables y con elevado potencial de reutilización, al aplicar un tratamiento adecuado, se pueden generar nuevos productos de alto valor agregado (N. Aguilar et al., 2009). En el caso del bagazo, si bien, en Argentina, se lo reutiliza principalmente como combustible en las centrales azucareras y en la producción de pulpa y papel, aún no se ha logrado alcanzar un desarrollo sostenible, con un nivel de utilización integral de la materia prima, por lo cual, es necesario implementar un sistema de gestión integral de residuos que permita el aprovechamiento total de los mismos, generando beneficios socioeconómicos y medioambientales.

II. 3. NUEVOS PRODUCTOS DE VALOR AGREGADO

Para contribuir a la reducción de la contaminación ambiental en el país, minimizando la cantidad de residuos sólidos generados, se considera como un óptima alternativa, recuperar y reutilizar una fracción de los residuos sólidos, materiales lignocelulósicos de desecho, recursos fibrosos, renovables y sostenibles, en el diseño de nuevos productos de innovación, de valor agregado, respetuosos con el medio ambiente: *contenedores biodegradables aptos para el cultivo de plantas en vivero.*

II.3.1. CONTENEDORES PARA EL CULTIVO DE PLANTAS EN VIVERO

II.3.1.1. Contenedores a base de materiales contaminantes

La producción en vivero de plantines forestales, hortícolas, florícolas, entre otros, es uno de los sistemas modernos de cultivo en el cual constantemente se aplican nuevas tecnologías, métodos y materiales, con la finalidad de lograr mayores rendimientos manteniendo la calidad de los cultivos.

El cultivo en vivero se realiza generalmente en contenedores individuales del tipo macetas o latas, de uso común en viveros ornamentales, o en celdas o cavidades, generalmente agrupadas en portaccontenedores formando bloques o en bandejas del tipo multiceldas o speedling, de uso común en viveros hortícolas y forestales (Landis, Tinus, McDonald, & Barnett, 1990).

Estos contenedores se fabrican comúnmente con materiales plásticos derivados del petróleo (polietileno, polipropileno, poliestireno), de diferentes formas y tamaños en función a las necesidades del vivero, de la especie a cultivar y del sistema de plantación (Beeks & Evans, 2013b, 2013a; Mooney, 2009). Algunos diseños de contenedores plásticos comerciales, se ilustran en la Figura II.7.

Los contenedores plásticos tienen la ventaja de ser de bajo costo, fáciles de almacenar, durables, de diferente densidad de pared (mayor o menor rigidez), relativamente resistentes, y en las paredes no se desarrollan ni hongos ni algas; sin embargo, tienen la desventaja de, además de ser elaborados con materiales contaminantes, ser desechados luego de su uso, dando origen a pilas de residuos, ocasionando graves problemas de contaminación ambiental (Evans & Hensley, 2004; Evans & Karcher, 2004).



Figura II.7. Diseño de contenedores comerciales utilizados comúnmente en viveros

II.3.1.2. Contenedores a base de materiales no contaminantes

Se entiende por *contenedores biodegradables* a aquellos recipientes destinados al cultivo de plantas, elaborados sin materiales contaminantes derivados del petróleo, como por ejemplo: fibras vegetales (cáscara de arroz, papeles reciclados, turba, fibra de madera, paja de arroz, fibra de coco, yute, otros) y materiales renovables de origen vegetal (bioplásticos, otros), que se descomponen rápidamente cuando se entierran en el suelo o cuando son compostados (Beeks & Evans, 2013b, 2013a, Evans et al., 2015, 2010).

Presentan consecuencias favorables en cuanto al producto, al medio ambiente y a lo económico (Fertilop, 2011; Horticom News, 2010).

- Presentan un efecto positivo en cuanto al cultivo: Permiten el buen crecimiento de la planta, debido a que las raíces perforan las paredes del contenedor, en contacto con el aire detienen su crecimiento estimulando la formación de raíces secundarias, dando lugar a un desarrollo radicular sano y rápido. La no deformación del sistema radicular asegura una buena y rápida fijación de la planta y una mejor exploración del suelo. La planta no necesita trasplante, se introduce directamente en el destino final, con lo cual las raíces que se forman en el exterior de la misma se activan inmediatamente y se evita el stress por trasplante. Se degradan biológicamente, transformándose en materia orgánica.
- Presentan un efecto positivo sobre el medio ambiente: Favorecen el desarrollo de tecnologías limpias. Se elaboran con materiales reciclados, siendo una

alternativa ecológica a bienes que frecuentemente se obtienen a partir de materiales contaminantes y difícilmente biodegradables, como polietileno, poliestireno expandido, polipropileno, y otros materiales plásticos, permitiendo mitigar la contaminación y reducir el consumo de recursos no renovables.

- Presentan un efecto positivo en cuanto a lo económico: El uso de materias primas recicladas en el diseño de contenedores biodegradables, otorga valor agregado a los materiales de desecho. Mejoran la economía de los viveros, dado que las plantas cultivadas no requieren trasplante, por lo cual, se ahorra tiempo y se disminuye la mano de obra.

Se clasifican como plantables o compostables (Cypher & Fulcher, 2015a; Evans & Hensley, 2004; Evans et al., 2010; Mooney, 2009):

- Contenedores “plantables”: Son aquellos que pueden ser enterrados directamente en el recipiente final, el campo o la cama de siembra. Su diseño permite que las raíces de las plantas perforen y atraviesen las paredes del contenedor; una vez enterrados, se biodegradan en un corto periodo de tiempo.
- Contenedores “compostables”: Son aquellos que no pueden ser enterrados directamente en el recipiente final, el campo o la cama de siembra. Su diseño no permite que las raíces perforen y atraviesen las paredes del contenedor; su biodegradación es muy lenta, por lo cual deben ser removidos y sometidos a un tratamiento de descomposición biológica aeróbica.

En los últimos tiempos se ha incrementado la lista de contenedores biodegradables de tipo comercial: productos con nuevas materias primas, disponibles en diferentes formas y tamaños, de paredes sólidas o ranuradas, con diseños diversos (Beeks & Evans, 2013b; Camberato & Lopez, 2010; Cypher & Fulcher, 2015c; Woodske, 2012), tal como se ejemplifica en la Tabla II.4. En el mercado internacional, el contenedor “plantable” más común es el contenedor a base de turba y el contenedor “compostables” más común es el contenedor a base de cáscara de arroz. En Argentina no tienen amplio uso, lo cual puede ser consecuencia en parte, al desconocimiento de sus virtudes y, en parte a una oferta nacional limitada, pues solamente se ha encontrado venta de plantas ornamentales en bolsas biodegradables denominadas Biopack fabricadas por las cadenas “Easy y Romipack” (“Easy y Romipack proponen macetas biodegradables para regalar a mamá,” 2016).

Tabla II.4.Tipos de contenedores biodegradables comerciales**Contenedores biodegradables “plantables”**

Contenedor de estiércol de vaca:

Elaborados con estiércol de vaca compostado, comprimido, con el agregado de un agente aglutinante.

Ejemplo: CowPots Co.



<http://www.cowpots.com/>

Contenedor de turba:

Elaborados con turba, generalmente en mezcla con residuos de fibra de madera o residuos de papel.

Ejemplo: Jiffy



<http://www.jiffypot.com/>

Contenedor de papel:

Elaborados con pulpa de papel reciclado y cartón con el agregado de un agente aglutinante.

Ejemplo: Western Pulp Products; Kord Fiber Grow; Myers Industries Inc.



<http://www.hc-companies.com/>

Contenedor de paja de arroz:

Elaborados con una mezcla de 80% de paja de arroz, 20% de fibra de coco con el agregado de un adhesivo de látex natural.

Ejemplo: Ivy Acres



<https://www.youtube.com/watch?v=7Ot0jMbG5A8>

Contenedor de fibra de madera: Elaborados con una mezcla de 80% fibras de cedro y 20% de turba sin agentes aglutinantes.

Ejemplo: Fertil USA



<http://www.fertil.us/>

Contenedor de fibra de coco:

Elaborado con fibras medias y largas de la cascara de coco con el agregado de un agente agutinante.

Ejemplo: Myers Industries Inc. ; ITML Horticultural Products



<http://www.hc-companies.com/>

Contenedores biodegradables “compostables”

Contenedor de cáscara de arroz:

Elaborado con cáscara de arroz molida con el agregado de un agente agutinante.

Ejemplo: Summit Plastics; EcoForms



<http://www.summitplastic.com/>

Contenedores bioplásticos:

Elaborados con bioplásticos derivados del ácido poliláctico o con almidón de trigo termoconformado.

Ejemplo: Summit Plastics; Ball Horticultural



<https://www.growertalks.com/>

II.3.2. MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS RECICLADOS COMO MATERIA PRIMA PARA EL DISEÑO DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

Los materiales lignocelulósicos serán de utilidad en el diseño de productos moldeados, contenedores biodegradables, si:

- Se encuentran en cantidad suficiente como para ser reutilizado en la generación de nuevos productos y, ser extraídos directamente de los productos desechados.
- Tiene la capacidad de poder conformarse entre sí durante el proceso de moldeado, desarrollando fuertes uniones entre los mismos en los puntos de contacto, conformando una estructura resistente, estable en el tiempo.

En función de ello, se considera que, los residuos sólidos urbanos, como papeles y cartones; residuos forestales, como aserrín de madera de especies de pino y eucalipto y residuos agroindustriales, como bagazo de caña de azúcar, son fuente de fibras y/o partículas lignocelulósicas renovables, posibles sustitutos de recursos naturales no renovables, con gran potencial para ser utilizados como materia prima en el diseño de contenedores biodegradables, considerando como principal materia prima, fibras celulósicas obtenidas de papeles y cartones reciclados; y como material secundario, partículas de madera y fibras de bagazo de caña de azúcar, ya que, por el tipo de estructura que presentan, la conformación se verá afectada y las propiedades de enlace disminuidas (Figura II.8).

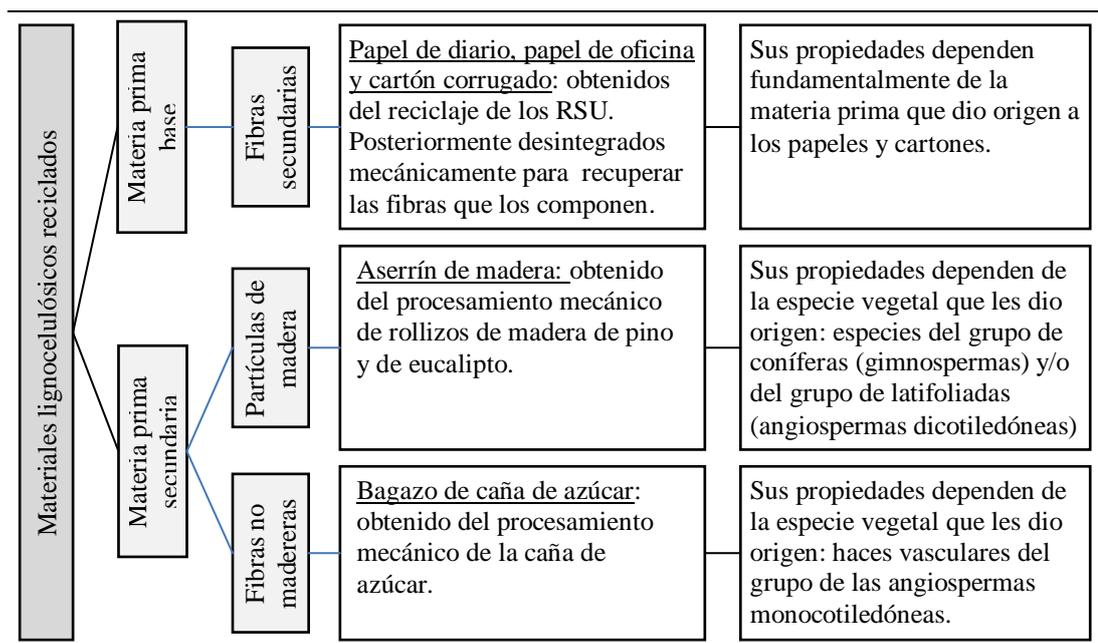


Figura II.8. Materiales lignocelulósicos reciclados para el diseño de contenedores biodegradables

II.3.2.1. Papeles de diario, papeles de oficina y cartones corrugados reciclados

El *papel prensa o periódico*, es un papel utilizado para impresión, económico, de diferentes calidades, con gramaje comprendido entre 45 y 56 g/m². Esta compuesto entre un 70% a 80% de pulpa mecánica (Braz, 2007).

El *papel de oficina o papel obra* es un papel apto para escritura e impresión con un gramaje entre 50 g/m² y 220 g/m². Esta compuesto por 80% de pulpa química o químimecánica blanqueada y 20% de cargas minerales que mejoran su lisura, opacidad y características de impresión (Braz, 2007).

El *cartón corrugado* es una hoja rígida cuyo gramaje es igual o superior a 150 g/m². Utilizado fundamentalmente en el mercado del embalaje. Elaborado a partir de la combinación de una o más hojas de papel ondulado, adherido a una o varias hojas de papel liner (Braz, 2007). El papel onda es fabricado con pulpa semiquímica o pulpa reciclada; el papel liner es fabricado principalmente con pulpa química de coníferas.

Para su reutilización, los residuos papeleros deben ser separados del resto de los RSU, recolectados, y clasificados según las distintas calidades (papel de diario, papel de oficina, cartón corrugado, otros). Posteriormente, para poder ser utilizados como fuente de materia prima en nuevos productos papeleros, deben ser desintegrados mecánicamente para lograr la separación de las fibras que lo componen, comúnmente denominadas, fibras celulósicas recicladas o secundarias. De este modo se cierra y equilibra el ciclo sostenible de los papeles y cartones, que parten de una fuente renovable y natural para fabricar nuevos productos papeleros, prolongando la vida útil de las fibras de celulosa, evitando que acaben en un vertedero o incineradas a cielo abierto, optimizando el aprovechamiento de los recursos naturales, minimizando la polución medio ambiental.

II.3.2.2. Aserrín de madera de pino y de eucalipto

Los aserrines son residuos lignocelulósicos que se obtienen de todas las operaciones mecánicas de elaboración de la madera, en especial en aquellas que involucran el aserrado de rollizos.

Para su reutilización, los residuos madereros deben ser recolectados y llevados a un lugar seco para su estacionamiento; y tamizados para eliminar impurezas y homogenizar la muestra. De este modo se cierra y equilibra el ciclo sostenible de los

desechos del aserrío, mediante el aprovechamiento de los mismos en el diseño de nuevos productos, minimizando la polución medio ambiental.

II.3.2.3. Bagazo de caña de azúcar

El bagazo de caña, es el residuo lignocelulósico fibroso remanente del tallo o cuerpo de la caña que se obtiene al triturar y comprimir la caña de azúcar en los molinos para extraer el jugo azucarado (guarapo), constituyendo un conjunto heterogéneo en cuanto a su composición estructural y granulométrica (Anino & Pizzo, 2016; ICIDCA, 2000). De este modo se cierra y equilibra el ciclo sostenible del desecho azucarero, bagazo, mediante el aprovechamiento del mismo en el diseño de nuevos productos, minimizando la polución medio ambiental.

II.4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

II.4.1. CONSTITUYENTES FIBROSOS

II.4.1.1. Clasificación de materiales fibrosos

Considerando la nomenclatura técnica utilizada en la industria papelera, de la amplia variedad de materiales fibrosos lignocelulósicos, son utilizados como materia prima (Hortal, 1988; Mogollón, García Hortal, & León, 2008; Smook, 1990a):

- Fibras madereras.

Se clasifican botánicamente en dos grupos:

- Tallos de gimnospermas (coníferas),
- Tallos de angiospermas dicotiledóneas (latifoliadas).

- Fibras no madereras.

Presentan diversidad en cuanto a su clasificación botánica; comúnmente se las agrupa en las siguientes categorías:

- Tallos de angiospermas monocotiledóneas (gramíneas: caña de azúcar, trigo, cebada, arroz, esparto, bambú, entre otras),
- Tallos de angiospermas dicotiledóneas herbáceas (lino, cáñamo, yute y kenaf) o arbóreas (morera de papel),
- Frutos de angiospermas dicotiledóneas (algodón),
- Hojas de angiospermas monocotiledóneas (abacá y sisal).

- Fibras secundarias.

Provenientes de:

- Recursos papeleros reciclados post-consumo,
- Recursos papeleros reciclados pre-consumo.

II.4.1.2. Caracterización general de materiales fibrosos

Características de fibras madereras:

- Tallos de gimnospermas (Hortal, 1988; Smook, 1990a):

Desde el punto de vista papelerero, la clase de mayor importancia son las coníferas, también conocidas como maderas blandas (softwoods) o maderas de fibras largas. En la historia evolutiva de las plantas superiores, representan una forma primitiva, presentando sus tejidos madereros una estructura microscópica simple. Su estructura vertical (longitudinal) está constituida por traqueidas (fibras); parénquima y células epiteliales de los canales de resina. Su estructura horizontal (radial) está formada por radios leñosos, constituidos por dos tipos de células especializadas, traqueida radial y parénquima radial, y por células epiteliales. Las traqueidas longitudinales son conocidas como fibras. Componen el 90% o más del volumen del tronco; son células alargadas y ahusadas; lignificadas y resistentes; su longitud media oscila entre 1,4 y 6 mm; y su diámetro tangencial entre 20 y 50 μm . (Figura II.9)

- Tallos de angiospermas dicotiledóneas (Hortal, 1988; Smook, 1990a):

Desde el punto de vista papelerero, la clase de mayor importancia son las latifoliadas, también conocidas como maderas duras (hardwood) o madera de fibra corta. Poseen una estructura compleja, a diferencia de las coníferas. En su estructura vertical (longitudinal), se encuentran las células fibrosas; el parénquima axial y los elementos de vaso. En su estructura horizontal (radial) se encuentra el parénquima radial. Los elementos fibrosos están constituidos por las llamadas “fibras verdaderas” (fibras libriformes y fibras traqueidas), y las “traqueidas” (traqueidas vasculares y traqueidas vasicéntricas). Las fibras libriformes son relativamente largas, de pequeño diámetro y pared gruesa, mientras que las fibras traqueidas son de mayor diámetro, de pared más gruesa y longitud similar a las libriformes. Dado que no existe una distinción clara entre ambas, generalmente se las engloba bajo el nombre de “fibra”. Componen alrededor del 50% del volumen del tronco; su longitud media varía entre 0,4 y 1,6 mm, y su diámetro tangencial varía entre 10 a 40 μm . (Figura II.9)

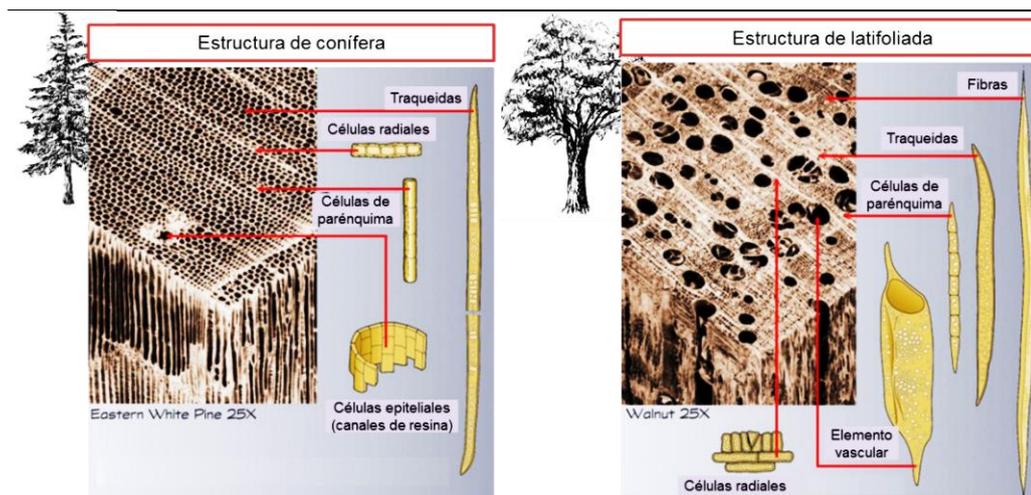


Figura II.9. Estructura de maderas de coníferas y latifoliadas.

Fuente: Adaptado de (Komulainen, 2015)

Características de fibras no-madereras

- Tallos de angiospermas monocotiledóneas herbáceas (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008):

Desde el punto de vista papelerero, una de las gramíneas de mayor interés es la caña de azúcar. El tallo de estas (Figura II.10), parte rica en fibra, carece de cambium y se encuentra protegido exteriormente por una epidermis fina, muy densa, de células no fibrosas, bajo la cual se encuentra una zona anular donde se ubican diversas células, células parenquimatosas, células esclerosas, elementos fibrosos; la región central del tallo o médula está formada principalmente por tejido parenquimático de tipo no fibroso. Las fibras internas representan aproximadamente el 15% del peso seco del tallo, mientras que las fibras de la zona anular o córtex representan el 50%. Las fibras de bagazo son consideradas fibras cortas en comparación a las fibras de latifoliadas; con longitudes de 0,8 a 3 mm y diámetros de 10 a 40 μm .

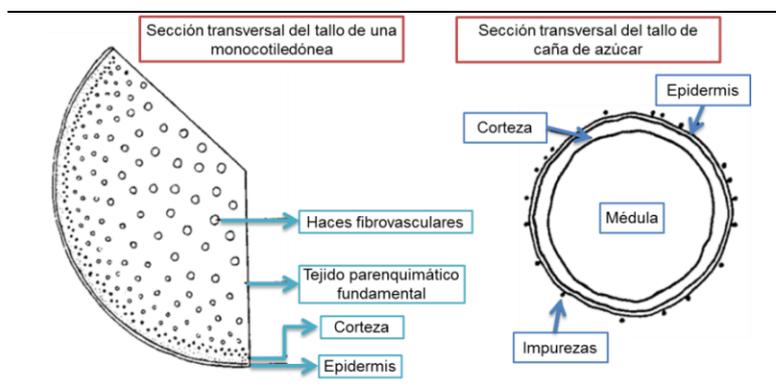


Figura II.10. Sección transversal del tallo de monocotiledóneas.

Fuente: Adaptado de (Hortal, 1988)

Características de fibras secundarias

Cuando la fibra virgen, utilizada en procesos de manufactura, se recicla, y se vuelve a utilizar como materia prima para elaborar nuevos productos papeleros, recibe el nombre de fibra secundaria o fibra reciclada (Smook, 1990e; Spangenberg, 1993).

Los papeles y cartones reciclados pueden provenir de (Zanuttini, 2012):

- **Materiales post-consumo:** Son papeles y cartones recuperados luego de que el producto paplero haya servido al consumidor; material que proviene de recolección doméstica, comercios, sitios de desembalaje, entre otros.
- **Materiales pre-consumo:** Son materiales no utilizados por el consumidor; corresponde al material recuperado en plantas de conversión de papeles y cartones corrugados, recortes de materiales utilizados en imprentas, excedente de publicaciones no vendidas, entre otros.

Para que estos materiales reciclados puedan ser utilizados eficientemente como materia prima, es importante clasificarlos en calidades. La “Lista europea de calidades estándar de papel y cartón recuperado”, los clasifica en cinco tipos de calidades, las cuales se detallan en la Tabla II.5.

Tabla II.5. Calidades de papeles y cartones reciclados.

Tipo	Composición	Ejemplos
Grupo 1: Calidades ordinarias	Mezclas clasificadas y sin clasificar	Cartón gris; cartón corrugado, revistas de devolución, periódicos, guías telefónicas, otros.
Grupo 2: Calidades medias	Calidades homogéneas con o sin pulpa mecánica; papeles impresos o no impresos.	Periódico nuevo, papeles impresos de oficina, libros sin pulpa mecánica, revistas coloreadas libre de pulpa mecánica, papel autocopiativo, cartón blanco sin pulpa mecánica cubierto de polietileno (PE), otros.
Grupo 3: Calidades altas	Calidades blancas con o sin pulpa mecánica; papeles impresos o suavemente impresos.	Refiles blancos libres de pulpa mecánica, papeles de escritura, papel kraft blanqueado impreso, cartón multipliego blanco conteniendo pulpa mecánica, papel periódico no impreso, otros.
Grupo 4: Calidades kraft	Calidades con alta proporción de fibra larga kraft, blanqueada o sin blanquear	Refiles de corrugado, cartón corrugado fabricado con papel kraft liner, bolsas kraft usadas, papeles kraft, otros.
Grupo 5: Grados especiales	Calidades especiales que presentan alguna dificultad para su reciclado	Cartón de embalaje de líquidos, papeles laminados, etiquetas, papeles blancos con resistencia en húmedo.

Fuente: (Zanuttini, 2012)

Las fibras secundarias solamente se pueden utilizar como materia prima para elaborar productos de propiedades iguales o inferiores del material de origen, pues, durante los procesos de reciclaje las fibras pasan por sucesivos procesos de

desintegración, refinado y secado, que modifican la calidad del material fibroso. El grado de alteración depende del número del ciclo de reutilización y de la forma de utilización de las fibras, no siendo recomendable utilizar más allá de 4 a 6 ciclos (Cabalova, Kacik, Geffert, & Kacikova, 2011); siendo atribuibles las principales alteraciones a los efectos de secado y de refinación (Cabalova et al., 2011; Fernandes Diniz, Gil, & Castro, 2004; Laivins & Scallan, 1996; Lumiainen, 1992).

II.4.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Las especies vegetales utilizadas para la elaboración de productos papeleros son materiales lignocelulósicos, muy heterogéneos, en los cuales su composición química, sus características anatómicas y sus propiedades físicas varían ampliamente. La composición química varía con la parte del árbol (raíz, tallo o rama), el tipo de madera (madera normal, de tensión o compresión), entre especies y entre las mismas especies, la ubicación geográfica, el clima y las condiciones del suelo (Hortal, 1988; Pettersen, 1984). Un resumen general de los constituyentes químicos presentes en la pared celular de las fibras vegetales se detalla en la Figura II.11.

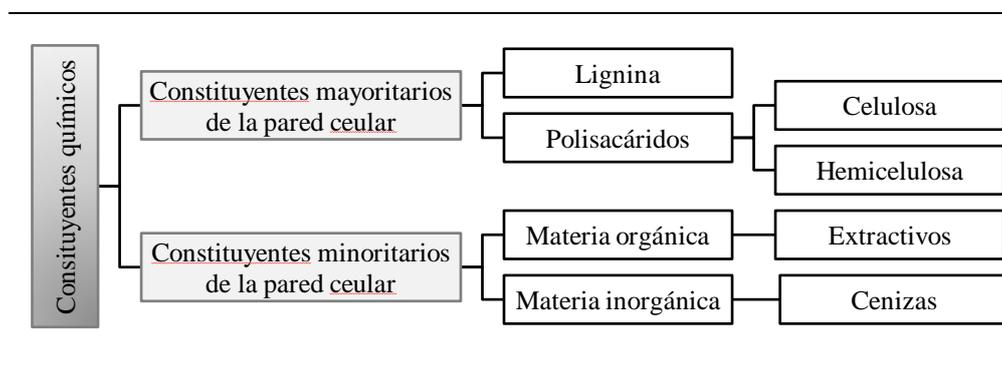


Figura II.11. Constituyentes químicos

Un resumen general de las características químicas de los constituyentes químicos de vegetales, se indican en la Tabla II.6.

Tabla II.6. Características químicas de los constituyentes.

Constituyente Químico	Estado natural	Monómero constituyente	Grado de polimerización	Importancia relativa (%)
Celulosa	Polímero lineal de estructura cristalina	D-Glucosa	3000-10000	40-50
Hemicelulosas	Heteropolímero ramificado amorfo	Pentosas y/o Hexosas	150-200	20-25
Lignina	Macromolécula tridimensional amorfa	Alcoholes / Fenilpropano	100-200	20-35
Extractivos	Varios	-	-	1-10

Fuente: (Hortal, 1988)

A continuación se describe cada uno de los constituyentes que componen las fibras de los materiales lignocelulósicos.

II.4.2.1. Celulosa

La celulosa es el componente principal de todas las células vegetales (fibrosas o no fibrosas), uno de los más abundantes e importantes biopolímeros; se encuentra formando la estructura básica de la pared celular, entremezclada con el resto de los polisacáridos y la lignina; la que determina el carácter de la fibra y permite su utilización como recurso papero (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008; Smook, 1990c). Es un polisacárido, cuya unidad monomérica básica es la D-Glucosa, la cual se enlaza sucesivamente a través de enlaces β -1,4 glucosídicos, dando origen a un homopolímero lineal; de fórmula química $(C_6H_{10}O_5)_n$, donde “n” es el número de unidades que se repiten, también conocido como grado de polimerización (DP) (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008; Smook, 1990c). Estructuralmente, la unidad más pequeña que se repite a lo largo de la cadena es la celobiosa (Hortal, 1988). Los valores del DP de la molécula de celulosa, en general varían entre 3000 a 10000 (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008; Smook, 1990c). En la molécula de celulosa (Figura II.12), cada unidad de glucosa contiene tres grupos hidroxilos libres, los cuales se encuentran ligados a los carbonos dos, tres y seis, respectivamente; los grupos terminales difieren entre sí, uno es un grupo aldehído reductor y, el otro es un grupo alcohólico no-reductor (IPT, 1988).

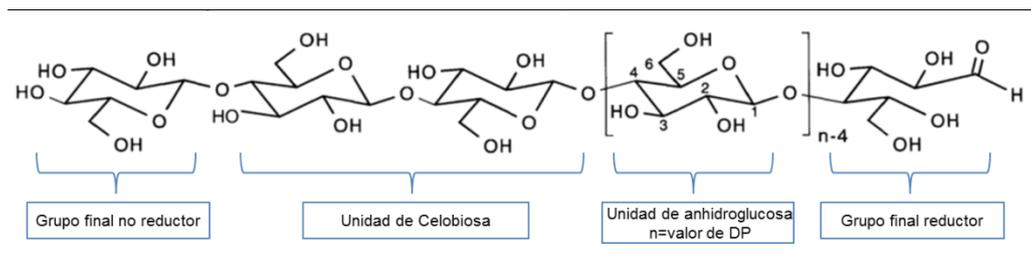


Figura II.12. Estructura de la molécula de celulosa.

Fuente: Adaptado de (Klemm, Philipp, Heinze, Heinze, & Wagenknecht, 1998)

Las moléculas de celulosa tienden a formar fuertes enlaces del tipo puente hidrógeno intramolecular (entre unidades de glucosa de la misma molécula) e intermolecular (entre unidades de glucosa de moléculas adyacentes) (Hortal, 1988; IPT, 1988), tal como se puede observar en la Figura II.13.

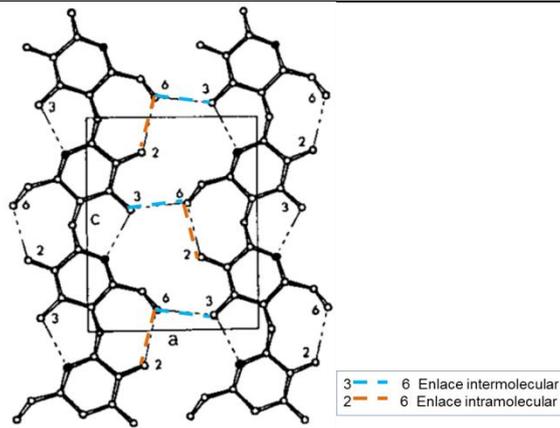


Figura II.13. Enlaces de tipo puente de hidrógeno.

Fuente: Adaptado de (Hortal, 1988)

Estos enlaces son de gran importancia; permiten a las cadenas de celulosa formar estructuras empaquetadas, de tipo cristalino, con un elevado grado de ordenamiento lateral junto con otras moléculas. Las interacciones de tipo intramolecular son responsables de la rigidez de las cadenas unitarias y las interacciones de tipo intermolecular, de la formación de la fibra vegetal (IPT, 1988).

La organización física de la celulosa en la fibra, estructura micro y submicroscópica, se puede observar en la Figura II.14.

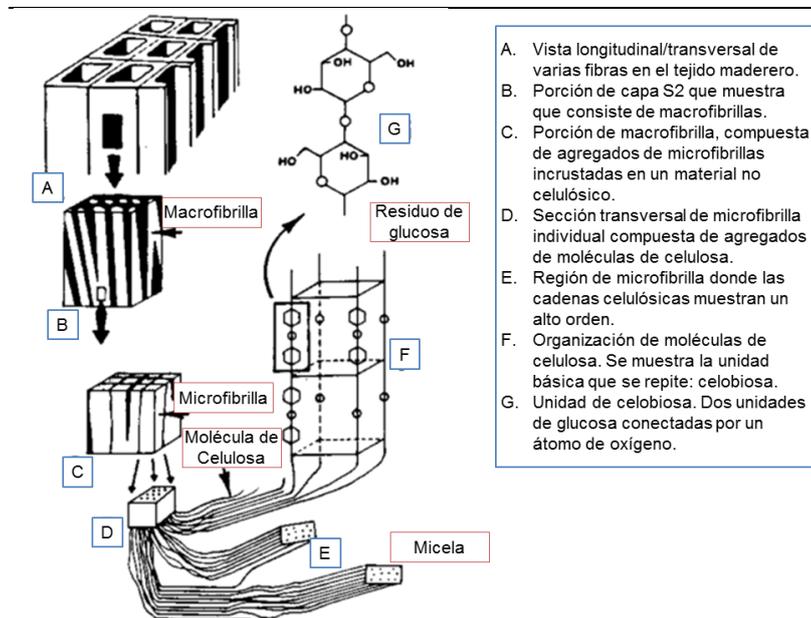


Figura II.14. Estructura micro y submicroscópica de la celulosa.

Fuente: Adaptado de (Hortal, 1988)

II.4.2.2. Hemicelulosas

Las hemicelulosas son polisacáridos químicamente heterogéneos, íntimamente ligadas a la molécula de celulosa. Comparadas con la celulosa, son de estructura más compleja, polímeros ramificados de bajo peso molecular, con regiones amorfas, con cierta orientación, con cadenas de menor longitud, con grupos acetilos y/o ácidos urónicos en sus extremos (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008; Smook, 1990c). En su composición pueden aparecer, combinaciones de los siguientes monosacáridos (Hortal, 1988; IPT, 1988; Mogollón et al., 2008; Smook, 1990c):

- Hexosas (azúcares que poseen seis átomos de carbono): glucosa, manosa y galactosa.
- Pentosas (azúcares que poseen cinco átomos de carbono): xilosa y arabinosa.

Los monosacáridos presentes en las cadenas de hemicelulosas, se ilustran en la Figura II.15.

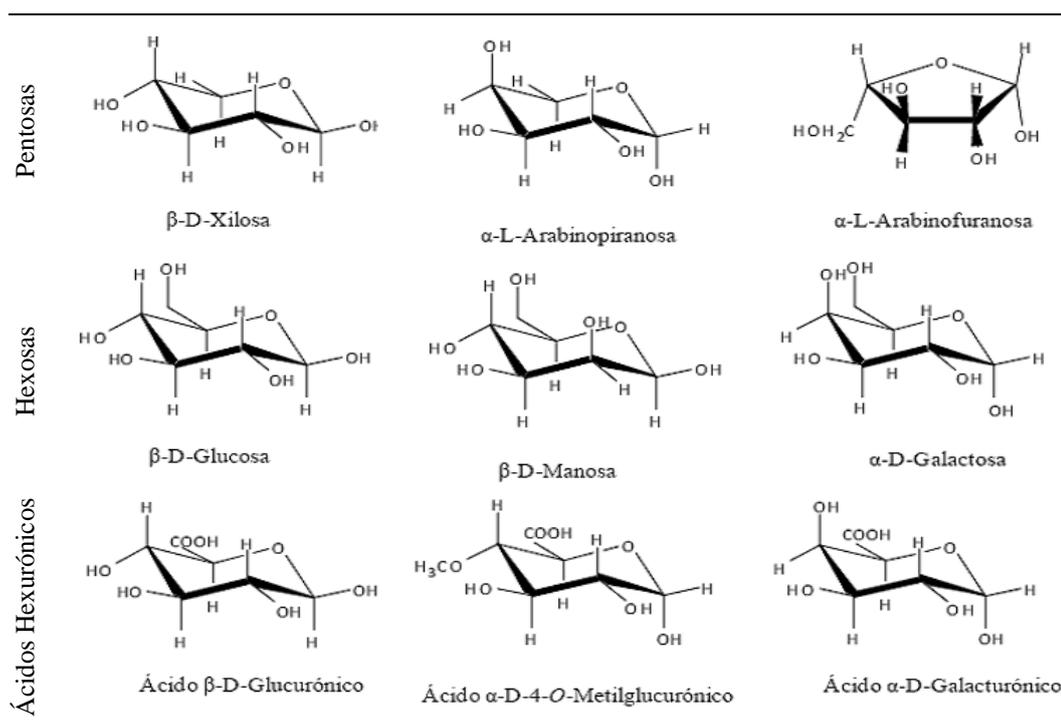


Figura II.15. Estructura de monosacáridos presentes en las cadenas de hemicelulosas.

Fuente: Adaptado de (Fengel & Wegener, 1984)

Los polímeros formados por la condensación de pentosas se denominan pentosanas, y aquellos formados por hexosas, hexosanas, con las fórmulas químicas generales $(C_5H_8O_4)_n$ y $(C_6H_{10}O_5)_n$, respectivamente, donde n es el DP, cuyos valores varían entre 150 a 200 (IPT, 1988). La naturaleza y proporción de hemicelulosas varía entre

las especies vegetales, así por ejemplo, en las coníferas predominan las manosas y galactosas, mientras que en las latifoliadas predominan las xilosas y los acetilos (Hortal, 1988; IPT, 1988).

II.4.2.3. Lignina

La lignina, luego de la celulosa, es el biopolímero más abundante en la naturaleza, donde se la encuentra asociada al complejo “holocelulósico” (celulosa + hemicelulosas). Es una sustancia química, amorfa, altamente polimerizada, constituyente intercelular incrustante o cementante de las células fibrosas de las plantas madereras, la cual genera una estructura resistente al impacto, a la compresión y a la flexión (IPT, 1988; Smook, 1990c). Posee una estructura reticulada, tridimensional y amorfa, constituida por unidades de fenilpropano, las cuales se unen entre sí mediante enlaces carbono-carbono (C-C) y enlaces éter (C-O-C) (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008). La frecuencia de los diferentes tipos de enlaces y el contenido de grupos funcionales varían considerablemente entre las especies vegetales y dentro de la misma pared celular (Mogollón et al., 2008). Entre los principales grupos funcionales se encuentran los grupos metoxilo (-OCH₃), grupos hidroxilo (-OH), grupos carbonilo y carboxilo, grupos éter (R-O-R), enlaces dobles (-C=C-) y grupos ésteres (-C-O-R) (Mogollón et al., 2008). La estructura principal de la lignina proviene de la polimerización deshidrogenativa (iniciada por enzimas) de los precursores primarios (IPT, 1988): alcohol trans-coniferílico (grupo guayacilo); alcohol trans-sinapílico (grupo siringilo) y alcohol trans-p-cumárico (grupo p-hidroxifenilo), los cuales se ilustran en la Figura II.16.

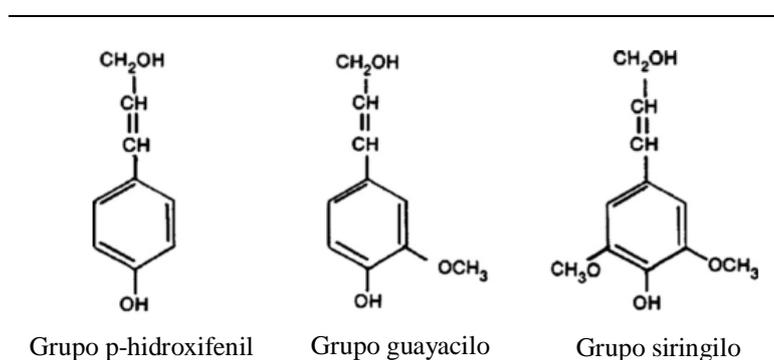


Figura II.16. Precursores primarios de la lignina.

Fuente: (Rowell, 2005)

En función a la especie vegetal, el núcleo aromático de la lignina varía, dando lugar a tres tipos de ligninas:

- Ligninas de maderas de coníferas “tipo G”: constituidas principalmente por unidades guayacilo, y en cantidades menores unidades p-hidroxifenilo y siringilo.
- Ligninas de maderas de latifoliadas “tipo SG”: constituidas tanto por unidades de guayacilo como de siringilo en relaciones que van desde 4:1 a 1:2.
- Ligninas de herbáceas “tipo SGH”: constituidas por los tres tipos de unidades, predominando las unidades de p-hidroxifenilo.

Su estructura básica, porcentaje y distribución a través de las paredes celulares difiere según sus orígenes, su situación en la planta, naturaleza, edad y condiciones de crecimiento de las células, por ejemplo, las especies vegetales de coníferas poseen un mayor porcentaje de lignina que las latifoliadas, y estas mayor porcentaje que las herbáceas (Hortal, 1988; Mogollón et al., 2008). Han surgido varios modelos en cuanto a la estructura de la macromolécula de lignina; un modelo de la estructura de la lignina predominante en especies de coníferas, se ilustra en la Figura II.17.

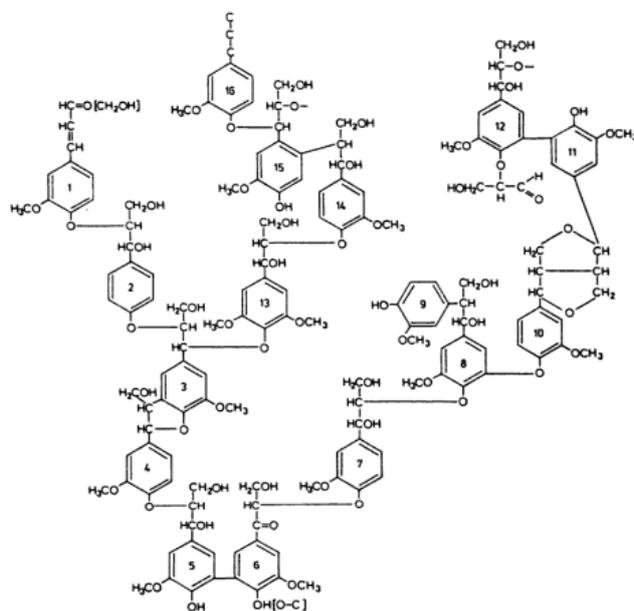


Figura II.17. Modelo de estructura de lignina predominante en coníferas

Fuente: (Sjöström, 1981).

II.4.2.4. Extractivos y Cenizas

Además de la “holocelulosa” y lignina, hay otras sustancias en cantidades pequeñas presentes en los tejidos vegetales, los cuales no influyen sobre la estructura morfológica de la fibra, pero en la industria papelera tienen una incidencia negativa

(Hortal, 1988; Smook, 1990c). Se clasifican como (Fengel & Wegener, 1984; Hortal, 1988; IPT, 1988; Klock & Sulato de Andrade, 2013; Prinsen, 2010):

- **Materia orgánica:** En este grupo se encuentran los compuestos extraíbles. Son sustancias solubles en agua fría o caliente o en disolventes orgánicos neutros como alcohol, benceno, acetona o éter.
- **Materia inorgánica:** En este grupo se encuentran las sustancias minerales (principalmente metales). Son sustancias insolubles.

Extractivos

Corresponden a los materiales orgánicos encontrados en vegetales; son sustancias de bajo peso molecular. Se encuentran en proporciones muy variables según la especie vegetal, factores genéticos, posición en el vegetal, entre otros. Químicamente están compuestos por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, terpenos, fenoles, ácidos grasos, ácidos resínicos, grasas, ceras, aceites esenciales, sustancias neutras insaponificables (Hortal, 1988; IPT, 1988; Mogollón et al., 2008; Smook, 1990c). Algunas estructuras se ilustran en la Figura II.18.

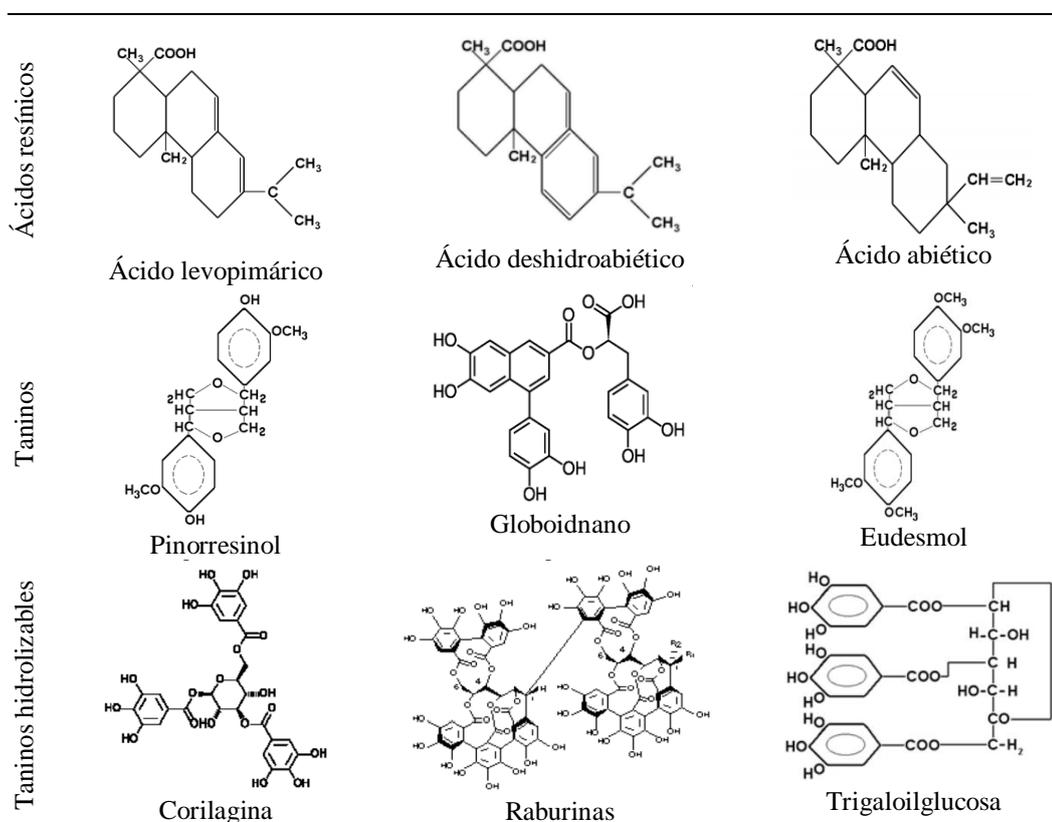


Figura II.18. Estructura molecular de compuestos extractivos.

Fuente: Adaptado de (Nuñez, 2008b)

Los extractivos son materiales solubles en agua y disolventes orgánicos neutros, y en función a su solubilidad se clasifican en compuestos lipofílicos y compuestos hidrofílicos (Fengel & Wegener, 1984; Pazo, 2008; Prinsen, 2010; Sjöström, 1981):

- Los compuestos extraíbles lipofílicos (lípidos y derivados) consisten principalmente en ácidos y alcoholes grasos, ácidos resínicos, hidrocarburos, terpenos, esteroides, glicéridos, ceras, entre otros; y pueden ser aislados de los materiales lignocelulósicos mediante extracciones con solventes orgánicos apolares.
- Los compuestos extraíbles hidrofílicos (hidrosolubles) consisten principalmente en compuestos fenólicos libres como estilbeno, lignanos, taninos, flavonoides, entre otros; y pueden ser aislados de los materiales lignocelulósicos mediante extracciones con solventes orgánicos polares.

Cenizas

La medida del contenido de cenizas corresponde al contenido de materiales inorgánicos de la especie vegetal evaluada. Se obtienen después de la combustión de las fibras vegetales a una temperatura de $575 \pm 25^{\circ}\text{C}$ y corresponden a una medida aproximada del contenido de sales minerales y otras materias inorgánicas (Stenius, 2000). En general, el contenido de sustancias inorgánicas es inferior al 0,5%, sin embargo, en especies madereras con grandes cantidades de sílice, el valor puede ser elevado (Rowell, 2005). Estos materiales inorgánicos están constituidos por una amplia variedad de elementos (IPT, 1988; Rowell, 2005), constituyendo el calcio, magnesio y potasio el 80% de las cenizas de especies madereras, los cuales se encuentran como sulfatos, oxalatos, carbonatos, fosfatos o silicatos. Estos materiales son químicamente insolubles, no pueden ser aislados de los materiales lignocelulósicos mediante extracciones.

II.4.3. PROPIEDADES DE LAS FIBRAS INDIVIDUALES

La fibra consiste en un elemento tubular o cilíndrico obtenido de materia vegetal, cuyo principal constituyente químico es la celulosa (Biermann, 1996).

Teniendo en cuenta que las fibras forman la estructura básica de los productos papeleros y que, cada especie vegetal está conformada por células con características específicas, se puede esperar que las propiedades de las fibras, en función a su fuente de origen, tengan un efecto sustancial sobre las propiedades de dichos productos

(Biermann, 1996; Sundholm, 2000). Las propiedades de las fibras varían no sólo entre especies vegetales, sino también, como por ejemplo, en el caso de plantas madereras, dentro y entre arboles de la misma especie (Sundholm, 2000).

Las características morfológicas de las fibras y la resistencia intrínseca de estas, se encuentran íntimamente relacionadas con las propiedades y niveles de calidad de las pulpas y productos papeleros; los tratamientos químicos y mecánicos que tienen lugar en los procesos de pulpado, pueden degradar los componentes estructurales de la fibra u ocasionar cambios en la morfología de las mismas (Hortal, 1988). Básicamente, son las características anatómicas de las fibras las cuales sirven como criterio de orientación para dilucidar el valor paplero de una materia prima fibrosa.

II.4.3.1. Estructura de la pared celular de una fibra celulósica

La estructura de la pared celular de las fibras vegetales (Figura II.19) está conformada por (Hon & Shiraishi, 2000; Sjöström, 1981):

- Lámina media (LM): Capa delgada, amorfa, formada casi enteramente por lignina y hemicelulosas, químicamente unidas dando origen al complejo lignina-hemicelulosas. Se encuentra rodeando a la fibra; realiza una función de enlace entre fibras adyacentes. El espesor de esta capa rígida e hidrofóbica varía de 0,2 a 1 μm , dependiendo de la especie y condición de crecimiento.
- Pared primaria (P): Está compuesta por microfibrillas de celulosa desordenadas, de hemicelulosas y proteínas. Es usualmente fina y presenta gran flexibilidad, y suele catalogarse como amorfa. Su espesor es del orden de 0,1 a 0,2 μm .
- Pared secundaria(S): Son paredes especializadas en estructura y composición. Las microfibrillas ordenadas de celulosa cristalina son su componente principal. Su matriz fibrilar está fuertemente orientada, interpenetrada por los elementos constituyentes no celulósicos. Constituye la mayor parte de la pared. Generalmente consta de tres capas con características físicas y químicas diferentes: S1 es la capa externa (espesor 0,1-0,2 μm), S2 es la capa media o central (espesor 2-10 μm) y S3 es la capa interna (espesor alrededor de 0,1 μm).
- Lumen: Cavidad celular central hueca, limitada por las paredes.

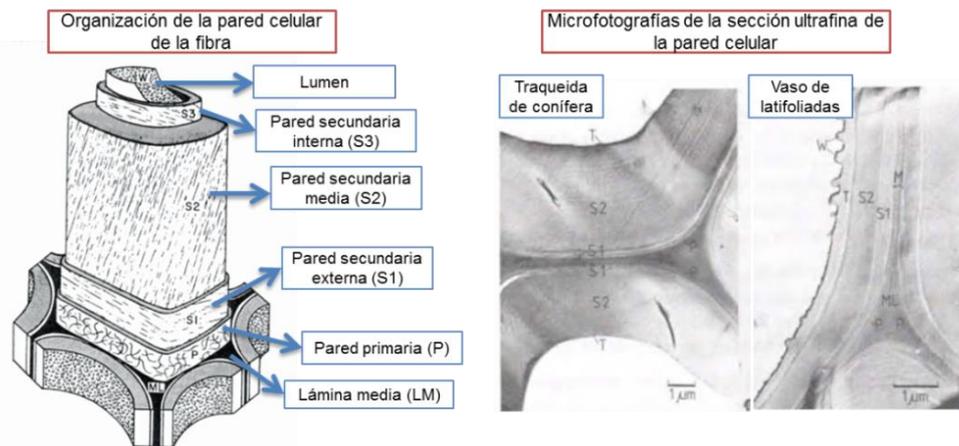


Figura II.19. Estructura simplificada de la pared celular de las fibras vegetales.

Fuente: Adaptado de (Fengel & Wegener, 1984; Sjöström, 1981)

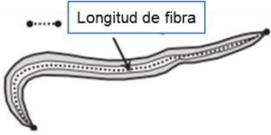
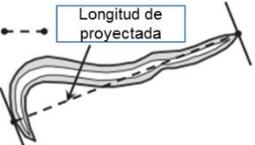
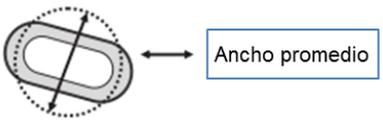
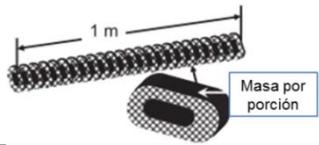
II.4.3.2. Variaciones de las dimensiones de las fibras en pulpa

Dependiendo del proceso de pulpado los efectos sobre las propiedades de las fibras serán diferentes (Levlin & Söderhjelm, 2000): En el caso de pulpas químicas, la lignina y las hemicelulosas se disuelven de la pared de la fibra, volviendo a estas más delgadas y flexibles; los tratamientos mecánicos deforman las fibras e inducen al curl y kinks influyendo en la longitud de las mismas. En general, las pulpas químicas contienen entre 5% a 10% de finos, 30% de fibras de longitud media y entre 60% a 65% de fibras largas. Con tratamientos de refino a baja consistencia, las fibras tienden a volverse rectas, hay fibrilación externa con formación de finos y fibrilación interna con aumento de la capacidad de hinchamiento de las fibras, y en consecuencia mayor flexibilidad y capacidad de colapsar, lo cual mejora la formación del entramado fibroso; al intensificar el refino puede ocurrir acortamiento de fibra. En el caso de pulpas mecánicas, debido a la desfibrilación, las fibras sufren cambios en la longitud y en las dimensiones de la sección transversal. En general, las pulpas mecánicas contienen iguales proporciones de finos, de fibras de longitud media y de fibras largas; al utilizar un desfibrado menos agresivo para separar las fibras, el porcentaje de fibras largas aumenta. Al aumentar el proceso de refino se obtienen fibras con paredes más delgadas y más flexibles, lo cual permitirá una mejor formación del entramado fibroso.

II.4.3.3. Dimensiones morfológicas de las fibras

Los parámetros característicos utilizados para evaluar las dimensiones morfológicas de las fibras individuales se detalla en la Tabla II.7.

Tabla II.7. Parámetros morfológicos característicos de las dimensiones de una fibra.

Parámetro	Valor promedio de	Ejemplificación
Longitud del contorno (mm)	Longitud de fibra enderezada	
Longitud proyectada (mm)	Longitud de la fibra curvada	
Curl (%)	Extensión del curling de la fibra	$\text{Curl} = \left(\frac{\text{longitud del contorno}}{\text{longitud proyectada}} - 1 \right) * 100$
Diámetro de fibra (μm)	Dimensión de la sección transversal	
Espesor de pared (μm)	Espesor de la pared de la fibra	
Coarseness (g m ⁻¹)	Masa por unidad de longitud	

Fuente: Adaptado de (Sixta, 2006).

Las propiedades morfológicas de las fibras se pueden determinar mediante una clasificación de una muestra de pulpa representativa en fracciones de diferentes longitudes utilizando tamices estandarizados (Gooding & Olson, 2001; Levlin & Söderhjelm, 2000; Sixta, 2006), o bien, mediante un examen microscópico de un número representativo de fibras (Levlin & Söderhjelm, 2000; Pulkkinen, Ala-Kaila, & Aittamaa, 2006; Sixta, 2006). Sin embargo, estos métodos resultan engorrosos y lentos. Por ello, actualmente se ha implementado para la determinación de las propiedades morfológicas el uso de analizadores de fibra óptica (Carvalho, Ferreira, Martins, & Figueiredo, 1997; Levlin & Söderhjelm, 2000; Pulkkinen et al., 2006; Robertson, Olson, Allen, Chan, & Seth, 1999; Sixta, 2006); los cuales permiten monitorear la calidad de la pulpa de forma rápida y confiable; son métodos más rápidos y menos tediosos, que permiten conocer la distribución de la longitud de las fibras, sin necesidad de una clasificación previa, a partir de un analizador óptico

automatizado. Entre los equipos comerciales disponibles en el mercado se pueden citar: Kajaani fiber analyzer FS-200; Fiber quality analyzer (FQA); Pulp quality monitor (PQM); Pulp Expert; Metso FiberLab™; entre otros.

En investigaciones previas (Robertson et al., 1999), sobre métodos de medición de propiedades morfológicas, los autores midieron longitud de fibra, coarseness e índice Curl en pulpas químicas de conífera y de latifoliada y, pulpas mecánicas de conífera, por microscopía, y por análisis automático mediante el uso de un analizador FQA, y un analizador Kajaani FS-200, e informaron que al comparar las medidas arrojadas por el analizador FQA y el analizador Kajaani, estas presentaron similitud, mientras que al comparar las medidas realizadas por microscopía y por análisis automático, los valores de curl, arrojados por este último método, fueron aproximadamente un 20% inferiores.

II.4.3.4. Relación entre parámetros morfológicos de la fibra y calidad de las pulpas

Los parámetros morfológicos característicos de evaluación, de mayor importancia para predecir la calidad de una pulpa son: la longitud y el ancho de fibra y el espesor de pared celular, ya que estos, naturalmente, sufren modificaciones durante los procesos de pulpado (Pulkkinen et al., 2006; Sixta, 2006; Smook, 1990a):

- Longitud de fibra:

Esta variable es de suma importancia sobre las propiedades de las fibras (Figura II.20). A mayor longitud, las fibras se entrelazan mejor entre ellas, aumentando la superficie de contacto, y con ello las propiedades de resistencia mecánica. Las fibras cortas, llenan los espacios intersticiales logrando una trama más "cerrada", otorgando mayor rigidez y opacidad al producto, además de mejorar la formación y las propiedades superficiales.

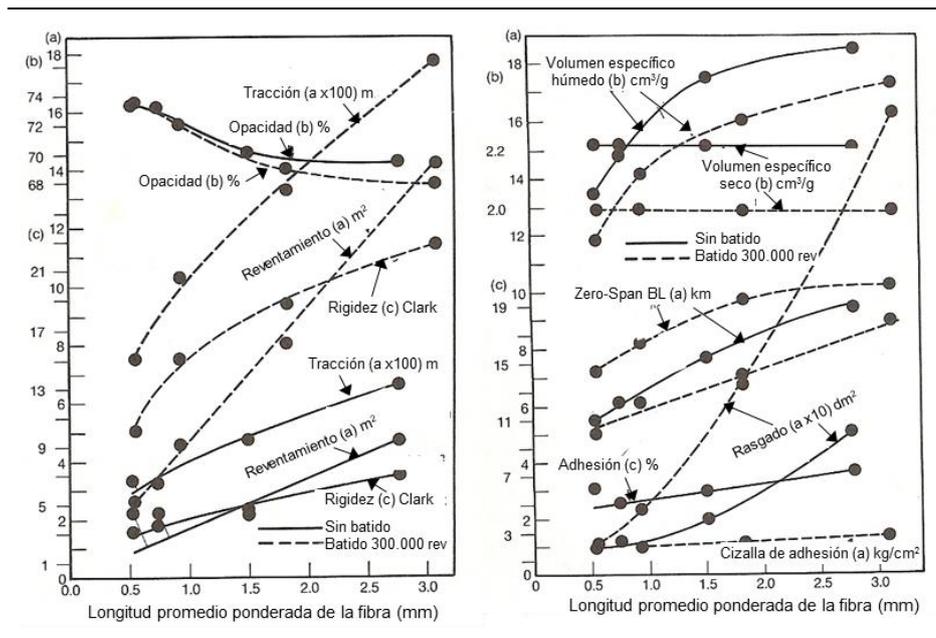


Figura II.20. Influencia de las longitudes de las fibras sobre las propiedades papeleras.

Fuente: Adaptado de (Clark, 1985)

- Espesor de pared y diámetro de la fibra:

Además de las fuerzas de atracción química y de entrecruzamiento de fibras, contribuye a la resistencia del papel, la forma de colapso de las fibras, propiedad que depende del ancho de fibra y del espesor de pared. El colapso controla el área de enlace relativa entre las fibras adyacentes; a mayor capacidad de colapsar, aumenta la capacidad de enlace interfibras, y con ello, incrementan aquellas propiedades mecánicas que dependen del área de enlace. Entre fibras de diferente espesor de pared, el número de fibras y los puntos de contacto pueden ser los mismos en ambas estructuras, pero el área de contacto y los puntos de unión son mayores en fibras con menor espesor. Fibras con espesores de pared más pequeños, son más flexibles y colapsan fácilmente en forma de cinta durante la formación. Fibras con paredes de mayor espesor, presentan resistencia al colapso y no contribuyen a la formación de enlaces entre las fibras, dando lugar a una hoja abierta, voluminosa y absorbente, con bajas propiedades de resistencia a la tracción y explosión, y altas propiedades de resistencia al rasgado.

- Coarseness

Si bien, el índice de la flexibilidad relativa de la fibra, es un parámetro que se suele utilizar para relacionar la longitud de fibra con el espesor de pared, una medida más satisfactoria del comportamiento de la fibra es el coarseness, parámetro que refleja el

peso del material de la pared de la fibra por unidad de longitud de la fibra, normalmente expresado en mg/m o g/m. A mayores valores de coarseness, la flexibilidad de la fibra y la capacidad de formación de enlaces interfibras disminuyen. En general, los valores de coarseness incrementan con la longitud de las fibras. Durante los procesos de pulpado, las fibras se vuelven flexibles y compresibles y debido a ello aumentan su potencial de unión. El colapsamiento, la conformabilidad, la flexibilidad, el coarseness, la forma y la fibrilación de las fibras influyen en la red fibrosa (Ali, 2013). El efecto de las variaciones morfológicas de las fibras en la formación de una hoja de papel se puede observar en la Figura II.21.

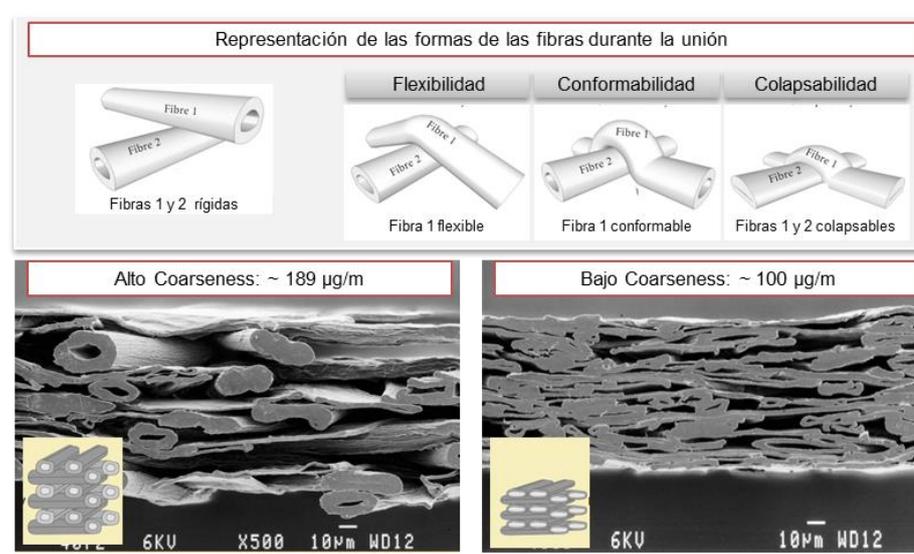


Figura II.21. Relación entre morfología de las fibras y formación de una hoja de papel.

Fuente: Adaptado de (Ali, 2013; CANFOR, 2010b)

II.4.4. PROPIEDADES DE LAS PULPAS

II.4.4.1. Relación entre procesos de pulpado y propiedades de las pulpas

En función a la forma de energía empleada para la liberación de las fibras, las pulpas, pueden ser obtenidas, a partir de procesos de pulpado químico, procesos de pulpado mecánico, o una combinación de ambos procesos (Scott, 1995). En los procesos de pulpado químico, se logra la individualización de las fibras mediante la aplicación de reactivos químicos y en los procesos de pulpado mecánico, se logra la individualización de las fibras mediante la aplicación de energía mecánica.

Cada proceso de pulpado modifica las características químicas, físicas y morfológicas de las fibras en diferentes grados, repercutiendo ello en las propiedades de las pulpas y, estos a su vez, en las propiedades de los productos papeleros; en

consecuencia, la selección de un determinado tipo de pulpa estará condicionado al tipo de producto que se desea elaborar.

Algunas de las diferencias en las propiedades entre pulpas mecánicas y pulpas químicas se deben a la diferencia en las dimensiones de la fibra, siendo mayores los cambios en las dimensiones de las fibras para pulpas mecánicas y de menor importancia para pulpas químicas (Scott, 1995). Además, existe una gran diferencia entre estas pulpas en lo que respecta a contenido de lignina y de hemicelulosas, así al comparar ambas pulpas se tiene que la pulpa mecánica contiene un mayor porcentaje de lignina que las pulpas químicas (Scott, 1995). Las investigaciones han mostrado que la lignina restringe el hinchamiento de la fibra en agua, disminuye los enlaces fibra-fibra y, rigidiza la fibra; todo ello contribuye a producir un papel con baja resistencia, alto volumen específico y alta opacidad. Como resultado de la remoción de lignina durante el pulpado y blanqueo, el hinchamiento de las fibras, ocurre más rápidamente durante el refinado y las fibras se tornan más flexibles. Además, se genera un aumento de la superficie de la fibra y se pueden formar enlaces interfibras con buena resistencia. En cuanto a la celulosa, la mayor influencia del proceso de pulpado consiste en disminuir la longitud promedio de la cadena del polímero, lo cual no afecta a las propiedades de resistencia hasta un valor crítico, después del cual la resistencia de las fibras decrece rápidamente. En cuanto a las hemicelulosas estas son más fácilmente atacadas durante el proceso de pulpado; juegan un rol importante en los enlaces interfibras y en el hinchamiento de la fibra; mejoran los enlaces interfibras y aquellas propiedades de resistencia que dependen de estos, como la resistencia a la tracción y el reventamiento.

II.4.4.2. Propiedades físicas de pulpas

El objetivo de las pruebas llevadas a cabo en pulpas es simular el proceso industrial de fabricación de los diferentes productos papeleros en el laboratorio de forma estandarizada, ensayando las propiedades en hojas de laboratorio, ya que es muy difícil predecir las propiedades finales de un producto utilizando solamente la evaluación de las propiedades de las fibras individuales. Los resultados deben proporcionar una base suficiente para estimar la calidad de la pulpa, la cual dependerá del propósito final (Levlin & Söderhjelm, 2000).

Los principales ensayos que se llevan a cabo para determinar las propiedades de la pulpa son el grado de drenabilidad; el tiempo de drenado; y la capacidad de retención de agua (Levlin & Söderhjelm, 2000):

II.4.5. PROPIEDADES FÍSICAS GENERALES DE PAPELES Y CARTONES

La hoja de papel es una red de fibras celulósicas heterogéneas aglomeradas al azar (Niskanen, 2000). Esto conlleva a que las propiedades, de una hoja de papel, deriven de las propiedades de las fibras, de la estructura de la red fibrosa, de la orientación de las fibras, del área relativa de unión entre fibras, y de las propiedades geométricas y de resistencia de las fibras. Por ello, la calidad, de todo producto papeler, puede ser descrita a partir de diferentes propiedades físicas, muchas de las cuales están íntimamente relacionadas con el uso final del producto.

Entre las propiedades estructurales más importantes, de papeles y cartones, se encuentran, gramaje, espesor, densidad, volumen específico y permeabilidad al aire (Biermann, 1996; Levlin & Söderhjelm, 2000; Zanuttini, 2008).

Entre las propiedades mecánicas más importantes, de papeles y cartones, se encuentran, resistencia a la tracción, resistencia al reventamiento, resistencia al rasgado, resistencia a la compresión y rigidez (Biermann, 1996; Levlin & Söderhjelm, 2000; Sixta, 2006; Zanuttini, 2008).

II.4.6. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE FIBRAS CELULÓSICAS RECICLADAS

En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre el potencial de las fibras celulósicas recicladas para la fabricación de papeles (Levlin & Söderhjelm, 2000; Spangenberg, 1993).

II.4.6.1. Efectos generales del reciclado sobre las fibras

Las fibras secundarias, son fibras que vuelven a entrar en el proceso de fabricación de papel a partir del procesamiento de papeles y cartones reciclados; y en dicho proceso se someten a una serie de operaciones unitarias, las cuales afectan la calidad de la fibra debido a alteraciones en las propiedades físicas y químicas de las mismas, disminución del grado de polimerización de componentes polisacáridos, cambios en la estructura morfológica de las fibras y cambios en el nivel de unión interfibra (Ali,

2013; Buligon, 2012; Ellis & Sedlachek, 1993; Götsching & Pakarinen, 2000; Hubbe, Venditti, & Rojas, 2007; Laivins & Scallan, 1996; Nazhad, 2005):

- Las operaciones de pulpado, refinado y secado, rigidizan a las fibras, y en consecuencia afectan las dimensiones de las mismas: reducción en la longitud de las fibras individuales por acortamiento y, reducción en el área de la sección transversal por desprendimiento de fracciones de la superficie de la fibra.
- Los procesos de blanqueo, los aditivos químicos y los contaminantes, modifican la química superficial de las fibras.
- Los procesos de fraccionamiento y limpieza de las pulpas, eliminan las partículas de mayor densidad y los finos.
- Los procesos mecánicos como pulpado, refinado y secado, o los procesos químicos como el blanqueo, alteran la estructura mecánica de las fibras individuales, siendo el secado responsable de los principales cambios en la morfología de las fibras.
- Hay acumulación de cargas las cuales aumentan el gramaje sin contribuir a las resistencias, acumulación de materiales extraños (aceites, almidón seco, resina, tintas) que recubren a las fibras interfiriendo con las uniones, debilitamiento de la flexibilidad de las fibras.

Una ilustración esquemática de los principales cambios que sufren las fibras de pulpas kraft durante el proceso de reciclado, se ilustra en la Figura II.22.

El grado de alteración depende del número del ciclo de reciclado y de la forma de uso de las fibras; los mayores efectos se observan después del primer ciclo, no siendo recomendable más de cuatro o seis ciclos (Atalla, 2011; Cabalova et al., 2011).

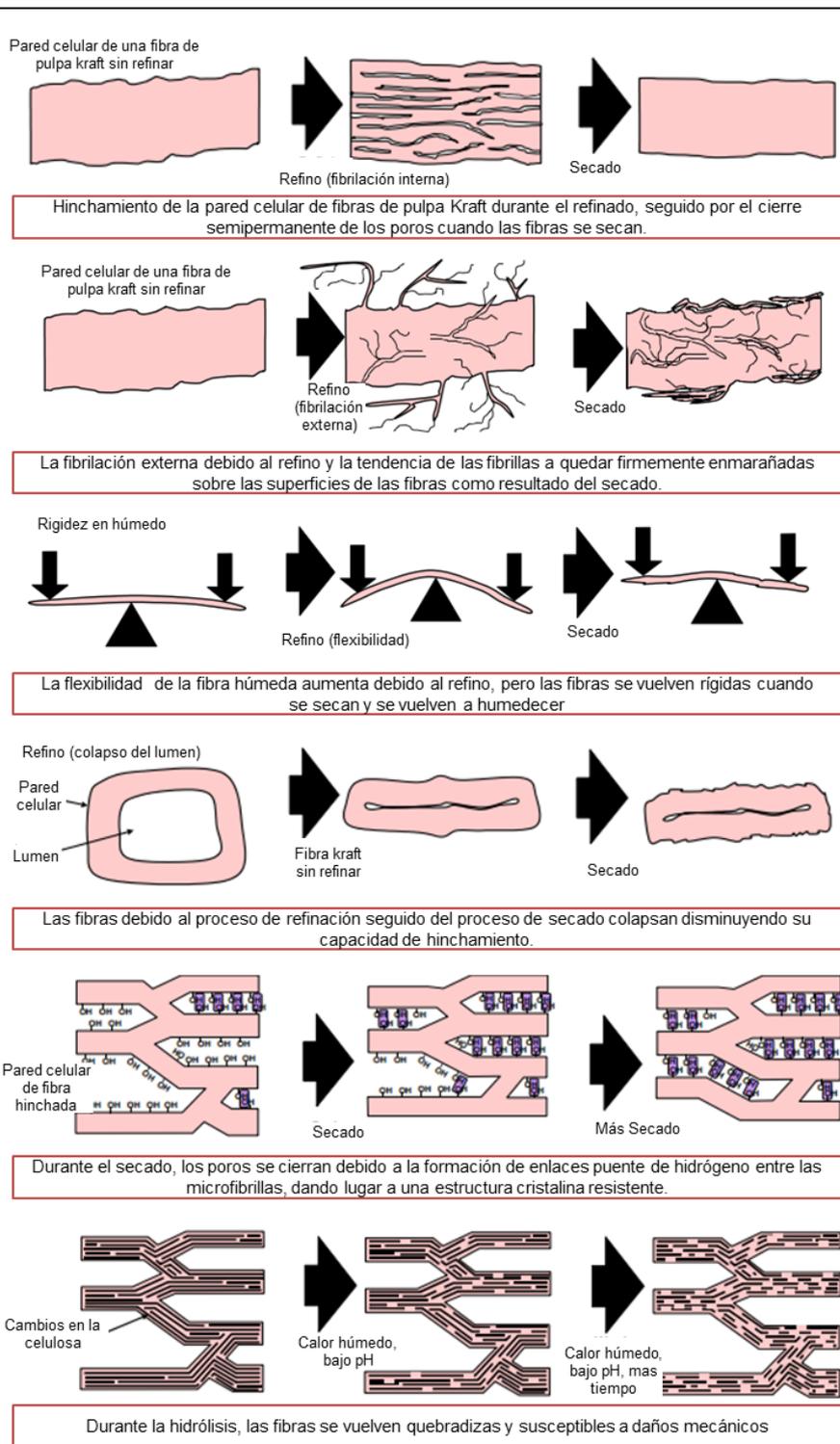


Figura II.22. Cambios en las fibras de pulpas kraft durante el proceso de reciclado.

Fuente: Adaptado de (Hubbe et al., 2007)

Influencia del secado: Hornificación

El secado, que tiene un carácter anisótropo, tiene una gran influencia en las propiedades del papel producido a partir de fibras recicladas y es responsable de los principales cambios en las características y propiedades entre fibras recicladas y

fibras vírgenes (Cabalova et al., 2011; Spangenberg, 1993). El deterioro de las propiedades físicas de las fibras secundarias durante el proceso de secado, debido a la disminución de la capacidad de hinchamiento de las fibras y a la disminución de las propiedades hidrófilas de la superficie de las fibras, a causa de la redistribución o migración de resina y ácidos grasos a la superficie (Cabalova et al., 2011; Nazhad, 2005), da como resultado papeles con propiedades mecánicas reducidas, en especial las propiedades de resistencia (Cabalova et al., 2011; Spangenberg, 1993).

Las fibras celulósicas de naturaleza hidrofílica, tienen a lo largo de la macromolécula numerosos grupos hidroxilos de gran afinidad con el agua, por lo que durante el proceso de formación de la hoja las fibras absorben agua y se unen debido a la atracción polar de las moléculas de agua con los grupos hidroxilos que cubren la superficie de la celulosa, y al evaporarse el agua por efecto del calor, los grupos hidroxilos de la superficie de celulosa se unen por medio de puentes de hidrógeno. En la medida que la hoja de papel se va consolidando, ocurren una serie de factores que afectan la estructura de la hoja de papel, las fibras colapsan y se unen, los poros se reducen y, las fuerzas capilares se incrementan y, en las capas externas de la pared celular se produce un endurecimiento, el cual afecta el uso de las fibras recicladas; el efecto del calor, aumenta la cristalinidad y disminuye el área superficial de las fibras, ocasionando una pérdida en la capacidad de absorción de agua e hinchamiento de la fibra afectando negativamente la flexibilidad y la capacidad de enlace fibra-fibra para la estructuración de la nueva hoja de papel.

La pérdida de la capacidad de la fibra de absorber agua e hincharse, con la consecuente pérdida irreversible de la flexibilidad y de la capacidad de unión de las mismas, debido a la remoción del agua de la pared celular durante los procesos de prensado y secado, se atribuyen al fenómeno de hornificación (Ali, 2013; Fernandes Diniz et al., 2004; Hubbe et al., 2007; Laivins & Scallan, 1996).

Para la cuantificación del fenómeno de hornificación se ha introducido la medida del valor de retención de agua (WRV) por centrifugación a partir de la cual, la hornificación irreversible de la fibra, se considera como una disminución en el valor WRV (Cabalova et al., 2011; Fernandes Diniz et al., 2004; Göttching & Pakarinen, 2000), según la Ecuación II.1.

$$\text{Hornificación (\%)} = \frac{\text{WRV}_{\text{pulpa virgen}} - \text{WRV}_{\text{pulpa reciclada}}}{\text{WRV}_{\text{pulpa virgen}}} * 100 \quad \text{Ecuación II.1.}$$

Se han encontrado estudios de la influencia del fenómeno de hornificación sobre las propiedades de reventamiento y tensión, ambas propiedades relacionados con el hinchamiento de las fibras (Fernandes Diniz et al., 2004). Los estudios demuestran variación en los valores de dichas propiedades al someter la pulpa a sucesivos reciclos (Howard, 1990).

En el caso de pulpas químicas los efectos del secado sobre las fibras son más severos en comparación con las fibras de pulpas mecánicas, ya que en estas últimas el espacio entre microfibrilas se encuentra ocupado por lignina, la cual inhibe la formación de los enlaces interfibrilares durante el secado siendo el impacto del proceso menos influyente; la presencia de lignina las vuelve más rígidas y no colapsan durante el proceso de formación, alcanzando una menor superficie de contacto interfibrilar (Ken N. Law, Valade, & Li, 1996; Kwei N. Law, Valade, & Quan, 1996). Ejemplo de los cambios que sufren las fibras de pulpas químicas durante las etapas de secado, se ilustran esquemáticamente en la Figura II.23.

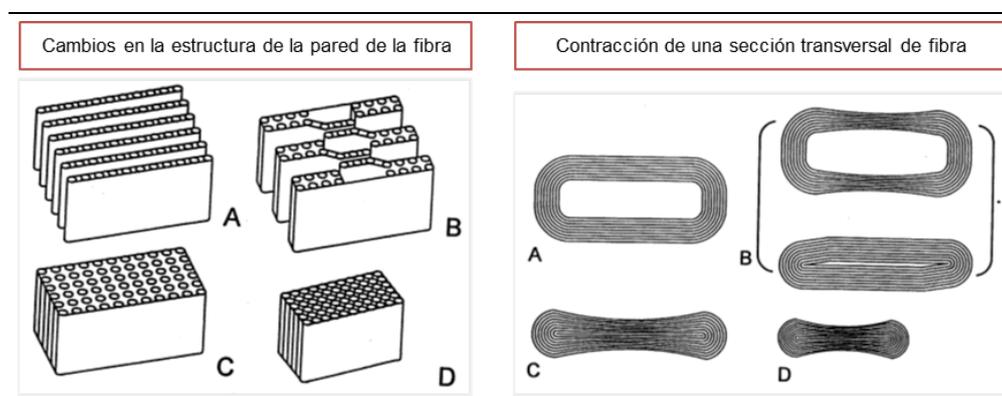


Figura II.23. Cambios en fibras de pulpas kraft durante las etapas de secado.

Fuente: (Göttsching & Pakarinen, 2000)

En la Figura II.23 se observa, en la etapa “A” la estructura de la fibra húmeda antes del secado. En la etapa “B”, el drenaje ha comenzado a producir cambios morfológicos en la matriz de la pared fibrilar; las laminillas de la pared fibrilar se van acercando entre si debido a las fuerzas capilares; el lumen puede colapsar. Con el secado adicional, los espacios entre laminillas continúan disminuyendo hasta alcanzar la etapa “C”, donde la mayoría de los espacios libres de la estructura laminar de la pared celular ya se han cerrado. Hacia el final del secado, en la etapa “D”, la eliminación del agua se produce en la estructura fina de la pared de la fibra;

la fibra se encoge fuerte y uniformemente, siendo la contracción irreversible (Cabalova et al., 2011).

Influencia del refino: Fibrilación

La refinación provoca un delaminado interno y un incremento del tamaño de los poros grandes de la pared celular, y vuelve a abrir algunos poros pequeños, pues los poros que se cierran, por el secado, no se vuelven a abrir por los niveles normales de refinación, debido a que se forman fuertes uniones de puentes de hidrógeno irreversible entre las microfibrillas durante el secado que no se rompen cuando la fibra se refina.

El proceso de refino en pulpas químicas es un paso esencial para mejorar la capacidad de unión de las fibras. El proceso genera una variedad de cambios simultáneos en la estructura de la fibra (Cabalova et al., 2011), algunos de los cuales se ilustran en la Figura II.24.

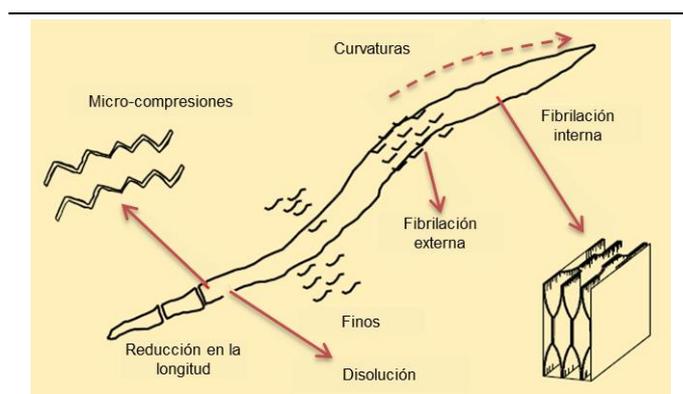


Figura II.24. Efectos que sufren las fibras debido al refino.

Fuente: Adaptado de (CANFOR, 2010a)

La fibrilación externa (Figura II.25), involucra separación parcial de la lámina media y del material macrofibrilar desde las capas externas de la pared celular. La fibrilación externa y desfibrilación de la superficie, principalmente se produce en la pared primaria y capas exteriores de paredes secundarias. Las capas exteriores son divididas en fibrillas, microfibrillas, nanofibrillas de la macromolécula de la celulosa y las hemicelulosas (Cabalova et al., 2011; Clark, 1985).

La fibrilación interna (Figura II.25), consiste en la división tangencial interna y de la estructura coaxial de la pared celular con subsecuente absorción de agua. La delaminación es causada por el aumento de la penetración del agua a la pared celular y por la plastificación de la fibra (Cabalova et al., 2011; Clark, 1985).

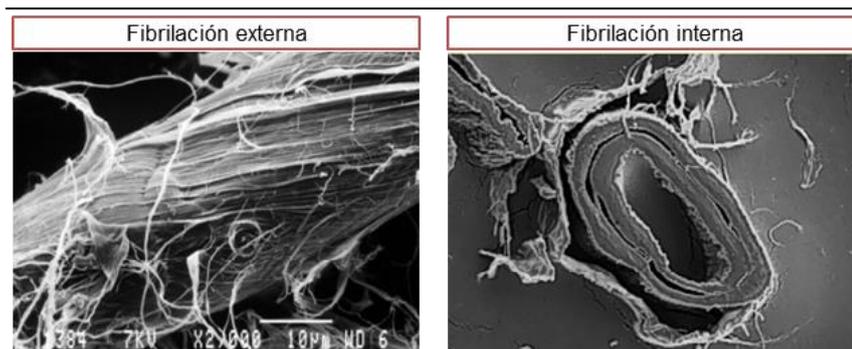


Figura II.25. Efectos del refinado sobre las fibras.

Fuente: (CANFOR, 2010a)

Cuando una misma fibra se vuelve a reciclar, puede volver a obtener fibrilación externa pero no interna, dado que, al colapsarse los lúmenes de la fibra durante el secado por evaporación estos espacios en su mayoría no se vuelven a abrir, esto limita a la fibra y se puede llegar a comprometer su longitud durante la refinación (Cabalova et al., 2011; Clark, 1985).

Estudios han demostrado que, al igual que en el caso de fibras vírgenes, las condiciones de refinado para las fibras recicladas se deben seleccionar correctamente para evitar un refinado excesivo y daños mayores en la estructura de la fibra. Un refinado moderado a baja consistencia resulta apropiado como tratamiento; permite mejorar la capacidad de unión natural de las fibras, reduciendo la necesidad de agentes de unión química (Lumiainen, 1992).

II.4.6.2 Efectos de los sucesivos ciclos de reciclado sobre las propiedades de fibras de pulpas mecánicas y químicas.

En la literatura se encuentran diferentes estudios de investigación sobre el efecto del reciclado sobre las propiedades de fibras celulósicas recicladas:

- Espesor de pared, área del lumen y área de la sección transversal:

Se encontraron estudios (Göttsching & Pakarinen, 2000) de, evaluación de los efectos de los sucesivos ciclos de reciclado sobre los valores de, espesor de pared, área del lumen y área de la sección transversal, de fibras de pulpas mecánicas y químicas, cuyos resultados (Tabla II.8) demostraron una disminución de las dimensiones entre el primer y el quinto ciclo. En el caso de fibras de pulpas químicas no se observó reducción del área del lumen, porque después del primer ciclo, la fibra colapsa y se aplasta.

Tabla II.8. Cambios en las dimensiones de las fibras por efecto del reciclado.

Parámetros	TMP (%)	CTMP (%)	Kraft (%)
Área de la sección transversal	8,30	7,90	7,70
Espesor de pared	7,90	5,00	3,00
Área de lumen	14,00	31,00	0
Relación de aspecto	9,60	9,60	3,90

Fuente: Adaptado de (Göttsching & Pakarinen, 2000)

- Longitud de fibra:

Se encontraron estudios (Cabalova et al., 2011; Howard & Bichard, 1992; Kwei N. Law et al., 1996) de, evaluación de los efectos de los sucesivos ciclos de reciclado sobre los valores de longitud de fibras de pulpas mecánicas y químicas, cuyos resultados (Tabla II.9) demostraron baja variabilidad en la longitud de la fibra. Atribuyeron dichos resultados a que las hojas de ensayo no fueron secadas en un cilindro caliente, ni calandradas, porque, en general, las fibras sufren cierto acortamiento, principalmente luego del primer ciclo (Cabalova et al., 2011).

Tabla II.9. Efecto del reciclado sobre la longitud de las fibras.

Nº ciclo	Longitud aritmética promedio (mm)				
	SGW	TMP	CTMP	BKP (refinada)	BKP (sin refinar)
0	0,30	0,54	0,57	0,71	0,77
1	0,28	0,53	0,57	0,66	0,82
5	0,30	0,54	0,55	0,65	0,82

Fuente: Adaptado de (Howard & Bichard, 1992)

- Drenaje:

Se encontraron estudios (Howard & Bichard, 1992; Ken N. Law et al., 1996; Kwei N. Law et al., 1996; Wistara & Young, 1999) de evaluación de los efectos de los sucesivos ciclos de reciclado sobre los valores de drenado de las fibras de pulpas mecánicas y químicas, bajo un sistema con recirculación de finos, cuyos resultados (Tabla II.10) demostraron una disminución en el grado de drenado para ambos tipos de fibras, como consecuencia de la acumulación de finos por usar un sistema cerrado.

Tabla II.10. Efecto del reciclado sobre el drenaje.

Nº ciclo	Grado de drenado CSF(ml)				
	SGW	TMP	CTMP	BKP (refinada)	BKP (sin refinar)
0	236	83	80	246	607
1	205	70	50	155	577
5	183	52	59	156	560

Fuente: Adaptado de (Howard & Bichard, 1992)

- Valor de retención de agua (WRV):

Se encontraron estudios (Göttsching & Pakarinen, 2000; Ken N. Law et al., 1996; Kwei N. Law et al., 1996; Wistara & Young, 1999) de, evaluación de los efectos de

los sucesivos reciclados sobre los valores de WRV para fibras de pulpas mecánicas y químicas; cuyos resultados (Figura II.26) demostraron que, los valores de WRV en las pulpas químicas, a diferencia de las pulpas mecánicas, disminuyen considerablemente, en especial en el primer ciclo. Se atribuyó a la variación en la capacidad de enlace y en la densidad de las pulpas.

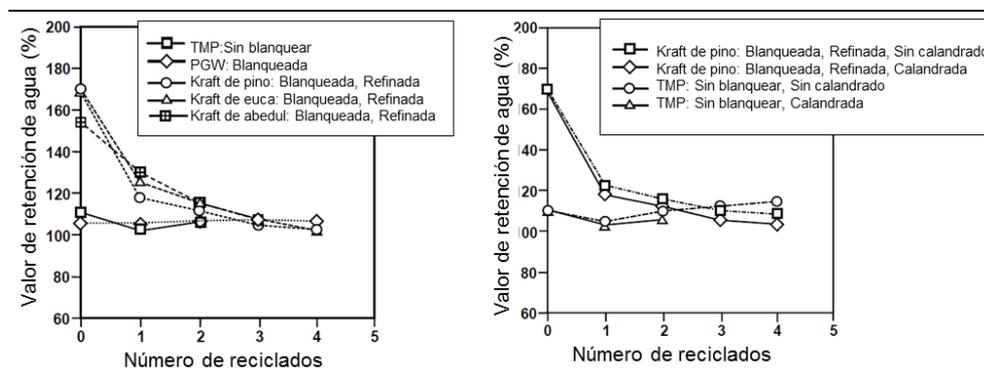


Figura II.26. Efecto del reciclado sobre WRV.

Fuente: Adaptado de (Göttsching & Pakarinen, 2000)

- Propiedades físicas:

Se encontraron varios estudios (Göttsching & Pakarinen, 2000; Howard & Bichard, 1992; Ken N. Law et al., 1996; Kwei N. Law et al., 1996; Sutjipto, Li, Pongpattanasuegsa, & Nazhad, 2008; Wistara & Young, 1999) de, evaluación de los efectos de los sucesivos reciclados sobre las propiedades físicas, ensayando hojas de papel elaboradas con diferentes tipos de pulpas mecánicas y químicas; cuyos resultados (Figura II.27) demostraron que, en el caso de SGW, el reciclado mejora la capacidad de unión de las fibras debido a una mayor flexibilidad de las mismas como consecuencia de una fibrilación interna mejorada; las fibras son cada vez más planas y más flexibles, dando lugar a una hoja más delgada y más densa; CTMP presenta un comportamiento similar, pero más pronunciado, ya que el pre-tratamiento químico disminuye la rigidez de la pared celular, aumentando el número de fibras colapsadas; en BKP refinadas, la resistencia al rasgado presenta un crecimiento notable, mientras que la resistencia al reventamiento, resistencia a la tracción, y densidad disminuyen debido a la reducción en la capacidad de unión entre las fibras como consecuencia del fenómeno de hornificación; y en BKP sin refinar, la densidad se mantiene constante, la resistencia al reventamiento y a la tracción aumentan, mientras que la resistencia al rasgado decrece como consecuencia del ondulado de las fibras durante el secado.

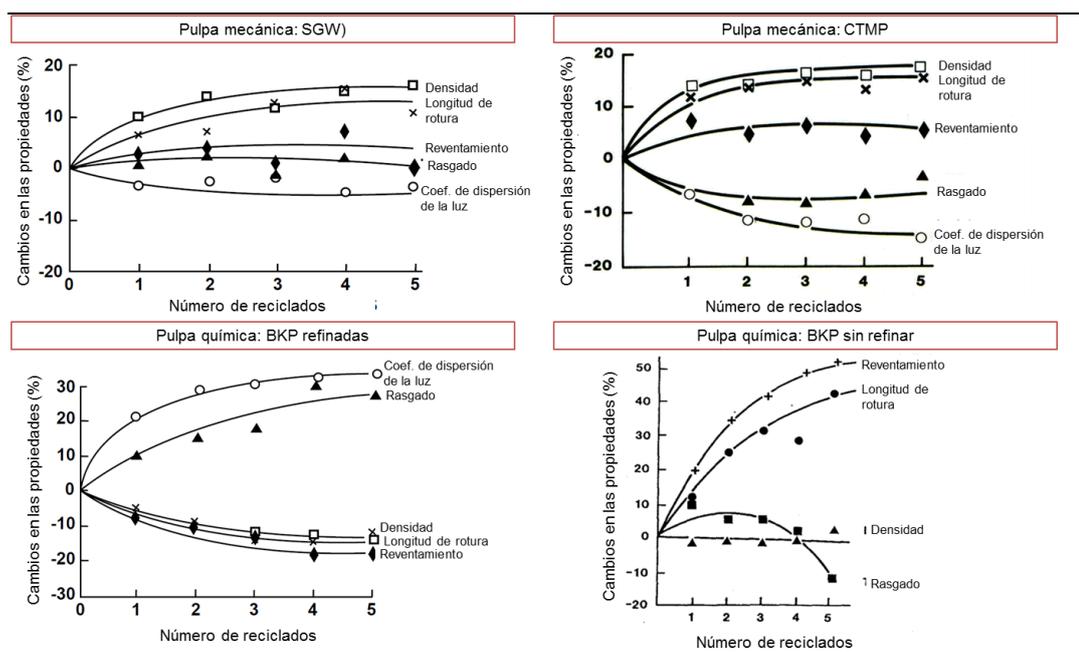


Figura II.27. Efectos del reciclado sobre propiedades físicas.

Fuente: Adaptado de (Howard & Bichard, 1992)

II.4.7. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE PULPAS

II.4.7.1. Comportamiento reológico de fluidos

Una suspensión acuosa consiste en un sistema heterogéneo compuesto por partículas sólidas dispersas aleatoriamente en un medio líquido. Las fases que componen la suspensión poseen características propias, que difieren de las características de la mezcla, la cual tiene calidad de fluido (Ávila, 2012). El comportamiento de los fluidos, sometidos a diferentes tipos de esfuerzos, se describe por medio de la reología, ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia cuando se encuentra sometida a tensiones y esfuerzos (S. E. Aguilar, 2001; Barnes, 2000; Mezger, 2011; O. Rojas, Briceño, & Avendaño, 2012). Uno de los parámetros más característicos de la reología es la viscosidad, que mide la resistencia interna que un líquido ofrece al movimiento relativo de sus distintas partes. A partir de la relación existente entre la fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, se definen las propiedades reológicas de la materia (O. Rojas et al., 2012).

A partir del modelo de dos placas (Barnes, 2000; Mezger, 2011), el cual relaciona el esfuerzo cortante aplicado sobre el fluido y la velocidad de deformación del fluido (Figura II.28), se definen los parámetros reológicos fundamentales: Esfuerzo de corte

(Ecuación II.2), Velocidad de deformación (Ecuación II.3) y Viscosidad de cizallamiento (Ecuación II.4).

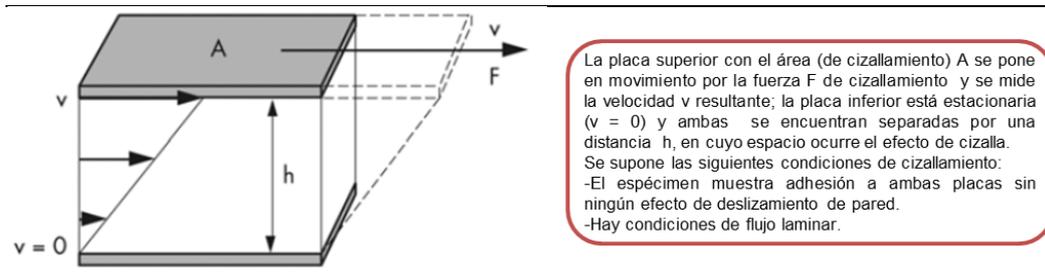


Figura II.28. Diagrama de definición del flujo de cizalla o corte.

Fuente: Adaptado de (Mezger, 2011)

$$\text{Esfuerzo de corte: } \tau \text{ (Pa)} = \frac{\text{Fuerza de corte (N)}}{\text{Área de corte (m}^2\text{)}} \quad \text{Ecuación II.2.}$$

$$\text{Velocidad de deformación: } \dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Velocidad (m/s)}}{\text{Distancia entre placas (m)}} \quad \text{Ecuación II.3.}$$

$$\text{Viscosidad de cizallamiento: } \eta \text{ (Pa} \cdot \text{s)} = \frac{\text{Esfuerzo de corte (Pa)}}{\text{Velocidad de deformación (s}^{-1}\text{)}} \quad \text{Ecuación II.4.}$$

El estudio de la reología se extiende desde el comportamiento de los sólidos elásticos de Hooke hasta los fluidos viscosos de Newton (O. Rojas et al., 2012).

La Tabla II.11, proporcionan las ecuaciones de estado de los diferentes comportamientos reológicos; y la Figura II.29, los reogramas correspondientes.

Tabla II.11. Ecuaciones de estado de los comportamientos reológicos de fluidos.

Comportamiento reológico	Ecuación de estado
Sólido elástico de Hooke (lineal)	$\tau = G * \gamma$
Sólido elástico no lineal	$\tau = G(\gamma) * \gamma$
Fluidos viscoelásticos	$\tau = \tau(\gamma, \dot{\gamma}, t, \dots)$
Fluido viscoso no lineal, no Newtoniano	$\tau = \eta(\dot{\gamma}) * \dot{\gamma}$
Fluido viscoso lineal, Newtoniano	$\tau = \eta * \dot{\gamma}$

Nota: τ =Esfuerzo de cizalla (Pa); γ = Deformación; $\dot{\gamma}$ =Velocidad de deformación (s⁻¹); η =Viscosidad (Pa*s); G= Módulo de elasticidad (N/m²). Fuente: Adaptado de (O. Rojas et al., 2012)

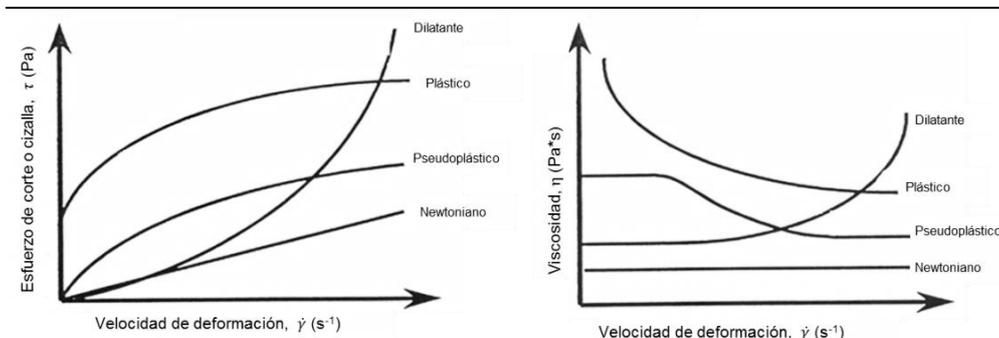


Figura II.29. Reograma de los comportamientos reológicos de fluidos.

Fuente: Adaptado de (O. Rojas et al., 2012).

II.4.7.2. Parámetros reológicos

Esfuerzo de fluencia o límite elástico:

El esfuerzo de fluencia (yield stress), resistencia mecánica de la suspensión fibrosa, se considera como una de las propiedades reológicas más importantes de las suspensiones de pulpa en el diseño de equipos destinados a la fabricación de papel (Babak Derakhshandeh, Hatzikiriakos, & Bennington, 2010), ya que, antes de que se pueda dar inicio al movimiento dentro de una suspensión de fibras para mezclar, transportar o dispersar agregados de fibras, se deben aplicar fuerzas externas suficientes para superar las fuerzas del entramado fibroso (Bennington, Kerekes, & Grace, 1990). Se define como la fluencia a la que un medio adopta continuas deformaciones a un valor de tensión constante. Permite determinar el comportamiento de flujo y la formación de flóculos (Bousfield, 2008).

Presenta una fuerte dependencia sobre la consistencia (Bennington et al., 1990; Babak Derakhshandeh et al., 2010; Kerekes, 2006; Sha, Nikbakht, Wang, Zhang, & Olson, 2015), cuya correlación se representa por la Ecuación II.5.

$$\text{Esfuerzo de fluencia: } \tau = a * (\text{Consistencia de la suspensión})^b \quad \text{Ecuación II.5.}$$

Dónde: “a” y “b” son constantes que dependen del proceso de ensayo empleado, y del tipo y grado de tratamiento de la pulpa. El valor típico de “a” se encuentra entre 1,18 y 24,5 y, el valor típico de “b” entre 1,25 y 3,02.

Su medición presenta ciertas dificultades por varias razones (Bennington et al., 1990; Kerekes, 2006): la ruptura de la red tiene lugar en zonas débiles alrededor de los flóculos; las suspensiones de fibras no floculadas tienen una resistencia de red significativamente mayor que las suspensiones floculadas; las fibras y los flóculos presionan contra la pared sólida y el esfuerzo de fluencia puede ser medido dentro del cuerpo de una suspensión en lugar de su interfaz con una pared sólida, y ello puede reflejar la fricción de un tapón de red que se desliza sobre la superficie en lugar de la propiedad de la suspensión verdadera.

Viscosidad de cizalla:

Las suspensiones de pulpas, al vencer el esfuerzo de fluencia, fluyen a una velocidad de deformación determinada como consecuencia de la fluencia aplicada y de la viscosidad de la suspensión. A menudo, tanto las fibras como los flocos formados

pueden tener un tamaño mayor en comparación con el tamaño del tubo o canal por donde circulen, por lo cual no se puede considerar a la suspensión en continuo. Las fibras en flujo de cizallamiento pueden migrar lejos de las paredes, dejando una zona deficiente en fibra cerca de la pared sobre la cual tiene lugar la mayor parte de la cizalladura (Kerekes, 2006). Se ha encontrado en mediciones de viscosidad de suspensiones de pulpas, que esta se encuentra fuertemente influenciada por la forma del equilibrio de las fibras, la fricción entre fibras y la rigidez de la fibra; por ejemplo, para una fibra dada, la viscosidad aumenta con una cizalladura decreciente, mientras que a medida que aumenta la velocidad de corte, las viscosidades de las suspensiones floculadas disminuyen a valores no floculados (Kerekes, 2006).

Velocidad de deformación:

Influye sobre la reología de la suspensión de fibras. Estudios han demostrado que se obtienen grandes velocidades de deformación superficial cuando las fibras se restringen físicamente con relación al flujo (Kerekes, 2006).

Viscoelasticidad:

Las suspensiones de pulpa pueden presentar un comportamiento viscoelástico (Damani, Powell, & Hagen, 1993; Kerekes, 2006; Jorge H. Sánchez, Fajardo, & Quintana, 2016). Se han llevado a cabo mediciones del comportamiento viscoelástico de suspensión de pulpa kraft blanqueada a alta consistencia con cizallamiento oscilatorio, demostrando los resultados que a valores inferiores al nivel crítico de deformación, la suspensión muestra viscoelasticidad lineal casi independiente de la consistencia, lo cual sugiere que la descomposición del entramado fibroso ocurre alrededor de los flóculos; mientras que, a valores superiores a la deformación crítica, el entramado fibroso muestra comportamiento viscoelástico no lineal, lo cual sugiere que los flóculos fueron interrumpidos. También, se han considerado suspensiones a consistencia media, demostrando los resultados que la viscosidad es dependiente de la deformación; lo cual puede ser consecuencia del cambio de la tensión elástica a un régimen en el que se producen roturas en la suspensión.

II.4.7.3. Reología de las suspensiones de pulpas celulósicas

Las suspensiones de pulpas celulósicas consisten en fibras lignocelulósicas, tratadas física y químicamente, dispersas en agua (Biermann, 1996). Cada componente de dicha suspensión aporta características propias al comportamiento del flujo de la

misma, en el cual aparecen esencialmente dos entidades: un reticulado fibroso, fuertemente estructurado, y los flóculos, aglomerado de fibras entrelazadas (Kerekes, 2006). El potencial de las suspensiones de pulpas para formar entramados fibrosos y los fenómenos de floculación, dan como resultado un comportamiento de fluido de tipo no-Newtoniano que exhibe propiedades viscoelásticas (Bousfield, 2008; B. Derakhshandeh, Kerekes, Hatzikiriakos, & Bennington, 2011; Kerekes, 2006), es decir, son materiales que cuando son sometidos a un cizallamiento, a bajas deformaciones se comportan como un sólido elástico, mientras que a altas deformaciones se comportan como un líquido viscoso (O. Rojas et al., 2012). Esto tiene implicaciones prácticas en casi todas las operaciones unitarias involucradas en los procesos de fabricación de papel; siendo la reología de las suspensiones clave para la implementación óptima de los procesos, recibiendo atención significativa en la literatura (Bousfield, 2008; B. Derakhshandeh et al., 2011; Kerekes, 2006). Entre los parámetros más influyentes en la reología de las suspensiones de pulpas se encuentran: las características y propiedades de las fibras (relación entre longitud y diámetro de fibra, y la flexibilidad y conformabilidad), la consistencia de la suspensión (interacción fibra-fibra y fibra-agua), la formación de flóculos y, la presencia de cargas, auxiliares de retención, antiespumantes y agentes antimicrobianos (Bousfield, 2008).

Regímenes de las suspensiones de pulpas

En base a las colisiones inducidas, debido a la asimetría de las fibras y la consistencia de las suspensiones, se han definido los siguientes regímenes de comportamiento de las fibras (Kerekes, 2006):

- Régimen diluido: Aquel en el que se encuentra menos de una fibra dentro de un volumen barrido por la longitud de una sola fibra; correspondiendo al límite superior la “concentración crítica”.
- Régimen a mayores concentraciones: Aquel en el que se encuentran 3 o más contactos por fibra. Las fibras están restringidas en rotación; aquellas fibras flexibles se bloquean en redes en una configuración curva al cesar el cizallamiento. La aparición de esta afección se denomina “concentración de sedimentación”.

El comportamiento sobre el intervalo de suspensiones de las distintas etapas de la fabricación de papel, se generalizó por el número de aglomeración (N), definido como el número de fibras en un volumen barrido por la longitud de una fibra (Kerekes, 2006), y calculado, para fibras re-humedecidas, según la Ecuación II.6.

$$N = \frac{5 * \text{Consistencia de la suspensión} * \text{Longitud de fibra}^2}{\text{Grosor de fibra}} \quad \text{Ecuación II.6.}$$

En función al número de aglomeración, N, se definieron tres regímenes de comportamiento, los cuales se detallan en la Tabla II.12.

Tabla II.12. Regímenes de suspensiones de fibras.

Regímenes	Tipo de contacto entre fibras	N
Diluido	Colisiones oportunas	$N < 1$
Semi-Concentrado	Colisiones forzadas	$1 < N < 60$
Concentrado	Contactos continuos	$N > 60$

Fuente: Adaptado de (Kerekes, 2006)

Fuerzas en los puntos de contacto de las fibras

La reología de las suspensiones de pulpas se rige por las fuerzas existentes en los puntos de contactos de la fibra, las cuales se han definido mediante fuerzas electroquímicas, de tensión superficial y mecánicas (Kerekes, 2006):

- **Fuerzas electroquímicas:** Si bien se creía que las fuerzas coloidales dominaban las suspensiones de pulpas, se ha encontrado que dado el gran tamaño de las fibras, las fuerzas coloidales son secundarias.
- **Fuerzas de tensión superficial:** En el entramado fibroso, las burbujas de aire atrapadas en los intersticios, hacen que las fibras se adhieran a partir de la tensión superficial; en la red húmeda estas fuerzas se incrementan y, pueden causar floculación.
- **Fuerzas mecánicas:** La cohesión de las fibras también puede ser causada por las fuerzas mecánicas de “fricción” y de “enganche”. Las fuerzas de enganche resisten una fuerza aplicada por una fuerza de reacción normal a la superficie de la fibra; surgen del curl, kinks o de superficies altamente fibriladas y son de importancia en el régimen diluido, ya que permiten que las fibras se adhieran en lugar de deslizarse unas sobre otras durante un flujo de cizallamiento. Las fuerzas de fricción se oponen a una fuerza aplicada por una fuerza normal que proviene de la flexión de la fibra cuando éstas se encuentran bloqueadas en un entramado fibroso por 3 o más contactos. Son de importancia en el régimen

concentrado. Las fuerzas de flexión son la fuente de cohesión en los entramados fibrosos formados sobre el cese de la agitación. Requieren un coeficiente de fricción para inhibir el deslizamiento de las fibras unas sobre otras, los cuales dependen de varios factores, siendo uno de ellos la rugosidad superficial.

Formación de flóculos

Las suspensiones de fibras no son redes homogéneas; sino que las fibras se forman en flóculos que pueden existir de forma aislada o concentrados dentro de la red fibrosa, influyendo significativamente en la reología de la suspensión.

En el proceso de formación de flóculos en suspensiones diluidas los principales componentes son (Kerekes, 2006): La unión de fibras como consecuencia del movimiento relativo de rotación y traslación; el entrelazamiento mecánico que da lugar a fuerzas de cohesión; la dispersión de los flóculos débiles debido a fuerzas hidrodinámicas; la formación y dispersión de flóculos transitorios durante un equilibrio dinámico; y a niveles crecientes de cizallamiento, reducción del tamaño de flóculos transitorios y, a niveles decreciente, formación de flóculos de mayor tamaño dejando pocas fibras libres en la suspensión.

II.4.8. FITOTOXICIDAD DE MATERIALES LIGNOCELULOSICOS

II.4.8.1. Nutrientes y contaminantes

Nutrición vegetal: Macro y micronutrientes

La “nutrición vegetal”, es el conjunto de procesos a través de los cuales el vegetal absorbe del medio circundante nutrientes en forma orgánica, elementos minerales específicos que requiere para el desarrollo de su ciclo vegetativo (Fagro, 2012; Virgili, 1996), elementos nutritivos que tienen un papel clave en el metabolismo: sirven como componentes de compuestos orgánicos, almacenamiento de energía, cofactores enzimáticos, entre otros.

Considerando las cantidades requeridas por la especie vegetal se clasifican generalmente en (Fagro, 2012; Lallana & Lallana, 2014; Virgili, 1996):

- **Macronutrientes:** Elementos absorbidos por la planta en mayores cantidades. En este grupo se encuentran: nitrógeno, fósforo; potasio; azufre, calcio y magnesio.

- **Micronutrientes:** Elementos absorbidos por la planta en cantidades mínimas. En este grupo se encuentran: hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno y boro.

Cuando los nutrientes específicos no se encuentran a niveles de concentración óptima, sino, en exceso o deficiencia, estos pueden ocasionar alteraciones en el ciclo vegetativo, tal como se detalla en la Tabla II.13.

Cuando los elementos esenciales para las plantas se encuentran a concentraciones superiores a las óptimas, especialmente en el caso de los micronutrientes, estos pueden tener efectos fitotóxicos (Guerra, 2013).

Tabla II.13. Principales alteraciones en el ciclo vegetativo a causa de nutrientes.

Elemento	Principales funciones	Principales alteraciones en la planta
Nitrógeno	Parte de la estructura molecular de proteínas y de otros compuestos esenciales para el metabolismo. Interviene en el crecimiento.	Pobre crecimiento de tallos y hoja; restricción en ramificación de raíces. Plantas débiles raquíticas, de hojas pequeñas, amarillas. Clorosis.
Potasio	Está presente en órganos que están en plena actividad fisiológica. Cumple funciones de regulación y catálisis.	Reducción en el crecimiento de cambium. Enrollamiento de las hojas. Acortamiento de entrenudos, forma achaparrada. Clorosis, seguida de necrosis.
Calcio	Es importante su papel en el mantenimiento de la integridad celular y la permeabilidad de las membranas celulares. Es requerido también para la elongación y la división celular.	Reducción del crecimiento de los tejidos meristemáticos, y deformación. Posible desintegración estructural en la membrana. Muerte de puntos apicales de crecimiento. Clorosis. Necrosis.
Magnesio	Parte de la molécula de clorofila. Activador del metabolismo glucocídico.	Rigidez, clorosis internervales que comienzan por zonas adultas. Necrosis.
Fósforo	Parte estructural en nucleótidos, ácidos nucleicos, ciertas proteínas y coenzimas. Esencial en la formación y crecimiento.	Coloración azul verdoso en la planta o coloración rojiza en tallos y nervaduras. Retraso en los procesos reproductores.
Hierro	Es activador esencial de enzimas que intervienen en la síntesis de clorofila.	Clorosis y necrosis en hojas. Disminución de biomasa radicular, del crecimiento y rendimiento del cultivo.
Manganeso	Activador enzimático de la respiración. Cooperación con el Fe en la síntesis de proteínas.	Clorosis y necrosis en zonas internervales. Inhibición del crecimiento.
Boro	Transporte de hidratos de carbono.	Necrosis en tallos y raíces.
Zinc	Necesario para la síntesis de triptófano.	Crecimiento retardado. Reducción en el crecimiento. Clorosis.
Cobre	Componente de enzimas metálicas en oxidación de sustratos.	Enanismo. Malformación.
Molibdeno	Esencial para la fijación de nitrógeno. Activador de la nitrato reductasa.	Clorosis internerval en hojas. Necrosis.

Fuente: Adaptado de (Fagro, 2012; Lallana & Lallana, 2014)

Se entiende por *fitotoxicidad* a la capacidad que tienen ciertas sustancias orgánicas o minerales para ejercer un efecto nocivo sobre las plantas ocasionando un retraso en la germinación, inhibición o efectos adverso en crecimiento de las plantas (Teresa & Remigio, 2011). El daño causado es función de las propiedades químicas de la sustancia, de la concentración en la cual se encuentra, del tiempo y frecuencia de

exposición del organismo frente al tóxico y de la relación del tóxico con el ciclo de vida de la planta (Y Acosta, Paolini, & Benítez, 2004; Báez et al., 2004). Los niveles de toxicidad frente al organismo vivo dependerán de las condiciones en las que se encuentran expuestos dichos organismos, como: características y propiedades del terreno o sustrato, procesos de fertilización, proceso de control de plagas, condiciones de riego, y de la cercanía a zonas industriales o mineras (Guerra, 2013).

Además de los micronutrientes, existen otros elementos que no son nutrientes y pueden ocasionar efectos fitotóxicos, como por ejemplo, el sodio, el aluminio y los metales pesados como el plomo y el cadmio (Guerra, 2013; I. G. Martínez, Rodríguez, Sánchez, & González-gonzález, 2008), los cuales producen disminución del crecimiento de la raíz, disminución del crecimiento del tallo, necrosis, entre otros. También pueden ocasionar efectos fitotóxicos los ácidos alifáticos de bajo peso molecular y ciertos compuestos fenólicos, producidos por materia orgánica descompuesta, los cuales afectan el desarrollo vegetativo, suprimen la germinación, la proliferación de raíces y el rendimiento de los cultivos (Y Acosta et al., 2004).

Desordenes fisiológicos a causa de la conductividad eléctrica

El contenido de sales (CE) permite medir el riesgo potencial de daño a una planta. Cuando el cultivo se lleva a cabo en contenedor, la concentración de nutrientes es mayor, comparada con el cultivo en campo, y en consecuencia, aumenta la acumulación de sales disueltas (Domínguez, 2010); y un elevado valor de salinidad (CE) y de contenido de sodio, puede afectar la germinación de las semillas y el desarrollo de la plántula (Y Acosta et al., 2004; Yudith Acosta et al., 2006; Zubillaga, Branzini, & Lavado, 2008). Dependiendo de la sensibilidad de las especies de plantas hacia las sales, los síntomas de daño pueden ocurrir cuando los valores son $>0,5$ ms/cm (Y Acosta et al., 2004; Yudith Acosta et al., 2006).

Desordenes fisiológicos a causa del pH

La disponibilidad de nutrientes, los valores de conductividad y la actividad biológica, pueden sufrir alteraciones frente a variaciones en los valores de pH (Domínguez, 2010). Cambios de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes con lo que permanecen en forma no disponible para las plantas, pueden deteriorar el sistema radical o presentar toxicidad a causa de la excesiva absorción de elementos fitotóxicos (Zubillaga et al., 2008). En general, la mayoría de los vegetales y cultivos

agronómicos, pueden crecer sin sufrir desórdenes fisiológicos en un intervalo óptimo entre 5 y 6; a valores superiores de 6 pueden suponer dificultades en disponer de Fe, P, Mn, B y Zn y, a valores inferiores a 5 puede ocurrir deficiencias de P, K, Ca, N, Cu y Mo (Domínguez, 2010).

II.4.8.2. Fitotoxicidad: Herramientas de diagnóstico

Cuando se utilizan materiales lignocelulosicos como materia prima para desarrollar productos papeleros que estarán en contacto directo o indirecto con especies vegetales, como es el caso de los contenedores biodegradables, los materiales pueden intervenir negativamente en el ciclo vegetativo de la planta. Para asegurar que dichos materiales no produzcan efectos nocivos a la planta durante las etapas de germinación y desarrollo, resulta importante evaluar la calidad del material midiendo las características químicas (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nutrientes y metales pesado) y biológicas que permitan estimar el grado de fitotoxicidad (C. Madrid, Quevedo, & Andrade, 2000; F. Madrid, López, Cabrera, & Murillo, 2001; Tiquia, 2010). Las características químicas, se pueden determinar mediante la aplicación de técnicas analíticas, como espectrofotometría de absorción atómica con técnica de llama, técnicas químicas clásicas, entre otras (I. G. Martínez et al., 2008; Paradelo, Moldes, Rodríguez, & Barral, 2008; Sadzawka et al., 2007; Sadzawka, Carrasco, Grez, & Mora, 2005; Zubillaga et al., 2008); mientras que las características biológicas se pueden evaluar mediante bioensayos. Los bioensayos resultan adecuados para determinar el efecto de agentes físicos y químicos sobre organismos de prueba bajo condiciones experimentales específicas y controladas (Báez et al., 2004). Se definen como la proporción o grado de efecto de un material sobre un grupo de organismos vivos seleccionados bajo condiciones definidas, transcurrido un tiempo estipulado de exposición (Báez et al., 2004).

Entre los bioensayos se destacan los ensayos de germinación, los cuales se clasifican en (Teresa & Remigio, 2011; P. R. Warman, 1999): ensayos de germinación por siembra en extractos acuosos (Yudith Acosta et al., 2006; Araújo, Sahyoun, & Monteiro, 2001; Celis, Sandoval, Zagal, & Briones, 2006; Emino & Warman, 2004; Gariglio, Buyatti, Pilatti, Russia, & Acosta, 2002; Hidalgo, Estrada, & Luengo, 2007; F. Madrid et al., 2001; Paradelo et al., 2008; C. Rojas, Orellana, Sotomayor, & Varnero, 2005; Tiquia, 2000; Tiquia, Tam, & Hodgkiss, 1996; Varnero, Rojas, &

Orellana, 2007; Zapata, Guerrero, & Polo, 2005), y en ensayos de germinación por siembra directa en muestra (Brida, 2008; Emino & Warman, 2004; Gómez, 2009; Rivera-Cruz, Trujillo-Narcía, Miranda de la Cruz, & Maldonado Chávez, 2005).

II.4.9. BIODEGRADACIÓN DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

La biomasa de origen lignocelulósico, es el material orgánico más abundante en la tierra, constituida fundamentalmente por polímeros de celulosa, hemicelulosas y lignina; biodegradable y renovable; con amplias aplicaciones industriales (Álvarez et al., 2012), ideal para el desarrollo de materiales amigables con el medio ambiente; siendo una excelente alternativa para el diseño de contenedores biodegradables. Sin embargo, las condiciones de diseño son de importancia vital, dado que, al ser la biomasa biodegradable, se debe asegurar la funcionalidad del contenedor durante su uso en vivero y, su completa degradación al finalizar su vida útil.

II.4.9.1. Proceso de desintegración de materiales lignocelulósicos

La desintegración, consiste en un proceso de descomposición lenta del material cuando este es desechado en el medio ambiente; y se evidencia por la pérdida paulatina de sus propiedades originales, disminución de propiedades mecánicas, pérdida de integridad y fragmentación o disminución del tamaño de la partícula; debido a la influencia de diversos factores, químicos, biológicos y ambientales, que actúan sobre la estructura del material causando el deterioro del mismo (Andrady, Parthasarathy, & Song, 1992).

Los procesos de desintegración se producen en respuesta a una combinación de mecanismos, y en función al mecanismo predominante, se pueden dividir en dos categorías (Andrady et al., 1992; ECOEMBES, 2008; Kolybaba et al., 2003):

- **Degradación:** Se define como el proceso de desintegración que ocasiona cambios químicos sobre el material. Se clasifica en:
 - Biodegradación: Inducido por organismos vivos (microorganismos).
 - Fotodegradación: Inducida por luz (radiación UV).
 - Termodegradación: Causado por la temperatura.
 - Degradación química: Causado por hidrólisis o por oxidación.
- **Deterioro:** Se define como el proceso de desintegración que ocasiona cambios físicos sobre el material. Se clasifica en:

- Bio-deterioración: Inducido por organismos vivos.
- Hidro-deterioración (disolución): Inducido por agua.

II.4.9.2. Degradación biológica o biodegradación

La biodegradación de un material orgánico consiste en un proceso de digestión, asimilación y metabolización por la acción de microorganismos (bacterias, hongos, algas), los cuales, degradan la materia, transformándola en una estructura química más simple, fragmentos más pequeños, de menor peso molecular. Los niveles de degradación dependerán de la complejidad del compuesto a ser degradado y del microorganismo utilizado para tal fin. Los microorganismos, para poder metabolizar el sustrato requieren de factores ambientales como: humedad, oxígeno, pH y temperatura adecuada. Las enzimas, proteína con una función específica sobre un sustrato, son las ejecutoras de la degradación (ECOEMBES, 2008). Las transformaciones biológicas se pueden realizar aeróbica o anaeróbicamente, según la disponibilidad de oxígeno (Kayhanian, 1995). Las reacciones aeróbicas son más completas y liberan energía, dióxido de carbono y agua; mientras que las anaeróbicas son oxidaciones incompletas y liberan menor energía (ECOEMBES, 2008).

Biodegradación de materiales lignocelulósicos en suelo

El suelo está formado por cinco componentes principales: materia mineral, agua, aire, materia orgánica y seres vivos. Dado que el suelo está conformado por un mosaico discontinuo de microambientes, los microorganismos se distribuyen heterogéneamente en función a la distribución vertical de los nutrientes, la cual es a su vez sufre alteraciones en función a la composición de la atmósfera del suelo, el pH, la humedad, la proporción de minerales, entre otros (L. Carrillo, 2003). La distribución de ciertos microorganismos en el suelo se detalla en la Tabla II.14.

Tabla II.14. Distribución de microorganismos en suelo.

Profundidad (cm)	Bacterias aerobias	Bacterias anaerobias	Actinomicetos	Hongos	Algas
3-8	7.800	1.950	2.080	119	25
20-25	1.800	379	245	50	5
35-40	472	98	49	14	0,5
65-75	10	1	5	6	0,1
135-145	1	0,4	-	3	-

Fuente: (L. Carrillo, 2003)

Los residuos sólidos urbanos, forestales y agroindustriales: papeles y cartones reciclados, aserrines de madera y, bagazo de caña de azúcar, respectivamente, están

constituidos principalmente por polímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo cual, los convierte en materiales susceptibles al ataque microbiano bajo condiciones de exposición al suelo. Entre los principales microorganismos presentes en el suelo, capaces de biodegradar la celulosa, hemicelulosa y lignina, se encuentran los *Actinomycetes*, *Basidiomycetes* y *Ascomycetes* (Delfín-Alcalá & Durán de Bazúa, 2003; Diorio, Forchiassin, Papinutti, & Sueldo, 2003; Saiz-Jimenez, 1984).

Dentro de las principales categorías de degradación por hongos se encuentran (Levin, 1998; Saiz-Jimenez, 1984):

- **Pudrición blanca:** Los hongos causantes de pudrición blanca son un grupo amplio y heterogéneo de Basidiomycetes que se caracterizan por su habilidad para degradar todos los componentes de la pared celular incluyendo la lignina.
- **Pudrición blanda:** Los hongos causantes de la pudrición blanda pertenecen a los Ascomycota y Deuteromycota. Todos los componentes de la pared celular pueden ser degradados, pero usualmente existe una preferencia por los carbohidratos.
- **Pudrición castaña:** Los hongos causantes de la pudrición castaña pertenecen a los Basidiomycota; estos remueven los polisacáridos, pero tienen una limitada capacidad para degradar la lignina.

Los diversos modos de degradación de la pared celular por hongos causantes de pudrición se ilustran en la Figura II.30.

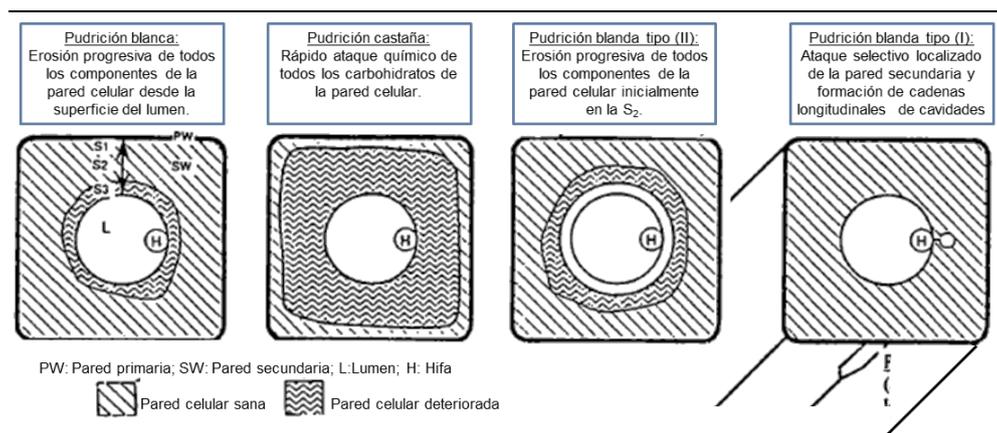


Figura II.30. Degradación de la pared celular por hongos causantes de pudrición.

Fuente: Adaptado de (Levin, 1998)

Cuando los materiales lignocelulósicos son atacados por microorganismos, se produce una serie de acciones degradativas extracelulares, tanto enzimáticas como no enzimáticas, deteriorando el material química y morfológicamente (Levin, 1998).

- En el caso de la celulosa (Gaitán & Pérez, 2007; Leschine, 1995; Levin, 1998; J. Pérez, Muñoz-Dorado, De La Rubia, & Martínez, 2002; Saiz-Jimenez, 1984; C. Sánchez, 2009): La ruptura de la cadena de los polisacáridos durante el ataque por hongos, se debe principalmente a la acción sinérgica de enzimas hidrolíticas y enzimas oxidativas. Entre las características que definen a los organismos celulíticos, se encuentra la producción de un sistema enzimático extracelular “celulasa”, (constituido por tres grupos de enzimas, endoglucanasas, exoglucanasas y B-glucosidasas), que tiene la capacidad de hidrolizar la celulosa a productos solubles.
- En el caso de las hemicelulosas (Levin, 1998; J. Pérez et al., 2002; Saiz-Jimenez, 1984; C. Sánchez, 2009): En general, son los primeros polímeros en sufrir un ataque por hongos, lo cual puede ser consecuencia de la menor extensión de sus cadenas, solubilidad y localización. Las enzimas hidrolíticas son las principales causantes de su degradación. A medida que las hemicelulosas se van degradando en la pared celular, inmediatamente adyacente al lumen, las enzimas se van introduciendo en la pared secundaria, abriendo canales que permiten el acceso a las enzimas degradadoras de lignina; por lo cual una pérdida de hemicelulosas siempre irá acompañada de una remoción de lignina.
- En el caso de la lignina (Delfín-Alcalá & Durán de Bazúa, 2003; Gutiérrez & Martínez, 1996; Levin, 1998; Mora, 2006; J. Pérez et al., 2002; Saiz-Jimenez, 1984; C. Sánchez, 2009; Tuomela, Vikman, Hatakka, & Itavaara, 2000): Esta es hidrófoba, insoluble y está inmersa en una densa matriz de polisacáridos, por lo cual durante el ataque por hongos, las enzimas solamente tienen acceso a la superficie de la pared celular, siendo el contacto físico lignina-enzima el factor limitante de la velocidad de la degradación del polímero. La lignina dificulta la degradación de los carbohidratos al unirse covalentemente a los polisacáridos depositados en las paredes celulares, formando una barrera física resistente al ataque microbiano. Además de ser un polímero recalcitrante a la degradación, tiene una estructura reticular tridimensional formada por anillos aromáticos unidos por átomos de oxígeno, que actúa como barrera dificultando el acceso de

las enzimas hidrolíticas hacia las fibrillas celulósicas. La degradación de la lignina involucra la oxidación de anillos aromáticos y cadenas en el interior del polímero, aumentando la solubilidad y la higroscopicidad del núcleo del polímero, con una liberación en paralelo de fragmentos de dimensiones variadas.

II.4.9.3. Cinética de biodegradación

Los diferentes estudios relacionados con la biodegradación de materiales; suponen exponer al material bajo condiciones ambientales definidas para provocar la degradación biológica del mismo y tomar muestras del material degradado sobre un periodo de tiempo estipulado, para establecer posteriormente la cinética de degradación (Alvarez, Larrucea, Bermúdez, & Chicote, 2009; Andrady et al., 1992; Fox & Noike, 2004; Kayhanian, 1995; Komilis & Ham, 2003; Nechita, Dobrin, Ciolacu, & Bobu, 2010; Norashikin & Ibrahim, 2009).

Entre las posibles mediciones del grado de degradación de un material, se encuentran (Andrady et al., 1992; Lesteur et al., 2010; Nechita et al., 2010; Sridach, Hodgson, & Nazhad, 2006; Tuomela et al., 2000):

- Propiedades mecánicas: Resistencia a la tensión del material degradado.
- Pérdida de peso: La degradación de productos papeleros produce sacáridos solubles que se difunden fuera del papel.
- Propiedades macromoleculares: Las medidas de viscosidad permiten conocer el peso molecular del material degradado.
- Ensayos químicos: Contenido de polímeros de celulosa, hemicelulosas y lignina. Conversión de los polisacáridos en glucosa.

Hay varios estudios realizados de evaluación de la degradación de materiales lignocelulósicos, papeles y cartones (Francou, Linères, Derenne, Villio-Poitrenaud, & Houot, 2008; Hubbe, Nazhad, & Sánchez, 2010; Pommier, Llamas, & Lefebvre, 2010; Sridach et al., 2006; Venelampi, Weber, Rönkkö, & Itävaara, 2003), aserrines de madera (Atkinson, Jones, & Gauthier, 1996) y bagazo de caña de azúcar (Boopathy, Beary, & Templet, 2001), materiales sometidos a procesos de descomposición tanto aeróbica como anaeróbica, que demuestran que dichos materiales sufren un proceso de degradación en un tiempo de estudio comparativamente corto.

- Tipo 1: Moldeados de pared gruesa

Se fabrican utilizando un único molde. Los productos tienen un espesor de pared aproximado entre 5-10 mm. La superficie en contacto con el molde es relativamente lisa, mientras que el otro lado es rugoso. Luego de su elaboración, los moldes son secados en un horno de secado. La materia prima es típicamente papel Kraft reciclado. Se utiliza principalmente para el embalaje de soporte de artículos no frágiles y pesados; y para macetas y contenedores de plantas.

- Tipo 2: Moldeado transferido

Para su fabricación se utilizan dos moldes, un molde de conformación y un molde de transferencia o de despegue. Los productos tienen un espesor de pared aproximado entre 3-5 mm. Las superficies son relativamente lisas en ambos lados, con una mejor precisión dimensional. El producto formado se seca en un horno calentado. La materia prima comúnmente utilizada es el periódico reciclado. Se utiliza principalmente para estuches de huevo, bandejas para frutas, bandejas para alimentos; además nuevos diseños se utilizan para embalaje de productos electrónicos y electrodomésticos, material hospitalario desechable, vajilla y bebidas.

- Tipo 3: Termoformado (Moldeados de pared delgada)

Este es el enfoque de fabricación más reciente. El producto inicial, parcialmente formado, es capturado en un molde calentado donde es prensado, densificado y secado; no necesita curado en el horno. Debido al proceso de prensado en caliente, las paredes son más densas, de alta calidad, con buena precisión dimensional y superficies lisas y rígidas. Los productos tienen un espesor de pared aproximado entre 2-4 mm. El resultado se asemeja a la apariencia de artículos de plástico termoformado.

- Tipo 4: Procesado

Son productos que requieren algún tipo de tratamiento secundario o especial que no sea simplemente moldeado y curado. Entre estos se encuentran: impresión adicional, diseños especiales, coloración, recubrimientos o aditivos.

II.5.1.2. Proceso general de elaboración de productos moldeados

El proceso general de producción de productos de pulpa moldeada (Figura II.32), es subdividido en dos procesos principales, moldeado y estampado, cada uno de los

cuales, a su vez, está conformado por diferentes etapas (B. M. Didone et al., 2017; Kirwan, 2005; K. Y. P. Martínez & Toso, 2015).

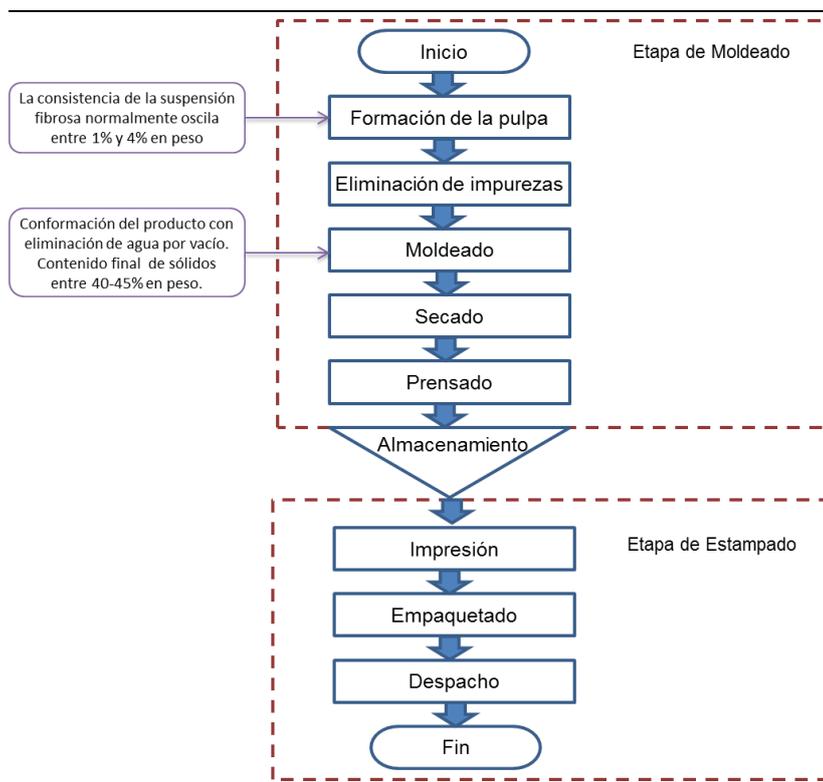


Figura II.32. Diagrama de flujo para la elaboración de productos de pulpa moldeada.

Fuente: Adaptado de (K. Y. P. Martínez & Toso, 2015)

En la etapa de formación, recortes de papeles y cartones reciclados (y/o pulpa virgen), se mezclan con agua y ciertos aditivos químicos (impermeabilizante, colorantes, etc.), y se desintegran en un equipo conocido como Pulper; y la suspensión se diluye a la consistencia de trabajo deseada (normalmente entre 1-4% en peso sólido). Luego, la suspensión fibrosa pasa por un sistema de limpieza, formado normalmente por un conjunto de cribas vibratorias, que permiten eliminar las impurezas más gruesas. Finalmente se transporta la suspensión a un tanque de almacenamiento, donde se lleva a cabo el moldeado.

En la etapa de moldeado, la suspensión fibrosa pasa a través de una máquina que trabaja con dos rotores sincronizados que dan la forma del producto deseado, por medio de operaciones de presión y succión del exceso de agua. En los rotores se acoplan los “patrones de molde”, los cuales se diseñan en función a la geometría del producto final. Para el moldeado del producto, se utilizan comúnmente dos tipos diferentes de procesos (B. M. Didone et al., 2017; Kirwan, 2005; Frank A. Paine, 1991):

- Moldeo por inyección a presión, donde el producto se forma por soplado de aire caliente a una presión aproximada de 4 kg/cm², y a una temperatura aproximada de 480°C, y
- Moldeo por succión, donde la pulpa permanece en contacto con el lado exterior del molde perforado, y es aspirada mediante la aplicación de vacío desde el lado opuesto del molde, quedando el producto en el exterior de la moldura.

Finalizado el moldeo, en general, el producto pasa a un horno de secado, en la cual se calienta entre 10-15 min a temperaturas entre 180-240 °C, dependiendo de las condiciones de humedad del material y del tipo de producto. Existen dos tipos principales de procesos de secado (B. M. Didone et al., 2017; Kirwan, 2005; PendlePace Ltd, 2005):

- Moldeo simple: Es el proceso de secado en túnel por circulación de aire caliente (Figura II.33); representa aproximadamente el 85% de todas las instalaciones de secado. Se clasifican en Secaderos de un paso, Secaderos multi-paso y Cámara de secado. Los productos de moldeo simple caen en la categoría de moldeados de pared gruesa y de transferencia. Los sistemas de producción para estos productos suelen estar diseñados para una producción de gran volumen con altos niveles de automatización.
- Moldeo de precisión: El proceso de secado en molde o termoformado (Figura II.34), se realiza aplicando calor entre las superficies del molde. El producto moldeado húmedo, es transferido a un molde de secado inferior, donde por la acción de un molde superior se somete a prensado y calentamiento adicional. Debido a la acción sucesiva de secado y prensado en caliente, el producto moldeado se seca completamente. Se obtienen productos más densos, más lisos y más precisos; con mejor unión entre las fibras lo cual aumenta las propiedades mecánicas. Se utilizan para productos de alta calidad y de pequeños volúmenes de producción.
- Métodos alternativos: Son métodos de uso menos frecuente, que incluyen el secado en microondas y el secado en cámara.

Posteriormente, el producto pasa a la etapa de prensado, con la finalidad de mejorar el acabado y resistencia del producto, dejándolo apto para el proceso de estampado. A veces se dan tratamientos adicionales: impresión, revestimiento, acabados decorativos, color.

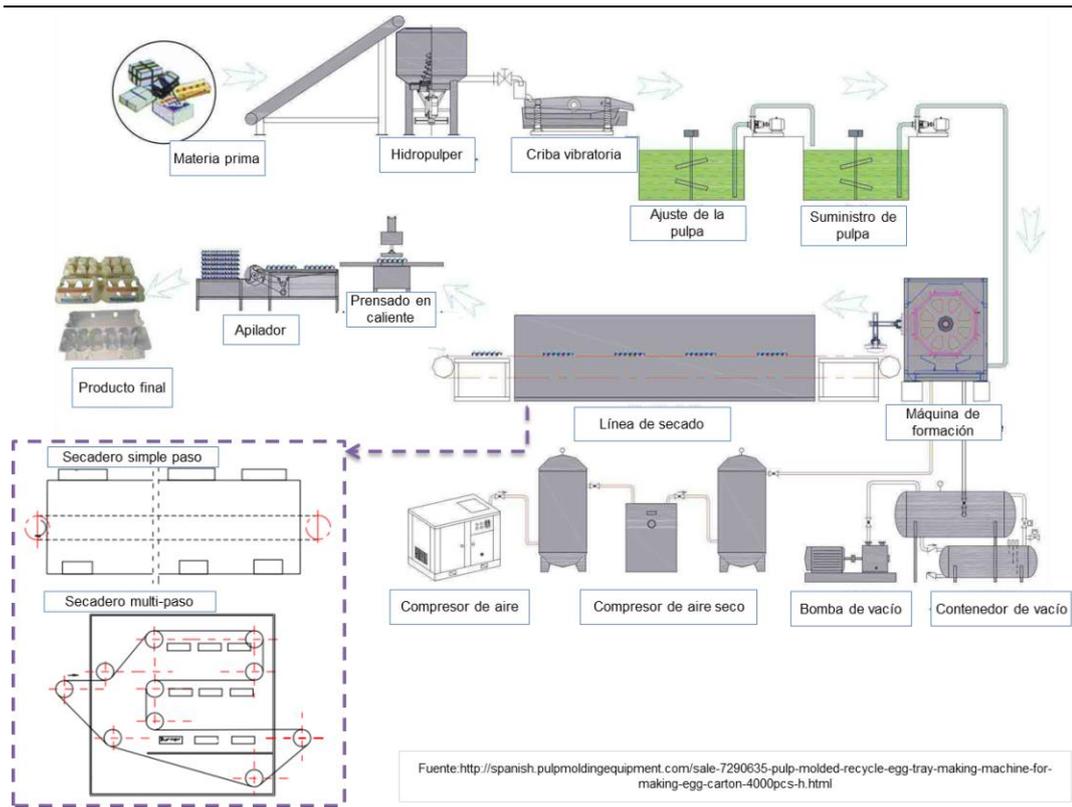


Figura II.33. Proceso de secado en túnel

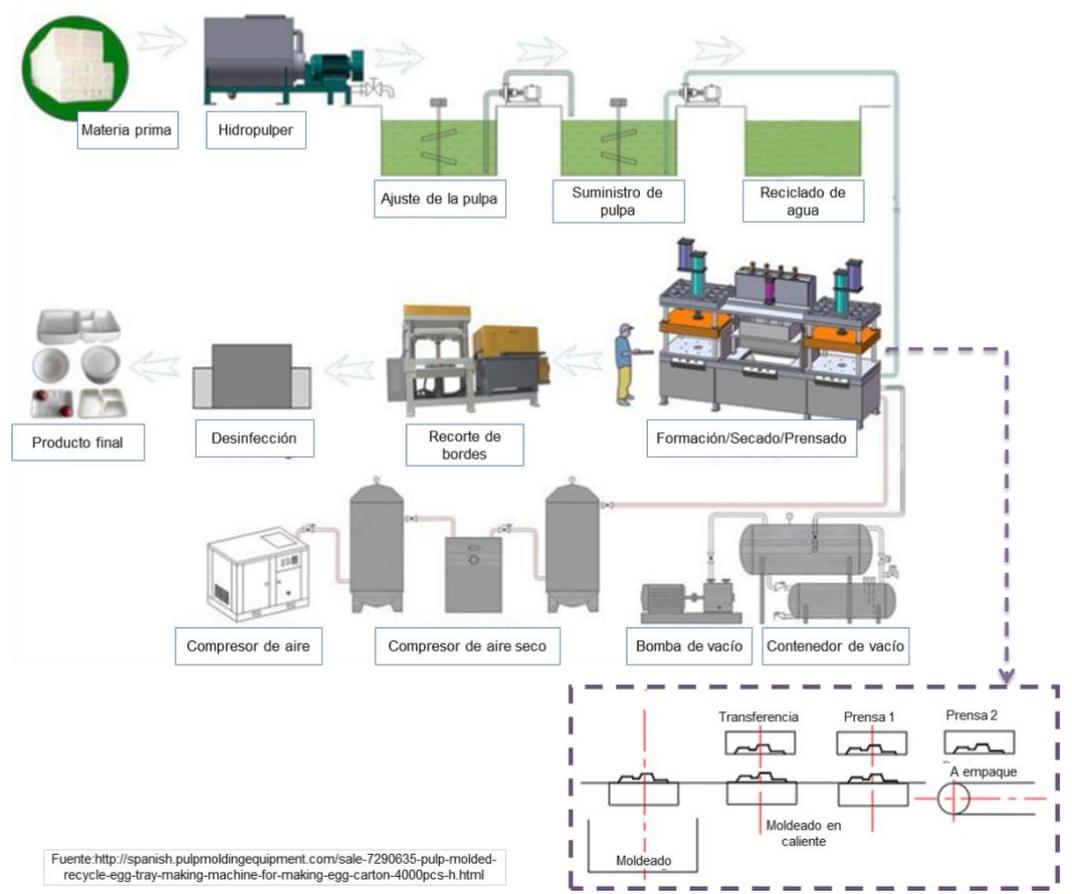


Figura II.34. Proceso de secado en molde

II.5.1.3. Características y propiedades generales de pulpas moldeadas

La pulpa moldeada se caracteriza principalmente por (Frank A. Paine, 1991):

- Capacidad de absorber y amortiguar los impactos. Es un material no sólo elástico-plástico, sino también emplástico; cuando es golpeado, el impacto tiende a disiparse por la distorsión y el aplastamiento en el punto del golpe. Esto la convierte en un excelente material de embalaje, ya que garantiza la protección del producto que cubre durante su manipulación, transporte o almacenaje.
- Capacidad de mantener la aireación debido a su estructura micro-porosa.
- Capacidad de absorber humedad debido a su estructura química.
- Capacidad de adaptación a diferentes moldeados, debido a su flexibilidad.
- Dependiendo de la función del producto, se pueden variar el espesor de pared del material, por lo cual también se tendrán materiales con diferentes densidades. En consecuencia se pueden obtener estructuras blandas y menos rígidas o estructuras duras y más rígidas.
- Recurso amigable con el medio ambiente. Dado que consiste simplemente en agua y fibras de celulosa (principalmente recicladas), la pulpa moldeada es un material renovable y una solución biodegradable.
- Bajos costos de fabricación, materia prima económica.

En cuanto a las propiedades mecánicas básicas, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión y rigidez, estas juegan un papel importante a la hora de evaluar la resistencia del producto moldeado; siendo relevante evaluar dichas propiedades bajo las mismas condiciones de uso final del molde (B. M. Didone et al., 2017). En el caso de productos para envasado, son importantes las propiedades de resistencia a la tracción y compresión y la variación de estas con las condiciones ambientales; y en el caso de productos para embalaje como sustitutos de otros materiales competitivos, como propiedades comparables se evalúan capacidad de amortiguamiento, absorción de energía y capacidad de carga de impacto (B. M. Didone et al., 2017). Aún no ha sido posible realizar una definición exacta de las propiedades mecánicas de la pulpa moldeada, ya que el comportamiento mecánico de cada muestra depende del tamaño, geometría y espesor de pared de cada producto (B. M. Didone et al., 2017); en adición, la fuente de materia prima utilizadas y las características de las fibras (longitud de fibra, capacidad de unión entre las fibras, propiedades estructurales, etc.),

influirán directamente en las propiedades del producto moldeado (Graciela B. Gavazzo & Pavlik, 2008b).

Los estudios de caracterización y evaluación de propiedades de pulpa moldeada, son escasos. Han sido desarrollados principalmente estudios de evaluación del comportamiento mecánico de productos moldeados, propiedades de absorción de impacto, de resistencia a la compresión y capacidad de amortiguamiento a impactos físicos o vibraciones (Ji, Wang, & Chen, 2008): (Eagleton & Marcondes, 1994), realizaron experimentos para evaluar las propiedades de amortiguación de la pulpa moldeada en comparación de una espuma de poliestireno expandido, a partir de la construcción de curvas de amortiguación. (Noguchi, Miyashita, Seto, & Kawano, 1997), desarrollaron un compuesto de microesferas de pulpa y plástico triturado con un aglutinante de almidón modificado, y posteriormente evaluaron las propiedades mecánicas, tensión-deformación por compresión y absorción de choques del material. (Hoffmann, 2000), realizó experimentos para determinar la relación entre la geometría de un recipiente de pulpa moldeada y la resistencia estática y dinámica resultante de dicha geometría; y ha evaluado la influencia de la forma de la muestra de pulpa moldeada sobre las características mecánicas. (Gurav, Bereznitski, Heidweiller, & Kandachar, 2003), realizaron experimentos para determinar las propiedades mecánicas, resistencia a la tracción y compresión, de envases de pulpa moldeada; además evaluaron la variación de dichos materiales en relación a las propiedades evaluadas. (Ma, Soh, & Wang, 2004), plantearon un enfoque de factores estructurales, el cual les permitió emplear un método de diseño modular para diseñar envases de pulpa moldeada con estructuras de paredes delgadas, y establecer relaciones empíricas entre la capacidad de carga de las unidades estructurales y los factores estructurales. (Sørensen & Hoffmann, 2004), investigaron la resistencia al apilamiento de bandejas de pulpa moldeada, evaluando el comportamiento de fluencia por compresión y la resistencia a la compresión estática, bajo condiciones variables de humedad. (Ji et al., 2008), investigaron el comportamiento mecánico a escala micro, de materiales de pulpa moldeada, y evaluaron la morfología superficial de la muestra durante el proceso de carga. (Z. Wang, Cai, & Jing, 2012), analizaron el comportamiento de amortiguación de una unidad de cubo para el moldeo de materiales de pulpa moldeada, utilizando un software para simular los ensayos de compresión y evaluar el efecto del ángulo de inclinación y la altura en el modelo. (Z.

W. Wang & Li, 2014), investigaron sobre la capacidad de carga y de absorción de energía, de productos de pulpa moldeada utilizados como envases de amortiguamiento de electrónicos, tanto en la compresión estática como en el impacto dinámico. (Xiao & Shao, 2015), realizaron experimentos para evaluar el comportamiento global de la compresión estática de la pulpa moldeada a diferentes temperaturas.

Escasos estudios de evaluación de las propiedades físicas han sido desarrollados. (Graciela B. Gavazzo, Lanouette, & Valade, 2005), con el objetivo de identificar variables importantes en el proceso de pulpa moldeada, analizaron las propiedades de pulpas procedentes de una fábrica industrial de celulosa y papel a escala de laboratorio. (G B Gavazzo, 2010), evaluó la influencia de las materias primas y condiciones de proceso sobre moldeados obtenidos en laboratorio, realizando mediciones de drenado en pulpas; mediciones de densidad, rigidez, resistencia a la tracción, explosión y rasgado en hojas estándar de laboratorio; y mediciones de espesor, densidad de pared y resistencia a la compresión en moldeados.

II.5.2. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE SECADO

II.5.2.1. Influencia del secado en la unión de la red fibrosa

Las fibras celulósicas constituyen los principales elementos estructurales de todo producto papelerero. De las propiedades de las fibras y del proceso de unión entre estas, depende la formación del entramado fibroso. La resistencia de la red fibrosa depende de la resistencia individual de la fibra y de la resistencia de la unión inter-fibra (Stratton, 1991). Las fibras celulósicas no son "stickies" en el sentido corriente de la palabra, es decir, la unión o cohesión de las superficies de las celulosas, no se debe a un pegamento o hidrato (Clark, 1985). El proceso de unión se debe a la tendencia intrínseca de las fibras a unirse entre sí cuando se encuentran en presencia de agua u otro líquido polar y se secan (Niskanen, 2000). La causa principal de unión inter-fibra, se debe casi enteramente a la unión superficial debido a la tensión líquida del agua entre las capas fuertemente unidas de moléculas de agua sobre las superficies de la celulosa y hemicelulosas (Clark, 1985). Cuando se elimina al agua de la suspensión fibrosa, la tensión superficial crea una fuerza que compacta y aproxima las fibras logrando entre ellas un contacto más estrecho (Clark, 1985). Mientras hay agua suficiente como para llenar los espacios entre las fibras del

entretelado fibroso, las fuerzas de tensión superficial son muy bajas, luego, a medida que la eliminación del agua avanza, hasta el punto en que el aire forma una proporción apreciable del medio en el que están suspendidas las fibras, las zona inter-facial agua-aire aumenta rápidamente, a la vez que aumenta la fuerza de la tensión superficial (Clark, 1985). Durante el proceso secado, se crean enlaces puente de hidrógeno entre los grupos hidroxilos de la celulosa y las moléculas de agua del medio, que sirven de puente entre las diferentes fibras de celulosa; debido a enlaces puente de hidrógeno entre moléculas de agua, que son los de más baja energía en el sistema agua-celulosa, parte del agua es removida y las superficies de la celulosa se aproximan unas a otras; luego continúa hasta que solamente una capa monomolecular de agua permanece entre las dos superficies de las moléculas de celulosa y finalmente los puentes de hidrógeno, entre los hidroxilos del agua y de la celulosa, se rompen formándose la unión de las superficies de celulosa (Clark, 1985), tal como se ilustra en la Figura II.35.

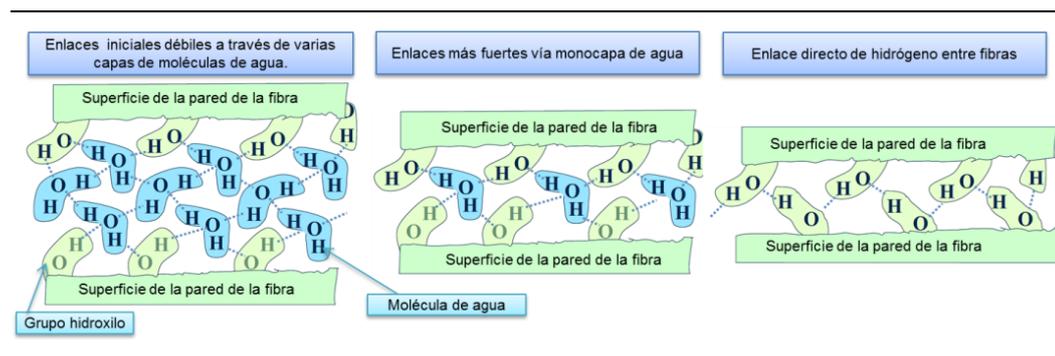


Figura II.35. Formación de enlaces por puente hidrógeno entre fibras.

Fuente: Adaptado de (Komulainen, 2016)

II.5.2.2. Proceso de secado

El secado es el proceso por el cual los materiales volátiles, usualmente agua, se evaporan de un material para producir un producto sólido (Perry & Green, 2008). La masa se transfiere durante el secado en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor que se desprende de las superficies expuestas (Perry & Green, 2008). El movimiento dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de las características del mismo (Perry & Green, 2008). Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de secado (Perry & Green, 2008). Durante el secado ocurren simultáneamente muchos procesos físicos como: transferencia de calor y masa, plastificación viscoelástica y densificación, y

desarrollo de enlaces fibra-fibra; los cuales resultan afectados por cambios en la conductividad térmica, la permeabilidad del material fibrosa y la evaporación continua de agua durante el proceso de secado; y como consecuencia, el secado de productos moldeados, resulta un proceso complejo (Hunt, Tamasy-Bano, & Nyist, 1999). Las condiciones de secado y las transformaciones físicas y químicas que ocurren en el equipo de secado tienen influencia directa sobre la calidad del producto (Perry & Green, 2008).

La intensidad del secado refleja el cambio en la cantidad de humedad a través del tiempo, y está influenciado por la temperatura, humedad, velocidad relativa del aire, presión total, entre otros.

En las etapas de fabricación de los productos moldeados, luego de la formación, dependiendo del proceso de moldeo utilizado, el producto puede tener desde 50 a 85% de humedad, y mediante la aplicación de calor, se logra reducir el contenido de humedad hasta aproximadamente un 5%. En todo manto fibroso existe: agua libre (entre las fibras); agua de impregnación (absorbida por las fibras) y agua de hidratación (en los poros de la fibra y parte ligada a la molécula de celulosa), las cuales se eliminan por evaporación en las sucesivas fases del proceso de secado; primeramente se elimina el agua libre, luego el agua de impregnación, y finalmente, el agua de hidratación (B. B. Aguilar, Ramírez, Casillas, & Urquiza, 2008).

El proceso de secado de los productos papeleros (Figura II.36), se lleva a cabo en 4 fases (Karlsson & Oyj, 2000; Smook, 1990b):

- Fase de calentamiento: Tanto la temperatura del sólido como la velocidad de secado se incrementan gradualmente, aproximándose a las de velocidad constante.
- Fase de velocidad de secado constante: Tanto la temperatura del sólido como la velocidad de evaporación son constantes y la evaporación puede tener lugar tanto en la superficie del sólido como dentro de este. Ocurre la mayor tasa de evaporación. La evaporación del agua del manto fibroso se lleva a cabo rápidamente desde las superficies de las fibras o desde los grandes capilares.
- Fase de velocidad de secado descendente: La velocidad de secado comienza a disminuir debido al aumento de la resistencia para la difusión de vapor desde el interior del sólido hasta su superficie exterior. Se evapora la humedad interna, la

cual emigra a la superficie. La etapa, tiene lugar dada la disminución de la presión parcial del vapor debido a la naturaleza higroscópica de la fibra celulósica y al aumento de la resistencia a la transferencia de calor debido a la disminución de la conductividad térmica del sólido. La temperatura del sólido se incrementa a medida que el sistema alcanza el equilibrio térmico. La tasa de evaporación comienza a disminuir una vez que la sequedad del manto fibroso alcanza el punto en el que el agua libre se concentra en los capilares menores.

- Fase de eliminación del agua ligada: Es una etapa muy corta, que ocurre cuando el manto fibroso alcanza aproximadamente un 9% de humedad. Se produce una rotura de enlaces químicos para poder eliminar por evaporación el agua restante.

En la región higroscópica, la presión parcial de vapor, en la superficie de la red fibrosa o en cualquier parte dentro de la red fibrosa, está en función de la temperatura local y del contenido de humedad (Karlsson & Oyj, 2000). La isoterma de sorción de un entramado fibroso depende de su composición. Existe una ligera diferencia entre pulpas químicas y mecánicas; la pulpa mecánica es más higroscópica (Karlsson & Oyj, 2000). Los aditivos tienen una influencia prominente en las propiedades de sorción; y tienden a disminuir la higroscopicidad del producto papelerero (Karlsson & Oyj, 2000).

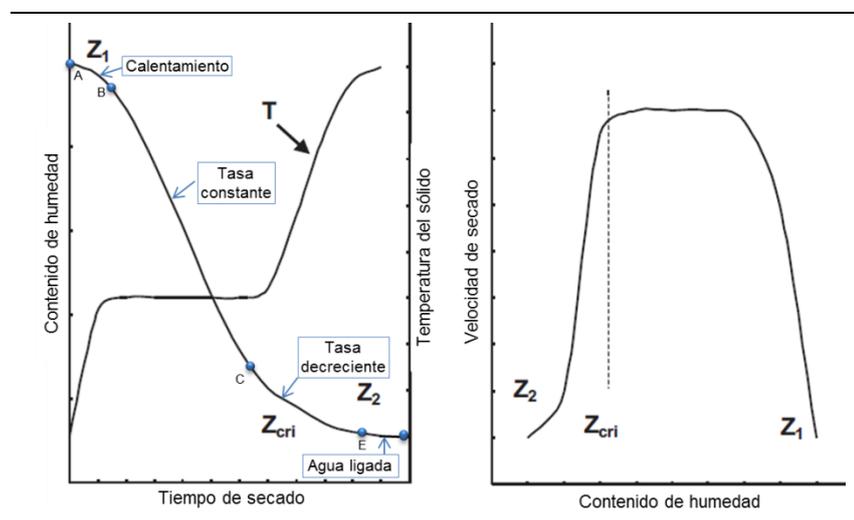


Figura II.36. Fases del secado de productos papeleros.

Fuente: Adaptado de (Karlsson & Oyj, 2000).

II.5.2.3. Influencia de la operación de secado sobre las pulpas moldeadas

En cuanto a la evaluación de las variables involucradas y la influencia de la operación de secado sobre las pulpas moldeadas, se han encontrado escasos estudios.

(M. Didone & Tosello, 2016), evaluaron el potencial de la tecnología de secado por impulsos durante la fase de secado de productos termoformados a partir del diseño de un equipo de prueba que les permitió realizar los ensayos experimentales, comprender y controlar los fenómenos de secado por impulso. (Nyist, Hunt, Tamásybánó, Composites, & Woodscience, 1998), diseñaron y moldearon un panel estructural tridimensional, usando diferentes materiales fibrosos, y luego realizaron trabajos experimentales para optimizar la eficiencia de secado y el rendimiento estructural del panel, evaluando diferentes procesos de secado. Como continuación al trabajo de Nyist et al. (1998), (Hunt et al., 1999), realizaron trabajos experimentales con el fin de optimizar la eficiencia de secado y el rendimiento estructural del panel tridimensional, evaluando las temperaturas internas, el espesor, el contenido de humedad, las velocidades de secado y las propiedades mecánicas en función del tiempo. (M. L. S. Pérez, 2011), investigaron la influencia de la temperatura del aire de secado, del pH de la pulpa y la variación de sequedad del producto, sobre las propiedades de la pulpa. (Vieira & Rocha, 2007), determinaron la influencia de la temperatura y de la velocidad del aire de secado sobre las propiedades físicas (gramaje, espesor, densidad aparente, porosidad, resistencia a la tensión y reventamiento, estabilidad dimensional y absorción de agua) de pulpas recicladas.

II.6. APTITUD DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

II.6.1. PROPIEDADES DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

En la actualidad, los términos orgánico, sostenible, alternativo y verde se han convertido en uso común; y en consecuencia han aumentado el desarrollo de nuevos productos en varios sectores industriales.

La industria viverística utiliza comúnmente contenedores plásticos, los cuales, si bien, satisfacen las necesidades de producción, tienen varias desventajas, están elaborados con materiales no renovables derivados del petróleo, son desechados luego de su uso, tiene altos costos de mano de obra de recolección, posibilidades de contaminación química, foto-degradación y responsabilidad por contenedores mal desinfectados (S. Nambuthiri et al., 2013). En base a dichas desventajas, y dado el reciente interés de los consumidores y del mercado por productos y prácticas empresariales más sostenibles (Dennis et al., 2010), la industria verde, como alternativa, se ha enfocado en el desarrollo de contenedores biodegradables

destinados a la producción y comercialización de plantas, con diseños atractivos, e idóneos para el medio ambiente y para el consumidor, que conlleve a una mejora de la sostenibilidad de los sistemas de producción actuales y una mejora en la sostenibilidad ambiental de la industria viverística (Hall et al., 2010; S. Nambuthiri et al., 2013). Actualmente hay disponibles en el mercado internacional, contenedores compostables, los cuales una vez que se retira la planta se descomponen por compostaje, y contenedores plantables, los cuales no necesitan ser removidos antes de plantar ya que con el tiempo se degradan en el suelo (Cypher & Fulcher, 2015a).

Aunque los contenedores biodegradables tienen la ventaja de ser biodegradables y/o compostables, y en comparación a los contenedores tradicionales pueden tener ventajas económicas, ser productos competitivos, beneficiosos durante la producción y la comercialización, es necesario evaluar sus propiedades para verificar si son capaces de asegurar niveles de uso técnico comparativos con los contenedores plásticos. Esto se debe en especial a que, para el productor, es de gran importancia que el contenedor se adapte de forma eficiente a los procesos productivos que utiliza; ya que la producción en vivero es automatizada en numerosas áreas, deben adaptarse a los procesos de carga y transporte así como a los distintos sistemas de riego, con bajas tasas de evaporación para no alterar el consumo energético en vivero (Straeter, 2004). El cambio de contenedores plásticos por contenedores biodegradables afecta el costo de las diferentes etapas de producción, siendo los factores influyentes: el precio del contenedor, los cambios potenciales en el uso del agua, los cambios en el tiempo de producción, la posible disminución de la portabilidad, los posibles cambios en el uso de fertilizantes y el aumento en el precio de venta debido a la disposición del consumidor a pagar más por ser un producto “amigable con el medio ambiente”. Si bien, en aquellos viveros que reutilizan los contenedores, el uso de contenedores biodegradables aumentaría los costos relacionados al envase, el costo adicional del contenedor puede compensarse dado que se elimina el almacenamiento y desinfección de contenedores viejos y la mano de obra y los costos asociados con esas tareas, además se puede aumentar el precio de venta, ya que, en general, los consumidores están dispuestos a pagar un precio más alto dependiendo de su actitud hacia el medio ambiente, convirtiéndose en una alternativa económicamente viable.

La mayor parte de la investigación sobre contenedores biodegradables para la producción de cultivos en vivero se ha centrado en (Beeks & Evans, 2013b;

Camberato & Lopez, 2010): las condiciones de riego, crecimiento de algas y hongos en las paredes de los contenedores, en las resistencias en seco y en húmedo de los mismos, y el crecimiento de plantas, dado las características planteadas en los párrafos anteriores. (Dall, 1997), diseñó un contenedor para horticultura a base de pulpa moldeada y agregado de tiocianato orgánico como aditivo antimicrobiano; y evaluó la resistencia a la degradación microbiana de dicho contenedor. (Evans & Hensley, 2004), elaboraron contenedores a base de plumas de aves de corral procesadas; y evaluaron el crecimiento de plantas, de las especies “clavel de moro” (*Tagetes patula* L.), “vinca de Madagascar” [*Catharanthus roseus* (L.) G. Don.] y “malvón” (*Pelargonium hortorum* L.H. Bailey), bajo condiciones de irrigación y fertilización uniformes, utilizando como control contenedores plásticos y de turba. (Evans & Karcher, 2004), elaboraron contenedores a base de plumas de aves de corral procesadas, y evaluaron las características de rendimiento del contenedor, uso del agua, resistencia, crecimiento de algas y hongos en las paredes y grado de descomposición, en comparación a contenedores de plástico y de turba. (Yamauchi, Masuda, & Kihara, 2006), elaboraron contenedores a base de papeles de diario reciclados y vinaza de la destilación de Shochu (bebida alcohólica destilada de la batata); y evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y químicas, la desintegración de dichos contenedores y el efecto en el crecimiento de plantas hortícolas. (V. Candido, Miccolis, Castronuovo, & Manera, 2008), estudiaron contenedores de poliésteres biodegradables sencillos y combinados con materiales compostables y un contenedor de polipropileno, en el cultivo de la especie “estrella federal” (*Euphorbia pulcherrima*); evaluaron el comportamiento mecánico de los contenedores (resistencia a la tracción, resistencia a la rotura e índice de degradación) y las características agronómicas de las plantas. (Minuto et al., 2008), estudiaron el uso de contenedores biodegradables en la producción de diferentes especies ornamentales; y evaluaron los efectos fitotóxicos y las propiedades mecánicas. (Camberato & Lopez, 2010), utilizaron siete contenedores biodegradables comerciales y un contenedor plástico en cultivos a largo plazo bajo condiciones normales de vivero; cultivaron la especie “estrella federal” (*Euphorbia pulcherrima*) y evaluaron la integridad estructural de cada contenedor y la calidad de la planta. (Evans et al., 2010), utilizaron siete contenedores biodegradables comerciales y un contenedor plástico para evaluar propiedades de resistencia en seco y en húmedo, uso de agua, desarrollo de hongos y algas en las paredes y descomposición en condiciones de campo. (H. J.

M. Flores et al., 2010), evaluaron la factibilidad técnica del uso de contenedores elaborados a base de fibra de coco, en comparación con dos tipos de contenedores de poliestireno expandido para la propagación en vivero de dos especies forestales de clima tropical; y determinaron las características morfológicas de las plantas cultivadas. (Nechita et al., 2010), analizaron el comportamiento de contenedores elaborados con fibras celulósicas secundarias, turba y aditivos, para el proceso de producción de plántulas de hortalizas, enfocándose en sus propiedades de resistencia mecánica y biodegradabilidad. (Vincenzo Candido, Castronuovo, & Miccolis, 2011), estudiaron contenedores de poliésteres biodegradables combinados con compost y fibra vegetal y un contenedor de polipropileno, en el cultivo de la especie “estrella federal” (*Euphorbia pulcherrima*); evaluaron las propiedades de resistencia a la tracción, resistencia a la rotura e índice de degradación de los contenedores y las características agronómicas de las plantas. (Kuehny, Taylor, & Evans, 2011), evaluaron el crecimiento en invernadero de tres especies: “malvón” (*Pelargonium hortorum*), “vinca rosea” (*Catharanthus roseus*) y “alegría del hogar” (*Impatiens walleriana*), utilizando para el cultivo varios tipos de contenedores biodegradables y un contenedor plástico para control. (Lopez & Camberato, 2011), utilizaron contenedores biodegradables comerciales y un contenedor plástico para evaluar la producción en vivero de un cultivo a largo plazo, “estrella federal” (*Euphorbia pulcherrima*); determinaron apariencia y durabilidad de los contenedores y midieron parámetros de calidad de la planta. (Beeks & Evans, 2013b), determinaron las propiedades físicas de diferentes contenedores biodegradables elaborados a partir de, bioplásticos, cáscara de arroz, papel, turba, estiércol, fibra de madera, paja de arroz y fibra de coco, en comparación con contenedores plásticos, antes y después de haber sido utilizados para cultivar “violeta de los alpes” (*Cyclamen persicum* L.) bajo ambiente de invernadero. (Beeks & Evans, 2013a), evaluaron el crecimiento de un cultivo a largo plazo (*Cyclamen persicum* L.) en contenedores elaborados a partir de bioplásticos, cáscara de arroz, papel, turba, estiércol, fibra de madera, paja de arroz y fibra de coco, en comparación con los contenedores plástico, utilizando un sistema de sub-irrigación. (A. Koeser, Lovell, Evans, & Stewart, 2013), evaluaron el crecimiento de plantas y el consumo total de agua para diferentes contenedores biodegradables y un control plástico, durante el cultivo en invernadero a corto plazo, de “petunia” (*Petunia hybrida*). (A. Koeser, Kling, Miller, & Warnock, 2013), investigaron la capacidad de contenedores biodegradables de soportar los rigores de

un proceso de producción comercial semi-mecanizado y el rendimiento de los mismos bajo tres métodos de riego diferentes; utilizaron contenedores biodegradables disponibles en el mercado y los compararon con contenedores plásticos. (Lina, Toshio, Yo-Ichi, Yoshiaki, & Yasuharu, 2013), desarrollaron contenedores biodegradables utilizando residuos industriales obtenidos como subproductos de Konjac (*Amorphophallus konjac*); y midieron absorción de agua, resistencia y biodegradación de dichos contenedores en comparación con contenedores plásticos. (Schettini et al., 2013), elaboraron contenedores a partir de una matriz polimérica reforzada con fibras de cáscara de tomate combinadas con las semillas y hebras de cáñamo; investigaron la funcionalidad, el comportamiento físico-químico y mecánico de estos contenedores en condiciones experimentales estándar y controladas ensayando hojas de laboratorio con el fin de correlacionar los resultados; además evaluaron el proceso de biodegradación durante el cultivo de plantas en suelo. (J. G. Carrillo & Castellanos, 2014), desarrollaron un contenedor compuesto de cartón con una matriz a base de poliestireno expandido reciclado y un disolvente natural cítrico utilizado como película para el sellado superficial, destinados al cultivo de especies de coníferas y latifoliadas; evaluaron propiedades de resistencia a la tracción y compresión de anillo bajo diferentes condiciones ambientales, y la capacidad de absorción de agua para poder controlar el grado de biodegradación del material. (McCabe, Schrader, Madbouly, Grewell, & Graves, 2014), compararon la efectividad de contenedores de fibra de coco, de papel y de madera sin recubrimientos con los mismos tipos de contenedores recubiertos con biopolímeros (poliamida, ácido poliláctico, poliuretano); evaluaron resistencia, durabilidad y uso de agua durante la producción de plantas. (Castronuovo et al., 2015), estudiaron contenedores de poliésteres biodegradables combinados con fibras vegetales en diferentes proporciones y un contenedor de polipropileno, en el cultivo de la especie “estrella federal” (*Euphorbia pulcherrima*); evaluaron la respuesta agronómica de las plantas y el comportamiento mecánico y colorimétrico de los contenedores. (Evans et al., 2015), utilizaron contenedores biodegradables comerciales y un control de plástico, para determinar el intervalo de riego, cantidad de agua necesaria para cultivar “vinca de Madagascar” (*Catharanthus roseus*) y la velocidad con la que el agua pasa a través de la pared del recipiente. (Brumfield et al., 2015), determinaron los costos económicos de los sistemas de producción comercial, de dos especies de plantas leñosas, utilizando para el cultivo contenedores

plásticos y contenedores alternativos, elaborados con pulpa de madera, tela, queratina y fibra de coco, en sistemas de vivero en el exterior. (Li et al., 2015), evaluaron el rendimiento mecánico de dos contenedores a base de papel en comparación con un contenedor plástico, en un sistema de producción contenedor-contenedor e investigaron la influencia del contenedor en el uso de agua y en el crecimiento de las plantas, para lo cual utilizaron la especie “abedul de río” (*Betula nigra*). (Susmitha Nambuthiri, Geneve, et al., 2015), realizaron ensayos en campo para evaluar el desempeño de contenedores de queratina, de pulpa de madera, de fibra textil y de fibra de coco, en comparación con contenedores plásticos; evaluaron el impacto del material sobre la dinámica de la temperatura del sustrato y la pérdida de agua por evaporación a través de sus paredes laterales bajo condiciones ambientales controladas. (X. Wang et al., 2015), utilizaron contenedores de papel reciclado, de fibra textil, de keratina, y de fibra de coco y contenedores plásticos para evaluar el crecimiento y la biomasa de plantas y las características de uso de agua en diferentes ambientes de vivero; cultivaron tres especies ornamentales arboladas “el huso de la fortuna” (*Euonymus fortunei*), “boj común” (*Buxus sempervirens*) y “carióptera” (*Caryopteris clandonensis*). (Postemsky, Marinangeli, & Curvetto, 2016), fabricaron contenedores biodegradables (Ganocetas) a base de un sustrato residual obtenido después de la fermentación en estado sólido de residuos lignocelulósicos agroindustriales por el hongo medicinal *Ganoderma lucidum*; y evaluaron su uso para el cultivo de plántulas hortícolas, determinaron el crecimiento de plántulas y las propiedades fisicoquímicas de los contenedores.

II.6.2. PRODUCCIÓN DE PLANTAS EN CONTENEDORES

La industria viverística, es una actividad altamente intensiva y de gran importancia en el país, con una gran infraestructura y desarrollo tecnológico (Arroyo, 1996). Las plantas producidas en vivero tienen un mayor rendimiento, hay menor mortandad y mayor crecimiento una vez llevadas al sitio de plantación; debido principalmente a que en el vivero se provee a la plántula, de manera controlada, de las condiciones óptimas de temperatura, humedad, riego y nutrientes para asegurar el crecimiento, y se promueve la formación de un sistema radicular fibroso, de gran volumen y relativamente superficial, favoreciendo la relación raíz/tallo para soportar el trasplante (Buamscha et al., 2012). La misión de todo vivero, es obtener plantas de

calidad, que garanticen una buena supervivencia y crecimiento en el lugar donde se establezcan en forma definitiva (Buamscha et al., 2012).

II.6.2.1. Uso de contenedores en la producción

La producción de plantas en contenedor es una innovación relativamente reciente. En los sistemas actuales de producción en vivero, las plantas son desarrolladas inicialmente en un contenedor pequeño, posteriormente, al final del cultivo, los plantines (plantita ya establecida, con hojas y un sistema radicular parcialmente desarrollado) son trasplantados en camas a raíz desnuda para un periodo adicional de crecimiento, en contenedores de mayor tamaño o en campo (Ramoá, 2014). Cada tipo de producción tiene características biológicas únicas que afectan la sobrevivencia de las plantas y su crecimiento después de la plantación en campo.

Para referimos al cultivo en contenedor, surgen varios términos en relación al recipiente, por ejemplo, en el ámbito de las plantas ornamentales reciben el nombre de macetas mientras que en los viveros forestales reciben el nombre de contenedores; también aparecen los términos celdas o cavidades, que consisten en recipientes individuales, unidos en “bandejas” o “bloques”; o el término “tubete” que consisten en recipientes individuales sostenidos por una estructura denominada porta contenedor (Buamscha et al., 2012; Landis et al., 1990).

A la hora de establecer un sistema de producción de especies en contenedor, una de las consideraciones de mayor importancia es la elección del contenedor (Buamscha et al., 2012). El diseño del contenedor, el material a partir del cual fue elaborado, la forma, dimensión y color, condicionan una multitud de variables: aspectos operativos, sistemas de riego y cantidad de riego, cantidad de nutrientes minerales, sistemas de producción, crecimiento de la planta, dimensiones de la planta, formación del sistema radical, número de plantas a cultivar por unidad de superficie, etc. (H. S. Aguilar, 2014; Buamscha et al., 2012). Las principales consideraciones biológicas y operativas a tener en cuenta son (H. S. Aguilar, 2014; Amoroso et al., 2010; Buamscha et al., 2012; Gilman, Harchick, & Paz, 2010; Landis et al., 1990; Lerena, 1997; Prieto Ruiz, Domínguez Calleros, Cornejo Oviedo, & Návar Cháidez, 2007; S., Divo de Sesar, & Vilella, 2009):

Volumen del contenedor:

La dimensión óptima está relacionada con la especie, el tamaño de planta deseado, la densidad de cultivo, la duración de la estación de crecimiento y el medio de crecimiento que se utilice. Un contenedor de mayor volumen, en general, permitirá un mayor crecimiento, con plantas más altas, con mayores diámetros del cuello, sin embargo, hay limitaciones económicas en cuanto al tamaño, ya que ocupan un mayor espacio y pueden alargar el tiempo de permanencia en vivero.

Profundidad del contenedor:

Es un parámetro importante porque determina la longitud del sistema radical; y también la proporción de sustrato que drena libremente dentro del contenedor. Cuando se aplica agua a un contenedor lleno de sustrato, en el fondo del contenedor se forma una zona de saturación, siendo esta zona proporcionalmente mayor en los contenedores menos profundos.

Diámetro del contenedor:

Es un parámetro importante y es función de la especie a ser cultivada, por ejemplo, en el caso de árboles, arbustos y herbáceas de hojas grandes se requiere un contenedor de mayor diámetro para que el agua de riego pueda atravesar el denso follaje y llegar al sustrato.

Espaciamiento entre plantas:

Otro factor importante es la distancia entre plantas, ya que el espaciamiento afecta la disponibilidad de luz, agua y nutrientes para cada planta, efecto más pronunciado en aquellos cultivos de especies de hojas grandes. Cuando el espacio entre plantas es reducido, se observan efectos negativos en la altura y el diámetro del cuello (plantas más altas con diámetros de cuello menores), en la rectitud de los tallos, y en la frondosidad. Además afecta las condiciones de riego y fertilización, por ejemplo, en el caso del uso de aspersores superiores fijos, el agua y los fertilizantes líquidos no logran atravesar el follaje. Hay una mayor probabilidad de enfermedades foliares debido a la mala circulación de aire entre las plantas; la temperatura del sustrato disminuye, y al no llegar luz a los follajes inferiores, estos mueren.

Orificios de drenaje:

Deben tener un orificio inferior que permite el buen drenaje, y, también permite la poda de la raíz por efecto del aire, pero debe evitar la pérdida excesiva del sustrato durante el proceso de carga.

Sistema de control radicular:

El diseño del contenedor debe permitir el control del crecimiento y desarrollo de las raíces, ya que la calidad de una planta en contenedor depende en gran medida de su sistema radical. Varias compañías han desarrollado contenedores que tienen ranuras laterales en las paredes para controlar el espiralamiento y otras deformaciones de las raíces por medio de la poda al ponerse en contacto con el aire. Las plantas crecidas en recipientes de lados lisos dan como resultado raíces deformadas porque las raíces laterales no pueden extenderse horizontalmente y por lo tanto, o bien circundan dentro del recipiente o crecen verticalmente hasta el fondo.

Propiedades aislantes:

Tanto las propiedades aislantes del contenedor como su color afectan la temperatura del sustrato afectando el crecimiento radicular. En climas cálidos el uso de contenedores negros suele ser perjudicial para el desarrollo de la plántula.

II.6.2.2. Calidad de la planta: Atributos morfológicos

La calidad de una planta está dada por el grado en que esta cumple con los atributos morfológicos, fisiológicos y químicos, que aseguren la supervivencia y el óptimo crecimiento bajo las condiciones ambientales y ecológicas del lugar donde serán plantadas (Rodríguez Laguna, 2010). Existen técnicas para evaluar la calidad, entre las cuales se destacan las pruebas morfológicas de calidad de planta ya que son fáciles de medir, la mayoría son no destructivas, y permiten evaluar la forma o estructura de la plántula y no requieren personal capacitado (Rodríguez Laguna, 2010). Los procedimientos consisten en medir los atributos morfológicos de las plantas cultivadas en contenedores biodegradables, biomasa seca, altura del tallo, diámetro del cuello, longitud de la yema, número de fascículos, relación raíz/parte aérea, y los resultados de las variables evaluadas comparar con las plantas control para determinar la calidad de las mismas (Buamscha et al., 2012; Landis, Dumroese, & Haase, 2010).

III. PARTE EXPERIMENTAL

III.1. MATERIAS PRIMAS

III.1.1. PULPAS SECUNDARIAS

El diagrama de flujo del proceso de obtención de las pulpas secundarias se ilustra en la Figura III.1.

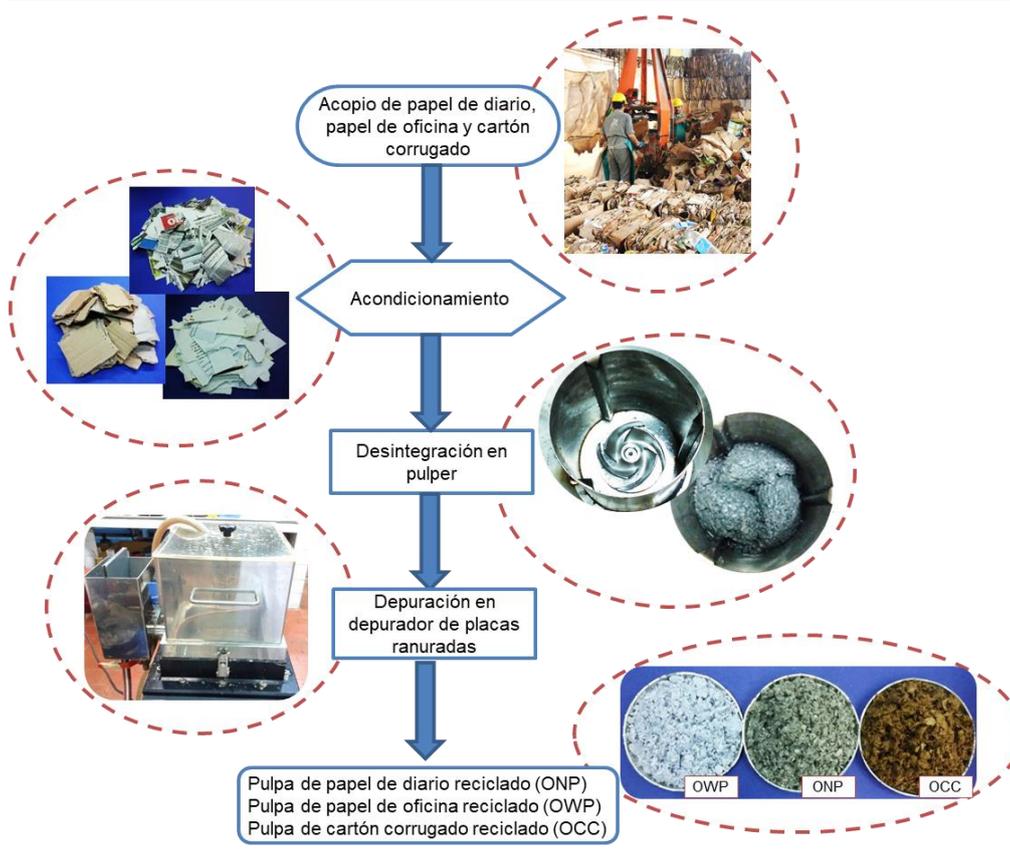


Figura III.1. Diagrama de flujo para obtención de pulpas secundarias

Se seleccionó como materia prima de trabajo, papeles de diario reciclados (ONP); papeles de oficina reciclados (OWP) y cartones corrugados reciclados (OCC), productos de la generación de residuos sólidos urbanos en la provincia de Misiones.

Los fardos de papeles y cartones se adquirieron de un centro de acopio local de materiales sólidos reciclados con el fin de obtener una muestra representativa. Se realizó una inspección visual de cada fardo y se eliminó todo material extraño (alambres, broches metálicos, cintas adhesivas, piedras, entre otros). Luego, los papeles y cartones, se trozaron manualmente en cuadrados de aproximadamente 10x10 cm, y la muestra se homogenizó a partir de la técnica de cuarteo. El material,

previamente acondicionado, se desintegró en un “pulper”, a una consistencia de trabajo del 8% y (25 ± 1) °C de temperatura, durante un periodo de tiempo de 15 min. Luego, la pulpa obtenida, se sometió a un tratamiento físico con el fin de eliminar las posibles partículas contaminantes presentes en la suspensión fibrosa (arena, partículas metálicas, adhesivos, pastillas de papeles, etc.), utilizando un equipo Somerville, depurador de placas ranuradas con abertura de 0,15 mm. La pulpa obtenida, se centrifugó con el fin de reducir su contenido de humedad, y luego se guardó en ambiente refrigerado.

El proceso se realizó en forma individual para cada material de estudio.

III.1.2. ASERRÍN DE MADERA

El diagrama de flujo del proceso de acondicionamiento de los aserrines de madera, se ilustra en la Figura III.2.

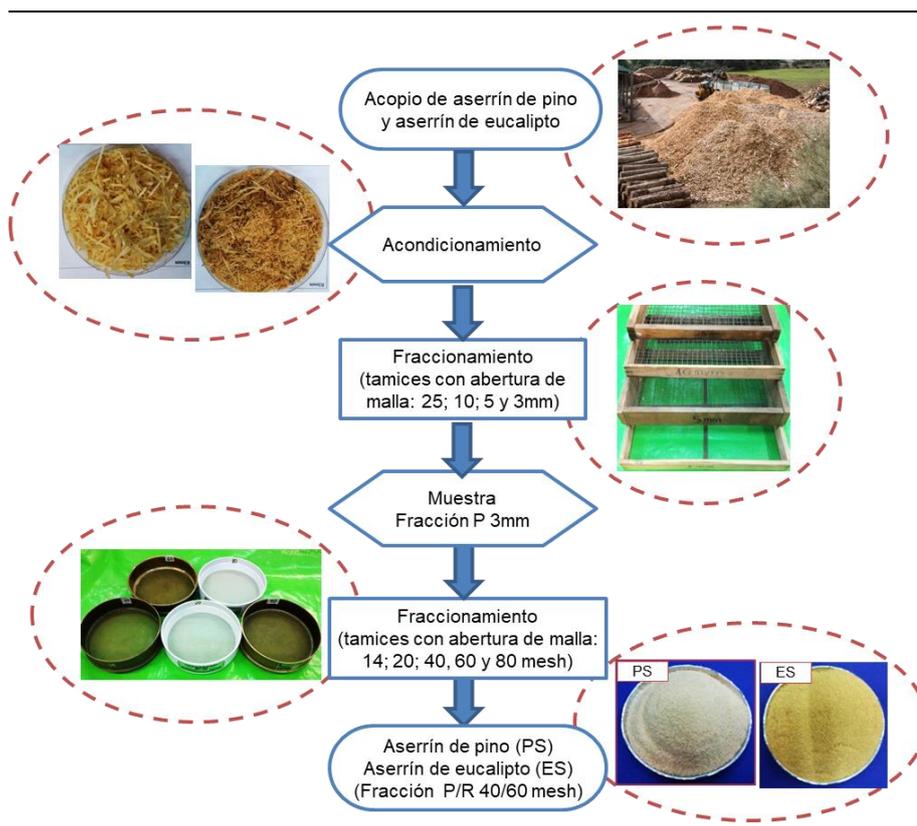


Figura III.2. Diagrama de flujo del proceso de acondicionamiento de aserrines

Se partió de residuos lignocelulósicos reciclados, aserrín de madera de *Pinus elliottii* (PS) y aserrín de madera de *Eucalyptus grandis* (ES), productos de la generación de residuos industriales de la transformación primaria de la madera (aserríos) en la provincia de Misiones.

Las muestras de PS se recolectaron de un aserradero local y las muestras de ES de un aserradero ubicado en la localidad de Aristóbulo del Valle. El material recolectado se secó al aire hasta alcanzar una humedad de equilibrio de entre 10-12%. Una vez acondicionado, se caracterizó físicamente para conocer la distribución por tamaño de partícula. En primer lugar, se realizó un fraccionamiento grueso, utilizando tamices de malla cuadrada con aberturas de: 25; 10; 5 y 3 mm. Con dicho fraccionamiento se eliminó el material de descarte (recortes de madera, chips, cortezas, virutas, astillas, materiales metálicos) y se logró una muestra granulométricamente homogénea. Posteriormente, de la fracción P 3 mm, se tomó una muestra de 2 kg, utilizando el método de cuarteo sucesivo y, a partir de la misma se realizó el fraccionamiento utilizando tamices normalizados con abertura de malla de: 14; 20; 40; 60 y 80 mesh, según norma ASTM E11-95 “Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes” (“ASTM International,” 1995). Se tomó el peso total y los pesos retenidos de cada fracción tamizada, para determinar los valores de porcentaje retenido en cada tamiz, y de este modo, visualizar la tendencia homogénea o heterogénea del tamaño de partícula. La distribución por tamaño de partícula obtenida, se detalla en la Tabla III.1.

Tabla III.1. Distribución por tamaño de partícula

Fracción	Aserrín de pino (% _{smi})	Aserrín de eucalipto (% _{smi})
Inicial	100	100
R 25 mm	3,52	0
R 10 mm	0,14	0
R 5 mm	4,05	0
R 3 mm	18,7	1,58
P 3 mm	73,6	98,4
Inicial	100	100
R 14 mesh	14,8	1,20
R 20 mesh	17,3	4,80
R 40 mesh	36,6	37,3
R 60 mesh	20,0	33,9
R 80 mesh	6,00	12,4
P 80 mesh	5,35	10,5

Finalizado el proceso de tamizado, a partir de pulpas secundarias en mezclas con partículas de aserrín (fracción R14, R20, R40 y R60 mesh), en una relación 60/40, se elaboraron hojas de laboratorio de 150 g/m² de gramaje, según norma TAPPI T 205 sp-95 “Forming handsheets for physical tests of pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Luego, se tomaron microfotografías de dichas hojas, utilizando un microscopio electrónico con objetivo 4x, con luz incidente; y a partir de las mismas se evaluó la capacidad de distribución de las partículas en la matriz y

la capacidad de interacción fibra-partícula. Ejemplos de microfotografías de hojas elaboradas con mezclas ONP/PS, se ilustran en la Figura III.3.

A partir de la distribución por tamaño de partícula y de la evaluación de las microfotografías, se seleccionó aquella fracción de partícula que, permitió un mayor aprovechamiento del residuo, con una óptima formación e interacción fibra-partícula: fracción P/R 40/60 mesh.

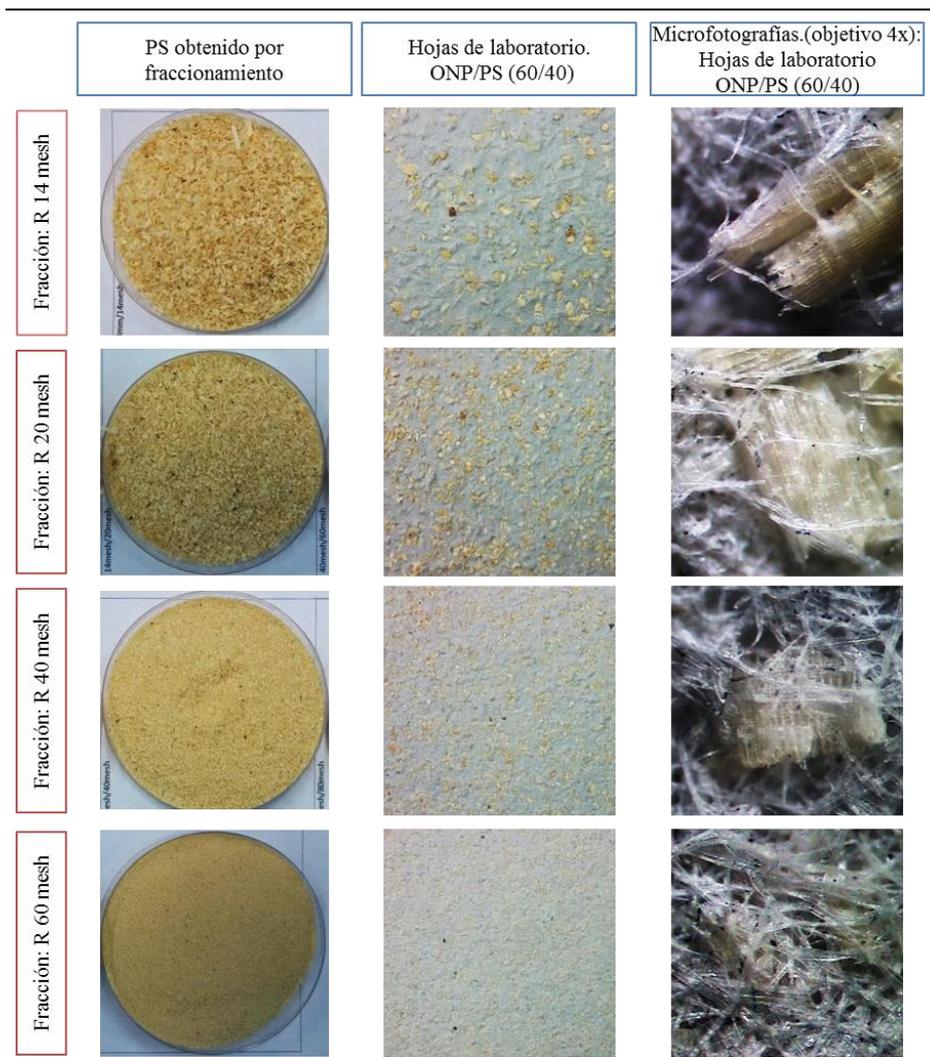


Figura III.3. Microfotografías de hojas de laboratorio a base de mezclas de ONP/PS

III.1.3. BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

El diagrama de flujo del proceso de obtención de bagazo, se ilustra en la Figura III.4.

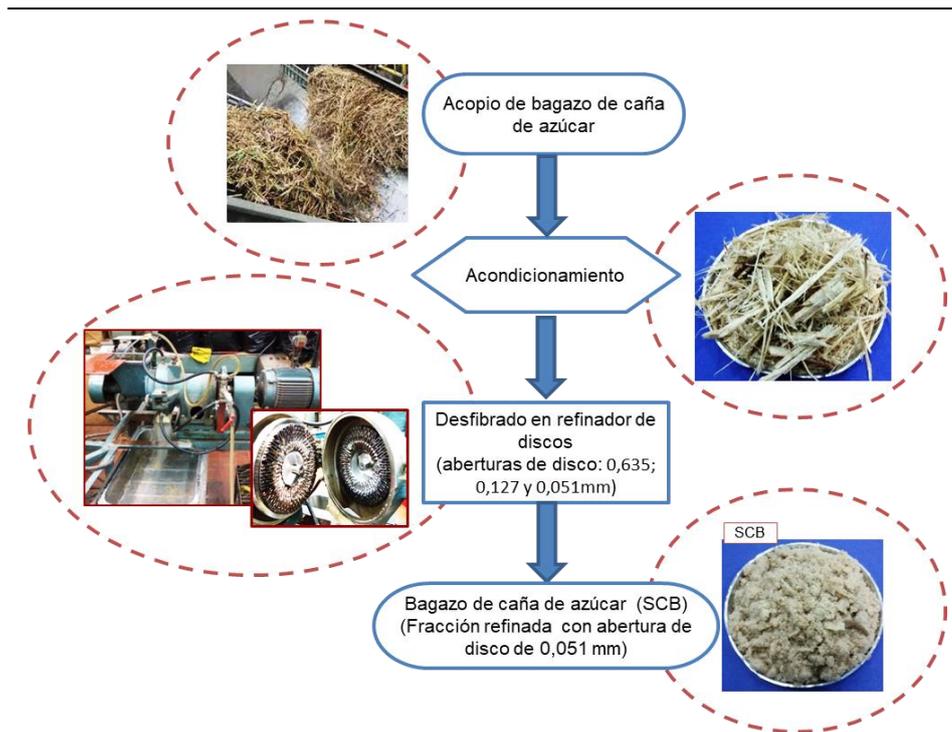


Figura III.4. Diagrama de flujo del proceso de obtención de bagazo de caña de azúcar

Se seleccionó como materia prima de trabajo, bagazo de caña de azúcar (SCB), residuo generado por la industria azucarera durante el procesamiento de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), en la provincia de Misiones.

Las muestras de bagazo se recolectaron de un ingenio azucarero ubicado en la localidad de San Javier. El material se secó al aire hasta alcanzar una humedad de equilibrio de entre 10-12%. Una vez acondicionado, el bagazo, sin desmedular, se desintegró mecánicamente en un refinador de disco, utilizando un disco de 20,32 cm de diámetro. Se utilizaron tres etapas sucesivas de desfibrado, con aberturas de disco de: 0,635; 0,127 y 0,051 mm; con un caudal de 5 L/min. Posteriormente, el material obtenido, se centrifugó, con el fin de reducir su contenido de humedad, y se guardó en ambiente refrigerado con el fin de evitar su descomposición.

Se estimó la relación fibra/médula, a partir de la clasificación por longitud de fibra de una muestra representativa de la fracción de SCB con abertura de disco de 0,051 mm, siguiendo la norma TAPPI T 233 cm-95 "Fiber length of pulp by classification" (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001), utilizando el equipo clasificador Bauer-McNett con tamices de abertura de malla de 30; 50; 100 y 200 mesh. Los resultados en porcentaje en peso obtenidos por clasificación se detallan en la Tabla III.2.

Tabla III.2. Clasificación por longitud de fibras de SCB

Fracción (mesh)	% en peso
R 30	20,7
R 50	25,2
R 100	24,6
R 200	7,18
P 200	22,3

Se consideró como médula la fracción P/R 200 mesh, obteniéndose fibra y médula en una relación aproximada de 70/30%, valores comparables con los encontrados por la bibliografía (Vargas-Radillo et al., 2015).

Finalizado el proceso de desfibrado, a partir de pulpas secundarias en mezcla con bagazo de caña de azúcar desfibrado (fracciones refinadas con abertura de discos de 0,127 y 0,051 mm), en relación 60/40, se elaboraron hojas de laboratorio de 150 g/m² de gramaje, según norma TAPPI T 205 sp-95 “Forming handsheets for physical tests of pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Luego, se tomaron microfotografías de dichas hojas, utilizando un microscopio electrónico con objetivo 4x, con luz incidente; y a partir de las mismas se evaluó la capacidad de distribución del bagazo desfibrado en la matriz y la capacidad de interacción entre ambos materiales. Ejemplos de microfotografías de hojas elaboradas con mezclas ONP/SCB, se ilustran en la Figura III.5.

A partir de la evaluación de las microfotografías, se seleccionó aquella fracción de SCB que permitió una óptima formación e interacción entre pulpas secundarias y SCB, fracción refinada con abertura de disco de 0,051 mm.

**Figura III.5.** Microfotografías de hojas de laboratorio a base de mezclas de ONP/SCB

III.2. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

III.2.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

El diagrama de flujo del procedimiento de caracterización química de las materias primas de estudio se ilustra en la Figura III.6.

Las determinaciones se realizaron para cada muestra por duplicado.

Los pesos se determinaron utilizando una balanza analítica de 0,1 mg de precisión.

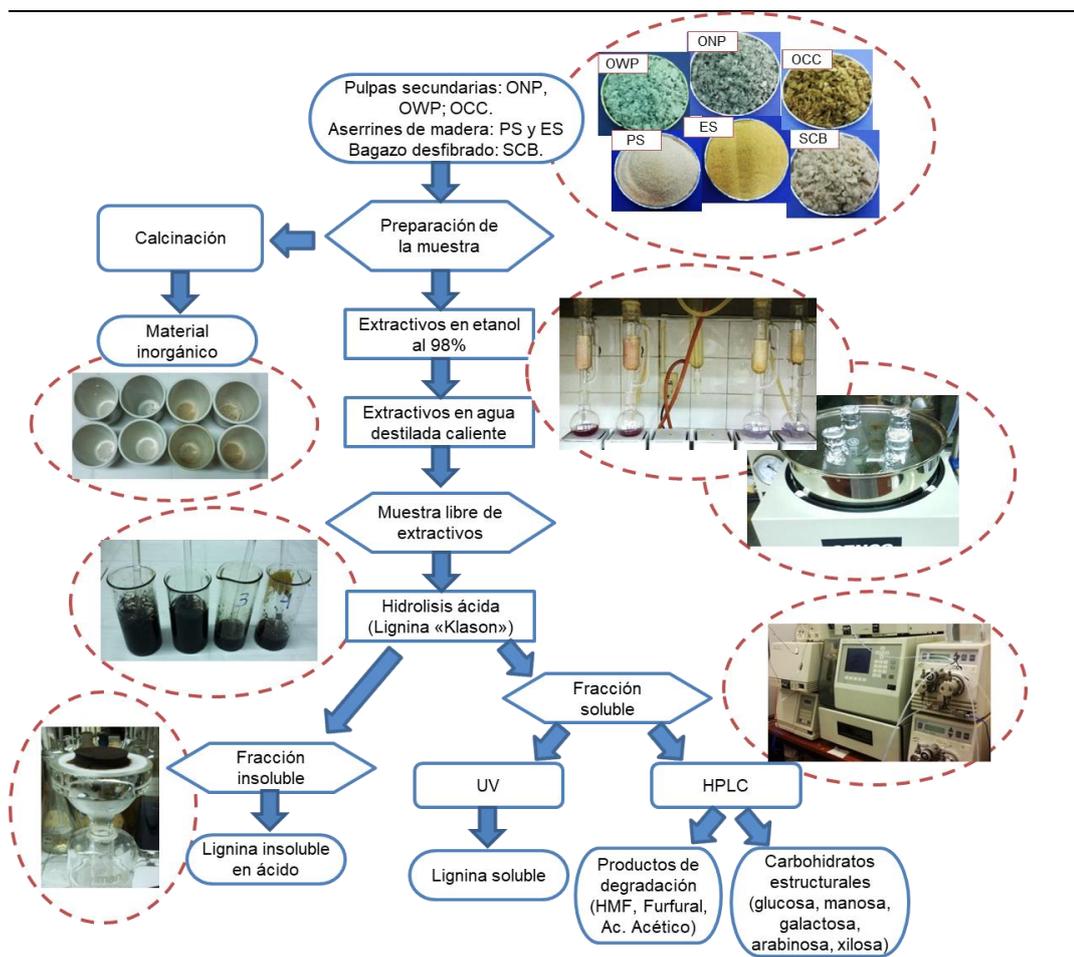


Figura III.6. Diagrama de flujo del procedimiento de caracterización química

III.2.1.1. Preparación de la muestra

Se seleccionó una muestra representativa de cada material. En el caso de ONP, OWP, OCC y SCB, la muestra se dejó secar al aire libre y, posteriormente se desintegró en un molino tipo Wiley para pasar una malla de abertura 20 mesh. En el caso de PS y ES, las muestras corresponden a la fracción P/R 40/60 mesh, por lo cual no fue necesario aplicar un tratamiento mecánico de reducción de tamaño. Cada

muestra se guardó en un recipiente hermético. Luego, se determinó la humedad de equilibrio de las muestras de ensayo. Para ello, se pesó un pesa filtro, limpio y seco, se cargó con una porción representativa de muestra, se pesó y se llevó a estufa a (105 ± 3) °C de temperatura hasta peso constante. A partir de los resultados obtenidos se determinó el contenido de humedad porcentual de cada muestra (Ecuación III.1).

$$\text{Humedad, \%} = \frac{\text{Peso muestra}_{\text{humeda}} - \text{Peso muestra}_{\text{seca}}}{\text{Peso muestra}_{\text{humeda}}} * 100 \quad \text{Ecuación III.1.}$$

III.2.1.2. Determinación del contenido de cenizas

El contenido de cenizas de las muestras de estudio, previamente acondicionadas, se determinó por combustión a 525 °C, según norma TAPPI T 211 om-93 “Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). A partir de los datos obtenidos, se determinó el contenido de cenizas, (Ecuación III.2).

$$\text{Cenizas, \%}_{\text{sbs}} = \frac{\text{Peso de ceniza (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación III.2.}$$

III.2.1.3. Determinación del contenido de extractivos

Extraíbles solubles en etanol

El contenido de extractivos en etanol de las muestras de estudio, previamente acondicionadas, se determinó según norma TAPPI T 204 cm-97 “Solvent extractives of wood and pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Dicha extracción, permite extraer de la muestra, todas las sustancias de baja polaridad como resinas, ácidos grasos, hidrocarburos, parte de taninos, etc. Como solvente se utilizó etanol al 98%. A partir de los datos obtenidos, se determinó el contenido de extraíbles en etanol, (Ecuación III.3).

$$\text{Extraíbles en etanol, \%}_{\text{sbs}} = \frac{\text{Peso seco del extracto (g)}}{\text{Peso inicial de la muestra (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación III.3.}$$

Extraíbles solubles en agua caliente

A partir de las muestras libres de extractivos en etanol, se determinó el contenido de extractivos en agua caliente, según norma TAPPI T 207 cm-99 “Water solubility of wood and pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Dicha extracción, permite extraer de cada muestra todos los extractivos que no fueron

solubles en la etapa anterior. A partir de los datos obtenidos, se determinó el contenido de extraíbles en agua caliente, (Ecuación III.4).

$$\text{Extraíbles en agua caliente, \%}_{sbs} = \frac{\text{Peso seco del extracto (g)}}{\text{Peso inicial de la muestra (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación III.4.}$$

III.2.1.4. Determinación del contenido de lignina

Contenido de lignina insoluble en ácido

El contenido de lignina insoluble se determinó tomando como base la norma TAPPI T 222 om-98 "Acid-insoluble lignin in wood and pulp" (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). En dicho método, la lignina, comúnmente conocida como "lignina Klason", se define como un componente de madera o pulpa insoluble en ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 72%.

Se partió de una muestra exenta de extractivos, secada a 50 °C, equivalente a 10 g en el caso de ONP, OWP, OCC y SCB y, equivalente a 5 g en el caso de PS y ES. Se tomó un vaso de precipitado de 100 mL, se taró y se cargó con la muestra de ensayo. En el caso de, ONP, OWP, OCC y SCB, se pesó (2,0±0,1) g y en el caso de PS y ES, se pesó (1,0±0,1) g peso seco. Luego, se añadió, gradualmente, 10 mL de H₂SO₄ al 72%, y conjuntamente se agitó y maceró el material con una varilla de vidrio para asegurar la dispersión. Se dejó reposar la mezcla durante 2 h, revolviendo el material con frecuencia para asegurar la disolución completa. Transcurridas las 2 h, se transfirió el material del vaso de precipitado a un Erlenmeyer de 400 mL, previamente tarado, y se añadió agua destilada para diluir hasta una concentración del 3% de H₂SO₄. Luego, se llevó a digestión, en autoclave, por 1 h a 124 °C de temperatura y 1 atm de presión. Finalizada la digestión, se dejó reposar el material insoluble, manteniendo el Erlenmeyer en posición inclinada. Una vez que decantó la lignina, sin agitar el precipitado, se procedió a filtrar la solución mediante filtración al vacío. Finalizado el filtrado, se recolectó el líquido residual, y reservó para determinar el contenido de lignina soluble. La lignina retenida en el papel de filtro, se lavó con agua destilada para eliminar el ácido remanente; y luego, se transfirió a un crisol, previamente tarado, se pesó y se llevó a estufa a (105±3) °C hasta pesaje constante. Posteriormente, el crisol con la lignina insoluble se llevó a mufla a una temperatura de (525±25) °C por 1 h. Finalizada la ignición, se retiró el crisol de la mufla y se colocó en un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente, luego se

pesó. A partir de los datos obtenidos, se determinó el contenido de lignina insoluble corregida por cenizas, (Ecuación III.5).

$$\text{Lignina insoluble corregida por cenizas, } \%_{sbs} = \frac{\text{Peso de lignina insoluble (g)} - \text{Peso cenizas (g)}}{\text{Peso inicial de la muestra (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación III.5.}$$

Lignina soluble

El contenido de lignina soluble en ácido, se determinó tomando como base la norma TAPPI UM 250 “Acid-soluble lignin in wood and pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1991).

A partir del líquido residual del filtrado de la lignina insoluble, se determinó el contenido de lignina soluble en ácido por espectrofotometría a 205 nm. Se midió la absorción de la muestra utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Shimadzu, modelo UV-1800), con una longitud de onda de 205 nm utilizando cubetas con paso de luz de 10 mm. Como solución de referencia se utilizó H₂SO₄ al 3% con dilución 1:10. Las muestras se diluyeron con H₂SO₄ al 3%, para obtener un valor de absorbancia en un intervalo de 0,2 a 0,7: diluciones 1:10 para ONP, OWP, SCB y ES, y diluciones 1:5 para OCC y PS. A partir de los datos obtenidos, se determinó el contenido de lignina soluble, (Ecuación III.6).

$$\text{Lignina soluble, } \%_{sbs} = \frac{\text{Peso de lignina soluble (g)}}{\text{Peso inicial de la muestra (g)}} * 100 \quad \text{Ecuación III.6.}$$

Lignina total

El contenido de lignina total de cada muestra se determinó por la Ecuación III.7.

$$\text{Lignina total, } \%_{sbs} = \begin{aligned} & \text{Lignina insoluble corregida por cenizas } (\%_{sbs}) \\ & + \text{Lignina soluble } (\%_{sbs}) \end{aligned} \quad \text{Ecuación III.7.}$$

III.2.1.5. Determinación de carbohidratos

El contenido de carbohidratos, se determinó tomando como base los procedimientos analíticos de laboratorio LAP NREL/TP-510-42618 “Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass” (Sluiter et al., 2012).

Teniendo en cuenta que los carbohidratos se hidrolizan y solubilizan con H₂SO₄, la determinación de los azúcares, ácidos orgánicos y productos de degradación (Furfural y HMF) en los extractos líquidos obtenidos por el proceso de hidrólisis ácida, se realizó mediante cromatografía líquida HPLC (Waters Corp. Massachusetts,

USA), equipado con un inyector automático, utilizando una columna AMINEX-HPX87H (BIO-RAD) y las siguientes condiciones cromatográficas: fase móvil de H_2SO_4 4 mM; flujo de 0,6 mL/min; 35°C de temperatura; detector de Índice de refracción y Arreglo de diodos. Conociendo las proporciones de los azúcares, ácidos orgánicos y productos de degradación presentes en cada muestra, se cuantificó el contenido final de carbohidratos (Ecuación III.8).

$$\begin{aligned} \text{Carbohidratos, \%}_{sbs} = & \\ \text{Celulosa}(\%_{sbs}) + \text{Hemicelulosas}(\%_{sbs}) = & \\ [\text{Celobiosa}(\%_{sbs}) * 0,95 + \text{Glucosa}(\%_{sbs}) * 0,90 + \text{HMF}(\%_{sbs}) * 1,28] + & \\ [\text{Xilosa}(\%_{sbs}) * 0,88 + \text{Ac. Acético}(\%_{sbs}) * 0,72 + \text{Furfural}(\%_{sbs}) * 1,37] & \end{aligned} \quad \text{Ecuación III.8.}$$

III.2.2. EVALUACIÓN DE DIMENSIONES MORFOLÓGICAS

El diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de las dimensiones morfológicas de pulpas secundarias se ilustra en la Figura III.7.

Las determinaciones se realizaron para cada muestra por duplicado.

Los pesos se determinaron utilizando una balanza analítica de precisión de 0,01 g.

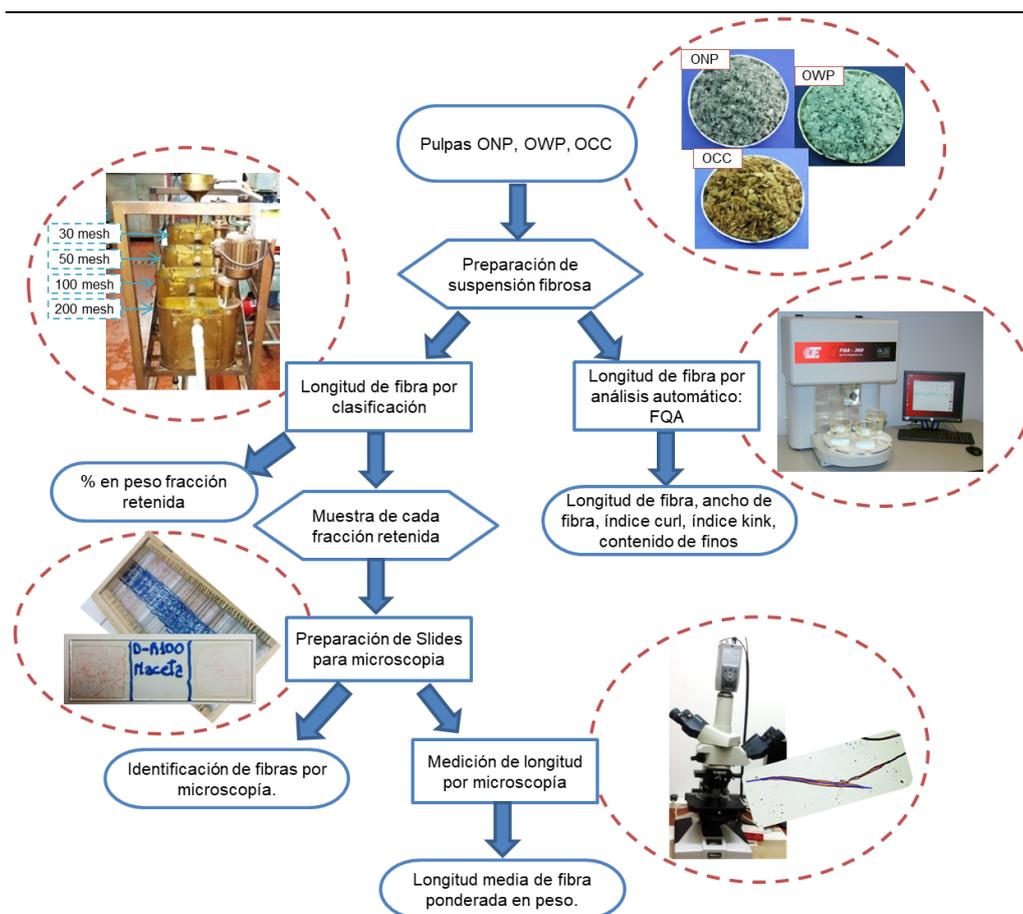


Figura III.7. Diagrama de flujo de evaluación de dimensiones morfológicas

III.2.2.1. Longitud de fibra por clasificación

Para la clasificación de fibras (Gooding & Olson, 2001; Levlin & Söderhjelm, 2000; Sixta, 2006), se utilizan técnicas estándar de laboratorio, que consisten en el uso de equipos de clasificación, que permiten separar selectivamente el porcentaje de fibras, de una determinada muestra de pulpa, según sus longitudes, de manera que mediante el peso y longitud de cada fracción, se pueda determinar su composición. La metodología consiste en hacer circular un volumen conocido de pulpa por tamices de ranuras de tamaño decreciente, por un tiempo estipulado. Las fibras son retenidas en función a su longitud (de mayor a menor longitud), y el contenido de finos se corresponde al material que pasa a través del tamiz de menor abertura.

Para el desarrollo del trabajo, la longitud de fibras de pulpas de ONP, OWP y OCC, se determinó según norma TAPPI T233 cm-95 “Fiber length of pulp by classification” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Se utilizó un equipo clasificador “Bauer Mac Nett”; con tamices estándar de tamaños de malla decreciente de, 30, 50, 100 y 200 mesh. Las fibras de mayor longitud corresponden a la fracción retenida en malla 30 mesh y los finos corresponden al material que pasa la malla 200 mesh.

El porcentaje en peso de fibra retenida en cada compartimento, se determinó considerando los valores de peso seco obtenidos, según la Ecuación III.9.

$$\text{Peso de fibra retenida por malla, \%} = \frac{\text{Peso seco de fibra retenida por malla (g)}}{\text{Peso seco inicial de fibra (g)}} * 100\% \quad \text{Ecuación III.9.}$$

III.2.2.2. Longitud de fibra por microscopía

Mediante microscopía óptica (Levlin & Söderhjelm, 2000; Pulkkinen et al., 2006; Sixta, 2006), se puede medir la longitud individual de cada fibra.

Para el desarrollo del trabajo, a partir de las muestras de fibras obtenidas por clasificación, se prepararon slides para microscopía. Para ello, se tomó una pequeña porción de muestra, se colocó en un tubo de ensayo y se añadió agua destilada en cantidad adecuada para hacer una dilución tal, que contuviera aproximadamente 200 fibras. Con la suspensión en agitación, se tomó una alícuota de la misma; se pasó una fracción de 1 mL a un portaobjeto previamente acondicionado (Nuñez, 2008a), y se secó en estufa a 50°C. Luego, se tiñó in vitro con safranina, se enjuagó con agua

destilada, y se secó en estufa a 50°C. Posteriormente, se agregó una pequeña cantidad de glicerina y sobre esta se colocó un cubreobjetos.

Luego, se procedió a evaluar los parámetros mediante análisis matemático de imágenes, utilizando para ello un analizador de imagen con un software marca “Leica QWin”. Se realizaron mediciones de fibras individuales, 80 fibras por fracción, para cada tipo de pulpa. Para las mediciones, se consideró como longitud de fibra, la distancia medida por el eje longitudinal entre un extremo y otro de la fibra.

A partir de los valores de peso seco de cada fracción, obtenidos por clasificación y, los valores de longitud media de cada fracción, obtenidos por microscopía, se determinó la longitud promedio ponderada por peso de las pulpas de estudio, mediante la Ecuación III.10.

$$\text{Longitud de fibra media ponderada en peso, mm} = \frac{\sum_{i=1}^5 (\text{Longitud media de fibra retenida}_i * \text{Peso de fibra retenida}_i)}{\text{Peso seco de muestra inicial (g)}} \quad \text{Ecuación III.10.}$$

III.2.2.3. Identificación de fibras por microscopía

Cada especie vegetal se compone de células muy específicas, por lo cual, el origen vegetal de una pulpa puede revelarse a partir de la identificación de las fibras procedentes de las células del tejido vegetal (Sixta, 2006). Para poder visualizar los detalles morfológicos y caracterizar la estructura de una fibra se pueden aplicar diferentes métodos y técnicas, como por ejemplo: microscopía óptica, microscopía electrónica, técnicas de tinción diferencial, contraste óptico, aplicación de reactivos de hinchamiento, entre otras (Sixta, 2006). Utilizando microscopía óptica normal se pueden observar las características morfológicas más importantes de las fibras y, con ayuda de un atlas de fibras, identificar el tipo de elemento celular y la fuente de origen. Utilizando reactivos de hinchamiento suaves, la pared celular se hincha, sus fibrillas se separan cada vez más y se hacen discernibles, mejorando la observación de la morfología de las paredes de las fibras. El tipo de pulpado que dio origen a una pulpa, se puede revelar a partir de la identificación de la composición química de las fibras. Los procesos de pulpado cambian la composición química y la estructura de la pared de las fibras, lo cual hace que estas sean característicamente diferentes en el tratamiento con ciertos reactivos de tinción (Levlin & Söderhjelm, 2000), como por ejemplo, los reactivos yoduro-yoduro (de uso común los reactivos de Hertzberg y

Graff) manchan las paredes celulósicas de color azul a violeta y las paredes incrustadas de lignina de amarillo.

Para el desarrollo del trabajo, a partir de los slides previamente preparados (III.2.2.2), se tomaron microfotografías de las muestras obtenidas por clasificación, utilizando un analizador de imagen con un software marca “Leica QWin”, con el fin de observar las características morfológicas de las fibras, identificando, fibras integra, haces fibrosos, cintas, finos fibrilares, finos harinosos, otros.

III.2.2.4. Longitud de fibra por análisis automático

Se dispone de varios métodos ópticos automatizados (Carvalho et al., 1997; Levlin & Söderhjelm, 2000; Pulkkinen et al., 2006; Robertson et al., 1999; Sixta, 2006), para medir la longitud de la fibra. Son métodos, más rápido y menos tedioso que los métodos por microscopía, que permiten conocer la distribución de la longitud de las fibras, sin necesidad de una clasificación previa. Su funcionamiento se basa en permitir el paso de un flujo de suspensión de pulpa diluido a través de una cubeta. Una fuente de luz ilumina el flujo para la detección de fibras con una cámara, capturan la imagen de la fibra, y mediante la técnica de análisis de imágenes proporciona los valores característicos para las fibras.

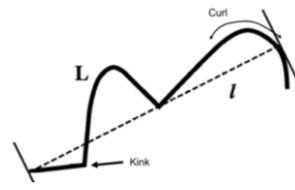
Para el desarrollo del trabajo se utilizó un dispositivo de medición de fibra óptica, Fiber quality analyzer (FQA), el cual detecta deformaciones de fibra. La unidad utiliza una cámara de dispositivo de carga acoplada (CCD) y una fuente de luz polarizada.

A partir de las pulpas previamente acondicionadas, utilizando un analizador de imagen automático “Fiber quality analyzer” (OpTest Equipment Inc., FQA-360, Code LDA12), se determinó los valores de distribución de la longitud media de la fibra, ancho de fibra, Curl, Kink y contenido de finos de cada muestra de estudio.

Las condiciones de análisis que se tuvieron en cuenta para los cálculos, se detallan en la Tabla III.3.

Tabla III.3. Condiciones de medición para analizador FQA.

Parámetro	Cálculo de Medición
Longitud ponderada, mm	$L_W = \frac{\sum n_i L_i^2}{\sum n_i L_i}$
Ancho de fibra, μm	Se informan con una precisión de 1 μm . El software utiliza una técnica de tramado que tiene en cuenta los tamaños de píxeles fraccionarios. La anchura de cada fibra se mide varias veces a lo largo de su longitud.
Índice Curl, %	$CI_{LW} = \frac{\sum CI_i L_i}{\sum L_i} * 100$
Kink, 1/m	$KI = \frac{2N_{(21-45)} + 3N_{(46-90)} + 4N_{(91-180)}}{L_T}$
Contenido de finos, %	$\%F = \frac{\sum n_i^*}{N} * 100$



Nota: L_i = longitud del contorno en la categoría "i-ésima"; n_i = conteo de fibra en la categoría "i-ésima"; CI_i = Índice curl en la categoría "i-ésima"; L_i = finos de la clase de longitud del punto medio; L_T = longitud total de la fibra; N = número total de fibras; n_i^* = N° de fibras <0,2 mm.
Fuente: Adaptado de (OpTest Equipment Inc., 2012)

III.2.3. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

El diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de propiedades físicas llevado a cabo se ilustra en la Figura III.8.

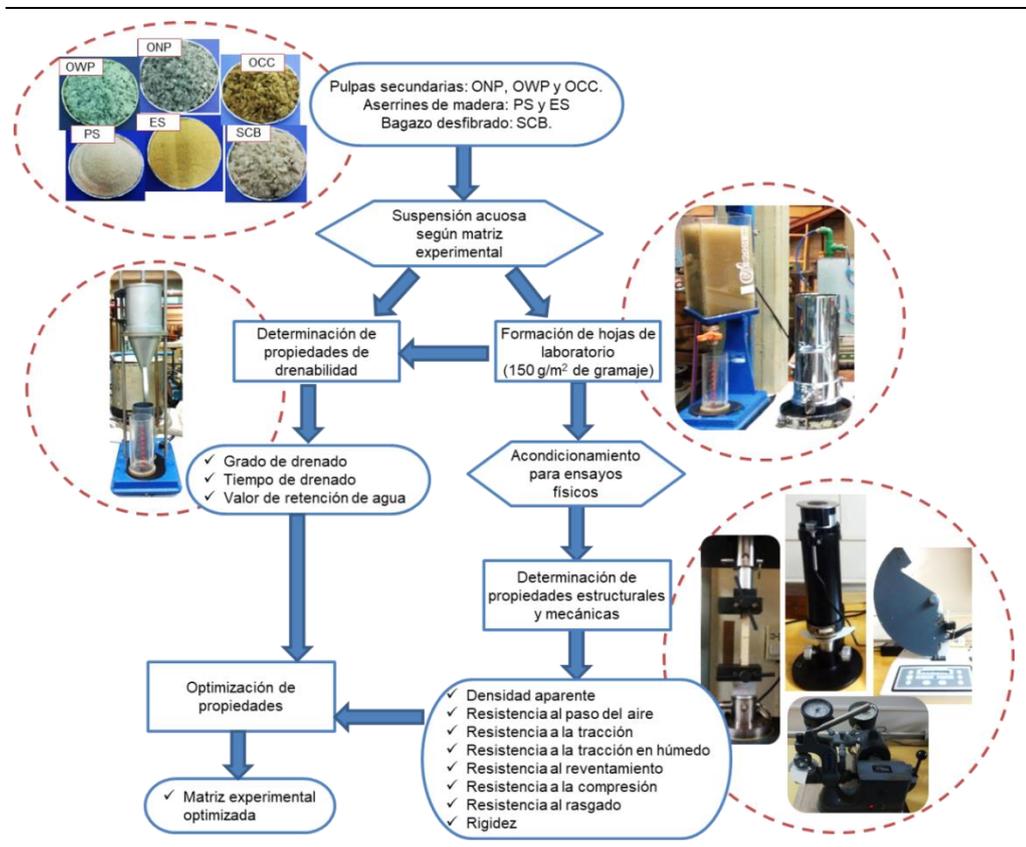


Figura III.8. Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de propiedades físicas.

Para evaluar los efectos de la combinación de los materiales lignocelulósicos de estudio, sobre las propiedades de drenabilidad (grado de drenado, capacidad de retención de agua, y tiempo de drenado) y las propiedades estructurales y mecánicas (gramaje, espesor, densidad aparente, resistencia al paso del aire, resistencia a la tracción, resistencia a la tracción en húmedo, resistencia al reventamiento, resistencia a la compresión, resistencia al rasgado, rigidez), se siguió un diseño experimental de mezclas y, las variables respuestas se optimizaron para seleccionar la combinación ideal que permita diseñar contenedores biodegradables aptos para el cultivo.

III.2.3.1. Diseño experimental de mezclas

El diseño experimental de mezclas (Montgomery, 2004), permite establecer combinaciones de las materias primas de estudio, y evaluar su comportamiento en base a las necesidades del producto. Para desarrollar materiales ajustados a ciertas propiedades, es imprescindible el uso de herramientas basadas en criterios de optimización de mezclas, la cual es una actividad sistemática que apunta a todas las mezclas de la matriz experimental (Ferrer, 2002; Montgomery, 2004), permitiendo seleccionar las materias primas y las proporciones entre éstas, que satisfagan los requerimientos técnicos específicos.

Para el desarrollo del trabajo se planeó un diseño experimental de tipo mezcla con un modelo de vértices extremos, utilizando un programa estadístico.

Se planteó una matriz experimental para cada material secundario utilizado, teniendo en cuenta las restricciones indicadas en la Tabla III.4.

Tabla III.4. Restricciones del diseño para cada matriz experimental

Nivel (%)		Componentes		
Bajo	Alto	Diseño I	Diseño II	Diseño III
0,0	100,0	ONP (X ₁)	ONP (X ₁)	ONP (X ₁)
0,0	100,0	OWP (X ₂)	OWP (X ₂)	OWP (X ₂)
0,0	100,0	OCC (X ₃)	OCC (X ₃)	OCC (X ₃)
0,0	40,0	PS (X ₄)	ES (X ₄)	SCB (X ₄)

Nota: $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 100 \%$

Cada matriz experimental (Tabla III.5), fue formada por 26 mezclas experimentales diferentes, constituida por 4 componentes: las materias primas base (ONP; OWP; OCC) y, un material secundario (PS; ES; SCB).

Tabla III.5. Matriz experimental base

N° de Mezcla	X ₁ (%)	X ₂ (%)	X ₃ (%)	X ₄ (%)
1	100,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	100,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	100,0	0,0
4	60,0	0,0	0,0	40,0
5	0,0	60,0	0,0	40,0
6	0,0	0,0	60,0	40,0
7	63,3333	13,3333	13,3333	10,0
8	13,3333	63,3333	13,3333	10,0
9	13,3333	13,3333	63,3333	10,0
10	43,3333	13,3333	13,3333	30,0
11	13,3333	43,3333	13,3333	30,0
12	13,3333	13,3333	43,3333	30,0
13	50,0	50,0	0,0	0,0
14	50,0	0,0	50,0	0,0
15	80,0	0,0	0,0	20,0
16	0,0	50,0	50,0	0,0
17	0,0	80,0	0,0	20,0
18	0,0	0,0	80,0	20,0
19	30,0	30,0	0,0	40,0
20	30,0	0,0	30,0	40,0
21	0,0	30,0	30,0	40,0
22	33,3333	33,3333	33,3333	0,0
23	40,0	40,0	0,0	20,0
24	40,0	0,0	40,0	20,0
25	0,0	40,0	40,0	20,0
26	20,0	20,0	20,0	40,0

A partir de las mezclas definidas en la matriz experimental base, previamente acondicionadas, se determinaron las propiedades de drenabilidad y las propiedades estructurales y mecánicas de las mismas.

Luego se optimizaron las variables respuestas con el fin de seleccionar una combinación ideal, para el diseño de contenedores aptos para el cultivo de plantas.

III.2.3.2. Propiedades de drenabilidad

Grado de drenabilidad

El proceso de caracterización, de las suspensiones de pulpa, en general involucra la medición de la resistencia al drenado, que se define como la resistencia de las fibras al flujo de agua (Smook, 1990d). Los métodos más comunes utilizados son el Canadian Standard Freeness (CSF) y Schopper-Riegler (SR) (Levlin & Söderhjelm, 2000). Ambos métodos son una medida relativa de la capacidad de drenado de una suspensión de pulpa; describen el procedimiento para determinar la velocidad a la cual el agua drena a través y desde una suspensión diluida de pulpa cuando se utiliza una tela metálica como malla de retención o tamiz. El número SR es directamente proporcional a la resistencia al drenado de la pulpa y el número CSF es inversamente

proporcional (Levlin & Söderhjelm, 2000). Las medidas de la capacidad de drenado, para el caso de pulpas mecánicas se usan como una indicación de la calidad y, para el caso de pulpas químicas como una medida del grado de refinado (Smook, 1990d).

Para el desarrollo del trabajo, el grado de drenabilidad de las diferentes mezclas experimentales, se determinó por norma ISO 5267/1-1979(E) “Pulps-Determination of drainability- Part 1: Scopper-Riegler method” (ISO, 1998).

Valor de retención de agua

El valor de retención de agua (WRV) es una medida empírica de la capacidad de un colchón de fibras para retener agua. El método describe la cantidad de agua que queda en una muestra de pulpa húmeda después de la centrifugación a un determinado valor de fuerza centrífuga (Levlin & Söderhjelm, 2000). Es la proporción de peso de agua y fibra seca. El valor de WRV se incrementa al aumentar el refinado debido a, la fibrilación interna, un ensanchamiento de los pequeños poros internos y delaminación, lo que comúnmente se llama hinchamiento que ocurre al mismo tiempo que la fibrilación externa. Aquellas pulpas que presentan un mayor grado de refinado, tendrán una mayor capacidad de retener agua, y por lo tanto, una menor capacidad para drenar el agua. A mayor WRV, mayor captación de agua, y mayor capacidad de formar enlace fibra-fibra una vez que el producto se seca, y por lo tanto, mayores propiedades de resistencia.

Para el desarrollo del trabajo, el valor de WRV de las diferentes mezclas experimentales, se determinó tomando como base la norma ISO/DIS 23714 “Pulps-Determination of water retention value”.

Se seleccionaron las materias primas correspondientes a cada mezcla experimental y, se tomaron 24 g peso seco de cada mezcla. La muestra se desintegró en un desintegrador estándar al 1,2% de consistencia, a 3000 rpm, durante 4 min. Luego se diluyó la suspensión hasta alcanzar una concentración de 5 g/L. Se agitó la suspensión y se tomó 1000 mL de muestra, la cual se filtró en una formadora de hoja, con el fin de formar un colchón de fibras con un contenido de pulpa seca entre 5% y 15%. Finalizado el filtrado, inmediatamente, se tomó una muestra representativa del colchón de fibras y se colocó en un receptáculo de testeo (tubos especiales para centrifugación, que contienen en su fondo una malla de 100 mesh por donde escurre el agua). Se colocó la unidad de testeo dentro de las cubetas de una centrífuga y se

procedió a centrifugar a una velocidad equivalente a una fuerza centrífuga de (3000 ± 50) g en la parte inferior del colchón de fibra, por un tiempo de $(15 \text{ min}\pm 30\text{s})$. Finalizada la centrifugación, inmediatamente se transfirió el colchón de fibras a un pesa filtro de peso conocido, se determinó el peso húmedo, y se llevó a estufa a (105 ± 3) °C hasta pesaje constante. A partir de los resultados obtenidos se calculó el valor de retención de agua (Ecuación III.11).

$$\text{WRV, g/g} = \frac{\text{Peso fibras húmedas después de centrifugación (g)}}{\text{Peso fibras secas después de centrifugación(g)}} - 1 \quad \text{Ecuación III.11}$$

Tiempo de drenado

El tiempo de drenado es una indicación relativa de la drenabilidad (Smook, 1990d). Se determina durante la formación de la hoja de laboratorio; es el tiempo en segundos que tarda en drenar un determinado volumen de suspensión a través de la malla del equipo formador de hoja (Smook, 1990d). Depende en gran medida de las condiciones de formación que se tienen durante la medición, tales como la diferencia de presión creada por el drenaje, la densidad de la capa de fibra en la malla y, las propiedades de las fibras incluyendo longitud, flexibilidad y grado de hinchamiento (Levlin & Söderhjelm, 2000).

Para el desarrollo del trabajo, el tiempo de drenado de las diferentes mezclas experimentales, se determinó por norma TAPPI T 221 cm-99 “Drainage time of pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001).

III.2.3.3. Propiedades estructurales y mecánicas

Formación de hojas de laboratorio para ensayos físicos

La formación de hojas de laboratorio para ensayos físicos, a partir de las diferentes mezclas experimentales, se realizó por norma TAPPI T 205 sp-95 “Forming handsheets for physical tests of pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001).

Debido a que las materias primas están destinadas a la fabricación de moldeados, se formaron hojas de laboratorio de 150 g/m^2 de gramaje.

En aquellos puntos, cuya composición contiene cierta proporción de aserrín, luego del pesaje, se procedió a hidratar el aserrín en agua a una temperatura de 55 °C por

30 min, para que el agua llene los poros de la madera provocando el hundimiento de las partículas y con ello una mejora distribución en la suspensión fibrosa.

Acondicionamiento de hojas para ensayos físicos

Las hojas previamente formadas se acondicionaron tomando como base la norma TAPPI T 402 sp-98 “Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001).

El contenido de humedad en la hoja influye en casi todas las propiedades estructurales y mecánicas. Las hojas son naturalmente higroscópicas, absorben fácilmente la humedad de la atmósfera ambiente o, liberan humedad si la atmósfera es más seca que la correspondiente al contenido de humedad de equilibrio de la hoja.

Las hojas de laboratorio previamente formadas se pre-acondicionaron a una atmósfera de 35% de HR y 40 °C de temperatura, durante 4 h. Posteriormente, se acondicionaron a una atmósfera de (50±2)% de HR y (23±1) °C de temperatura, por un periodo de 4 h.

Gramaje o peso base

El gramaje o peso base se define como la masa por unidad de superficie de una hoja, normalmente expresada en g/m². Es una de las características más influyentes tanto en las propiedades mecánicas de los papeles como en su incidencia económica.

Para el desarrollo del trabajo, el gramaje de las hojas formadas y acondicionadas, se determinó por norma TAPPI T 410 om-98 “Grammage of paper and paperboard” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001).

A partir de los resultados obtenidos se calculó el gramaje (Ecuación III.12).

$$\text{Gramaje, g/m}^2 = \frac{\text{Peso de la probeta (g)}}{\text{Área de la probeta (cm}^2)} * \frac{10.000 \text{ (cm}^2)}{1 \text{ (m}^2)} \quad \text{Ecuación III.12.}$$

Espesor

El espesor se define como la distancia entre las caras de una hoja, expresadas en μm. Las condiciones ambientales tienen gran influencia; su valor puede llegar a aumentar hasta un 15% si se mide en una atmósfera muy húmeda en comparación a una atmósfera muy seca, dependiendo de la composición fibrosa y el grado de refinado de la pulpa; por ello, las mediciones deben efectuarse sobre probetas previamente

acondicionadas. La rugosidad de la hoja afecta las medidas del espesor; a pesar de que las medidas se realizan bajo una presión determinada, a medida que aumenta la rugosidad aumenta la imprecisión en su determinación. Si cualquier lectura es superior al 5% sobre las demás, se debe realizar una medición en un punto adyacente para determinar si dicha lectura es causada por astillas, motas, materiales extraños o haces fibrosos. La superficie del cabezal de contacto influye sobre las medidas del espesor; a mayor diámetro de la pieza de contacto del micrómetro aumenta el valor del espesor. También influye en la medición el tiempo de compresión; a mayor tiempo de contacto disminuye ligeramente el valor del espesor, por lo cual es importante especificar el tiempo de ensayo. La presión entre las piezas de contacto durante la medida del espesor es muy importante; su influencia es tanto más importante cuanto menos denso sea el papel; a medida que la presión de contacto aumenta el espesor disminuye.

Para el desarrollo del trabajo, el espesor o calibre de las hojas formadas y acondicionadas, se determinó por norma TAPPI T 411 om-97 “Thickness of paper, paperboard, and combined board” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó un micrómetro digital (TMI Testing Machines Inc., modelo 549M). A partir de los resultados obtenidos se calculó el espesor (Ecuación III.13).

$$\text{Espesor, mm} = \frac{\sum \text{medidas registradas}}{\text{número de mediciones}} \quad \text{Ecuación III.13.}$$

Densidad aparente

La densidad aparente (ρ), se define como la masa por unidad de volumen, de una hoja, calculada como la relación entre el peso base y el espesor del material, expresada en kg/m^3 o en g/cm^3 . A partir del valor de densidad se pueden estimar otras propiedades como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y el coeficiente de dispersión de la luz. Su valor es un indicativo de la cantidad relativa de aire en la hoja que, a su vez, afecta las propiedades de resistencia y las propiedades ópticas.

Para el desarrollo del trabajo, la densidad aparente de cada hoja formada y acondicionada, se determinó matemáticamente (Ecuación III.14), a partir de los valores obtenidos de gramaje y espesor.

$$\text{Densidad aparente, kg/m}^3 = \frac{\text{Gramaje (g/m}^2\text{)}}{\text{Espesor (\mu m)}} * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000\text{g}} * \frac{1 \text{ }\mu\text{m}}{10^{-6}\text{m}} \right) \quad \text{Ecuación III.14.}$$

Volumen específico

El volumen específico, se define como la inversa de la densidad aparente de una hoja, expresado en m³/kg ó cm³/g. Da una buena indicación de la compactabilidad en húmedo de las fibras y el área de unión relativa de las mismas; es un indicativo de la facilidad de drenabilidad de una suspensión fibrosa; es la mejor base sobre la cual comparar las características de pulpas.

Para el desarrollo del trabajo, el volumen específico (Bulk) de cada hoja formada y acondicionada, se determinó matemáticamente (Ecuación III.15), a partir de los valores obtenidos de gramaje y espesor (o por su inversa, la densidad aparente).

$$\begin{aligned} \text{Volúmen específico, m}^3/\text{kg} \\ = \frac{\text{Espesor de la probeta (\mu m)}}{\text{Gramaje de la probeta (g/m}^2\text{)}} * \left(\frac{1000\text{g}}{1 \text{ kg}} * \frac{10^{-6}\text{m}}{1\mu\text{m}} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación III.15.}$$

División de las hojas para ensayos físicos

A partir de las hojas de ensayo previamente acondicionadas, se realizó la división de cada hoja, a fin de obtener las diferentes probetas correspondientes a cada ensayo, siguiendo los procedimientos de la norma TAPPI T-220 sp-96 “Physical testing of pulp handsheets” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001).

Resistencia al paso del aire

La estructura de una hoja de papel consta de una gran cantidad de huecos o poros más o menos interconectados, los cuales constituyen el volumen vacío del material. Las fibras que conforman la estructura de la hoja constituyen el volumen lleno del material. La porosidad o fracción de vacío “ε”, se define como la relación porcentual entre el volumen de huecos y el volumen total de un material. En general, se utiliza como un indicativo de la porosidad, la medida de permeabilidad al aire, la cual se mide utilizando instrumentos de fugas de aire.

Hay ciertos factores que influyen sobre los valores. A mayor contenido de humedad, las fibras se hinchan y los espacios interiores se reducen. A mayor longitud de fibra, mayor diámetro de fibra, y con ello mayor porosidad. Un mayor contenido de lignina aumenta la rigidez de fibra y con ello la porosidad; un mayor contenido de hemicelulosas, mejora la hidratación y facilita la plastificación de las fibras y con

ello disminuye la porosidad. A mayor refinado de la pulpa, menor fracción de vacío del papel. El calandrado afecta la estructura superficial de la hoja y el tamaño medio de los poros conectados con la superficie, disminuyendo la porosidad superficial.

Para el desarrollo del trabajo, la resistencia al paso del aire de cada probeta, se determinó por norma TAPPI T 460 om-96 “Air resistance of paper” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó un aparato resistencia al aire “Gurley” (Gurley Precision Instruments, Modelo N°4190). Se registró el tiempo necesario (con una precisión de 0,1 s), para que 100 mL de aire, atraviesen una sección circular de $6,4 \text{ cm}^2$ de la probeta.

Resistencia a la rotura por tracción

La resistencia a la rotura por tracción se define como la fuerza de tracción máxima, que una probeta de papel o cartón sometida a un esfuerzo creciente de tracción en cada extremo, bajo condiciones de ensayo normalizadas, puede soportar antes de que se rompa, resistencia límite denominada carga de rotura (kN/m). La deformación máxima que soporta la probeta hasta su punto de rotura, se define como alargamiento a la rotura; y el trabajo requerido para romper la tira, constituye la absorción de energía de tracción. Los dinamómetros modernos disponen de un sistema de registro, que permite obtener directamente una curva que relaciona la carga aplicada con el alargamiento, comúnmente denominada “curva de tensión-deformación” (Figura III.9), a partir de la cual se pueden calcular las propiedades de índice de tracción, alargamiento a la rotura, rigidez a la tracción y módulo de elasticidad.

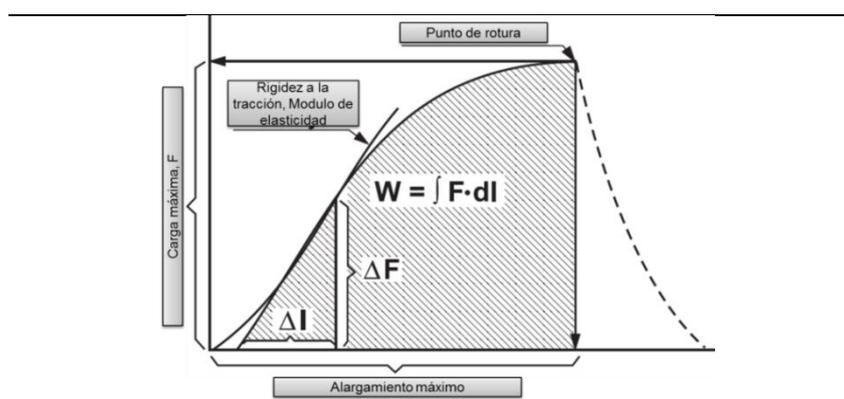


Figura III.9. Medición de las propiedades de resistencia a la tracción del papel.

Fuente: Adaptado de (Levlin & Söderhjelm, 2000)

Los valores dependen de la resistencia de la fibra y del grado de unión entre las mismas. Cuando el contenido de humedad de la hoja se incrementa, la resistencia a la

tracción decrece, y el alargamiento se incrementa, debido a que el agua debilita los enlaces interfibras al tiempo que aumenta la plasticidad de la fibra.

Para el desarrollo del trabajo, la resistencia a la tracción de cada probeta, se determinó por norma TAPPI T 494 om-88 “Tensile properties of paper and paperboard” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó un dinamómetro universal (Tensile and Compression Testing Machine, Adamel Lhomargy, Modelo Dy 32). Luego de la ruptura de la probeta, se registraron los valores de elongación y carga máxima de ruptura; y a partir de los mismos se determinó el índice de tracción (Ecuación III.16).

$$\text{Índice de tracción, (Nm/g)} = \frac{\text{Resistencia a la tracción}}{\text{Gramaje}} \quad \text{Ecuación III.16.}$$

Resistencia a la tracción en húmedo

La resistencia a la tracción en húmedo se define como la fuerza de tracción máxima que una probeta de papel o cartón, previamente saturada con agua, sometida a un esfuerzo creciente de tracción bajo condiciones de ensayo normalizadas, puede soportar antes de romperse. Es una propiedad importante para aquellos papeles o cartones que serán sometidos a estrés durante su uso, mientras están humedecidos.

Para el desarrollo del trabajo, la resistencia a la tracción en húmedo de cada probeta, se determinó por norma ISO 3781-1983 (E) “Paper and board - Determination of tensile strength after immersion in water” (ISO, 1998). Para realizar las mediciones se utilizó un dinamómetro universal (Tensile and Compression Testing Machine, Adamel Lhomargy, Modelo Dy 32), reemplazando el sistema de mordazas por un dispositivo de humedecimiento “método Finich”. Luego de la ruptura de la probeta, se registraron los valores de carga máxima de ruptura; y se determinó el índice de tracción en húmedo según la Ecuación III.16.

Resistencia a la compresión en anillo (RCT)

En el ensayo de compresión en anillo, la probeta de ensayo es de forma cilíndrica; la misma se forma al ser insertada en una ranura anular de un porta-muestras en forma de anillo. La carga se aplica con una placa plana sobre el borde del anillo. El anillo se carga axialmente hasta que falla la pieza de prueba.

Para el desarrollo del trabajo, la resistencia a la compresión en anillo de cada probeta, se determinó por norma TAPPI T 818 cm-97 “Ring crush of paperboard”

(Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó un dinamómetro universal (Tensile and Compression Testing Machine, Adamel Lhomargy, Modelo Dy 32). El valor de la prueba de aplastamiento del anillo se determinó como la carga máxima dividida por la longitud del borde, expresada en kN/m.

Resistencia al reventamiento

La resistencia al reventamiento se define como la presión máxima que puede soportar una probeta de papel o cartón sin romperse al ser aplicada una presión perpendicular al plano de la probeta. La resistencia a la ruptura de la probeta corresponde al valor máximo de la presión hidráulica aplicada sobre esta. Las condiciones ambientales tienen gran influencia en las medidas; si la humedad relativa pasa del 20 al 80% puede llegar a disminuir hasta un 20% los valores de resistencia.

Para el desarrollo del trabajo, la resistencia al reventamiento de cada probeta, se determinó por norma TAPPI T 807 om-99 “Bursting strength of paperboard and linerboard” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó un dispositivo de ensayo “Mullen” (Mullen tester, BF.Perkins). Se registró la presión máxima alcanzada, y a partir de ella se calculó el índice de reventamiento utilizando la Ecuación III.17.

$$\text{Índice de reventamiento, } \left(\frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^2}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Resistencia al reventamiento}}{\text{Gramaje}} \quad \text{Ecuación III.17}$$

Resistencia al rasgado

La resistencia al rasgado, se define como la fuerza media requerida para continuar el rasgado del papel a partir de un corte inicial de la probeta. Los equipos miden el trabajo requerido para producir un cierto desgarramiento.

Hay ciertos factores que influyen en las medidas. Las fibras de mayor longitud y mayor resistencia individual, incrementan los valores de resistencia al rasgado. A valores altos del grado de unión entre fibras, el nivel de resistencia al rasgado está determinado por la resistencia de la fibra.

Para el desarrollo del trabajo, la resistencia al rasgado de cada probeta, se determinó por norma TAPPI T 414 om-98 “Internal tearing resistance of paper” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó el dispositivo de rasgado “Elmendorf” (Digi-Tear Messmer, Modelo ME-

1653E). Finalizado el ensayo, se registró la medida, y se calculó el índice de rasgado utilizando la Ecuación III.18.

$$\text{Índice de rasgado, } \left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Resistencia al rasgado}}{\text{Gramaje}} \quad \text{Ecuación III.18}$$

Rigidez

La rigidez es una de las propiedades funcionales más importantes del papel y del cartón. Se refiere a las propiedades elásticas de un material cuando este se deforma por una carga externa. Generalmente se miden dos aspectos de la rigidez. La rigidez a la tracción, donde la carga externa actúa paralela al plano de la hoja; la deformación resultante es la elongación; y la misma se puede determinar a partir de los resultados del ensayo de tracción, utilizando la curva de “carga vs deformación” (Figura III.9), en la región elástica de dicha curva. Y la rigidez a la flexión, la cual describe la capacidad de una tira de papel o cartón para resistir una fuerza de flexión aplicada perpendicularmente al extremo libre de una tira sujeta en el otro extremo; y se relaciona directamente con la resistencia a la flexión medida como el momento de flexión; y la misma se determina mediante el instrumento de medición Taber.

Hay ciertos factores que influyen sobre las medidas. El refino provoca un aumento del grado de enlace de las fibras, por lo cual el módulo elástico de la hoja se incrementa con el refino, pero al mismo tiempo la estructura fibrosa se compacta y disminuye el espesor. A medida que aumenta el refino se incrementa la rigidez de la hoja hasta un valor máximo a partir del cual la rigidez comienza a disminuir. El prensado prosigue la compactación de la estructura de la hoja y, por lo tanto, a medida que el módulo elástico aumenta, el espesor disminuye, dependiendo los valores de la compactación fibrosa y del nivel de refino. Al incrementar el prensado, en pulpas con mayor grado de refino los valores de rigidez disminuyen. El calandrado, provoca una reducción del espesor sin, aportación adicional de área de unión entre las fibras, es decir, sin aumento del módulo elástico, por lo cual al incrementar el calandrado, la rigidez de la hoja disminuye. Cuando el contenido de húmeda ambiental se incrementa, a una temperatura constante, la rigidez de la hoja disminuye. Existe un cierto hinchamiento de la fibra, lo cual se traduce en un incremento del espesor de la hoja y una reducción del módulo elástico.

Para el desarrollo del trabajo, la rigidez de cada probeta, se determinó por norma TAPPI T 489 om-99 “Bending resistance (stiffness) of paper and paperboard” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Para realizar las mediciones se utilizó el dispositivo de rigidez “Taber” (REGMED). El resultado se expresó como la fuerza en mN necesaria para causar la deflexión de la probeta.

III.2.3.4. Optimización experimental de mezclas

A partir de las mediciones de las propiedades físicas generales, se realizó la evaluación de los datos, de acuerdo al plan experimental, con la ayuda de un programa estadístico. Posteriormente, se determinó la combinación de factores experimentales que simultáneamente mejoran el rendimiento de las propiedades, Valor de retención de agua, Densidad aparente, Resistencia a la tracción, Resistencia a la tracción en húmedo, Resistencia al reventamiento, Resistencia a la compresión en anillo, Resistencia al rasgado, Rigidez y Resistencia al paso del aire; mediante la optimización de las variables respuestas individuales o a través de múltiples respuestas, considerando para ello el uso final al cual serán destinadas las materias primas “contenedores biodegradables”, con requerimientos técnicos de: máxima resistencia mecánica; máxima rigidez; y máxima permeabilidad (mínima resistencia al paso del aire).

Primeramente se optimizaron las variables respuestas individuales, se ajustaron al modelo matemático cúbico especial, considerando los efectos estadísticamente significativos al 95%. Luego, se optimizaron las respuestas múltiples para determinar la combinación de los niveles de los factores que alcanzan la “deseabilidad” global óptima y los valores de los factores que maximizan la función de deseabilidad.

Los resultados obtenidos conforman la matriz experimental optimizada a ser utilizada posteriormente en el diseño de contenedores biodegradables.

III.2.4. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS

Los parámetros reológicos de las pulpas secundarias de estudio, ONP, OWP y OCC, se evaluaron siguiendo el diagrama de flujo ilustrado en la Figura III.10.



Figura III.10. Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de parámetros reológicos

A partir de las pulpas secundarias se prepararon suspensiones al 0,5; 1,0; 2,0 y 3,0% de consistencia, por desintegración a 3000 rpm, durante 4 min utilizando un desintegrador estándar de laboratorio. Luego, se llevaron a cabo las mediciones reológicas utilizando un reómetro DHR-2 (TA Instruments, New Castle, Delaware, EE.UU.), con un rotor de cuatro aspas de 42 mm de altura y 28 mm de diámetro, ubicado concéntricamente en un recipiente cilíndrico de vidrio. El recipiente tiene una altura interior de 10 cm y un diámetro interno de 6 cm, para garantizar un espacio entre el rotor y la pared interior superior a 5 veces el tamaño característico de las fibras. Las mediciones se realizaron a 25°C de temperatura. Para obtener datos reológicos consistentes para las suspensiones de pulpa y eliminar los efectos tixotrópicos después de cargar la muestra en el dispositivo de medición, todas las suspensiones fueron pre-cortadas con una velocidad de cizallamiento de 100 s^{-1} durante 20 s para romper cualquier estructura de fibra, tiempo para recuperar su estructura a un cierto nivel. Se evaluó, la viscosidad aparente dentro del régimen viscoelástico lineal de la muestra para cada consistencia; y el efecto de la consistencia sobre el esfuerzo de fluencia. Los valores de viscosidad se ajustaron por el modelo de Carreau-Yasuda a partir de la Ecuación III.19.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\dot{\gamma} * \lambda)^a]^{\frac{n-1}{a}}$$

Ecuación III.19.

Dónde: η_{∞} =viscosidad a velocidad de cizallamiento infinita; η_0 =viscosidad a velocidad de cizallamiento cero; λ =constante de tiempo para la suspensión; $\dot{\gamma}$ = razón de deformación; a =índice de transición; n = índice de velocidad.

Las determinaciones se realizaron para cada muestra por cuadruplicado.

Los resultados se analizaron estadísticamente a partir de un análisis de varianza, ANOVA, aplicando el método de diferencias significativas de Fischer, LSD, con un nivel de confianza del 95%.

III.2.5. EVALUACIÓN DE EFECTOS FITOTÓXICOS

El diagrama de flujo del procedimiento de determinación de los posibles efectos fitotóxicos de las materias primas de estudio, se ilustra en la Figura III.11.

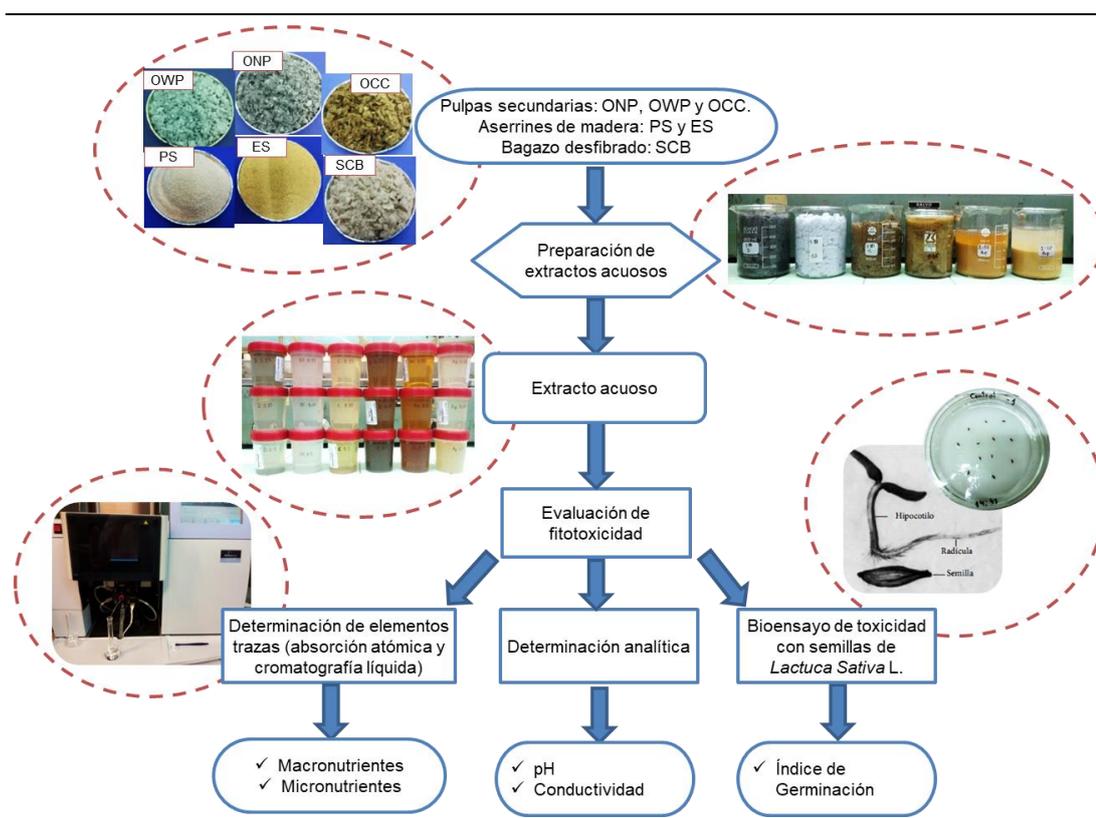


Figura III.11. Diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de efectos fitotóxicos

III.2.5.1. Preparación de extractos acuosos

A partir de las materias primas de estudio, pulpas secundarias (ONP, OWP y OCC), aserrines de madera (PS y ES) y bagazo de caña de azúcar (SCB), previamente acondicionadas, se prepararon extractos acuosos en proporción, 1:5 (100 g de material lignocelulósico en 500 mL de agua destilada); 1:10 (50 g de material lignocelulósico en 500 mL de agua destilada) y, 1:15 (33,33 g de material lignocelulósico en 500 mL de agua destilada). La suspensión se mezcló utilizando un mixer de laboratorio de 130 W de potencia, durante 15 min. Luego, la suspensión se dejó reposar durante 24 h en un recipiente de vidrio cubierto con film para evitar la

pérdida de humedad. Finalmente, la muestra se centrifugó durante 15 min a 3000 rpm, para obtener los extraíbles. El extracto acuoso obtenido se guardó en frasco estéril en lugar refrigerado, para evitar deterioro biológico del material.

III.2.5.2. Determinación de elementos traza

A partir de los extractos acuosos se identificaron y cuantificaron los macro y micronutrientes presentes en los mismos.

Demanda química de oxígeno (DQO)

Los extractos acuosos se centrifugaron durante 5 min a 3000 rpm y se guardaron en tubos de ensayo.

En un tubo de ensayo, apto para DQO, se adicionó 3,5 mL de solución catalizadora, luego se adicionó 1,5 mL de solución de digestión; luego se agitó la mezcla. Seguidamente se añadió 1,5 mL del extracto acuoso de estudio y se agitó nuevamente la mezcla. Luego, se colocó el tubo en un digestor de DQO (HACH, modelo DRB 200), por 2 h a 150 °C. Finalizada la digestión, con la muestra a temperatura ambiente, se midió la absorbancia utilizando un espectrofotómetro, en un rango de entre 400 a 800 nm de longitud de onda. Se calcularon los valores de DQO en ppm (mg/L).

Elementos traza por espectroscopia por absorción atómica

Los extractos acuosos se centrifugaron durante 5 min a 3000 rpm y se guardaron en tubos de ensayo.

Se tomó 10 mL del extracto previamente centrifugado, y se colocó en un tubo de ensayo. Se adicionó 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) 6M. Se cuantificaron los elementos Hierro, Cobre, Calcio, Manganeso y Magnesio, por espectroscopia por absorción atómica utilizando un equipo de absorción atómica (PerkinElmer. AAnalyst 200. Atomic Absorption Spectrometer).

- Para Hierro se utilizó: concentración de solución patrón de 6; 12 y 18 ppm; factor de dilución de 1,1; y longitud de onda de 302,10 nm.
- Para Cobre se utilizó: concentración de solución patrón de 1; 2; y 3 ppm; factor de dilución de 1,2; y longitud de onda de 324,8 nm.
- Para Calcio se utilizó: concentración de solución patrón de 3; 5; 10; 15 y 30 ppm; factor de dilución de 1,1; y longitud de onda de 422,7 nm.

- Para Manganeso se utilizó: concentración de solución patrón de 2; 4; 6 y 10 ppm; factor de dilución de 1,1; y longitud de onda de 279,5 nm.
- Para Magnesio se utilizó: concentración de solución patrón de 0,1; 0,5 y 1 ppm; factor de dilución de 6,25; y longitud de onda de 285,2 nm.

Se registró la absorbancia de cada elemento presentes en los extractos en ppm (mg/L).

Elementos traza por cromatografía líquida de alta resolución

Los extractos acuosos se centrifugaron durante 5 min a 3000 rpm y se guardaron en tubos de ensayo.

Se cuantificaron los aniones inorgánicos, Carbonato, Cloruro, Nitrito, Nitrato, Fosfato y Sulfato, por cromatografía líquida de alta resolución, utilizando un sistema HPLC (Waters Corp. Massachusetts, USA), con las siguientes condiciones cromatográficas:

- Columna: Hamilton PRP-X100 (5 μ m, 4,1 x 150 mm).
- Fase móvil: Ácido p-hidroxibenzoico 4mM con 2,5% de metanol, ajustado a pH 8,9 con KOH.
- Flujo: 1 mL/min.
- Temperatura: ambiente.
- Detector: Conductividad.

Se registraron las concentraciones de los aniones inorgánicos presentes en los extractos en ppm (mg/L).

III.2.5.3. Determinaciones analíticas

A partir de los extractos acuosos correspondientes a las muestras de estudio, se midió la conductividad eléctrica y el pH de los mismos.

Conductividad eléctrica

La salinidad de una solución acuosa se mide por su contenido de sales disueltas (mg/L o ppm) o, bien, por su capacidad para conducir la conductividad (mS/cm o μ S/cm) (Domínguez, 2010). Cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad.

La conductividad eléctrica, se determinó utilizando un conductímetro (Horiba, modelo D-24). Se verificó la calibración del equipo, corroborando un valor de conductividad constante de una muestra de agua destilada. Luego, se midió y registró la conductividad de cada extracto.

pH

Se entiende como pH al logaritmo negativo de base 10 de la concentración de iones H^+ en solución acuosa; a $pH < 7$ se tendrán soluciones ácidas; a $pH = 7$ se tendrán soluciones neutras y, a $pH > 7$ se tendrán soluciones alcalinas (Domínguez, 2010).

El pH, se determinó utilizando un pH-metro (Hanna Instruments, modelo HI 2211). Dado el rango estimativo de pH del material a analizar, se utilizaron para calibrar soluciones buffer 7 y buffer 10. Una vez finalizada la calibración se midió el pH de cada extracto, y se registró el valor.

III.2.5.4. Bioensayo de toxicidad con semillas de lechuga

Entre los bioensayos se destacan los ensayos de germinación. La germinación de semillas constituye el primer eslabón en el desarrollo de la planta; durante dicho período ocurren varios procesos fisiológicos, por lo cual, la presencia de sustancias fitotóxicas puede interferir en el proceso, alterando la viabilidad de la semilla, debilitando o inhibiendo el proceso de germinación, impactando en el desarrollo normal de la plántula (Y Acosta et al., 2004; Celis et al., 2006). Dichos bioensayos permiten evaluar los posibles efectos fitotóxicos de compuestos puros o mezclas sobre el proceso de germinación de semillas y desarrollo de la planta durante los primeros estadios (Celis et al., 2006). Son pruebas de uso común, métodos sencillos, rápidos y no destructivos (Araújo et al., 2001; Selim, Zayed, & Atta, 2012), los cuales se utilizan ampliamente para probar el exceso de salinidad o la presencia de sustancias tóxicas, tales como metales pesados, compuestos fenólicos, entre otros (Gariglio et al., 2002); sin embargo, no expresan la intensidad del efecto tóxico dado que representan un valor contable y ello constituye una desventaja (Y Acosta et al., 2004; Araújo et al., 2001).

El método más utilizado es el ensayo de germinación o índice de germinación propuesto por Zucconi, el cual ha sido utilizado por varios investigadores, aunque con algunas modificaciones en cuanto a especies vegetales empleadas, tipo y metodología de preparación de las muestras, y condiciones ambientales del ensayo

(Yudith Acosta et al., 2006; Araújo et al., 2001; Celis et al., 2006; Emino & Warman, 2004; Gariglio et al., 2002; Hidalgo et al., 2007; F. Madrid et al., 2001; Paradelo et al., 2008; C. Rojas et al., 2005; Tiquia, 2000; Tiquia et al., 1996; Varnero et al., 2007; Zapata et al., 2005).

Para el desarrollo del trabajo, los efectos fitotóxicos de las muestras de estudio, se evaluaron utilizando el método de determinación del índice de germinación propuesto por Zucconi (Tortosa, 2013; Zucconi, Forte, Monaco, & De Bertoldi, 1981).

El método se basa en la germinación de semillas depositadas sobre extractos acuosos preparados con la muestra de estudio, en comparación con una muestra control. Como punto final se determina el índice de germinación, que incluye las medidas de germinación y de elongación de la radícula de la muestra de estudio en comparación con una muestra control (Emino & Warman, 2004; Selim et al., 2012). De estos parámetros, la elongación de la radícula constituye, un indicador sub-letal, más sensible; permite ponderar el efecto tóxico de compuestos solubles presentes en niveles de concentración tan bajos que no son suficientes para inhibir la germinación, pero pueden retardar o inhibir los procesos de elongación radicular (Báez et al., 2004; Emino & Warman, 2004).

Acondicionamiento del material de vidrio

Se realizó un lavado exhaustivo del material de vidrio a utilizar, luego se enjuagó con agua de grifo y posteriormente con agua destilada, evitando el uso de detergentes porque dejan residuos tóxicos. Se secó en estufa a 50°C, y luego se envolvió con papel madera y se esterilizó en autoclave en húmedo por un periodo de 30 min, a 1 atm de presión y 121 °C de temperatura.

Papel de filtro apto para germinación

Como sustrato de germinación, se seleccionaron papeles de filtro de tipo cualitativo de 90 mm de diámetro (SCHLEICHER&SCHUEL, nº 597). Estos presentan trama amplia y porosa para asegurar la capacidad de retención de líquido; ausencia de residuos tóxicos, y pH neutro.

Material biológico

Las plantas superiores son ampliamente utilizadas en los ensayos de toxicidad por ser organismos eucarióticos, y por lo tanto más comparables a la mayoría de las especies de la flora y la fauna superiores. Además, tienen la ventaja de ser más sensibles al estrés ambiental en comparación con otros sistemas de ensayos disponibles; son de fácil manipulación y almacenaje; bajo costo, y tienen buena correlación con otros sistemas de pruebas (Y. G. Pérez, Albear, Pérez, Sánchez, & Pérez, 2012). El comportamiento de las especies vegetales frente a los elementos tóxicos variará en función a la sensibilidad de la especie, por ejemplo, el berro es muy sensible a la salinidad; la cebada parece ser menos sensible a la salinidad que el berro, pero es más afectada por los ácidos orgánicos; la lechuga y el amaranto son más sensibles que el berro a los compuestos tóxicos; asimismo, la lechuga y el tomate se ven más afectados por los compuestos fenólicos; por lo cual su elección es un factor esencial en los ensayos de toxicidad (Teresa & Remigio, 2011). Dentro de las especies comúnmente utilizadas se encuentran (Teresa & Remigio, 2011): *Allium cepa* L. (Cebolla); *Amaranthus tricolor* (Amaranto); *Cucumis sativus* (Pepino); *Daucus carota* (Zanahoria); *Glycine max.* L. (Soja); *Helianthus annuus* (Girasol); *Hordeum vulgare* (Cebada); *Lactuca sativa* (Lechuga); *Lepidium sativum* (Berro); *Lolium multiflorum* (Rye grass italiano); *Petunia x hybrida* (Petunia); *Phaseolus vulgaris* (Haba); *Raphanus sativus* (Rábano); *Solanum lycopersicum* (Tomate); *Triticum vulgare* (Trigo) y *Zea mays* (Maíz). De este grupo, la lechuga es una de las especies más apta para ser usada como indicador (Y. G. Pérez et al., 2012; A. T. Sánchez, 2008); ha permitido detectar efectos fitotóxicos en sustratos de distinto origen; con efectos sobre la germinación, elongación radicular y posterior crecimiento y desarrollo.

Para el desarrollo del trabajo, como material biológico, se utilizaron semillas de *Lactuca sativa* variedad Grand Rapids (Florensa, Lote 73, Cosecha 2014, U.S.A), libre de pesticidas, con una pureza del 99%, las cuales se adquirieron de una agroveterinaria local. Las semillas se conservaron a 4°C, en oscuridad y ambiente seco durante 5 d, antes de iniciar el ensayo.

Previo a la implementación de la prueba, se verificó la viabilidad del lote de semillas. Para ello, en una cámara de siembra; se colocó un disco del papel de filtro en una caja de Petri de 9 cm de diámetro, y se lo saturó con 5 mL de agua destilada,

evitando la formación de bolsas de aire. Luego se seleccionaron cuidadosamente 10 semillas, y con ayuda de una pinza, se colocaron en forma ordenada, dejando espacio suficiente entre las mismas para permitir la elongación radicular. Se tapó la caja con su respectiva tapa, y se cubrió con film para evitar la pérdida de humedad. Luego se llevó a un ambiente acondicionado, donde se dejó germinar durante 120 h a una temperatura de (22 ± 2) °C, con fotoperiodos de 12 h. Finalizado el periodo de exposición se evaluó número de semillas germinadas y la longitud de la radícula. El ensayo se realizó por duplicado, y la metodología se repitió dos veces.

Se consideraron viables aquellas semillas que otorgaron un poder germinativo superior al 90%, sincronización en la germinación y baja variabilidad de la elongación de la radícula (coeficiente de variación menor al 30%), con longitud radicular mayor a 5 mm.

Control Negativo

Como control negativo se utilizó agua destilada.

El control negativo permite evaluar el poder germinativo de las semillas y la elongación de la radícula en una muestra libre de tóxicos.

Desarrollo de la prueba

La siembra se llevó a cabo en una cámara de siembra, de manera de conservar las condiciones de esterilidad y evitar cualquier posible contaminación por esporas de hongos.

En una caja de Petri de 9 cm de diámetro, previamente acondicionada, se colocó un disco de papel de filtro; y se lo saturó con 5 mL de la dilución a ensayar, evitando la formación de bolsas de aire. Luego se seleccionaron cuidadosamente 10 semillas (se descartaron semillas de menor tamaño, porque pueden presentar un alto porcentaje de semillas vanas en comparación con las semillas de mayor tamaño, más vigorosas), y con ayuda de una pinza, se colocaron en forma ordenada sobre el papel de filtro, dejando espacio suficiente entre las mismas para permitir la elongación radicular. La placa se cerró y se cubrió con papel de film para evitar la pérdida de humedad. Luego se llevó a un ambiente acondicionado, donde se dejó germinar durante 120 h a una temperatura de (22 ± 2) °C, con fotoperiodos de 12 h. Los ensayos se realizaron por duplicado para cada muestra y dilución de ensayo, así como para el control negativo; y la metodología se repitió dos veces.

Finalizado el periodo de exposición, se realizó una observación detallada del estado general de las plántulas; y se registró el número de semillas con germinación normal y el número de semillas con germinación anormal.

Luego, la placa se llevó a un congelador a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura durante 10 min; con el fin de facilitar la medición radicular, ya que las plántulas al descongelarse adquieren una consistencia blanduzca favoreciendo la medición, además dicho procedimiento reduce la variabilidad en las medidas, principalmente cuando el crecimiento de la raíz es ensortijado o no es parejo. A la hora de realizar la medición, la placa se retiró del congelador, y una vez descongeladas las plántulas, éstas se colocaron cuidadosamente sobre un soporte de vidrio y, se procedió a medir la elongación de la raíz, utilizando un vernier digital. La medida de elongación de la raíz se consideró desde el nudo (región más engrosada de transición entre la radícula y el hipocótilo) hasta el ápice radicular.

A partir de los resultados obtenidos de germinación y elongación de radícula, en la muestra de estudio y en el control negativo, se determinó el índice de germinación a partir de la Ecuación III.20.

$$\begin{aligned} &\text{Índice de germinación: IG(\%)} \\ &= \frac{\text{N}^{\circ} \text{ Semillas germinadas}_{\text{muestra}} * \text{Longitud media de radícula}_{\text{muestra}}}{\text{N}^{\circ} \text{ Semillas germinadas}_{\text{control}} * \text{Longitud media de radícula}_{\text{control}}} * 100 \end{aligned} \quad \text{Ecuación III.20}$$

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente a partir de un análisis de varianza, ANOVA, aplicando el método de diferencias significativas de Fischer, LSD, con un nivel de confianza del 95%.

III.2.6. EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE BIODEGRADACIÓN

El diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de la cinética de biodegradación de las pulpas secundarias de estudio, se ilustra en la Figura III.12.

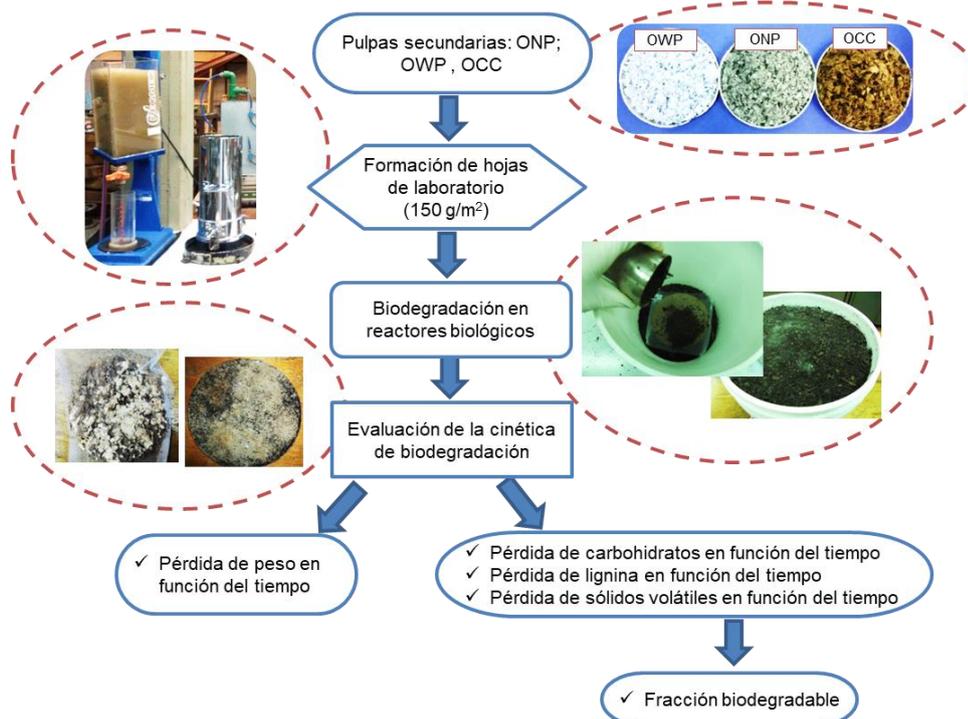


Figura III.12. Diagrama de flujo del procedimiento de determinación de la cinética de biodegradación

III.2.6.1. Biodegradación en reactores biológicos

Probetas

Se utilizaron hojas de laboratorio de 150 g/m^2 de gramaje, formadas a partir de pulpas puras de ONP, OWP y OCC, según norma TAPPI T 205 sp-95 “Forming handsheets for physical tests of pulp” (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Las hojas formadas no se prensaron, para conservar la rugosidad.

Sustrato

Se utilizó abono comercial (Mezcla, especial para plantas-Enmienda orgánica), cuya composición físico-química, otorgada por el fabricante, se detalla en la Tabla III.6.

Tabla III.6. Composición del sustrato orgánico

Componentes	Cantidad
Tierra	70%
Resaca	15%
Estiércol	15%
Materia Orgánica	5-10%
Humedad	15-20%
pH	4,5-5,5
Cenizas	70-75%

Reactores

Como reactores, se utilizaron envases plásticos, de 10 L de capacidad cada uno, con tapa hermética, de material de color blanco y opaco, para garantizar ausencia de luz y aire en el mismo.

Proceso de biodegradación

Los diferentes estudios relacionados con la biodegradación de materiales; suponen exponer al material bajo condiciones ambientales definidas para provocar la degradación biológica del mismo y tomar muestras del material degradado sobre un periodo de tiempo estipulado, para establecer posteriormente la cinética de degradación (Alvarez et al., 2009; Andrady et al., 1992; Fox & Noike, 2004; Kayhanian, 1995; Komilis & Ham, 2003; Nechita et al., 2010; Norashikin & Ibrahim, 2009).

Hay varios estudios realizados de evaluación de la degradación de materiales lignocelulósicos, papeles y cartones (Francou et al., 2008; Hubbe et al., 2010; Pommier et al., 2010; Sridach et al., 2006; Venelampi et al., 2003), aserrines de madera (Atkinson et al., 1996) y bagazo de caña de azúcar (Boopathy et al., 2001), materiales sometidos a procesos de descomposición tanto aeróbica como anaeróbica, que demuestran que dichos materiales sufren un proceso de degradación en un tiempo de estudio comparativamente corto.

Para el desarrollo del trabajo, las materias primas, se sometieron a degradación anaeróbica, considerando que los materiales de estudio, base del diseño de contenedores biodegradables, serán expuestos a condiciones de humedad, ausencia de oxígeno y en contacto directo con sustrato.

Las hojas previamente elaboradas y secas bajo tensión, se llevaron a estufa a (105 ± 2) °C, por 3 h; luego se dejaron enfriar en un desecador, e inmediatamente se pesaron utilizando una balanza analítica de precisión de 0,01 g. Los pesos registrados corresponden al peso inicial de las hojas.

Posteriormente, las hojas, correspondientes a cada reactor, se sumergieron en agua durante 6 min. Alcanzada la saturación, se dejaron escurrir por 6 min. Posteriormente, cada hoja se colocó en una bolsita de tela tul, a fin de evitar que el material degradado se pierda y dado la porosidad de dicha tela, asegurar el contacto directo con el sustrato. Cada bolsita se etiquetó con el número correspondiente de

hoja, para poder realizar el pesaje al finalizar el proceso de degradación y poder comparar dicho valor con el peso inicial. Los bio-reactores se conformaron con hojas de laboratorio intercaladas con sustrato distribuido en capas iguales; se colocó una capa de sustrato, una hoja de papel, una capa de sustrato, y así sucesivamente hasta llegar a la parte superior del envase, evitando espacios vacíos. Al ir conformando el bio-reactor, las diferentes capas de sustrato se humedecieron con ayuda de un rociador, de manera de asegurar un contenido de humedad de aproximadamente 80%. Una vez finalizado el armado de cada bio-reactor, los mismos se cerraron y sellaron. Se prepararon seis bio-reactores por materia prima, por duplicado, con seis hojas cada uno. A partir de los 28 d, cada 14 d, por un periodo final de 98 d, se procedió a abrir los bio-reactores y extraer el material degradado. Cada vez que se tomaron las muestras, se desecharon los bio-reactores analizados. El sustrato depositado sobre las hojas, se eliminó cuidadosamente empleando un cepillo de cerdas blandas. Las hojas degradadas se llevaron a estufa a (105 ± 3) °C durante 3 h. Luego se dejaron enfriar en un desecador, e inmediatamente se pesaron utilizando una balanza analítica de precisión de 0,01 g. Los pesos registrados corresponden al peso final de la hoja.

III.2.6.2. Determinación de la cinética de biodegradación

Entre las posibles mediciones del grado de degradación de un material, se encuentran (Andrady et al., 1992; Lesteur et al., 2010; Nechita et al., 2010; Sridach et al., 2006; Tuomela et al., 2000):

- Propiedades mecánicas: Se puede evaluar la resistencia a la tensión de distintas fracciones de material degradado.
- Pérdida de peso: Dado que la degradación de productos papeleros produce sacáridos solubles que se difunden fuera del papel, la pérdida de peso puede ser un buen método.
- Propiedades macromoleculares: Mediante las medidas de viscosidad, que permite calcular el peso molecular del material degradado.
- Ensayos químicos: Mediante las medidas de reducción del contenido de polímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina por ensayos químicos. Medición de la conversión de los polisacáridos en glucosa.

Determinación de la variación del peso en función del tiempo

A partir de los valores registrados de peso de caja hoja, antes del proceso de degradación y finalizado el proceso de degradación, se determinó la degradación como pérdida de peso del material en función del tiempo.

Determinación de la variación de las características químicas en función del tiempo

Se evaluó la variación del contenido de sólidos volátiles, del contenido de lignina y del contenido de carbohidratos, en función del tiempo siguiendo los lineamientos de caracterización química descritos en el apartado III.2.1.

Fracción biodegradable

Todo material orgánico seco contiene (Kayhanian, 1995), una cantidad determinada de sólidos volátiles y de cenizas, lo cual, en su conjunto, constituye el contenido de sólidos totales; a su vez, la fracción de sólidos volátiles está constituida por sólidos volátiles biodegradables y sólidos volátiles refractarios (Figura III.13). Los sólidos volátiles refractarios están constituidos en su mayoría por lignina. Por ello, aquellos materiales con alto contenido de sólidos volátiles refractarios y de cenizas, tienen valores de degradación biológica reducidos (Kayhanian, 1995). Determinando el contenido de lignina total del material respecto a sólidos volátiles, se puede conocer la fracción de sólidos volátiles biodegradables (Kayhanian, 1995).

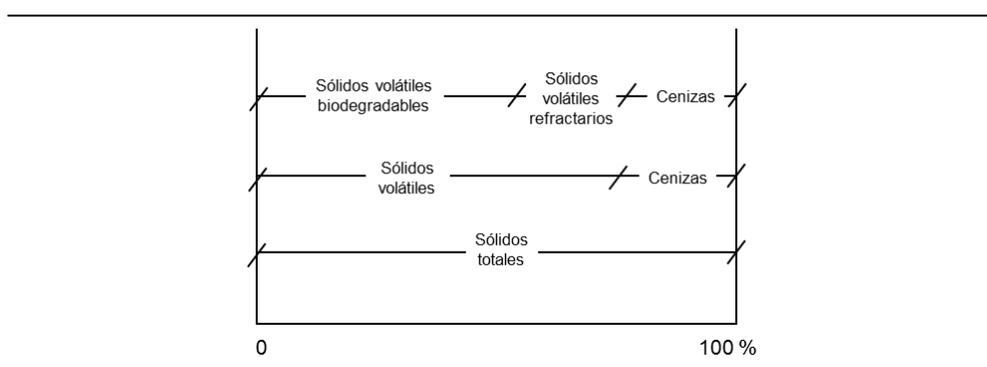


Figura III.13. Caracterización de un material orgánico en función a la fracción biodegradable.

Fuente: Adaptado (Kayhanian, 1995).

Para conocer la fracción biodegradable de los materiales lignocelulósicos comúnmente se utiliza una relación empírica (Ecuación III.21.) propuesta por Chandler (Kayhanian, 1995; Komilis & Ham, 2003; Richard, 1996), la cual considera que la degradación de un material orgánico, sometido a un proceso de

degradación anaeróbica, es directamente proporcional al contenido de lignina de dicho material.

$$\text{Fracción biodegradable} = 0,83 - 0,028 * \left(\frac{\text{Lignina \%}}{\text{Sólidos volátiles \%}} * 100 \right) \quad \text{Ecuación III.21.}$$

Para el desarrollo del trabajo, a partir de los valores de contenido de lignina y sólidos volátiles, se estimó la fracción biodegradable de los materiales degradados utilizando la relación empírica propuesta por Chandler.

III.3. DISEÑO DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

El diagrama de flujo del procedimiento de diseño de contenedores biodegradables, se ilustra en la Figura III.14.

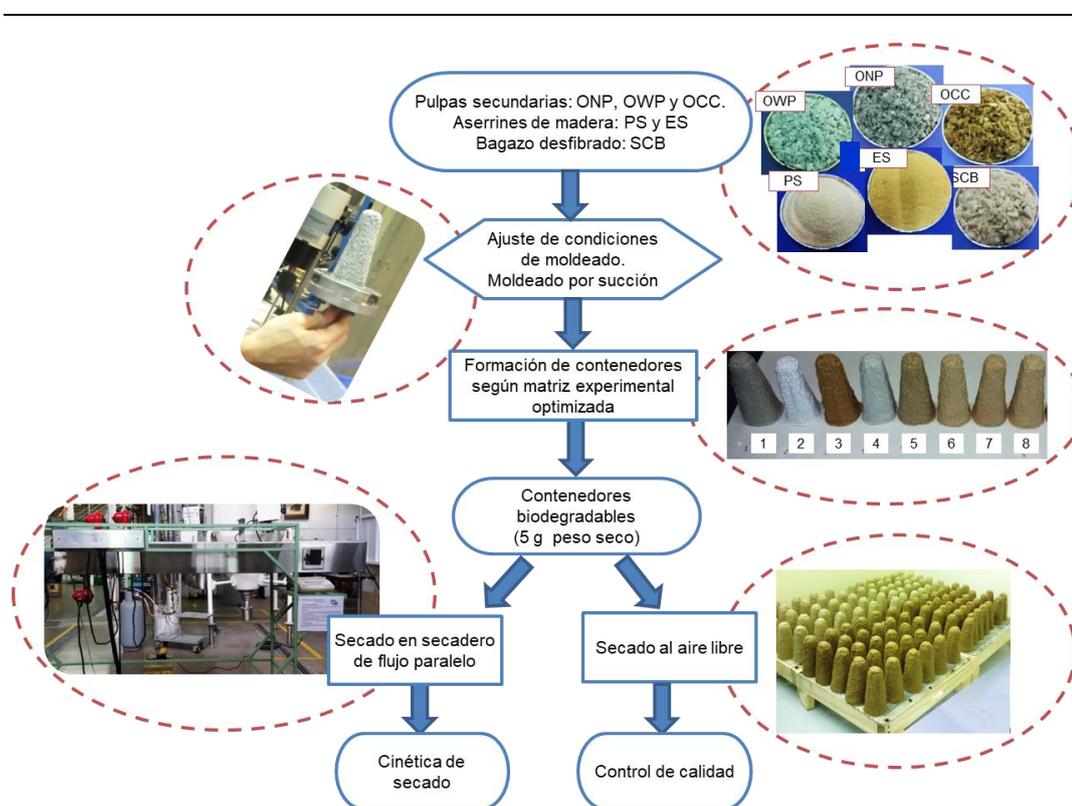


Figura III.14. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de contenedores biodegradables

III.3.1. AJUSTE DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO DE MOLDEADO POR SUCCIÓN

En el proceso de moldeo del producto por succión (B. M. Didone et al., 2017; Kirwan, 2005; Frank A. Paine, 1991), la pulpa, permanece en contacto con el lado exterior del molde perforado, y es aspirada mediante la aplicación de vacío desde el

lado opuesto del molde, quedando el producto en el exterior de la moldura. El producto tiene una humedad residual de aproximadamente 85%, la cual se elimina mediante la aplicación de un proceso de secado. En ocasiones se utiliza un sistema de prensado, que utiliza troqueles calientes, que dan lugar a un artículo de mayor rigidez y de mayor lisura, lo cual resulta importante en caso de impresión. Para llevar a cabo el proceso se utilizan máquinas de moldeo completamente automáticas. El proceso admite la incorporación de aditivos como por ejemplo cera, colofonia o polímeros sintéticos, para mejorar la resistencia en húmedo; también se puede aplicar a los moldeados revestimientos con films de plásticos o por impregnación para mejorar la impermeabilidad y la resistencia al vapor de agua. Los productos pueden colorearse tiñendo la pulpa o bien por medio de una pistola pulverizadora u otro procedimiento decorativo. Además se pueden realizar impresiones sobre los productos. Se utilizan en general para la producción de recipientes tipo bandeja abierta y para el diseño de grandes cantidades de molduras que requieren un bajo costo unitario, como por ejemplo, estuches para huevo, bandeja para embalar frutas y bandejas para alimentos.

Ajuste de las condiciones de moldeo por succión para llevar a cabo la formación de los contenedores:

Previamente a la formación de los contenedores biodegradables, se procedió a ajustar las variables de diseño, consistencia de suspensión fibrosa, velocidad de agitación, y el tiempo de succión, con el fin de obtener las condiciones óptimas de moldeo para formar contenedores biodegradables de 5 g equivalente a peso seco.

Para el ajuste de las condiciones de moldeo se trabajó con:

- Pulpas puras ONP, OWP y OCC a tres consistencias: 0,25; 0,50 y 0,75%_{sbs}
- Velocidades de agitación de la suspensión fibrosa a: 300 y 500 rpm.
- Tiempos de succión variables, ajustados, para obtener contenedores biodegradables de 5 g de peso seco.

Se seleccionaron las materias primas correspondientes, se pesó 24 g equivalente a peso seco de cada material y se desintegró en un desintegrador estándar al 1,2% de consistencia, a 3000 rpm, durante 4 min. Luego, se diluyó la suspensión añadiendo agua, hasta alcanzar una consistencia de 0,25%_{sbs}. El procedimiento se repitió hasta completar un volumen de 30 L de suspensión. Posteriormente, la suspensión se cargó en el tanque de agitación de dimensiones rectangulares, de 30 L de capacidad; y se

dejó en agitación continua utilizando un agitador de laboratorio de paletas a una velocidad de agitación de 300 rpm. A partir de la suspensión fibrosa, puesta en agitación continúa, se formaron los contenedores biodegradables utilizando el proceso de moldeo por succión. Para el moldeo, se utilizó un equipo diseñado por el grupo de investigación para tal fin, cuyo sistema se ilustra en la Figura III.15.



Figura III.15. Equipo de moldeo por succión

El equipo permite formar moldeados en laboratorio a partir de un sistema de succión y soplado. Está conformado por una matriz de forma piramidal truncada que permite obtener contenedores de 70 cm³. El sistema de soplado consta de un compresor, marca Asturcom (línea alfa) de 3HP. El sistema de succión consta de una bomba de vacío de anillo líquido (agua) de alto rendimiento (escala piloto), marca Pascal, con las siguientes características técnicas: Caudal: 850 L/min de caudal; 30 mm/Hg de presión residual; Vacío máximo, presión residual 30 mm/Hg; Ø aspiración y Ø expulsión: 1" bsp; Consumo máximo de agua: 5 L/min; y Motor monofásico: 2 HP 220 V 50 Hz, 100% blindado, 2800 rpm.

Para formar los contenedores, se abrió el sistema de succión; se colocó la matriz en la suspensión (siempre en el mismo lugar y en la misma posición) y conjuntamente, se cronometró el tiempo de succión necesario para formar un contenedor de 5 g de peso seco, al mismo tiempo que se midió el volumen de líquido extraído durante la formación; se retiró la matriz de la suspensión y, en posición invertida, se cronometró el tiempo de succión utilizado para retirar el agua remanente del molde. Luego se cerró el sistema de succión y se abrió lentamente el sistema de soplado para despegar el molde de la matriz. Inicialmente el sistema se estabilizó a partir de la

formación de tres contenedores, los cuales, posterior a su formación fueron desechados. Una vez estabilizado el sistema se procedió a registrar el volumen de líquido extraído y el tiempo de succión como variables de control de ajuste para formar un contenedor de 5 g de peso seco. Se realizó una evaluación visual de la calidad de cada contenedor, registrando formación del espesor, roturas, entre otros.

El procedimiento se aplicó a cada materia prima, a las diferentes consistencias de trabajo, a una velocidad de 300 rpm y a una velocidad de 500 rpm. Para cada combinación se formaron 10 contenedores. La Tabla III.7, proporciona las variables de ajuste de moldeo.

A partir de la evaluación de las condiciones de moldeo, se seleccionaron las variables que permiten obtener contenedores biodegradables de paredes consistentes, sin roturas, con espesores uniformes: consistencia de 0,50 %_{sbs}; velocidad de agitación de 300 rpm; y tiempos de succión de 6 s.

Tabla III.7. Variables de ajuste de las condiciones de moldeo

Materia prima	Condiciones de moldeo					
	300 rpm			500 rpm		
	0,25 %	0,50 %	0,75 %	0,25 %	0,50 %	0,75 %
ONP	-	6 s	5 s	-	6 s	4 s
OWP	-	7 s	4 s	-	7 s	4 s
OCC	-	6 s	4 s	-	6 s	4 s
Observaciones	Paredes muy finas. No se puede despegar el molde de la matriz.	Óptima formación. Espesor uniforme. Sin rotura de pared.	Las fibras tienden a decantar. No se puede despegar el molde de la matriz.	Paredes muy finas. No se puede despegar el molde de la matriz.	Rotura de pared. Debido a la turbulencia, disminuye la densidad de pared.	Paredes débiles en costuras. No se puede despegar el molde de la matriz.
Ejemplos ilustrativos de la apariencia de los contenedores formados						

III.3.2. MATRIZ EXPERIMENTAL BASE

A partir de la optimización de las variables respuestas (III.2.3.4) correspondientes a, las propiedades de drenabilidad, estructurales y mecánicas, evaluadas en hojas de laboratorio según un diseño experimental de tipo mezcla, se obtuvieron las combinaciones ideales (Tabla III.8), para diseñar contenedores biodegradables resistentes, rígidos y permeables, con aptitud para el cultivo de plantas.

Tabla III.8. Matriz experimental optimizada

N° de Mezcla	ONP (%)	OWP (%)	OCC (%)	PS (%)	ES (%)	SCB (%)
1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0
4	50,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0	0,0
6	30,0	30,0	0,0	40,0	0,0	0,0
7	30,0	30,0	0,0	0,0	40,0	0,0
8	30,0	30,0	0,0	0,0	0,0	40,0

III.3.3. FORMACIÓN DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

Considerando la matriz experimental optimizada de materiales lignocelulósicos (Tabla III.8), se tomaron 24 g equivalente a peso seco de cada combinación. En aquellos puntos, cuya composición contiene cierta proporción de aserrín, luego del pesaje, se procedió a hidratar el material en agua, a 55°C por 30 min, para que el agua llene los poros de la madera provocando el hundimiento de las partículas y con ello una mejor distribución en la suspensión fibrosa. La muestra se desintegró en un desintegrador estándar al 1,2% de consistencia, a 3000 rpm, durante 4 min. Luego, se diluyó la suspensión añadiendo agua, hasta alcanzar una consistencia de 0,5%_{sbs}. La suspensión se cargó en el tanque de agitación, y se dejó en agitación continua a 300 rpm con el fin de mantener homogenizada la muestra, evitando formación de vórtices en la suspensión. Se procedió a formar los contenedores utilizando el equipo de moldeado. Para poder estabilizar el sistema, se formaron inicialmente tres contenedores, los cuales luego se desecharon. Una vez estabilizado el sistema, se formaron los contenedores. Para ello, se abrió el sistema de succión; se colocó la matriz en la suspensión (siempre en el mismo lugar y en la misma posición) y conjuntamente se cronometró un tiempo de succión de 6 s; transcurrido dicho tiempo se retiró la matriz de la suspensión y, en posición invertida, se cronometró un tiempo de succión de 10 s con el fin de retirar el agua remanente. Luego se cerró el sistema de succión y se abrió lentamente el sistema de soplado para despegar el molde de la matriz. El molde formado, se colocó sobre un soporte, y se dejó secar al aire libre por un periodo de 24 h.

Los contenedores formados, secos al aire libre, se reservaron para, posteriormente, llevar a cabo los ensayos de evaluación de calidad.

III.3.4. CINÉTICA DE SECADO

III.3.4.1. Proceso de secado

Considerando la matriz experimental optimizada de materiales lignocelulósicos (Tabla III.8), siguiendo el proceso de moldeado (III.3.3), se procedió a formar los contenedores. Cada contenedor formado, se llevó inmediatamente a un equipo de secado, previamente acondicionado, y se secó hasta pesaje constante.

Se utilizó un secadero de túnel de flujo paralelo, a escala piloto, tal como se ilustra en la Figura III.16. El equipo consta de tres sistemas de resistencias de control de temperatura y un sistema regulador de velocidad de flujo de aire, los cuales permiten ajustar las variables de secado.

Las mediciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del flujo de aire, se llevaron a cabo mediante sensores de control instalados en el equipo. Se trabajó a una temperatura de (75 ± 3) °C; una velocidad de flujo de aire de 2,6 m/s, y una HR de $(4,1\pm 0,5)$ %; donde los valores de temperatura y de velocidad de flujo corresponden a los puntos máximos alcanzados por el secadero. El pesaje de cada contenedor se llevó a cabo de forma directa mediante una balanza digital incorporada al equipo. Se tomó el peso inicial del contenedor; luego se registraron los pesos cada 5 min hasta alcanzar pesaje constante; y posteriormente, el contenedor se llevó a estufa a (105 ± 3) °C de temperatura por un periodo de 4 h, para determinar el peso seco final.

Los ensayos se llevaron a cabo por duplicado.

A partir de los valores registrados, se determinó la cinética de secado, graficando:

- Curvas de secado:

Describen la cinética de secado, cómo esta varía durante el proceso, y como se ven afectadas por, las propiedades del material, tamaño o grosor del mismo y por las condiciones de la operación de secado (Perry & Green, 2008). La intensidad del secado refleja el cambio en la cantidad de humedad a través del tiempo, y está influenciado por la temperatura, humedad, velocidad relativa del aire, presión total, entre otros.

Son curvas del contenido de humedad en función del tiempo de secado. Permiten determinar el tiempo necesario para secar un dado lote en iguales condiciones de secado

- Curvas de velocidad de secado:

Son curvas de velocidad de secado en función al contenido de humedad. Permiten determinar la velocidad de secado del material por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo a condiciones de secado constante. Matemáticamente la velocidad se expresa por la Ecuación III.22.

$$\text{Velocidad de secado} = \frac{\text{Peso de sólido seco}}{\text{Área de superficie expuesta}} * \left(\frac{\Delta \text{Contenido de humedad}}{\Delta \text{Tiempo}} \right) \quad \text{Ecuación III.22}$$

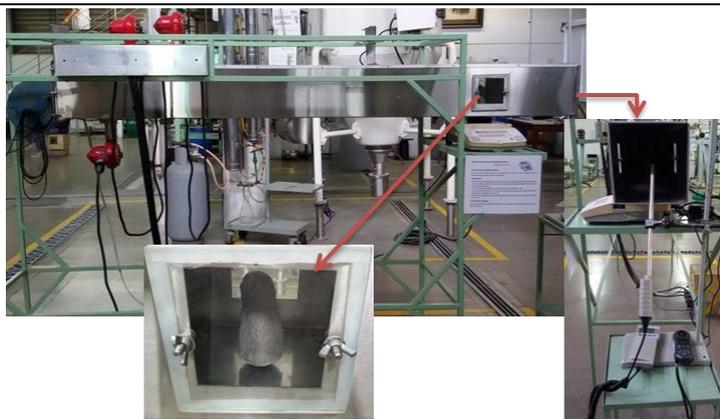


Figura III.16. Secadero de túnel de flujo paralelo

III.4. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

El diagrama de flujo del procedimiento de evaluación de calidad de contenedores biodegradables llevado a cabo, se ilustra en la Figura III.17.

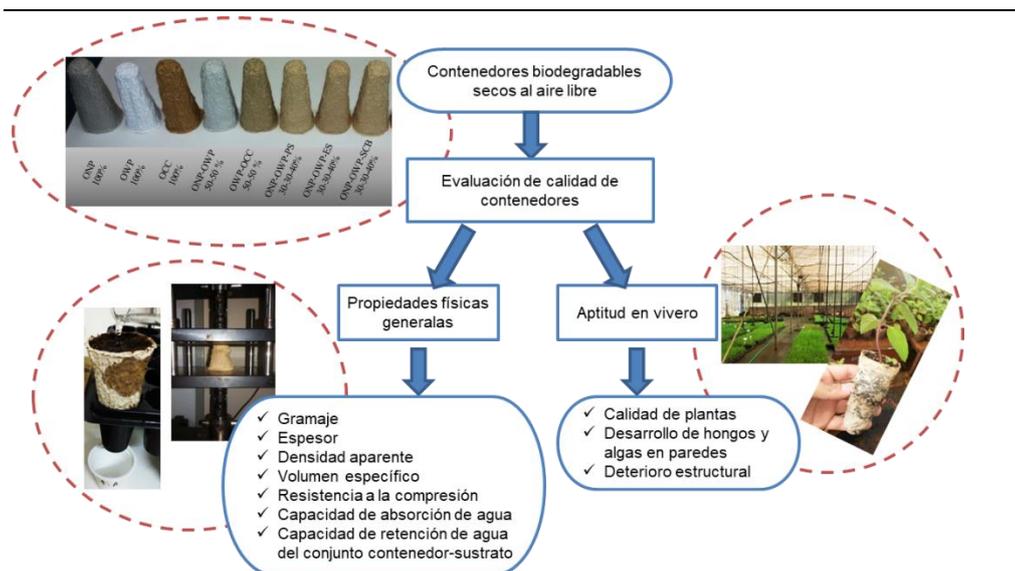


Figura III.17. Diagrama de flujo de evaluación de la calidad de contenedores biodegradables

Los contenedores biodegradables presentan variadas características en relación a la producción de plantas (Cypher & Fulcher, 2015a, 2015c; A. K. Koeser, 2013; S. Nambuthiri et al., 2013; Susmitha Nambuthiri, Fulcher, Koeser, Geneve, & Niu, 2015; Yue et al., 2010):

- Crecimiento de plantas

Pueden influir en el crecimiento de las plantas a través de los efectos de las paredes laterales porosas: hay un mayor uso de agua, reducción del círculo radicular y suministro de nitrógeno a las plantas a medida que se descomponen. Tienen potencial para aumentar la biomasa de los brotes, la biomasa de las raíces y el crecimiento general. Dada la permeabilidad de las paredes de los contenedores plantables, las raíces finas pueden penetrar fácilmente a través del contenedor durante la producción de invernadero; y a medida que las raíces emergentes están expuestas al aire, estas son “podadas” por el contacto con el aire, lo cual limita el daño y permite que estas se activen inmediatamente al entrar en contacto con el suelo, favoreciendo el crecimiento, reduciendo el choque por trasplante. Además, la no deformación del sistema radicular asegura una buena y rápida fijación de la planta. Seleccionando el contenedor biodegradable apropiado, el tamaño de la planta, la salud, el vigor y el atractivo de todo el producto terminado, incluido la apariencia del envase, pueden ser igualados o excedidos en comparación con los contenedores tradicionales.

- Condiciones de riego

En general, se requiere un aumento en la frecuencia y / o el volumen de riego para producir un cultivo equivalente al cultivado en contenedores tradicionales. Se debe tener en cuenta la pérdida de agua, dado que puede resultar en un crecimiento de la planta disminuido. La pérdida de agua a través de las paredes laterales se va afectada por el grado de porosidad de estas; mayor pérdida de agua a mayor porosidad. Los contenedores plantables tienen mayores tasas de pérdida de agua en comparación con los contenedores plásticos; requieren de 1,4 a 2,6 veces más agua. Los contenedores compostables requieren aproximadamente el mismo volumen y frecuencia de riego que los contenedores plásticos. La técnica de aplicación de riego usada también puede afectar los requerimientos de agua. Para reducir el consumo de agua se encuentran disponibles, bandejas de transporte que cubren las paredes laterales

porosas de los contenedores; producción de contenedor en contenedor; las enmiendas del sustrato; programación de riego optimizada; otros.

- Resistencia del contenedor

Los contenedores biodegradables, para ser viables comparados con los contenedores tradicionales deben ser capaces de soportar el proceso de producción, manipulación, envasado y transporte, así como soportar una cantidad impredecible de tiempo en vivero. En función al material y al proceso de fabricación, tienen diferentes resistencias. En general, los contenedores compostables son más resistentes y tienen un buen rendimiento en ciclos largos de producción, en comparación con los contenedores plantables, menos resistentes, excepto los contenedores de cascarilla de arroz y de fibras de coco; y adecuados para ciclos de producción más cortos porque pueden comenzar a descomponerse en vivero.

- Apariencia visual

Las paredes de los contenedores biodegradables tienden a cubrirse de algas y hongos, lo cual, es considerado poco atractivo y el impacto en la percepción del consumidor puede afectar su comercialización, por lo cual, es importante el desarrollo de recipientes resistentes al crecimiento de microorganismos. En general, los contenedores compostables no desarrollan algas y hongos en sus paredes, lo cual conduce a una planta más limpia y generalmente más atractiva en comparación a los contenedores plantables, los cuales desarrollan algas y hongos en sus paredes, siendo el nivel variable con el tiempo de producción y las condiciones de vivero. Una excepción son los contenedores de cascarilla de arroz y de paja, resistentes al crecimiento de hongos incluso en la producción a largo plazo (12 semanas).

III.4.1. PROPIEDADES FISICAS GENERALES

III.4.1.1. Acondicionamiento de contenedores para ensayos físicos

Los contenedores biodegradables, previamente formados y secos al aire libre, se acondicionaron a $(50\pm 2)\%$ de HR y (23 ± 1) °C de temperatura, por un periodo de 8 h. Finalizada la etapa de acondicionamiento se procedió a evaluar las propiedades físicas generales de los contenedores en un ambiente acondicionado $(50\pm 2)\%$ de HR y (23 ± 1) °C de temperatura. Se evaluaron 10 contenedores por ensayo.

III.4.1.2. Gramaje

A partir de cada contenedor, se cortó una probeta de 100 mm de largo por 15 mm de ancho. Se pesó cada probeta, utilizando una balanza analítica de precisión de 0,001 g. A partir de los valores registrados, se determinó el gramaje por la Ecuación III.12.

III.4.1.3. Espesor

Se midió el espesor de cada contenedor utilizando un vernier digital de 0,001 mm de precisión. Se realizaron mediciones en la parte superior, media e inferior de cada contenedor, con tres medidas por cada zona al azar. A partir de los valores registrados, se determinó el espesor, por la Ecuación III.13.

III.4.1.4. Densidad aparente

A partir de los valores de gramaje y espesor, calculados para cada contenedor, la densidad aparente, se determinó matemáticamente, mediante la Ecuación III.14.

III.4.1.5. Volumen específico

A partir de los valores de gramaje y espesor, calculados para cada contenedor, el volumen específico, se determinó matemáticamente, mediante la Ecuación III.15.

III.4.1.6. Resistencia a la compresión

Las mediciones de resistencia a la compresión se llevaron a cabo utilizando un dinamómetro universal (Tensile and Compression Testing Machine, Adamel Lhomargy, Modelo Dy 32), con una celda de carga de 1 KN.

Se ubicó el contenedor en forma centrada sobre la celda de carga inferior, luego se acercaron las celdas, sin ejercer esfuerzo sobre el contenedor, evitando rendijas de luz entre contenedor y celda. Se aplicó un esfuerzo perpendicular al contenedor, a una velocidad constante de 10 mm/min, hasta provocar su aplastamiento, (Figura III.18). Finalizado el ensayo, se registró la carga máxima de compresión. Los resultados se expresaron en índice, es decir, divididos por el gramaje, en Nm/g.

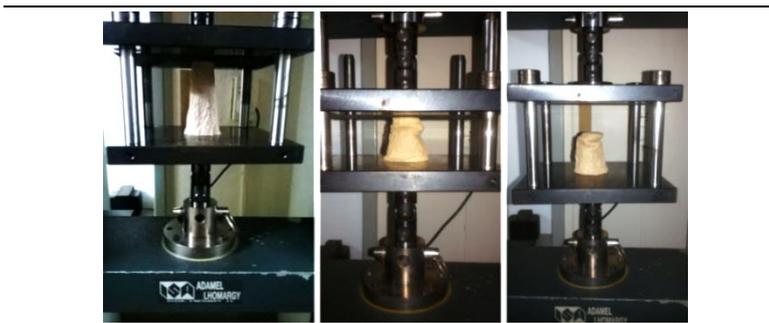


Figura III.18. Ensayo de resistencia a la compresión de contenedores

III.4.1.7. Capacidad de absorción de agua

La capacidad de absorción de agua, se determinó tomando como base la norma ISO 5637:1989 (E) “Paper and board – Determination of water absorption after immersion in water” (ISO, 1998). Se registró el peso inicial del contenedor. Luego, en un recipiente con agua, se sumergió el contenedor completamente, en forma vertical, cronometrando conjuntamente, un tiempo de inmersión de $5 \text{ min} \pm 5 \text{ s}$. Transcurrido dicho tiempo, se retiró el contenedor del agua; se dejó escurrir sobre un papel absorbente por un periodo de tiempo de 3 min. Posteriormente, se registró el peso final del contenedor. Para los pesajes se utilizó una balanza analítica de precisión de 0,001g.

A partir de los valores obtenidos, la capacidad de absorción relativa, se determinó matemáticamente (Ecuación III.23).

$$\text{Absorción relativa \%} = \frac{\text{peso después de inmersión} - \text{peso antes de inmersión}}{\text{peso antes de inmersión}} * 100 \quad \text{Ecuación III.23}$$

III.4.1.8. Retención de agua del conjunto contenedor-sustrato

Se evaluó la retención de agua del conjunto contenedor-sustrato, (Figura III.19).



Figura III.19. Capacidad de retención de agua del conjunto contenedor-sustrato

Se procedió a pesar el contenedor utilizando una balanza analítica de precisión de 0,001 g. Luego se cargó el contenedor con sustrato hasta la base, presionando el sustrato levemente para evitar espacios vacíos. Se registró el peso del conjunto contenedor-sustrato. Se colocó cada contenedor en forma vertical en un porta contenedor y, debajo de este se colocó un recipiente de peso conocido con el fin de recolectar el agua drenada. Armado el sistema, se añadió 100 mL de agua, cronometrando un tiempo de carga de 1 min. Finalizada la carga se cronometró un tiempo de drenado de 15 min; se procedió a pesar el agua drenada recolectada y luego esta se descartó. Transcurridas 24 h de iniciado el ensayo, se registró el peso final del conjunto contenedor-sustrato; luego se retiró cuidadosamente el sustrato del contenedor, y se registró el peso del contenedor. Como control se utilizaron, contenedores convencionales de polipropileno (PP), de color negro, de volumen y dimensión similar a los contenedores biodegradables utilizados en el ensayo, con orificios de drenaje en el extremo inferior y aristas verticales antiespiralizantes.

Se utilizaron tres tipos de sustratos:

- Sustrato A: Mezcla de perlita y corteza de pino compostada en proporción 1:1.
- Sustrato B: Mezcla de corteza de pino compostada, estiércol de vaca termofusionada y turba en proporción 3:1:1
- Sustrato C: Mezcla de corteza de pino compostada, cascarilla de arroz, y perlita, en proporción 3:1:1.

A partir de los datos obtenidos, la retención de agua del conjunto contenedor-sustrato, se determinó matemáticamente, (Ecuación III.24).

$$\text{Retención de agua}_{\text{contenedor-sustrato}, \%} = \frac{\text{Peso final}_{\text{contenedor-sustrato}} - \text{Peso inicial}_{\text{contenedor-sustrato}}}{\text{Volumen de agua adicionado}} * 100 \quad \text{Ecuación III.24}$$

III.4.2. EVALUACIÓN DE LA APTITUD EN VIVERO

III.4.2.1. Cultivo de especies en vivero

Lugar de cultivo:

Los ensayos experimentales se realizaron en invernaderos en la ciudad de Posadas (27° 25' 50,5" S 55° 53' 28,9" W), en las instalaciones de la empresa Biofábrica Misiones S.A., durante la estación primaveral (desde septiembre a diciembre de 2016). Las instalaciones cuentan con invernaderos destinados a las etapas de

aclimatación del cultivo, e invernaderos destinados a las etapas de rustificación, cada uno con características particulares, (Figura III.20):

- **Invernáculo:** Se inicia el proceso crecimiento y adaptación al ambiente, graduando la temperatura, la humedad y la radiación. Invernadero totalmente cerrado, equipado con extractores que permiten controlar el flujo de aire húmedo, controladores de temperatura y sistemas de riego por aspersión.
- **Casa de rustificación:** Las plantas son sometidas a condiciones más agrestes, con el fin de rustificar al cultivo. Para la rustificación cuentan con dos sistemas de invernadero, un invernadero totalmente cerrado, equipado con controladores de temperatura y sistemas de riego por aspersión, sin controladores de flujo de aire húmedo y, otro invernadero cubierto con tela media sombra, equipado con sistemas de riego por aspersión, sin controladores de temperatura y de flujo de aire húmedo, que opera bajo condiciones de humedad y temperatura ambiente.



Figura III.20. Invernaderos utilizados para el cultivo de las especies de ensayo

Probetas

Para los ensayos se utilizaron, los contenedores biodegradables formados previamente, en función a la matriz experimental optimizada (Tabla III.8); y como control, contenedores convencionales de PP, de color negro, de volumen y dimensión similar a los contenedores biodegradables, con orificios de drenaje en el extremo inferior y aristas verticales antiespiralizantes; y como soporte para ambos tipos de contenedores se utilizaron portaccontenedores de madera, (Figura III.21). Se utilizaron 15 contenedores por punto, por especie vegetal cultivada.



Figura III.21.Contenedores biodegradables, contenedores de PP y portacontenedores
Material biológico

Se consideraron tres especies de plantas durante la fase experimental, las cuales fueron brindadas por la empresa viverística y manejadas de acuerdo con las prácticas y reglas comerciales de la empresa:

- Hierba aromática: Menta (*Mentha arvensis*)

Estacas de menta de 10 cm de longitud, de características similares entre sí en cuanto a diámetro de tallo y número y tamaño de hojas, obtenidas de la misma planta madre.

- Hortaliza de hoja verde: Acelga (*Beta vulgaris* var.cicla)

Plántulas previamente sembradas y cultivadas de aproximadamente 8 cm de largo, de características similares entre sí en cuanto a diámetro de tallo y número y tamaño de hojas.

- Forestal: Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

Estacas de eucalipto de 10 cm de longitud, de características similares entre sí en cuanto a diámetro de tallo y número y tamaño de hojas, obtenidas de la misma planta madre.

Procedimiento de cultivo

El procedimiento general llevado a cabo se ilustra en la Figura III.22.

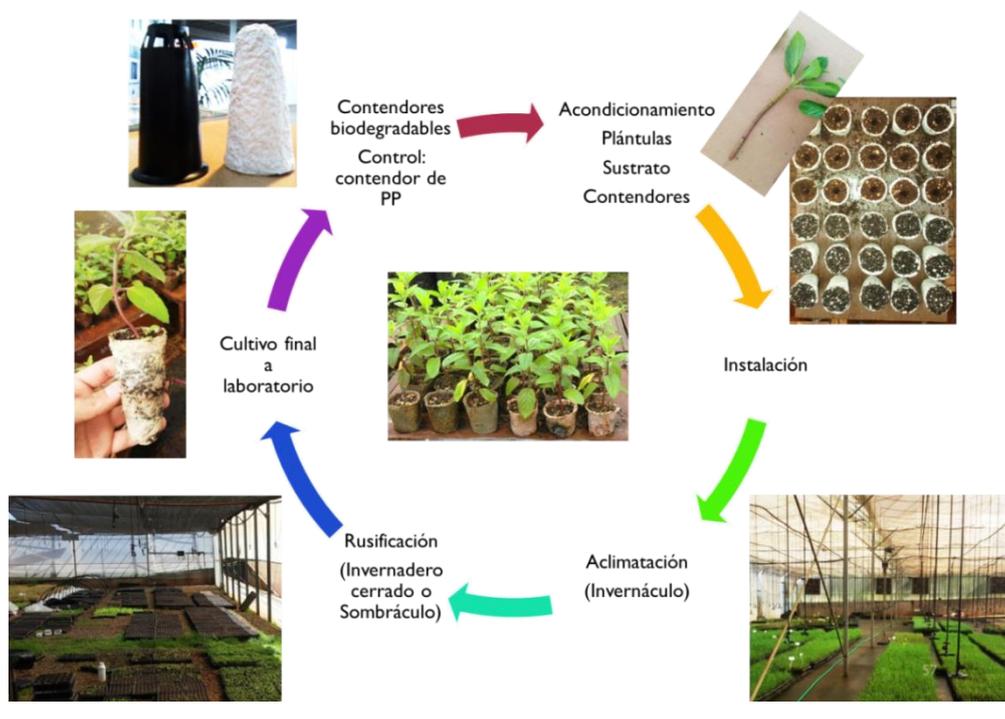


Figura III.22. Ejemplificación del procedimiento general de cultivo

En función al tipo de planta utilizado el procedimiento de cultivo difiere:

- Menta (*Mentha arvensis*)

Las plantas se cosecharon al momento de instalarlas, y se colocaron en un recipiente con agua para que puedan conservar la humedad mientras se efectúa la instalación.

Como sustrato se utilizó una mezcla de corteza de pino compostada y perlita en proporción 1:1, con agregado de 250 g de fertilizante Triple 15 (de composición 15% Nitrógeno total, 6,5% Fosforo asimilable como P_2O_5 y, 12,7% Potasio asimilable como K_2O).

Para la instalación, primeramente, en casa de cultivo, cada contenedor se cargó con el sustrato previamente homogenizado, dando golpeteos verticales contra una superficie con el fin de eliminar los espacios vacíos y compactar el sustrato, manteniendo el nivel de este hasta el borde del contenedor. Luego, con un punzón especial, en el centro del sustrato se hizo un hoyo de aproximadamente 4 cm, y se instaló una estaca por contenedor.

Finalizada la instalación de todas las estacas, los contenedores se dejaron en invernáculo, a una temperatura ambiente de (28 ± 2) °C, y de 75% a 90% de HR; y un sistema de riego de aspersión, con riego automático de 15 s cada 10 min.

Transcurrido un periodo de 28 d, los contenedores se trasladaron a casa de rustificación (invernadero totalmente cerrado); donde permanecieron en condiciones de temperatura y humedad ambiente; y un sistema de riego de aspersion, con riego automático de 6 min cada 2 h. Transcurrido un periodo de 14 d, las plántulas se retiraron y se llevaron a laboratorio.

- Acelga (*Beta vulgaris* var.cicla)

Las plantas se cosecharon al momento de instarlas, y previo al trasplante, se remojaron en una solución de cobre.

Como sustrato se utilizó una mezcla de corteza de pino compostada, con estiércol de vaca termofusionadas y turba, en proporción 3:1:1.

Para la instalación se siguieron los mismos lineamientos que para menta.

Finalizada la instalación, se aplicó una solución (PROMESS) que contiene fertilizante Triple 15 y un desinfectante de sustrato. Se dejaron en casa de rustificación (sombáculo), a humedad y temperatura ambiente, con un sistema de riego por aspersion, con riego automático de 10 a 15 min cada 6 h. En caso de ser necesario, en función de las condiciones climáticas y recomendación del encargado de vivero, el riego se complementó con riego manual utilizando riego tipo lluvia. Transcurrido un periodo de 56 d las plántulas se retiraron y se llevaron a laboratorio.

- Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

Las plantas se cosecharon al momento de instalarlas, y se colocaron en un recipiente con agua para que puedan conservar la humedad mientras se efectúa la instalación.

Como sustrato se utilizó una mezcla de corteza de pino compostada, perlita y cascarilla de arroz carbonizada en proporción 3:1:1; con agregado de 250 g de fertilizante Triple 15.

Para la instalación se siguieron los mismos lineamientos que para menta.

Finalizada la instalación de todas las estacas, los contenedores se dejaron en invernáculo, a una temperatura variable de (30 ± 5) °C y entre 85-97% de HR; y un sistema de riego de aspersion, con riego automático de 15 s cada 5 min. Transcurrido un periodo de 35 d, los contenedores se trasladaron a casa de rustificación. Durante 15 d permanecieron en un invernadero totalmente cerrado, bajo condiciones de temperatura controlada (28 ± 2) °C, humedad ambiente, y sistema de riego por

aspersión, con riego automático de 3 min cada 6 h. Transcurrido el periodo de aclimatación, las plantas se llevaron a sombráculo, donde permanecieron durante 21 d, bajo condiciones de temperatura y humedad ambiente; y sistema de riego de aspersión, con riego automático de 10 min cada 8 h. Finalizado el periodo de rustificación, las plántulas se retiraron y se llevaron a laboratorio.

III.4.2.2. Análisis de la calidad de las plantas: atributos morfológicos

La calidad de plantas cultivadas en contenedor se puede estimar mediante los atributos morfológicos (Buamscha et al., 2012; Landis et al., 2010):

- **Peso Seco:**

La biomasa seca total se define como, la suma de la biomasa seca aérea más la biomasa seca radical. El peso seco del plantín aumenta con la edad y el tamaño del contenedor.

- **Altura:**

La altura del tallo se define como, la distancia vertical desde el sustrato hasta el meristemo terminal o yema. Entre la altura de un plantín y su supervivencia suele haber una baja correlación. Bajo condiciones de sitio adecuadas, la altura del plantín, si bien no tiene efecto sobre la supervivencia, podría correlacionarse con el crecimiento a largo plazo.

- **Sistema radical:**

En el caso de la producción de plantas en contenedor, los problemas respecto a los sistemas radicales son escasos ya que el cepellón (sistema de raíces más sustrato) es muy poco perturbado durante la extracción y el transporte. La densidad de las raíces se ve afecta por la profundidad del contenedor; a medida que las plántulas crecen, hay desarrollo de raíces laterales a lo largo de la raíz principal. Cuando la temperatura del sustrato disminuye, se reduce la elongación de la raíz principal aumentando la frecuencia de raíces laterales por centímetro de profundidad.

Evaluación de los atributos morfológicos

Finalizada la etapa de cultivo, las especies vegetales cultivadas, se llevaron a laboratorio y se midieron sus atributos morfológicos: altura de planta y biomasa de la parte aérea y de la parte radicular. Para llevar a cabo las mediciones, se retiró

cuidadosamente cada plántula del contenedor, a fin de no lastimar la parte radicular; se enjuagó con agua de grifo a fin de eliminar restos de sustrato, y se dejó escurrir. Luego, se midió longitud de la planta (desde el cuello de raíz hasta extremo final de la planta), utilizando un vernier digital de precisión 0,001 mm. Posteriormente se procedió a separar, de cada planta, la parte aérea (desde el cuello de raíz hasta extremo final de la planta, considerando tallo y hojas), y la parte radicular (raíces). Se colocó cada parte en un recipiente de peso conocido, y se procedió al pesaje utilizando una balanza analítica de precisión 0,001 g. Luego, se llevó a estufa a (105 ± 3) °C hasta pesaje constante, para determinar la biomasa seca.

A partir de los resultados obtenidos se determinó matemáticamente la aptitud de los contenedores biodegradables para el cultivo, comparando los atributos morfológicos de las plantas cultivadas en estos con aquellas plantas cultivadas en contenedores convencionales de PP.

Los resultados se analizaron estadísticamente a partir de un análisis de varianza, ANOVA. Mediante el análisis estadístico se comparó los valores medios de cada variable para los diferentes tipos de contenedor ensayados; y para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se utilizó las Pruebas de Rangos Múltiples, mediante el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%.

III.4.2.3. Evaluación cualitativa del desarrollo de hongos y algas en paredes

A lo largo del ensayo experimental se evaluó visualmente el desarrollo de algas y hongos en las paredes de los contenedores y, se registró presencia/ausencia de los mismos.

III.4.2.4. Evaluación cualitativa del deterioro estructural de las paredes

A lo largo del ensayo experimental se evaluó visualmente el deterioro estructural de las paredes de los contenedores biodegradables y se registró, lesiones, roturas de pared, desintegración.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

IV.1.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La Tabla IV.1 muestra la composición química de las materias primas de estudio, pulpas ONP, OWP y OCC; aserrines PS y ES y; bagazo SCB.

Tabla IV.1. Composición química de las materias primas de estudio

Caracterización (%sbs)	ONP	OWP	OCC	PS	ES	SCB
Ext. en alcohol	1,72	0,29	0,99	2,00	2,12	1,54
Ext. en agua caliente	0,49	0,66	1,31	1,11	1,23	1,04
Extractivo total	2,21	0,95	2,30	3,11	3,36	2,57
Lignina insoluble	20,74	2,20	12,34	27,51	27,50	20,79
Lignina soluble	1,71	0,62	0,68	0,71	2,21	1,58
Lignina total	22,45	2,82	13,02	28,21	29,71	22,37
Celulosa	47,10	60,29	55,62	38,86	42,17	37,59
Hemicelulosas	15,15	15,89	13,28	18,22	12,96	24,90
Carbohidrato total	62,24	76,18	68,90	57,08	55,13	62,49
Cenizas	1,20	6,27	5,35	0,34	0,27	3,55
Rendimiento	88,11	86,23	89,57	88,74	88,46	90,98

Nota: % sbs: Porcentaje sobre base seca de la muestra original

A pesar de la heterogeneidad que presentan estos materiales, se obtuvo un balance de materia que representa casi el 90% del material, un resultado adecuado, teniendo en cuenta que los métodos de caracterización utilizados están desarrollados para materiales puros. En el caso de las pulpas, los resultados indican una mayor proporción de pulpas químicas blanqueadas y de cargas inorgánicas en la composición de pulpas OWP en comparación con pulpas ONP y OCC; y de una mayor proporción de pulpas de alto rendimiento en la composición de pulpas ONP en comparación a pulpas OWP y OCC. La composición química de las pulpas recicladas fue muy variable, ya que esta es función de la materia prima que da origen a las mismas, por ejemplo, en el caso de pulpas OWP los contenidos elevados de cenizas, pueden ser resultado de las cargas minerales que se adicionan a los papeles de oficina. Los aserrines, PS y ES, presentaron cierta similitud en sus composiciones. En general, los residuos forestoindustriales correspondientes al aserrado de madera, presentan un mayor porcentaje de extractivos en su composición en comparación con las maderas destinadas a la industria papelera, como consecuencia de la variación en

las especies utilizadas y de la edad de los árboles destinados a cada tipo de industria (María C Area & Vallejos, 2012). Además, se pueden observar diferencias en la composición química de una misma especie forestal, proveniente de distintas ubicaciones geográficas, como consecuencia de la variación de la composición y cantidad de corteza, ya que ésta se caracteriza por tener mayor contenido de lignina y menor contenido de celulosa, en comparación con la madera; o como consecuencia del periodo de almacenamiento del material, el cual influye sobre el contenido de extractivos disminuyéndolo como causa del deterioro microbiológico de la madera (Burkhardt, 2010). Mientras que SCB, presentó menor contenido de extractivos y lignina y, mayor contenido de carbohidratos y cenizas en comparación con los aserrines; como consecuencia de un alto contenido de tejido parenquimatoso muy rico en pentosas y, un elevado contenido de sílice, responsable de la mayor proporción de carbohidratos y de cenizas, respectivamente. En los residuos agroindustriales, la composición química se ve fuertemente afectada por el tiempo de estacionamiento del material, debido a su rápido deterioro microbiológico (Aguilar Rivera, 2011).

La Tabla IV.2, muestra la composición química de ciertos materiales lignocelulósicos, informada por otros autores en investigaciones previas, a partir de la cual se observa cierta similitud entre los resultados de la investigación y los resultados informados por otros autores.

Tabla IV.2. Datos de la literatura de composición química de materiales lignocelulósicos

Caracterización (%sbs)	Pulpa de papel kraft liner ^(a)	Pulpa virgen de BSKP ^(b)	Pulpa virgen de BHKP ^(b)	Pulpa virgen de UBSKP ^(b)	Pulpa virgen de UBHKP ^(b)	Pulpa virgen de TMP ^(b)	Aserrín de <i>Pino ellioti</i> ^(c)	Aserrín de <i>Eucalipto grandis</i> ^(d)	Bagazo de caña de azúcar ^(e)
Extractivo total	2,23	0	0,5	0,8	0,3	1,9	3,52	7,9	4,6
Lignina total	13,29	0,8	1,3	13,8	2,4	31,2	31,41	31,3	21,3
Celulosa	69,28	79,2	78	65,2	78	37,7	37,28	41,8	43,1
Hemicelulosa	12,98	20	20,3	20,1	19,3	29,2	24,89	12,1	27,2
Cenizas	1	-	-	-	-	-	0,26	0,7	1,5

Fuente: a. (Silva, Mocchiutti, Zanuttini, & Ramosa, 2006); b. (Spence, Venditti, Habibi, Rojas, & Pawlak, 2010); c. (Stoffel, 2016); d. (María C Area & Vallejos, 2012); e. (María C Area, Felissia, & Vallejos, 2009)

Aquellas materias primas que presentan un mayor contenido de carbohidratos, tendrán una mayor capacidad de enlace y por lo tanto favorecerán a las propiedades de resistencia de los productos finales; mientras que aquellas materias primas que presentan un mayor contenido de lignina tendrán menor capacidad de hinchamiento y

mayor rigidez de las fibras disminuyendo la capacidad de enlace, y con ello las propiedades de resistencia.

IV.1.2. DIMENSIONES MORFOLÓGICAS DE LAS FIBRAS

IV.1.2.1. Longitud de fibra por clasificación

La Tabla IV.3, muestra los porcentajes en peso de las fracciones de pulpas ONP, OWP y OCC, según longitud de fibra, obtenidas por clasificación.

Tabla IV.3. Composición porcentual en peso del fraccionamiento de pulpas secundarias según longitud de fibra

Fracción (mesh)	% en peso		
	ONP	OWP	OCC
R 30 (fibras largas)	26,66	26,97	48,10
R 50	33,03	30,95	21,55
R 100	14,87	17,19	11,90
R 200	6,67	3,99	2,86
P 200 (finos)	18,76	20,99	15,58

Las pulpas OCC presentan en su composición, un mayor porcentaje de fibras largas y un menor porcentaje de finos, en comparación con las pulpas OWP y ONP. Dichos resultados pueden ser consecuencia del origen de la materia prima; en general, los papeles de diario se elaboran a partir de fibras provenientes de pulpas mecánicas (principalmente fibras de latifoliadas); los papeles de oficina de fibras provenientes de pulpas químicas blanqueadas (principalmente fibras de coníferas o de bagazo); y los cartones corrugados, de fibras provenientes de pulpas químicas sin blanquear (papel liner) y de fibras secundarias (papel onda).

La Tabla IV.4, muestra los porcentajes en peso de las fracciones de diferentes pulpas secundarias, según longitud de fibra obtenidas por clasificación, bajo las mismas condiciones de fraccionamiento, informada por otros autores (S. E. Aguilar, 2001; Turrado, Dávalos, Fuentes, & Saucedo, 2012; Turrado, Saucedo, Ramos, & Reynoso, 2008). Dichos valores difieren numéricamente de los encontrados en el trabajo de investigación, posiblemente como consecuencia del origen y del ciclo de vida de las pulpas celulósicas recicladas, o del funcionamiento del equipo de fraccionamiento. Las pulpas de origen mecánico presentan menor porcentaje de fibras largas (fracción R30) y mayor porcentaje de finos (fracción P 200), en comparación con las pulpas de origen químico. En general, la fracción de fibras largas intactas en pulpas mecánicas pueden variar de 20% a 40% en peso dependiendo del tratamiento, mientras que en pulpas químicas pueden llegar a un 90% en peso (Niskanen, 2000).

Tabla IV.4. Datos de la literatura de composición porcentual en peso del fraccionamiento de pulpas secundarias según longitud de fibra

Fracción (mesh)	% en peso			
	ONP (a)	Pulpa reciclada Kraft (b)	Pulpa reciclada Kraft bolsero (c)	Pulpa de cartón de envase (a)
R 30	24,7	40,37	85,44	53,9
R 50	10,8	10,75	7,7	7,8
R 100	8,9	10,80	3,97	3,9
R 200	24,3	14,47	2,82	5,8
P 200	31,3	23,60	-	28,6

Fuente: a. (Turrado et al., 2012); b. (Turrado et al., 2008); c. (S. E. Aguilar, 2001)

IV.1.2.2. Identificación por microscopía de las fibras obtenidas por clasificación

La Figura IV.1, presenta una comparación de las microfotografías de cada fracción de pulpa obtenida por clasificación.

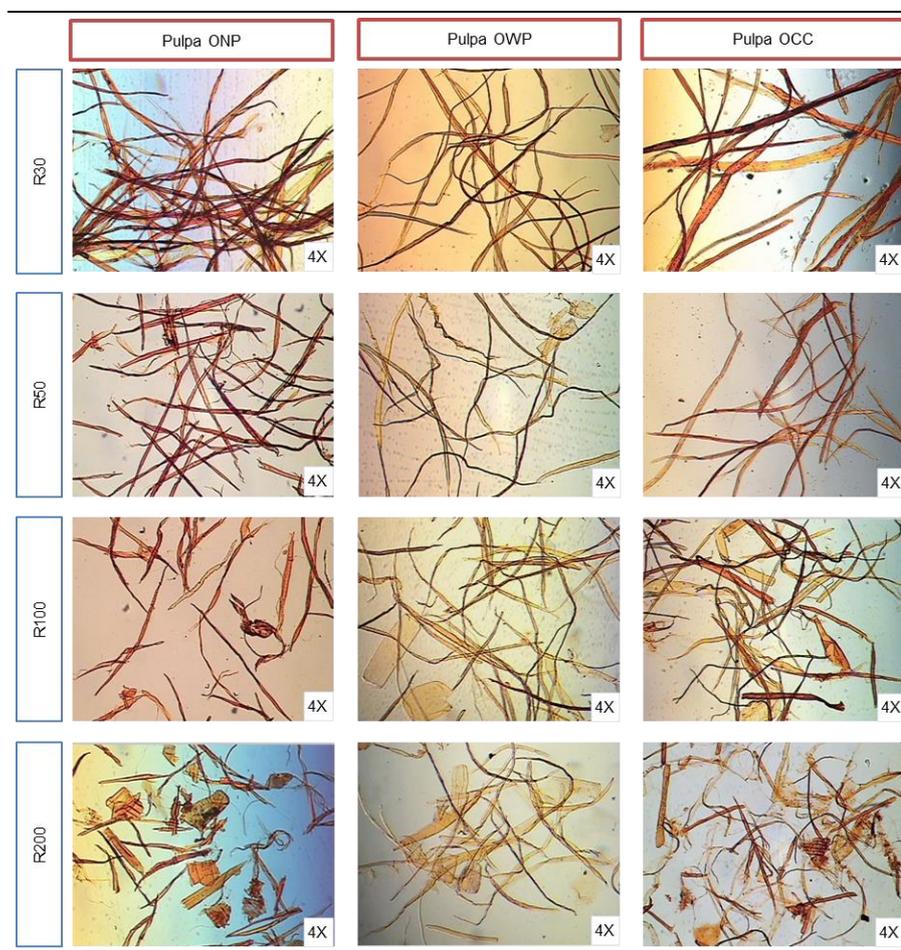


Figura IV.1. Microfotografías de fibras secundarias obtenidas por clasificación

En las microfotografías se observa que, la fracción R30 está conformada por fibras enteras, principalmente de latifoliadas (fibras de color marrón oscuro) en ONP y de coníferas (fibras de color marrón claro) en OWP y OCC; al igual que la fracción

R50; la fracción R100 está conformada por elementos fibrilares incluyendo trozos cortos de fibras; trozos fibrilares de pared (cintas y elementos vasculares); y la fracción R200 está conformada principalmente por finos fibrilares; trozos de células radiales. La fracción P200 está conformada por lámina media y pared primaria.

IV.1.2.3. Longitud de fibra por microscopía

La Figura IV.2, muestra los resultados obtenidos de longitud media correspondiente a cada fracción obtenida por clasificación, y la longitud ponderada para cada uno de los tipos de pulpa estudiados.

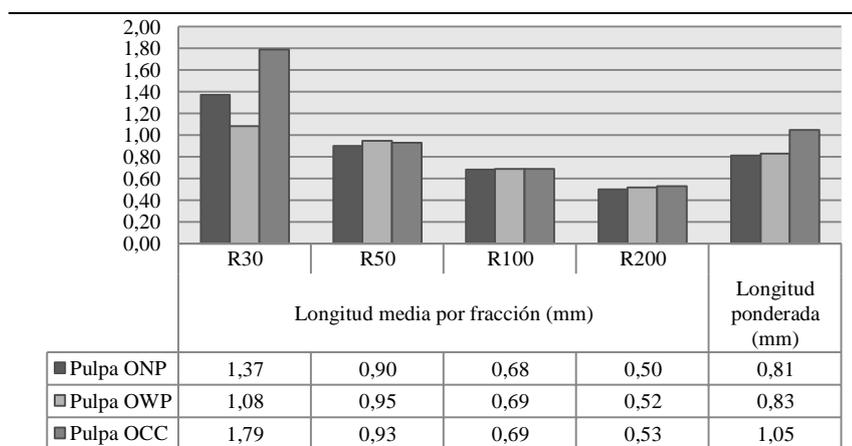


Figura IV.2. Longitud de fibra por microscopía

La longitud media de fibra correspondiente a la fracción R30, oscila entre 1,1 mm para pulpas OWP y 1,8 mm para pulpas OCC. La longitud ponderada en peso, oscila entre 0,8 mm para pulpas OWP y ONP y; 1,1 mm para pulpas OCC. Estos resultados concuerdan con los datos informados para composición porcentual en peso del fraccionamiento de pulpas secundarias según longitud de fibra: el mayor porcentaje de fibras largas y la mayor longitud ponderada en peso, corresponde a pulpas OCC.

IV.1.2.4. Longitud de fibra por análisis automático

La Tabla IV.5, proporciona algunos parámetros morfológicos obtenidos por análisis automático, utilizando un analizador FQA, de pulpas ONP, OWP y OCC.

Tabla IV.5. Parámetros morfológicos obtenidos por análisis automático (FQA)

Parámetros morfológicos	ONP	OWP	OCC
Longitud ponderada (mm)	0,87	0,86	1,20
Ancho de fibra (µm)	23,70	18,80	22,09
Índice Curl (%)	7	15	13
Índice Kink (1/mm)	1,05	2,28	1,82
Contenido de finos (%)	41,20	23,20	29,40

La longitud ponderada oscila entre 0,9 mm para fibras de pulpas ONP y OWP y; 1,20 mm para fibras de pulpas OCC. Una mayor longitud de fibras da lugar a un mayor número de enlaces, aumentando la superficie de contacto, y la fuerza de unión, y con ello la resistencia del entramado fibroso (Niskanen, 2000), en el caso de pulpas químicas por la pérdida de flexibilidad de las fibras, aunque se mantenga la longitud, el número de enlaces puede verse afectado. Una menor longitud de fibra, da lugar a un entramado fibroso más “cerrado” porque las fibras llenan los espacios intersticiales, y en consecuencia se tiene mayor rigidez, y mejor formación. El contenido de finos oscila entre 23% para pulpas OWP y 41% para pulpas ONP. El contenido de finos, como consecuencia de la gran área superficial que estos tienen, mejoran la unión entre las fibras (Niskanen, 2000), la estructura y el entramado fibroso, y con ello las propiedades de resistencia (Pulkkinen et al., 2006). El ancho de fibra oscila entre 19 μm para fibras de pulpas OWP y 24 μm para fibras de pulpas ONP. Tanto el ancho de fibra como el espesor de pared, influyen sobre la forma de colapso de las fibras y ello sobre las propiedades de resistencia (Pulkkinen et al., 2006). Fibras con espesores de pared más pequeños, son más flexibles y colapsan fácilmente en forma de cinta durante la formación; en cambio, fibras con paredes de mayor espesor presentan resistencia al colapso y no contribuyen a la formación de enlaces entre las fibras; dan una hoja abierta, voluminosa, con bajas propiedades de resistencia a la tracción y a la explosión y altas propiedades de resistencia al rasgado (Johansson, 2011). El índice Curl oscila entre 7% para fibras de pulpas ONP y 15% para fibras de pulpas OWP; y el índice Kink oscila entre 1,1 mm^{-1} para fibras de pulpas ONP y 2,3 mm^{-1} para fibras de pulpas OWP. Las deformaciones de las fibras tienen un efecto significativo sobre la resistencia de las fibras (Zeng, Retulainen, Heinemann, & Fu, 2012); las torceduras en la fibras (Kink), afectan negativamente la resistencia a la tracción en húmedo de la pulpa, mientras que los efectos de rizado en las fibras (Curl), afectan negativamente a la resistencia a la tracción y puede conducir a un elevado índice de rasgado (Wathén, 2006; Zeng et al., 2012).

La Tabla IV.6, muestra parámetros morfológicos de diferentes pulpas secundarias, obtenidas por medición automática mediante un analizador FQA, informados por otros autores (Cabalova et al., 2011; Pavlik & Gavazzo, 2013; Turrado et al., 2012), los cuales presentan cierta similitud con los resultados informados en el estudio.

Los valores de grado de drenado oscilan entre 17 °SR para mezclas OCC:PS en proporción 60:40 y 32 °SR para pulpas puras ONP, en el “Diseño I”; entre 18 °SR para mezclas OCC:ES en proporción 60:40 y 32 °SR para pulpas puras ONP, en el “Diseño II”; y entre 23 °SR para pulpas puras OCC y 36 °SR para mezclas ONP:SCB en proporción 60:40, en el “Diseño III”. El grado de drenado para las diferentes pulpas de estudio sigue el siguiente orden, ONP>OWP>OCC; y para los materiales secundarios, SCB>ES>PS. En el caso de las pulpas ONP, los mayores valores de grado de drenado en comparación a las pulpas OWP y OCC, puede ser consecuencia de los mayores porcentajes de fibras cortas y de finos, principales causantes de la disminución de la capacidad de drenado. Las medidas de drenado de la pulpa, indican la facilidad que tiene dicha pulpa en retener agua (Smook, 1990d), por lo cual, a un mayor valor de °SR, la pulpa tiene menor capacidad de drenado y por lo tanto, mayor capacidad de retener agua (Levlin & Söderhjelm, 2000). En el caso de SCB, los mayores valores de grado de drenado en comparación con PS y ES, es consecuencia de la elevada capacidad de absorción de agua que presentan las fibras de SCB. La naturaleza hidrofílica de las fibras celulósicas desempeña un papel importante ya que la estructuración de la red fibrosa ocurre en medio acuoso. Las medidas de capacidad de drenado son importantes durante la formación, un excesivo drenado es un indicativo de una formación deficiente, de un mayor flujo de agua atravesando las fibras, de un mayor contenido de fibras enteras, bajo contenido de finos y baja fibrilación; y pulpas con mayor capacidad de retener agua (menor capacidad de drenado) son un indicativo de una mayor superficie de enlace, de mayor capacidad de formación de enlace fibra-fibra, y por lo tanto mayores propiedades de resistencia.

En investigaciones previas (Graciela B. Gavazzo & Pavlik, 2008a) sobre grado de drenado de pulpas secundarias de tipo ONP, OWP y OCC, los autores han informado valores de 38,9 °SR para pulpas ONP; de 29,3 °SR para pulpas OWP y de 24,6 °SR para pulpas OCC; valores superiores a los encontrados durante el estudio, 32°SR para pulpas ONP; de 27 °SR para pulpas OWP y de 23 °SR para pulpas OCC.

Tiempo de drenado:

La Figura IV.4, presenta una comparación del tiempo de drenado para las distintas combinaciones de materiales según la matriz experimental (Tabla III.5).

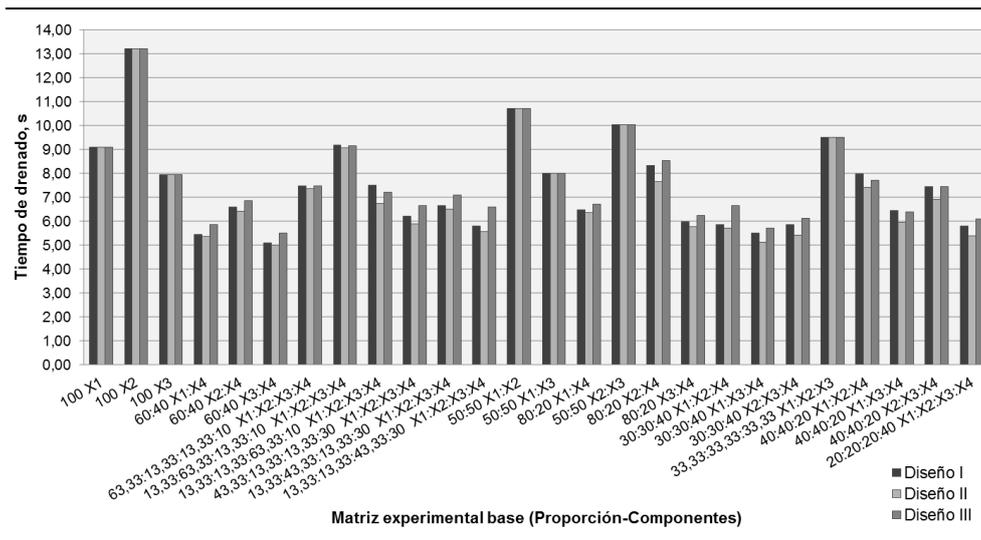


Figura IV.4. Tiempo de drenado

Los valores de tiempo de drenado oscilan entre 5 s para OCC:PS en proporción 60:40 y, 13 s para pulpas puras OWP, en el “Diseño I”; entre 5, s para OCC:ES en proporción 60:40 y 13 s para pulpas puras OWP, en el “Diseño II”; y entre 6, s para OCC:SCB en proporción 60:40 y 13 s para pulpas puras OWP, en el “Diseño III”. El tiempo de drenado para las diferentes pulpas de estudio sigue el siguiente orden, OWP>ONP>OCC; y para los diferentes materiales secundarios sigue el siguiente orden, SCB>PS>ES. El tiempo de drenado, es un indicativo del tiempo que se demora en eliminar el agua presente en una suspensión de pulpa; y depende en gran medida de las propiedades de las fibras, incluyendo longitud, flexibilidad y grado de hinchamiento (Levlin & Söderhjelm, 2000).

En investigaciones previas (Graciela B. Gavazzo & Pavlik, 2008a) sobre tiempo de drenado de pulpas secundarias de tipo ONP, OWP y OCC, los autores han informado valores de tiempo de drenado de 16,8 s para pulpas ONP; de 15,15 s para pulpas OWP y de 11,85 s para pulpas OCC; valores superiores a los encontrados durante el estudio, 9 s para pulpas ONP; de 13 s para pulpas OWP y de 8 s para pulpas OCC.

Valor de retención de agua

La Figura IV.5, presenta una comparación del valor de retención de agua para las distintas combinaciones de materiales según la matriz experimental (Tabla III.5).

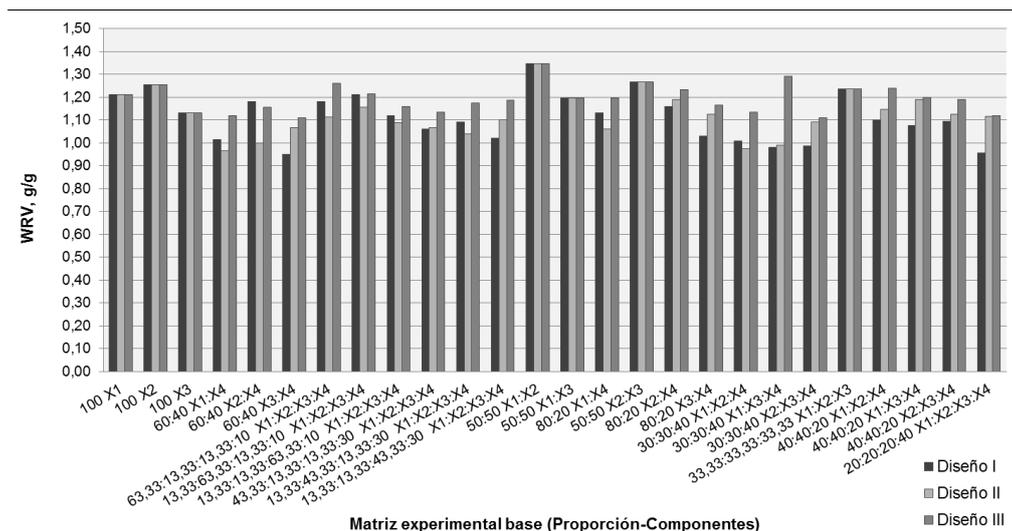


Figura IV.5. Valor de retención de agua

Los valores de WRV oscilan entre 0,95 g/g para mezclas OCC:PS en proporción 60:40 y 1,35 g/g para mezclas ONP:OWP en proporción 50:50, en el “Diseño I”; entre 0,97 g/g para mezclas ONP:ES en proporción 60:40 y 1,35 g/g para mezclas ONP:OWP en proporción 50:50, en el “Diseño II”; y entre 1,11 g/g para mezclas OCC:SCB en proporción 60:40 y 1,35 g/g para mezclas ONP:OWP en proporción 50:50, en el “Diseño III”. El valor de WRV para las diferentes pulpas de estudio sigue el siguiente orden, OWP>ONP>OCC; y para los materiales secundarios, SCB>PS>ES. Los valores de WRV se relacionan con el hinchamiento de la pared de la fibra y la fibrilación de la misma (Ali, 2013). A mayores valores de WRV, se tiene una mayor captación de agua y en consecuencia una mayor capacidad de formar enlace fibra-fibra debido al aumento de puentes hidrógeno y al hinchamiento que mejoran las propiedades de colapso, y esto lleva a mayores propiedades mecánicas (Ali, 2013; Atalla, 2011).

En investigaciones previas (Benitez et al., 2014) sobre valor de retención de agua en pulpas secundarias de tipo OWP, los autores han informado valores WRV entre 1,13 a 1,40 g/g en función al origen de la materia prima. (Brancato, Walsh, Sabo, & Banerjee, 2007) han informado valores de WRV de 1,79 g/g para pulpas recicladas del tipo kraft bolsero y valores de WRV de 1,4 g/g para pulpas recicladas del tipo TMP; valores que difieren de los encontrados en el estudio, 1,20 g/g para pulpas ONP; 1,25 g/g para pulpas OWP, y 1,10 para pulpas OCC.

IV.1.3.2. Propiedades estructurales y mecánicas

Las tablas IV.7, IV.8 y IV.9, proporcionan las propiedades estructurales (gramaje, espesor, densidad, volumen específico y resistencia al paso del aire) y las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, a la tracción en húmedo, al reventamiento, al rasgado, y a la compresión en anillo, y rigidez) correspondientes a los materiales de estudio del Diseño I, II y III, respectivamente, según matriz experimental base (Tabla III.5).

Tabla IV.7. Propiedades estructurales y mecánicas: Diseño I

Matriz experimental base (Proporción-Componentes)	Gramaje [g/m ²]	Espesor [mm]	Volumen específico [cm ³ /g]	Densidad aparente [g/cm ³]	Resistencia al paso del aire [s]	Tracción [N m/g]	Reventamiento [kPa m ² /g]	Rasgado [mN m ² /g]	RCT [kN/m]	Rigidez [mN m]	Tracción en húmedo [N m/g]
100 X1	179,33	0,43	2,38	0,42	9,10	15,15	0,61	3,15	0,97	2,93	1,78
100 X2	159,49	0,23	1,45	0,69	54,94	46,57	3,20	8,22	2,42	1,81	1,39
100 X3	162,74	0,29	1,79	0,56	11,25	27,80	1,80	10,42	1,63	1,93	1,97
60:40 X1:X4	159,69	0,58	3,62	0,28	1,49	3,83	0,20	1,32	0,28	1,01	0,65
60:40 X2:X4	169,60	0,53	3,14	0,32	3,87	11,39	0,73	4,35	0,69	1,70	0,28
60:40 X3:X4	159,01	0,52	3,25	0,31	1,59	8,46	0,52	3,84	0,47	1,39	0,64
63,33:13,33:13,33:10 X1:X2:X3:X4	161,19	0,45	2,78	0,36	5,31	13,27	0,60	3,47	0,81	2,24	1,23
13,33:63,33:13,33:10 X1:X2:X3:X4	156,68	0,39	2,46	0,41	11,80	25,42	1,43	6,83	1,42	2,04	0,88
13,33:13,33:63,33:10 X1:X2:X3:X4	165,45	0,42	2,54	0,39	6,34	21,37	1,09	6,79	1,13	2,34	1,20
43,33:13,33:13,33:30 X1:X2:X3:X4	155,56	0,50	3,21	0,31	2,02	9,10	0,44	2,93	0,53	1,34	0,70
13,33:43,33:13,33:30 X1:X2:X3:X4	158,78	0,47	2,97	0,34	3,30	14,33	0,78	4,65	0,76	1,67	0,66
13,33:13,33:43,33:30 X1:X2:X3:X4	162,08	0,50	3,06	0,33	1,83	12,86	0,62	4,23	0,65	1,68	0,78
50:50 X1:X2	163,28	0,32	1,96	0,51	19,21	24,56	1,28	4,85	1,59	2,32	1,34
50:50 X1:X3	161,64	0,35	2,17	0,46	8,14	19,84	0,96	5,70	1,16	1,97	1,81
80:20 X1:X4	163,32	0,51	3,12	0,32	2,74	8,47	0,33	2,15	0,55	1,89	1,01
50:50 X2:X3	160,14	0,26	1,65	0,61	24,96	37,09	2,30	9,62	2,12	1,90	1,63
80:20 X2:X4	158,87	0,43	2,69	0,37	7,27	23,30	1,47	6,44	1,23	1,95	0,73
80:20 X3:X4	161,39	0,45	2,79	0,36	2,28	17,30	0,92	6,63	0,88	2,04	1,15
30:30:40 X1:X2:X4	155,39	0,52	3,33	0,30	1,30	8,20	0,42	2,57	0,46	1,42	0,43
30:30:40 X1:X3:X4	163,47	0,55	3,34	0,30	1,80	5,66	0,32	2,24	0,38	1,24	0,61
30:30:40 X2:X3:X4	162,76	0,53	3,23	0,31	1,32	10,40	0,64	4,17	0,58	1,85	0,42
33,33:33,33:33,33 X1:X2:X3	161,74	0,31	1,93	0,52	15,26	26,84	1,28	6,61	1,48	2,21	1,28
40:40:20 X1:X2:X4	165,17	0,47	2,82	0,35	4,55	14,16	0,70	3,85	0,84	2,08	0,71
40:40:20 X1:X3:X4	163,31	0,50	3,04	0,33	2,77	10,72	0,54	3,52	0,63	1,97	1,03
40:40:20 X2:X3:X4	159,86	0,44	2,73	0,37	5,18	20,84	1,16	6,35	1,06	2,12	0,87
20:20:20:40 X1:X2:X3:X4	161,49	0,54	3,36	0,30	1,49	8,30	0,45	2,88	0,48	1,39	0,57

Nota: X1=ONP; X2=OWP; X3=OCC; X4=PS

Tabla IV.8. Propiedades estructurales y mecánicas: Diseño II

Matriz experimental base (Proporción-Componentes)	Gramaje [g/m ²]	Espesor [mm]	Volumen específico [cm ³ /g]	Densidad aparente [g/cm ³]	Resistencia al paso del aire [s]	Tracción [N m/g]	Reventamiento [kPa m ² /g]	Rasgado [mN m ² /g]	RCT [kN/m]	Rigidez [mN m]	Tracción en húmedo [N m/g]
100 X1	179,33	0,43	2,38	0,42	9,10	15,15	0,61	3,15	0,97	2,93	1,78
100 X2	159,49	0,23	1,45	0,69	54,94	46,57	3,20	8,22	2,42	1,81	1,39
100 X3	162,74	0,29	1,79	0,56	11,25	27,80	1,80	10,42	1,63	1,93	1,97
60:40 X1:X4	157,71	0,54	3,43	0,29	1,90	4,40	0,22	1,60	0,25	0,78	0,50
60:40 X2:X4	157,17	0,49	3,13	0,32	3,65	13,65	0,85	4,80	0,67	1,79	0,40
60:40 X3:X4	164,09	0,52	3,20	0,31	1,35	9,72	0,58	4,00	0,51	1,47	0,48
63,33:13,33:13,33:10 X1:X2:X3:X4	161,18	0,43	2,66	0,38	10,39	15,40	0,66	3,87	0,78	1,88	0,72
13,33:63,33:13,33:10 X1:X2:X3:X4	159,19	0,37	2,33	0,43	19,88	27,07	1,49	6,79	1,38	1,83	0,73
13,33:13,33:63,33:10 X1:X2:X3:X4	160,40	0,40	2,47	0,41	5,82	20,83	1,06	6,27	0,97	2,01	0,90
43,33:13,33:13,33:30 X1:X2:X3:X4	164,98	0,51	3,11	0,32	1,94	9,04	0,45	2,77	0,49	1,56	0,51
13,33:43,33:13,33:30 X1:X2:X3:X4	163,32	0,48	2,95	0,34	2,44	13,72	0,80	4,22	0,67	1,87	0,44
13,33:13,33:43,33:30 X1:X2:X3:X4	161,10	0,50	3,09	0,32	1,65	11,21	0,63	4,12	0,59	1,53	0,47
50:50 X1:X2	163,28	0,32	1,96	0,51	19,21	24,56	1,28	4,85	1,59	2,32	1,34
50:50 X1:X3	161,64	0,35	2,17	0,46	8,14	19,84	0,96	5,70	1,16	1,97	1,81
80:20 X1:X4	165,70	0,51	3,10	0,32	2,65	7,56	0,35	2,00	0,48	1,66	0,67
50:50 X2:X3	160,14	0,26	1,65	0,61	24,96	37,09	2,30	9,62	2,12	1,90	1,63
80:20 X2:X4	162,91	0,40	2,46	0,41	6,98	23,05	1,38	6,14	1,08	2,06	0,48
80:20 X3:X4	160,86	0,44	2,76	0,36	2,51	16,22	0,93	6,09	0,78	1,78	0,73
30:30:40 X1:X2:X4	158,64	0,53	3,37	0,30	1,22	8,78	0,46	2,69	0,48	1,43	0,32
30:30:40 X1:X3:X4	163,59	0,54	3,33	0,30	1,91	6,82	0,35	2,35	0,36	1,42	0,39
30:30:40 X2:X3:X4	160,09	0,51	3,20	0,31	1,27	12,65	0,73	4,53	0,58	1,74	0,39
33,33:33,33:33,33:30 X1:X2:X3	161,74	0,31	1,93	0,52	15,26	26,84	1,28	6,61	1,48	2,21	1,28
40:40:20 X1:X2:X4	160,30	0,45	2,81	0,36	5,12	16,12	0,79	4,00	0,75	1,96	0,56
40:40:20 X1:X3:X4	162,31	0,49	2,99	0,33	2,26	11,60	0,53	3,62	0,50	1,80	0,64
40:40:20 X2:X3:X4	160,10	0,43	2,67	0,38	4,12	21,82	1,24	6,77	1,02	1,87	0,76
20:20:20:40 X1:X2:X3:X4	165,04	0,53	3,21	0,31	1,58	8,32	0,45	4,47	0,41	1,46	0,34

Nota: X1=ONP; X2=OWP; X3=OCC; X4=ES

Tabla IV.9. Propiedades estructurales y mecánicas: Diseño III

Matriz experimental base (Proporción-Componentes)	Gramaje [g/m ²]	Espesor [mm]	Volumen específico [cm ³ /g]	Densidad aparente [g/cm ³]	Resistencia al paso del aire [s]	Tracción [N m/g]	Reventamiento [kPa m ² /g]	Rasgado [mN m ² /g]	RCT [kN/m]	Rigidez [mN m]	Tracción en húmedo [N m/g]
100 X1	179,33	0,43	2,38	0,42	9,10	15,15	0,61	3,15	0,97	2,93	1,78
100 X2	159,49	0,23	1,45	0,69	54,94	46,57	3,20	8,22	2,42	1,81	1,39
100 X3	162,74	0,29	1,79	0,56	11,25	27,80	1,80	10,42	1,63	1,93	1,97
60:40 X1:X4	162,68	0,46	2,84	0,35	6,16	7,46	0,30	1,86	0,58	1,73	0,72
60:40 X2:X4	157,41	0,39	2,47	0,41	7,99	19,47	1,04	5,15	1,27	2,13	0,71
60:40 X3:X4	162,86	0,43	2,65	0,38	3,28	14,17	0,72	4,83	0,89	2,01	0,90
63,33:13,33:13,33:10 X1:X2:X3:X4	163,44	0,37	2,28	0,44	8,45	16,46	0,75	3,81	1,03	2,10	1,10
13,33:63,33:13,33:10 X1:X2:X3:X4	159,41	0,31	1,92	0,52	20,43	30,93	1,75	7,04	1,71	2,03	0,91
13,33:13,33:63,33:10 X1:X2:X3:X4	163,23	0,34	2,06	0,48	9,00	24,47	1,28	7,31	1,42	2,37	1,35
43,33:13,33:13,33:30 X1:X2:X3:X4	164,50	0,42	2,57	0,39	5,53	12,78	0,58	3,25	0,90	2,14	0,85
13,33:43,33:13,33:30 X1:X2:X3:X4	162,05	0,40	2,44	0,41	7,80	18,77	1,01	5,14	1,26	2,40	0,75
13,33:13,33:43,33:30 X1:X2:X3:X4	163,30	0,39	2,39	0,42	6,11	17,53	0,88	5,32	1,12	2,26	0,79
50:50 X1:X2	163,28	0,32	1,96	0,51	19,21	24,56	1,28	4,85	1,59	2,32	1,34
50:50 X1:X3	161,64	0,35	2,17	0,46	8,14	19,84	0,96	5,70	1,16	1,97	1,81
80:20 X1:X4	166,56	0,42	2,53	0,39	5,60	10,80	0,43	2,33	0,77	2,10	0,72
50:50 X2:X3	160,14	0,26	1,65	0,61	24,96	37,09	2,30	9,62	2,12	1,90	1,63
80:20 X2:X4	159,94	0,34	2,14	0,47	17,15	28,70	1,65	6,53	1,79	2,20	0,72
80:20 X3:X4	165,01	0,36	2,20	0,45	7,00	21,22	1,12	7,05	1,29	2,31	0,85
30:30:40 X1:X2:X4	168,19	0,43	2,58	0,39	3,13	12,97	0,60	3,20	0,99	2,27	0,46
30:30:40 X1:X3:X4	166,96	0,45	2,67	0,37	3,23	9,30	0,41	2,98	0,73	1,94	0,40
30:30:40 X2:X3:X4	167,49	0,40	2,40	0,42	4,93	15,44	0,79	4,72	1,10	2,11	0,41
33,33:33,33:33,33:30 X1:X2:X3	161,74	0,31	1,93	0,52	15,26	26,84	1,28	6,61	1,48	2,21	1,28
40:40:20 X1:X2:X4	159,90	0,37	2,32	0,43	9,53	18,71	0,87	4,19	1,20	2,19	0,58
40:40:20 X1:X3:X4	167,94	0,41	2,46	0,41	4,73	13,51	0,64	4,05	0,94	2,23	0,80
40:40:20 X2:X3:X4	165,46	0,37	2,23	0,45	12,00	24,77	1,44	7,48	1,54	2,39	0,82
20:20:20:40 X1:X2:X3:X4	171,40	0,45	2,65	0,38	4,85	12,25	0,62	3,95	0,95	2,07	0,62

Nota: X1=ONP; X2=OWP; X3=OCC; X4=SCB

De los resultados obtenidos (Tabla IV.7; Tabla IV.8 y Tabla IV.9) se observa que, para las diferentes pulpas secundarias de estudio, los valores de espesor, volumen

específico, y rigidez, siguen el siguiente orden ONP>OCC>OWP; lo cual puede ser consecuencia de la mayor rigidez y baja capacidad de hinchamiento de las fibras por el mayor contenido de lignina y al elevado contenido de finos en la pulpa (Pavlik & Gavazzo, 2013); los valores de densidad, al igual que los valores de resistencia a la tracción, al reventamiento, a la compresión y al paso del aire, siguen el siguiente orden OWP>OCC>ONP; lo cual puede ser consecuencia de la mayor capacidad de hinchamiento de la fibra y la mayor flexibilidad y posibilidad de formar enlaces entre fibras, y de la mayor deformación de estas (curl y kink) (Pavlik & Gavazzo, 2013); los valores de resistencia a la tracción en húmedo siguen el siguiente orden OCC>ONP>OWP; mientras que los valores de resistencia al rasgado siguen el siguiente orden OCC>OWP>ONP; lo cual puede ser consecuencia de la presencia de fibras de paredes gruesas, de bajo colapsamiento y menor superficie de enlaces (Pavlik & Gavazzo, 2013). En las mezclas de pulpas secundarias, las propiedades variaron, dependiendo de la propiedad individual, el porcentaje de mezcla y el tipo de pulpa secundaria utilizada. En mezclas de pulpas secundarias con PS, ES o SCB, las propiedades de las pulpas se vieron afectadas por la adición de dichos materiales, variando en función al tipo de material y al porcentaje de este presente en la mezcla. A mayor proporción de dichos materiales en cada mezcla, independiente del tipo de pulpa secundaria, aumentan los valores de espesor; disminuyen los valores de densidad; aumentan los valores de volumen específico; disminuyen los valores de tracción, tracción en húmedo, reventamiento, rasgado, compresión y resistencia al paso del aire; y los valores de rigidez disminuyen en mezclas con ONP pero aumentan en mezclas con OWP y OCC. En general, la influencia de dichos materiales sobre los valores de las propiedades sigue el siguiente orden: SCB>ES>PS; lo cual puede ser debido a la naturaleza y composición química de los mismos; el bagazo tiene mayor contenido de carbohidratos en comparación a los aserrines, lo cual puede dar lugar a una mayor capacidad de formar enlaces por puente hidrogeno; los aserrines presentan mayor contenido de lignina y extractivos, en comparación al bagazo, lo cual puede dar lugar a una menor capacidad de enlace.

En investigaciones previas (Graciela B. Gavazzo & Pavlik, 2008a; Pavlik & Gavazzo, 2013), sobre propiedades estructurales y mecánicas de pulpas secundarias de ONP, OWP y OCC evaluadas en hojas de laboratorio, los autores informaron que las pulpas OWP dan hojas más densas, y mejoran las propiedades de tracción,

reventamiento y compresión en anillo, y presentan mayores valores de porosidad; las pulpas ONP mejoran la rigidez y dan hojas con un mayor volumen específico (menor densidad), y las pulpas OCC mejoran las propiedades de resistencia al rasgado, resultados equivalentes a los del trabajo de investigación.

IV.1.3.3. Optimización

Para evaluar los efectos de la combinación de los materiales lignocelulósicos de estudio, sobre las propiedades de drenabilidad (WRV) y las propiedades estructurales (densidad y resistencia al paso del aire) y mecánicas (resistencia a la tracción, a la tracción en húmedo, al reventamiento, al rasgado, a la compresión en anillo y rigidez), se optimizaron las variables respuestas para seleccionar la combinación ideal (máxima resistencia mecánica; máxima rigidez; mínima resistencia al paso del aire), que permita diseñar contenedores biodegradables aptos para el cultivo.

Modelo Ajustado

Se seleccionó aquel modelo matemático para el cual el valor-p es menor que 0,05 indicando que hay una relación estadísticamente significativa entre las variables respuestas y los componentes, a un NC del 95%. El mejor modelo, corresponde a una relación polinomial, con el error estándar más pequeño y el R^2 - ajustado más alto.

Las tablas IV.10, IV.11 y IV.12, proporcionan las ecuaciones del modelo ajustado, para cada una de las variables evaluadas, correspondientes al Diseño I, II y III, respectivamente.

Tabla IV.10. Modelo ajustado para cada variable respuesta: Diseño I

Ecuación del modelo ajustado	R2 ajustada (%)
Densidad = $0,41 * X_1 + 0,65 * X_2 + 0,54 * X_3 + 1,10 * X_4 - 1,58 * X_1 * X_2 - 2,18 * X_2 * X_4 - 1,87 * X_3 * X_4$	95,03
Resistencia al paso del aire = $8,83 * X_1 + 49,45 * X_2 + 11,01 * X_3 + 81,94 * X_4 - 35,77 * X_1 * X_2 - 138,00 * X_1 * X_4 - 22,60 * X_2 * X_3 - 254,60 * X_2 * X_4 - 148,80 * X_3 * X_4$	91,40
Tracción = $14,01 * X_1 + 45,25 * X_2 + 27,71 * X_3 + 14,82 * X_4 - 18,02 * X_1 * X_2 - 39,72 * X_1 * X_4 - 88,60 * X_2 * X_4 - 55,89 * X_3 * X_4$	98,63
Reventamiento = $0,43 * X_1 + 2,99 * X_2 + 1,59 * X_3 + 0,11 * X_4 - 2,06 * X_1 * X_2 - 4,88 * X_2 * X_4 - 2,35 * X_3 * X_4$	96,18
Rasgado = $3,07 * X_1 + 8,36 * X_2 + 10,41 * X_3 - 1,27 * X_4 - 2,83 * X_1 * X_2 - 4,48 * X_1 * X_3 - 8,44 * X_3 * X_4$	99,44
RCT = $0,87 * X_1 + 2,37 * X_2 + 1,59 * X_3 + 1,75 * X_4 - 3,77 * X_1 * X_4 - 6,13 * X_2 * X_4 - 4,88 * X_3 * X_4$	98,40
Rigidez = $2,91 * X_1 + 1,82 * X_2 + 2,04 * X_3 - 1,94 * X_4 - 1,14 * X_1 * X_3 + 5,93 * X_2 * X_4 + 4,85 * X_3 * X_4$	87,65
Tracción en húmedo = $1,72 * X_1 + 1,34 * X_2 + 1,86 * X_3 + 1,26 * X_4 - 1,09 * X_1 * X_2 - 3,65 * X_1 * X_4 - 3,98 * X_2 * X_4 - 4,10 * X_3 * X_4$	95,85
WRV = $1,22 * X_1 + 1,26 * X_2 + 1,15 * X_3 + 0,60 * X_4 + 0,38 * X_1 * X_2 + 0,22 * X_1 * X_4 + 0,51 * X_2 * X_4 - 3,35 * X_1 * X_2 * X_4$	91,91

Nota: X_1 =ONP; X_2 =OWP; X_3 =OCC; X_4 =PS

Tabla IV.11. Modelo ajustado para cada variable respuesta: Diseño II

Ecuación del modelo ajustado	R ² ajustada (%)
Densidad = $0,40*X_1 + 0,66*X_2 + 0,54*X_3 + 0,96*X_4 - 1,33*X_1*X_4 - 1,93*X_2*X_4 - 1,67*X_3*X_4$	97,02
Resistencia al paso del aire = $9,42*X_1 + 48,36*X_2 + 8,66*X_3 + 72,20*X_4 - 29,67*X_1*X_2 - 122,70*X_1*X_4 - 241,10*X_2*X_4 - 132,60*X_3*X_4$	90,98
Tracción = $14,44*X_1 + 45,37*X_2 + 27,46*X_3 + 22,75*X_4 - 15,74*X_1*X_2 - 52,55*X_1*X_4 - 95,34*X_2*X_4 - 65,95*X_3*X_4$	98,68
Reventamiento = $0,54*X_1 + 3,00*X_2 + 1,62*X_3 + 2,33*X_4 - 1,91*X_1*X_2 - 3,86*X_1*X_4 - 8,02*X_2*X_4 - 5,60*X_3*X_4$	96,29
Rasgado = $2,93*X_1 + 8,19*X_2 + 10,32*X_3 + 5,96*X_4 - 3,75*X_1*X_3 - 10,35*X_1*X_4 - 9,97*X_2*X_4 - 18,94*X_3*X_4$	96,27
RCT = $0,88*X_1 + 2,37*X_2 + 1,57*X_3 + 3,07*X_4 - 6,06*X_1*X_4 - 8,43*X_2*X_4 - 6,99*X_3*X_4$	97,83
Rigidez = $2,82*X_1 + 1,85*X_2 + 1,96*X_3 + 1,03*X_4 - 0,76*X_1*X_3 - 4,70*X_1*X_4 + 1,67*X_2*X_4$	87,41
Tracción en húmedo = $1,67*X_1 + 1,35*X_2 + 1,85*X_3 + 4,69*X_4 - 1,11*X_1*X_2 - 10,05*X_1*X_4 - 9,38*X_2*X_4 - 10,64*X_3*X_4$	94,10
WRV = $1,22*X_1 + 1,29*X_2 + 1,15*X_3 + 1,02*X_4 + 0,27*X_1*X_2 - 0,71*X_1*X_4 - 0,65*X_2*X_4 - 1,06*X_1*X_2*X_3$	75,78

Nota: X₁=ONP; X₂=OWP; X₃=OCC; X₄=ES

Tabla IV.12. Modelo ajustado para cada variable respuesta: Diseño III

Ecuación del modelo ajustado	R ² ajustada (%)
Densidad = $0,41*X_1 + 0,66*X_2 + 0,54*X_3 + 0,57*X_4 - 0,45*X_1*X_4 - 0,94*X_2*X_4 - 0,69*X_3*X_4$	95,28
Tracción en húmedo = $1,61*X_1 + 1,25*X_2 + 1,91*X_3 + 3,74*X_4 - 7,86*X_1*X_4 - 6,78*X_2*X_4 - 8,14*X_3*X_4$	86,40
Tracción = $15,20*X_1 + 45,49*X_2 + 27,63*X_3 - 5,11*X_4 - 17,49*X_1*X_2 - 7,94*X_1*X_3 - 28,44*X_2*X_4$	98,70
Reventamiento = $0,48*X_1 + 3,03*X_2 + 1,63*X_3 + 0,18*X_4 - 1,94*X_1*X_2 - 3,80*X_2*X_4 - 1,63*X_3*X_4$	97,08
Rasgado= $2,99*X_1 + 8,40*X_2 + 10,47*X_3 + 0,27*X_4 - 2,65*X_1*X_2 - 4,05*X_1*X_3 - 6,56*X_3*X_4$	99,04
RCT = $0,94*X_1 + 2,41*X_2 + 1,66*X_3 + 0,17*X_4 - 0,47*X_1*X_2 - 0,62*X_1*X_3 - 0,95*X_2*X_4 - 0,53*X_3*X_4$	98,92
Rigidez = $2,77*X_1 + 1,82*X_2 + 2,03*X_3 + 0,27*X_4 - 0,97*X_1*X_3 + 4,50*X_2*X_4 + 3,68*X_3*X_4$	57,08
Resistencia al paso del aire = $7,78*X_1 + 50,43*X_2 + 9,04*X_3 - 0,67*X_4 - 35,71*X_1*X_2 - 21,51*X_2*X_3 - 99,51*X_2*X_4$	94,13
WRV = $1,24*X_1 + 1,29*X_2 + 1,15*X_3 + 1,01*X_4 + 0,24*X_1*X_2 - 0,05*X_1*X_3 - 0,10*X_1*X_4 + 0,05*X_2*X_3 - 0,18*X_2*X_4 + 0,11*X_3*X_4 + 2,55*X_1*X_3*X_4$	53,37

Nota: X₁=ONP; X₂=OWP; X₃=OCC; X₄=SCB

Del modelo ajustado para cada variable respuesta, según diseño de estudio (Tabla IV.10, IV.11 y IV.12), se observa que las ecuaciones polinómicas de las variables respuestas de cada uno de los diseños, incluyen mezclas puras o binarias, excepto las respuestas de WRV, que además incluyen mezclas ternarias. Los resultados de las ecuaciones polinómicas indican la influencia de cada componente en la respuesta. La constante del componente puro de mayor valor, indica la mayor influencia sobre las respuestas. En efectos combinados, un signo positivo, implica efecto sinérgico entre los componentes, es decir, se tendrá un valor mayor para la respuesta cuando se mezclan estos componentes. Por el contrario, un signo negativo, implica efecto

antagónico entre los componentes, es decir, se tendrán valores menores para las respuestas cuando se mezclan estos componentes (Kuehl, 2001; Montgomery, 2004). El componente puro OWP tiene mayor influencia sobre: densidad aparente, índice de tracción, índice de reventamiento, RCT, resistencia al flujo de aire y WRV. El componente puro OCC tiene mayor influencia sobre: índice de rasgado y resistencia a la tracción en húmedo. El componente puro ONP tiene mayor influencia sobre: rigidez. Los materiales PS, ES y SCB, tienen una mínima influencia sobre las variables estudiadas, a excepción de la densidad y la resistencia al paso del aire, propiedades sobre las cuales si influyen. En las interacciones de los componentes se observa principalmente efecto antagónico en las variables estudiadas; a excepción de las variable WRV y rigidez, donde se observa efecto sinérgico.

Optimización de respuestas

La Tabla IV.13, proporciona la combinación de los niveles de los factores del diseño de mezcla que optimizan en forma individual y en forma simultánea todas las variables respuestas, según los objetivos deseados (máxima resistencia mecánica; máxima rigidez; mínima resistencia al paso del aire).

Tabla IV.13. Combinación de niveles de factores experimentales que optimizan las respuestas

Respuestas	Unidad	Objetivo	Niveles de factores óptimos ^(a)		
			Diseño I	Diseño II	Diseño III
Densidad	g/cm ³	Maximizar	100 X ₂	100 X ₂	100 X ₂
Tracción	N m/g	Maximizar	100 X ₂	100 X ₂	100 X ₂
Reventamiento	kPa m ² /g	Maximizar	100 X ₂	100 X ₂	100 X ₂
Rasgado	mN m ² /g	Maximizar	100 X ₃	100 X ₃	100 X ₃
RCT	kN/m	Maximizar	100 X ₂	100 X ₂	100 X ₂
Rigidez	mN m	Maximizar	100 X ₁	100 X ₁	100 X ₁
Tracción en húmedo	N m/g	Maximizar	100 X ₃	100 X ₃	100 X ₃
Resistencia al paso del aire	s	Minimizar	30:30:40 X ₁ :X ₂ :X ₄	30:30:40 X ₁ :X ₂ :X ₄	30:30:40 X ₁ :X ₂ :X ₄
WRV	g/g	Maximizar	50:50 X ₁ :X ₂	50:50 X ₁ :X ₂	50:50 X ₁ :X ₂
Respuestas múltiples ^(b)			50:50 X ₂ :X ₃	50:50 X ₂ :X ₃	50:50 X ₂ :X ₃

Nota: ^(a)Proporción porcentual – Componente; ^(b) Se determina teniendo en cuenta las condiciones de la columna “Objetivo”. Diseño I: X₁=ONP; X₂=OWP; X₃=OCC; X₄=PS. Diseño II: X₁=ONP; X₂=OWP; X₃=OCC; X₄=ES. Diseño III: X₁=ONP; X₂=OWP; X₃=OCC; X₄=SCB

El factor del diseño de mezcla, OWP, optimiza en forma individual las respuestas: densidad, índice de resistencia a la tracción, índice de resistencia a la explosión y RCT. El factor del diseño de mezcla OCC, optimiza en forma individual las respuestas: índice de resistencia al rasgado e índice de resistencia a la tracción en

húmedo. El factor del diseño de mezcla, ONP, optimiza en forma individual la respuesta: rigidez. El factor del diseño de mezcla, ONP:OWP:PS (ó ES ó SCB) en proporción 30:30:40, optimiza en forma individual la respuesta: resistencia al flujo de aire. El factor del diseño de mezcla, ONP y OWP en proporción 50:50, optimiza en forma individual la respuesta: WRV. El factor del diseño de mezcla OWP y OCC en proporción 50:50, optimiza en forma simultánea todas las respuestas analizadas. Se supone que dicha combinación permitirá obtener contenedores biodegradables de óptima calidad, en cuanto a resistencia, rigidez y permeabilidad del material. Los resultados demuestran que: mezclas de pulpas OWP y OCC maximizan las propiedades de resistencia y pulpas ONP maximizan las propiedades de rigidez y los materiales PS, ES o SCB maximizan la permeabilidad del producto. Los resultados no varían al variar el material PS, ES y SCB, lo cual demuestra que estos tienen menor influencia sobre las propiedades analizadas en comparación con las pulpas secundarias. Existen diferencia entre aquellos factores que optimizan las variables respuestas individuales y aquellos que optimizan las variables de forma simultánea; conduciendo a diferentes recomendaciones en cuanto a la combinación de componentes que mejoran la calidad de las respuestas estudiadas. Si se realiza solamente un análisis individual de cada respuesta se comete un error porque las variables están correlacionadas (Limón, Rodríguez, Sánchez, & Tlapa, 2012).

IV.1.4. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE PULPAS

IV.1.4.1. Esfuerzo de fluencia o límite elástico (yield-stress)

Las suspensiones de las diferentes pulpas evaluadas (ONP, OWP y OCC), no alcanzaron un esfuerzo de cizallamiento máximo único. Presentaron un comportamiento oscilatorio, atribuible al movimiento de los flóculos dentro de la suspensión, ya que estos ingresan y salen constantemente de la zona de tensión de cizallamiento para mantener una velocidad de rotación constante. La magnitud de los picos de tensión aumentó con el tiempo, resultado atribuible al proceso de sedimentación. Por lo tanto, los valores de esfuerzo de fluencia reportados para cada consistencia corresponden al primer máximo de cada ensayo.

Esfuerzo de fluencia como una función del tipo de pulpa secundaria

A partir de un análisis de varianza multifactorial, se encontró que: el tipo de pulpa secundaria, tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el esfuerzo de

fluencia con un nivel de confianza del 95,0%. La figura IV.6, presenta la comparación de medias para el esfuerzo de fluencia en función del tipo de pulpa, con intervalos de confianza del 95% por diferencia mínima significativa (LSD).

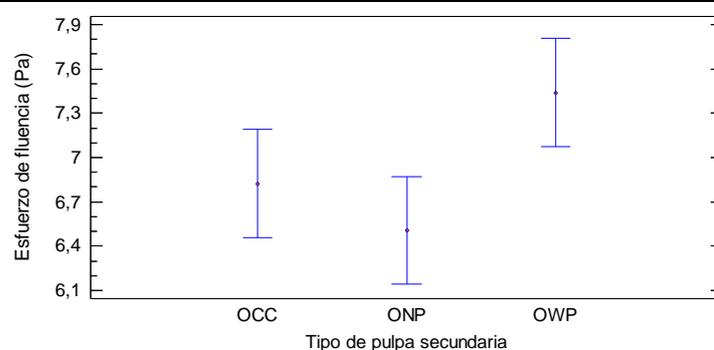


Figura IV.6. Medias para esfuerzo de fluencia como función del tipo de pulpa secundaria con intervalos de confianza del 95% por LSD

De la gráfica de medias se observa que, existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95,0%, entre las pulpas ONP y OWP. Los máximos valores de esfuerzo de fluencia se alcanzan con pulpas OWP mientras que los valores mínimos de esfuerzo de fluencia, se alcanzan con pulpas ONP.

Esfuerzo de fluencia como una función de la consistencia de la suspensión fibrosa

A partir de un análisis de varianza multifactorial, se encontró que: la consistencia de la suspensión fibrosa, tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el esfuerzo de fluencia a un nivel de confianza del 95,0%. La figura IV.7, presenta la comparación de medias del esfuerzo de fluencia en función de la consistencia de la suspensión fibrosa, con intervalos de confianza del 95% por diferencia mínima significativa (LSD).

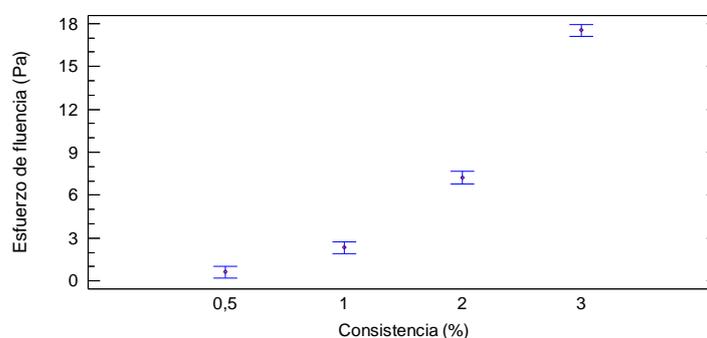


Figura IV.7. Medias para esfuerzo de fluencia como función de la consistencia de la suspensión fibrosa con intervalos de confianza del 95% por LSD

De la gráfica de medias se observa que, a medida que se incrementa la consistencia, se incrementa el esfuerzo de fluencia. A mayor consistencia se tiene un mayor

número de contacto entre las fibras; esto causa un aumento en la fricción y en el entramado entre las fibras, además hay mayor formación de floculos, lo cual conlleva a una mayor resistencia mecánica de la red fibrosa.

Esfuerzo de fluencia: interacción entre tipo de pulpa y consistencia de la suspensión

La Figura IV.8, presenta la interacción entre pulpas secundarias y consistencia de la suspensión fibrosa para el esfuerzo de fluencia, con intervalos de confianza del 95% por diferencia mínima significativa (LSD).

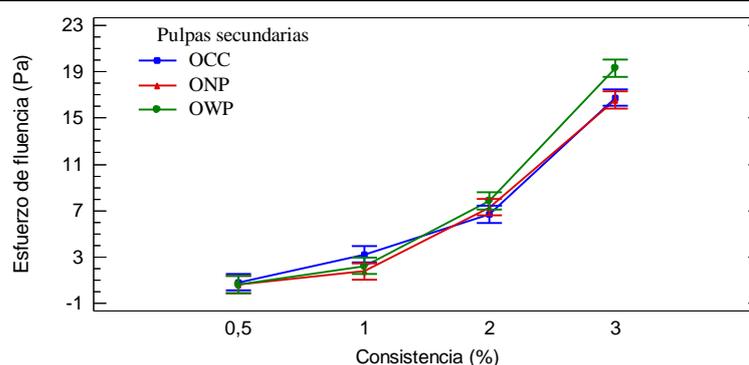


Figura IV.8. Interacción entre pulpas secundarias-consistencia para el esfuerzo de fluencia con intervalos de confianza del 95% por LSD

De la gráfica de interacción, se observa que, hay una interacción significativa entre tipo de pulpa secundaria y consistencia de la suspensión; el tipo de pulpa tiene un efecto significativo al 3% de consistencia. El esfuerzo de fluencia se incrementa a medida que aumenta la consistencia de la suspensión fibrosa, y dicho aumento es más significativo para la pulpa OWP en comparación a la pulpa ONP y OCC. Los valores de esfuerzo de fluencia dependen de las propiedades de las fibras; estas contribuyen a las fuerzas atractivas (coloidal, enlace superficial mecánico, flexión de la fibra elástica, tensión superficial), y afectan el esfuerzo de fluencia de la suspensión. Fibras más flexibles y de mayor longitud dan lugar a un mayor contacto entre fibras adyacentes y mayor número de enlaces, incrementando el esfuerzo de fluencia. Suspensiones fibrosas con mayor concentración, dan lugar a mayor número de contacto entre fibras y mayor resistencia del entramado fibroso y con ello mayor esfuerzo de fluencia (Babak Derakhshandeh et al., 2010). El movimiento del fluido de suspensión de la pulpa se ve muy influenciada por la fricción de las partículas y las características de la fibra (Bousfield, 2008). A mayor área de contacto entre las fibras, y una estructura fibrosa más cerrada, se alcanzan mayores valores de esfuerzo de fluencia (J.H. Sánchez, Quintana, & Fajardo, 2015). En investigaciones previas

(Bennington et al., 1990), sobre el comportamiento reológico de diferentes tipos de pulpas a diferentes concentraciones, los autores encontraron que el esfuerzo de fluencia se correlaciona con la concentración volumétrica de la suspensión. Informaron que el esfuerzo de fluencia depende del volumen de la suspensión ocupada por las fibras, las propiedades físicas de la fibra, la relación de aspecto y el módulo de elasticidad de las fibras, atribuibles a la resistencia del entramado fibroso que surge de la interacción mecánica entre la porción de fibras fibriladas. A medida que disminuye el grado de drenado, aumenta el esfuerzo de fluencia hasta un valor máximo y luego disminuye como consecuencia de la morfología de la fibra (fibrilación, curl y rigidez) (Sha et al., 2015).

IV.1.4.2. Viscosidad aparente

La Figura IV.9, presenta las curvas de viscosidad aparente como función de la velocidad de cizalla para las diferentes pulpas secundarias y las diferentes consistencias de estudio, a 25°C de temperatura.

De las gráficas se observa que, la viscosidad aparente aumenta a medida que aumenta la consistencia de la suspensión fibrosa, independientemente del tipo de pulpa, si bien, cabe destacar que, las pulpas OCC presentan mayores valores de viscosidad seguidas por las pulpas OWP y ONP, respectivamente. A bajas velocidades de cizalla, las suspensiones muestran una meseta newtoniana; luego, a medida que aumenta la velocidad de cizalla la viscosidad aparente comienza a disminuir hasta un cierto punto, donde el flujo vuelve a mostrar un comportamiento newtoniano cuando se alcanzan altas velocidades de cizallamiento. Al aumentar la velocidad de cizalla, la distribución de las fibras se vuelve muy heterogénea y comienzan a formarse flóculos sobre una velocidad de cizalla crítica dando lugar a una serie de colisiones alrededor de cada fibra que imparte resistencia al flujo. Cuando la velocidad de cizalla se incrementa por encima del valor crítico, las fibras comienzan a dispersarse uniformemente y finalmente los flóculos desaparecen. Por lo tanto, la dependencia de la viscosidad aparente sobre la velocidad de cizalla sugiere la ruptura del entramado fibroso y de los flóculos por el esfuerzo aplicado (J.H. Sánchez et al., 2015).

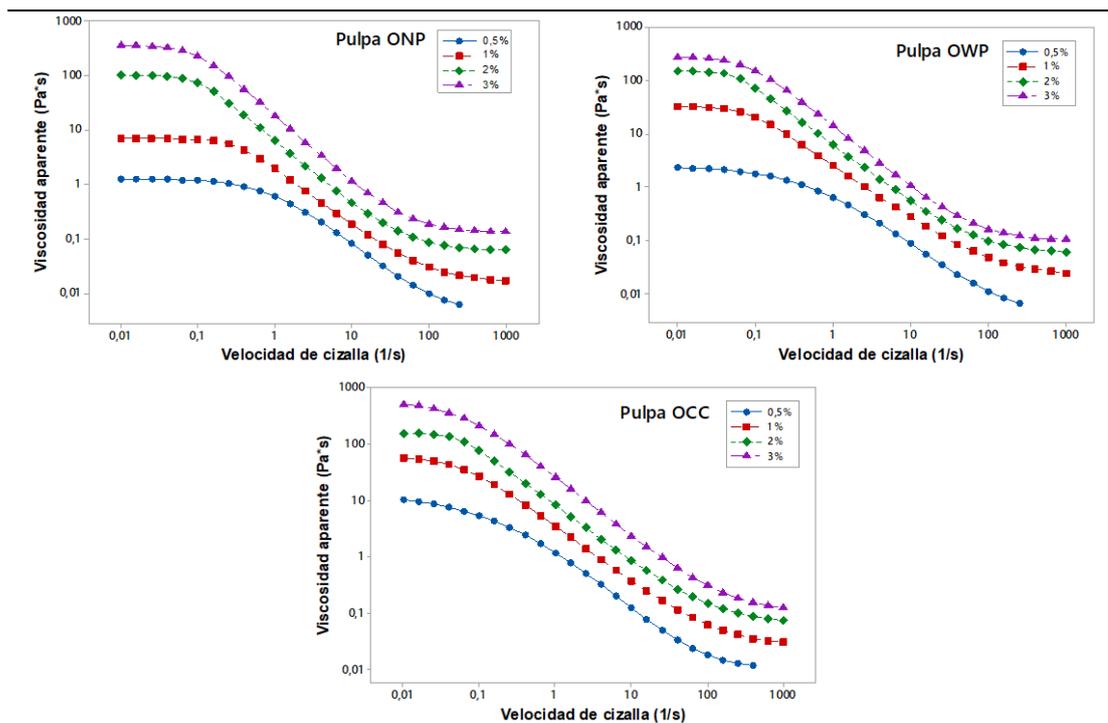


Figura IV.9. Viscosidad aparente como función de la velocidad de cizalla para las diferentes pulpas secundarias y consistencias

En investigaciones previas (J.H. Sánchez et al., 2015), sobre propiedades reológicas, esfuerzo de fluencia y viscosidad aparente, de suspensiones de pulpa, a distintas consistencias y temperaturas, los autores encontraron que el esfuerzo de fluencia es influenciado por la consistencia y la temperatura; mientras que la viscosidad aparente sólo es influenciada por la consistencia; además informaron que las suspensiones de pulpa presentan un comportamiento cizalle-adelgazante (pseudoplástico).

IV.1.4.3. Viscosidad a velocidad de cizalla cero

La Figura IV.10, presenta la viscosidad aparente a velocidad de cizalla cero, como una función de las distintas consistencias para las diferentes pulpas secundarias.

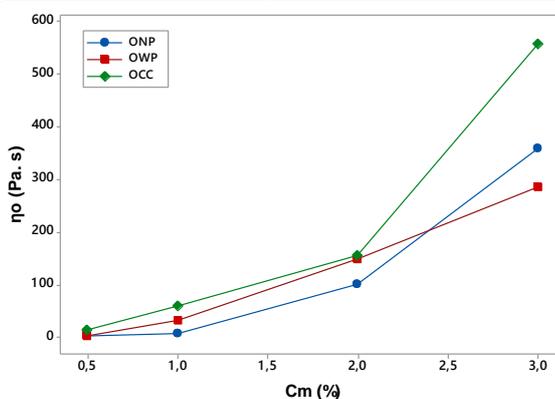


Figura IV.10. Viscosidad a velocidad de cizalla cero como una función de la consistencia para las diferentes pulpas secundarias

A bajas consistencias, no existen diferencias apreciables en función del tipo de pulpa evaluada. A medida que la consistencia aumenta, aumenta la viscosidad a velocidad de cizalla cero, presentando diferencia entre las pulpas, principalmente para OCC.

IV.1.4.4. Parámetros del modelo de Carreau-Yasuda

Para obtener la expresión matemática para viscosidad aparente, los resultados experimentales se ajustaron por el modelo de Carreau-Yasuda (Ecuación III.19). La Tabla IV.14, proporciona los parámetros del modelo de Carreau-Yasuda obtenidos para las pulpas a las diferentes consistencias.

Tabla IV.14. Parámetros del modelo de Carreau-Yasuda para las diferentes pulpas y las diferentes consistencias de las suspensiones fibrosas evaluadas

Pulpas	C_m (%)	η_0 (Pa*s)	η_∞ (Pa*s)	λ (s)	n	a
ONP	0,5	1,257	0,004	1,005	-0,183	1,105
	1	6,742	0,015	3,213	-0,068	2,334
	2	99,949	0,060	10,218	-0,194	2,524
	3	357,256	0,130	10,906	-0,253	2,031
OWP	0,5	2,436	0,004	1,879	-0,114	0,815
	1	32,839	0,022	13,337	0,004	2,335
	2	148,218	0,057	18,924	-0,087	3,595
	3	284,122	0,099	13,173	-0,170	1,743
OCC	0,5	12,952	0,010	4,369	-0,207	0,635
	1	60,286	0,027	18,205	0,011	1,460
	2	154,018	0,066	19,225	-0,001	2,626
	3	556,401	0,106	18,562	-0,053	1,226

Nota: η_∞ =viscosidad a velocidad de cizallamiento infinita; η_0 =viscosidad a velocidad de cizallamiento cero; λ =constante de tiempo para la suspensión; γ = razón de deformación; a=índice de transición; n= índice de velocidad.

Para todas las pulpas de estudio, ONP, OWP y OCC, la viscosidad aparente a velocidad de cizalla cero, aumenta con la consistencia de la suspensión. Este comportamiento es atribuible al proceso de sedimentación de las fibras durante el ensayo. Para suspensiones de mayor consistencia, la viscosidad alcanza valores de hasta 550 Pa*s, indicando tasas de sedimentación significativamente reducidas.

IV.1.5. EFECTOS FITOTÓXICOS

IV.1.5.1. Macro y micronutrientes: Elementos traza

Los efectos fitotóxicos en general ocurren cuando se tiene, una alta actividad microbiana, la cual reduce la concentración de oxígeno y bloquea el nitrógeno disponible; también en presencia de metales pesados, compuestos fenólicos, etileno y amoníaco, acumulación excesiva de sales, entre otros; la mayoría de estos factores

influyen en la germinación de la semilla simultáneamente siendo difícil estimar que parámetro influye mayoritariamente. (Selim et al., 2012; Tiquia, 2010).

La evaluación de la presencia de elementos traza en los extractos es de gran importancia, dado que los materiales estarán en contacto directo con las plantas, y en función de las condiciones de riego, contenido de humedad y temperatura, pueden liberar dichos componentes en mayor o menor grado; y cuando estos elementos, se encuentran a concentraciones superiores a las óptimas, especialmente en el caso de los micronutrientes, pueden tener efectos fitotóxicos (Guerra, 2013).

La Tabla IV.17, muestra los valores en parte por millón (ppm) de macro y micronutrientes presentes en las muestras de los extractos acuosos de los materiales lignocelulósicos en concentración, 1:5 y 1:15.

Tabla IV.15. Macro y micronutrientes de extractos acuosos de materiales lignocelulósicos

Parámetros (ppm)	ONP		OWP		OCC		PS		ES		SCB	
	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15
DQO	1648	1040	1022	570	1646	740	2094	758	1632	655	5489	1816
Cobre	0,28	0,46	0,30	0,50	0,32	0,53	0,46	0,57	0,49	0,68	0,58	0,73
Calcio	15,96	7,45	19,68	15,42	27,59	34,82	8,25	2,86	25,84	6,81	14,61	8,84
Manganeso	0,10	0,11	0,04	0,06	0,13	0,17	2,26	0,97	1,45	0,65	1,00	0,62
Magnesio	0,79	0,41	0,88	0,51	1,01	1,37	1,15	0,24	1,14	0,22	1,47	1,04
Hierro	1,13	2,58	1,20	2,38	1,96	2,58	1,98	2,38	1,64	2,56	5,02	4,21
Carbonato	27,21	27,49	130,63	124,43	144,23	526,14	72,81	34,59	13,72	25,65	63,26	55,52
Cloruro	5,88	1,91	6,03	3,23	4,87	2,05	5,02	0,75	30,33	8,63	4,82	2,40
Nitrito	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Nitrato	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fosfato	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14,29	n.d.	3,57	n.d.	n.d.	n.d.
Sulfato	0,68	n.d.	1,07	0,64	2,53	0,98	1,22	n.d.	1,22	n.d.	0,51	n.d.

Nota: n.d.: no detectado. Límite de detección: Nitrito: 0,05; Nitrato: 0,05; Fosfato: 0,15; Sulfato: 0,10

Hay diferencias entre las concentraciones y los materiales lignocelulósicos de los extractos acuosos. Los valores de DQO oscilan entre 570 ppm para extractos de OWP en concentración 1:15 y 5.489 ppm para extractos SCB en concentración 1:5. Los valores máximos de DQO se obtienen para los extractos de mayor concentración, independiente del tipo de material. Los valores de cobre oscilan entre 0,28 ppm para extractos de ONP en concentración 1:5 y 0,73 ppm para extractos SCB en concentración 1:15. Los valores máximos de cobre se obtienen para los extractos de menor concentración, independiente del tipo de material. Los valores de calcio oscilan entre 2,86 ppm para extractos de PS en concentración 1:15 y 34,82 ppm para extractos OCC en concentración 1:15. Los valores máximos de calcio se

obtienen para los extractos de mayor concentración, independiente del tipo de material, a excepción de los extractos OCC. Los valores de manganeso oscilan entre 0,04 ppm para extractos de OWP en concentración 1:5 y 2,26 ppm para extractos PS en concentración 1:5. Los valores máximos de manganeso se obtienen para los extractos de menor concentración en el caso de las pulpas secundarias y para los extractos de mayor concentración en el caso de aserrín y bagazo. Los valores de magnesio oscilan entre 0,22 ppm para extractos de ES en concentración 1:15 y 1,47 ppm para extractos SCB en concentración 1:5. Los valores máximos de magnesio se obtienen para los extractos de mayor concentración, independiente del tipo de material, a excepción de los extractos OCC. Los valores de hierro oscilan entre 1,13 ppm para extractos de ONP en concentración 1:5 y 5,02 ppm para extractos SCB en concentración 1:5. Los valores máximos de hierro se obtienen para los extractos de menor concentración, independiente del tipo de material, a excepción de SCB. Los valores de carbonato oscilan entre 13,72 ppm para extractos de ES en concentración 1:5 y 526,14 ppm para extractos OCC en concentración 1:15. Los valores máximos de carbonato se obtienen para los extractos de mayor concentración, en el caso de OWP, PS y SCB, y para los extractos de menor concentración en el caso de ONP, OCC y ES. Los valores de cloruro oscilan entre 0,75 ppm para extractos de PS en concentración 1:15 y 30,33 ppm para extractos ES en concentración 1:5. Los valores máximos de cloruro se obtienen para los extractos de mayor concentración, independiente del tipo de material. Los nitritos, nitratos y fosfatos no fueron identificados, independiente al tipo de material, a excepción del fosfato identificado para PS y ES a las concentraciones máximas. Los valores de sulfatos oscilan entre 0,51 ppm para extractos de SCB en concentración 1:5 y 2,53 ppm para extractos OCC en concentración 1:5. Los valores máximos de sulfato se obtienen para los extractos de mayor concentración, independiente del tipo de material. Las diferencias entre las concentraciones y los materiales puede ser consecuencia del encapsulamiento de otros materiales que se encuentran inhibiendo o favoreciendo la presencia de los elementos de estudio.

Los elementos evaluados se encuentran en bajas cantidades, en comparación con las concentraciones de los elementos esenciales consideradas aceptables para la mayoría de las plantas superiores (Tabla IV.16), por lo cual, se estima que los materiales lignocelulósicos estudiados no presentan efectos fitotóxicos.

Tabla IV.16. Concentraciones de macro y micronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elementos esenciales	Concentraciones, ppm	Elementos esenciales	Concentraciones, ppm
Nitrógeno	15.000	Hierro	100
Potasio	10.000	Manganeso	50
Calcio	5.000	Boro	20
Magnesio	2.000	Zinc	20
Fósforo	2.000	Cobre	6
Azufre	1.000	Molibdeno	0,1

Fuente: Adaptado de (Virgili, 1996).

IV.1.5.2. Conductividad y pH

La Tabla IV.17, proporciona los resultados del análisis de Conductividad y pH, para las muestras de los extractos acuosos de los materiales de estudio correspondientes a las concentraciones 1:5 y 1:15.

Tabla IV.17. Conductividad y pH para extractos acuosos de materiales lignocelulósicos

Parámetros	ONP		OWP		OCC		PS		ES		SCB	
	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15	1:5	1:15
pH	6,00	6,20	7,20	7,30	7,00	7,10	4,90	5,00	4,30	4,40	5,00	5,48
Conductividad (ms/cm)	0,16	0,08	0,26	0,16	0,30	0,52	0,23	0,10	0,36	0,14	0,30	0,17

Los valores de conductividad oscilan entre 0,08 ms/cm para extractos ONP en concentración 1:15 y 0,52 ms/cm para extractos de OCC en concentración 1:15. Los valores máximos de conductividad se obtienen para los extractos acuosos de ONP (0,16 ms/cm), OWP (0,26 ms/cm), PS (0,23 ms/cm), ES (0,36 ms/cm) y SCB (0,30 ms/cm) a la concentración máxima, mientras que para OCC (0,52 ms/cm) a la concentración mínima. Teniendo en cuenta dichos resultados, que la conductividad eléctrica indica el contenido de sales solubles presentes en el material (F. Madrid et al., 2001), y que (Domínguez, 2010), a valores de conductividad inferiores a 0,5 ms/cm se tiene baja conductividad (material no salino); a valores de conductividad entre 0,5-1,8 ms/cm, moderada conductividad (ligeramente salino) y a valores superiores a 1,8 ms/cm elevada conductividad (materiales altamente salinos); y que, además, en función de la sensibilidad de las especies de plantas hacia las sales, los síntomas de daño pueden ocurrir cuando los valores de conductividad son >0,5 ms/cm, queda demostrado que los materiales lignocelulósicos de estudio son materiales no salinos (baja conductividad), sin efectos fitotóxicos.

Los valores de pH oscilan entre 4,3 para extractos ES en concentración 1:5 y 7,3 para extractos de OWP en concentración 1:15. Los extractos acuosos de OWP y OCC se encuentran en un rango de pH neutro (7-7,3), los extractos de ONP en un rango de

pH ligeramente ácido (6-6,2), los extractos de PS y SCB en un rango de pH ácido (4,9-5,48), mientras que los extractos de ES se encuentran en un rango fuertemente ácido (4,3-4,4), siendo insignificante la diferencia entre las concentración. La acidificación del material en el caso de ES, PS y SCB, puede ser consecuencia de un mayor contenido de componentes orgánicos de difícil descomposición, (lignina, extractivos, ácidos carboxílicos, ácidos fenólicos, etc.); y/o al lavado de sales solubles principalmente sodio y cloruros (Domínguez, 2010; Pozzi, Filippín, Matías, & Hammann, 2010). En general, la mayoría de los vegetales y cultivos agronómicos, pueden crecer sin sufrir desórdenes fisiológicos en un intervalo óptimo entre 4 y 8, (Domínguez, 2010), Teniendo en cuenta los criterios de evaluación en cuanto a pH, se estima que los materiales de estudio no presentan efectos fitotóxicos.

IV.1.5.3. Bioensayo de toxicidad

Observación visual

Al realizar una evaluación visual del desarrollo de las plántulas en los diferentes extractos y en el control, se registraron las plántulas con germinación y/o crecimiento normal y anormal.

Como criterio indicador de germinación y/o crecimiento normal en las plántulas, se consideró (Bekendam & Grob, 1979):

- Emergencia de cotiledones libres de las cubiertas seminales, con hipocótilo y radícula visible;
- Sistema apical bien desarrollado: cotiledones intactos, hipocótilo recto, más o menos delgado y alargado.
- Sistema radicular bien desarrollado: raíz primaria larga y delgada, con pelos radicales.

Como criterio indicador de germinación y/o crecimiento anormal en las plántulas, se consideró (Bekendam & Grob, 1979):

- Plántula defectuosa: con emergencia de cotiledones e hipocótilo solamente, sin emergencia de la radícula; con desarrollo de hongos;
- Cotiledones defectuosos: deformados, dañados, ausentes, hinchados, con decoloración o con necrosis;

- Hipocótilo defectuoso: corto y grueso o ausente, curvado o formando un lazo, estrechamente retorcido o formando una espiral;
- Sistema radicular defectuoso: atrofiada o ausente, atrapada en la cubierta seminal, con constricción, raquítica, con crecimiento ensortijado, geotropismo negativo, pelos absorbentes poco desarrollados, ápices radiculares con necrosis.

La Figura IV.11, presenta ejemplos de plántulas con crecimiento normal y anormal observados durante el trabajo.



Figura IV.11. Crecimiento normal y anormal de plántulas

La Figura IV.12, presenta una comparación del crecimiento de plántulas en los diferentes extractos acuosos, correspondiente a las concentraciones 1:5 y 1:15.

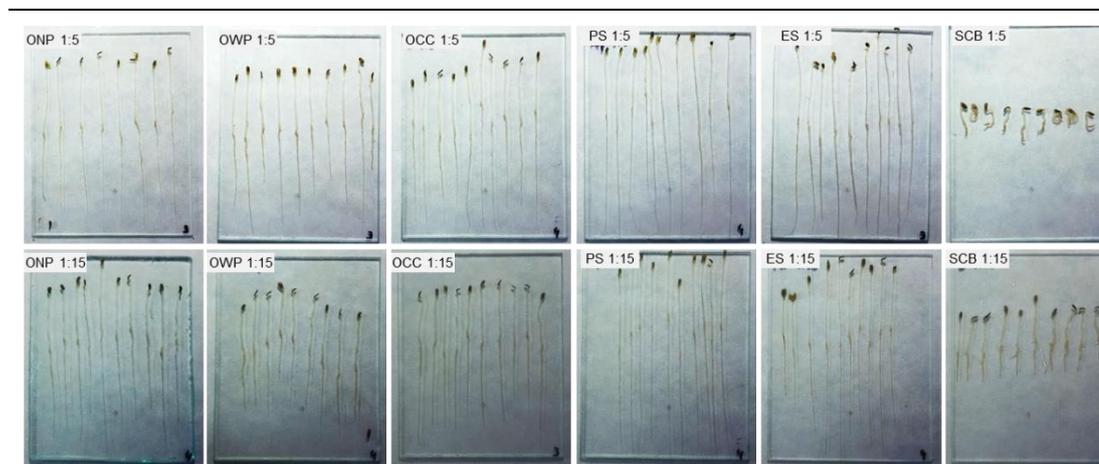


Figura IV.12. Comparación del crecimiento de plántulas en los diferentes extractos acuosos

Índice de germinación

La Figura IV.13, presenta una comparación entre los resultados porcentuales de semillas germinadas, correspondientes a extractos de los materiales lignocelulósicos evaluados (ONP, OWP, OCC, PS, ES y SCB) y los resultados obtenidos para la muestra control (agua destilada).

En todos los casos la germinación se inició transcurrida 24 h desde la siembra, indicando que no hubo retardo en la brotación.

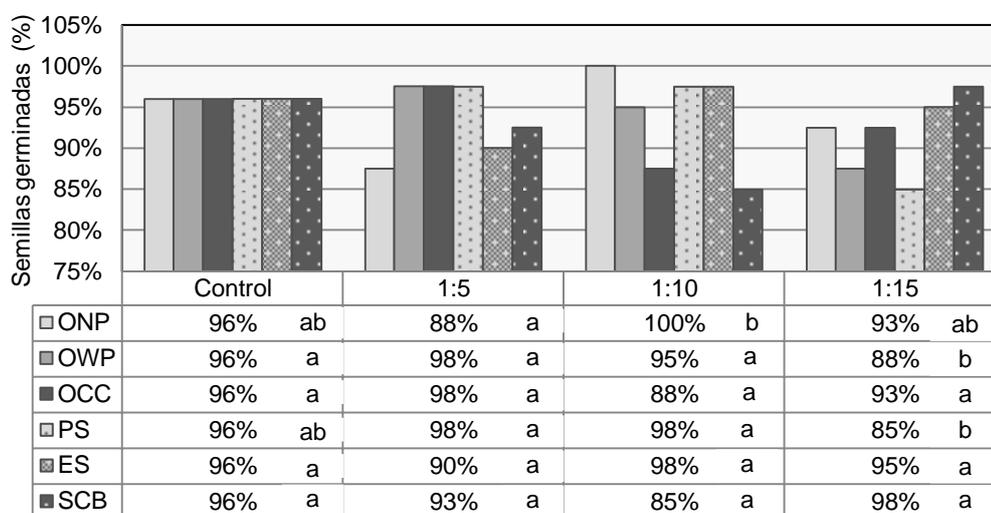


Figura IV.13. Porcentaje de semillas germinadas usando extractos de residuos lignocelulósicos

Nota: Para la misma materia prima, letras distintas indican que existe diferencia significativa, según test LSD a un nivel de confianza del 95%, (p -valor $\leq 0,05$).

El porcentaje de germinación de semillas en los extractos evaluados no muestra efectos adversos significativamente diferentes al control. La germinación de semillas de lechuga no discrimina eficazmente, tanto los diferentes extractos como, las diferentes concentraciones de los mismos y el control de agua destilada. En el control los porcentajes de germinación son superiores al 90%, esto demuestra que las semillas utilizadas cumplen con los estándares de calidad requeridos para el ensayo. En los extractos, si bien, en algunos casos son inferiores al 90%, como por ejemplo, extractos de SCB en concentraciones 1:10, y extractos de PS 1:15, con un 85% de germinación, no se puede concluir que los mismos tienen un efecto fitotóxico sobre la germinación de las semillas de lechuga, ya que, la germinación es el primer paso en el crecimiento de una plántula, cualquier efecto antagónico tendrá un impacto directo sobre la sobrevivencia de la misma, pudiendo ser inhibida o debilitada la germinación (Y Acosta et al., 2004), por lo cual, se utiliza un parámetro complementario, la longitud de radícula, parámetro más sensible a los efectos fitotóxicos en comparación con la germinación de semillas.

La Figura IV.14, presenta una comparación entre los resultados de longitud media de radícula, correspondientes a extractos de los materiales lignocelulósicos evaluados (ONP, OWP, OCC, PS, ES y SCB) y los resultados obtenidos para la muestra control (agua destilada).

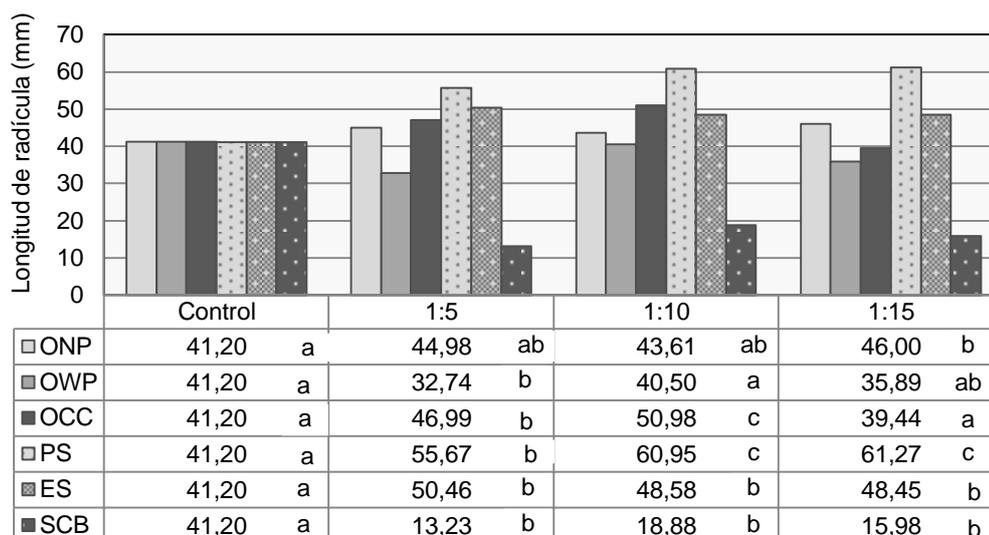


Figura IV.14. Longitud media de radícula usando extractos de residuos lignocelulósicos

Nota: Para la misma materia prima, letras distintas indican que existe diferencia significativa, según test LSD a un nivel de confianza del 95%, ($p\text{-valor} \leq 0,05$).

Los valores medios de longitud de radícula para la mayoría de los extractos evaluados, no muestra efectos adversos significativamente diferentes al control, a excepción del extracto de SCB, en cuyo caso se observa una marcada disminución de la longitud radicular, indicando posibles efectos fitotóxicos. Otra excepción es el extracto PS, en cuyo caso se observa un marcado incremento de la longitud radicular en comparación con el control, lo que permite estimar que los componentes extraíbles no tienen efecto fitotóxicos, y que pueden estar presentes ciertos componentes que favorecen el crecimiento.

La Figura IV.15, presenta una comparación entre los resultados porcentuales de índice de germinación, correspondientes a extractos de los materiales lignocelulósicos evaluados (ONP, OWP, OCC, PS, ES y SCB) y los resultados obtenidos para la muestra control (agua destilada). Se consideró que para el control el índice de germinación corresponde al 100 %.

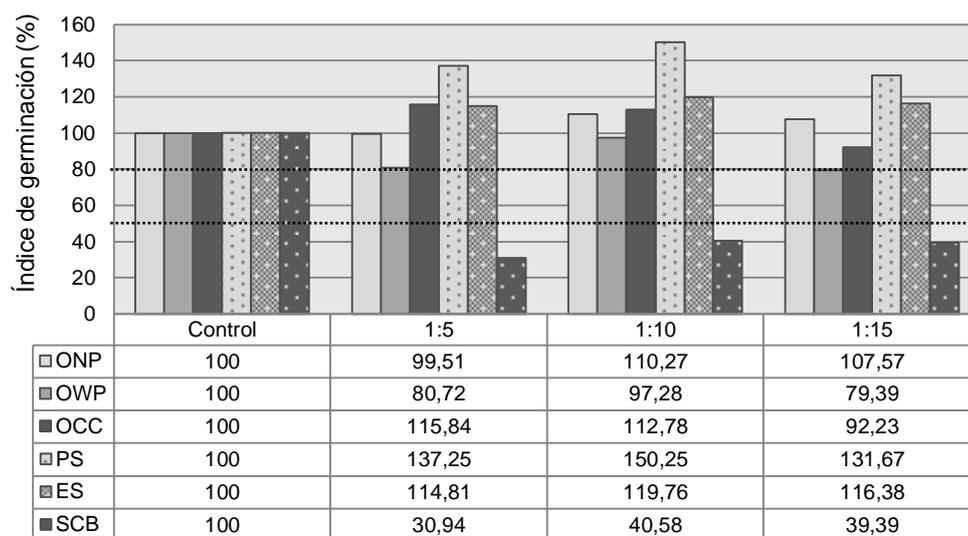


Figura IV.15. Índice de germinación usando extractos de residuos lignocelulósicos

Los extractos de ONP, OWP, OCC, PS y ES, para todas las concentraciones, presentan valores de IG mayores al 80%; mientras que los extractos de SCB para todas las concentraciones presentan valores de IG menores al 50%, lo cual puede estar asociado a una mayor carga orgánica en este material en comparación a los demás materiales estudiados.

Considerando como criterio de evaluación que (Emino & Warman, 2004; Zucconi et al., 1981), valores de IG menores a 50%, indican alta fitotoxicidad; valores de IG entre 50 y 80%, indican fitotoxicidad moderada, y valores de IG mayores a 80%, indican ausente o leve fitotoxicidad; se tiene que, las muestras de ONP, OWP, OCC, PS y ES, en todas las concentraciones evaluadas, no presentan o presentan leve efecto fitotóxico, proporcionando un medio adecuado para la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas; por el contrario, las muestras de SBC, en todas las concentraciones evaluadas, presentan un alto efecto fitotóxico, proporcionando un medio no adecuado para la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas. Los efectos fitotóxicos indican que el material puede tener una diversidad de compuestos orgánicos de los cuales algunos pueden ser tóxicos a las plantas.

En todos los casos se observa que, a concentraciones 1:5 y 1:15, concentradas y diluidas, respectivamente, los índices de germinación disminuyen; lo cual puede ser consecuencia a la liberación y/o encapsulamiento de ciertos micronutrientes que en mayores proporciones se tornan tóxicos.

También, se observa, en algunos casos, en especial para los extractos de PS y ES, que los valores de índice de germinación superan ampliamente el 80%, es decir, los valores de IG de la muestra son superiores a los valores del control. Cuando los valores de IG de la muestra son superiores a los valores del control, implica que hubo mayor crecimiento de las semillas en la muestra comparadas con el control negativo libre de contaminantes. Esto es un indicativo de efectos de exaltación u hormesis (Báez et al., 2004; Bohórquez-Echeverry & Campos-Pinilla, 2007); y ocurre cuando las concentraciones de nutrientes son muy elevadas, como por ejemplo en el caso de altas concentración de nitrógeno y fósforo que constituyen nutrientes limitantes para muchas plantas. La exaltación en un punto final no debe ser interpretada como un efecto favorable o estimulante debido a que es posible que muchos compuestos a bajas concentraciones produzcan exaltación por ser micronutrientes para los vegetales, respuesta que debe ser evaluada de manera conjunta con los efectos registrados en otras pruebas; también puede ocurrir que, los efectos adversos de los tóxicos se enmascaren por la cantidad de compuestos que estimulan el crecimiento (Báez et al., 2004; Ramírez Romero & Mendoza Cantú, 2008).

Considerando los resultados obtenidos de, elementos traza, pH, conductividad e índice de germinación, para los extractos acuosos evaluados, se observa la importancia de evaluar la interacción de dichos parámetros, dado que demuestran que la fitotoxicidad de un material, no solamente depende de los efectos adversos de los componentes sino también de las posibles interacciones entre ellos, aun cuando originalmente no sean potencialmente tóxicos, ya que los efectos inhibitorios pueden estar dados por la acción de las diferentes sustancias químicas que componen el material, sus posibles efectos aditivos o sinérgicos; antagónicos; de potenciación o inhibición (Y. G. Pérez et al., 2012). En el estudio llevado a cabo, no se llega a establecer la relación entre los valores de IG, macro y micronutrientes, pH y conductividad de los extractos SCB, por lo cual no se descarta la presencia de otras sustancias fitotóxicas, no determinadas en el marco del trabajo.

IV.1.6. CINÉTICA DE BIODEGRADACIÓN DE PULPAS

Los materiales lignocelulósicos, pulpas ONP, OWP y OCC, se sometieron a un proceso de degradación anaeróbica. Bajo dichas condiciones se evaluaron, el deterioro estructural visualmente y la degradación del material en el tiempo.

La Figura IV.16, presenta ejemplos de la degradación biológica que han sufrido los distintos materiales a lo largo del tiempo de ensayo.



Figura IV.16. Materiales degradados biológicamente

Cinética de degradación: pérdida de peso en función al tiempo

Debido a que la degradación del papel produce sacáridos solubles que se difunden fuera del papel, la pérdida de peso debería ser un buen método para establecer la variación en los valores de degradación (Andrady et al., 1992); sin embargo acarrea error en la determinación del peso final del material, ya que, a medida que avanza el tiempo de degradación se dificulta la recuperación del mismo; restos de sustrato y biomasa quedan adheridos a la superficie del material; durante el proceso de manipulación y limpieza, puede eliminarse fibras o perderse material, por lo cual, se puede tener un alto grado de dispersión en los resultados. En el caso de las hojas elaboradas con pulpas OWP, el ensayo se dio por finalizado a los 70 d, debido al elevado grado de degradación del material, que imposibilitaba la correcta separación del material del sustrato.

La Figura IV.17, presenta la cinética de degradación, pérdida de peso de los materiales evaluados, pulpas ONP, OWP, y OCC, en función al tiempo de ensayo.

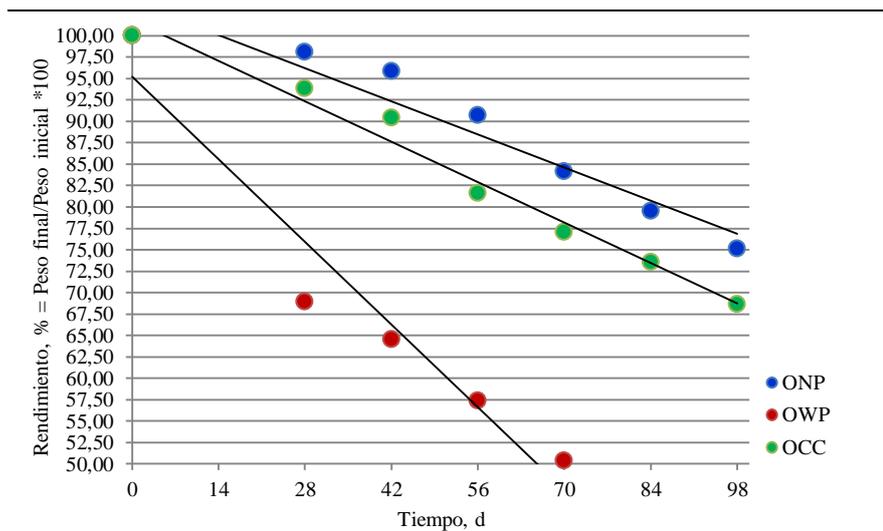


Figura IV.17. Cinética de degradación: pérdida de peso en función al tiempo

Los materiales de estudio sufren pérdida de peso en función del tiempo con tendencia aproximadamente lineal. Los datos indican que, bajo iguales condiciones, las hojas a base de pulpa ONP, sufren menor degradación, seguidas por las hojas a base de pulpa OCC, y OWP. La mayor pérdida de peso en las pulpas OWP, en comparación con las pulpas ONP y OCC, puede ser consecuencia de las características químicas de los materiales, a mayor contenido de lignina, el tiempo que demora el material en degradarse es mayor. Los resultados demuestran que la velocidad de degradación varía notablemente entre distintos materiales. A los 70 d se observó una pérdida del 50% del material a base de OWP, mientras que para ONP y OCC, a igual tiempo de ensayo se observó una reducción aproximada del 10 y 15 % del material inicial, respectivamente; a los 98 d se observó una pérdida del 30% del material a base de OCC y 25% del material a base de ONP.

En investigaciones previas (Alvarez et al., 2009), sobre la biodegradación de diferentes papeles, bajo condiciones controladas de compostaje, los autores informaron que los papeles de oficina, alcanzan aproximadamente un 65% de biodegradación a los 45 d; los cartones alrededor del 50%; mientras que los papeles de diario alcanzan aproximadamente un 40% de biodegradación a los 45 d. En otras investigaciones (Andrady et al., 1992), sobre biodegradación de distintos tipos de cartones, bajo condiciones aeróbicas, los autores informaron que, el material en 10 semanas de ensayo, redujo su peso en un 30%. Otros autores (Sridach et al., 2006), examinaron la biodegradación de cartones, de diferentes composiciones, enterrando el material en suelo, y encontraron que, el material, en 7 semanas de ensayo, redujo su peso aproximadamente un 60%. En otras investigaciones (Nechita et al., 2010),

sobre la biodegradación en suelo de contenedores elaborados a base de fibras celulósicas secundarias, turba y aditivos, los autores informaron que los contenedores alcanzaron una degradación de aproximadamente el 30 % a los 141 d de ensayo. Esto demuestra que la composición del material y las condiciones de degradación (aeróbico/anaeróbico), influyen sobre el tiempo de degradación de los materiales. Los resultados obtenidos en dichas investigaciones fueron en todos los casos superiores a los encontrados durante el desarrollo del trabajo, atribuible a las diferencias en las condiciones utilizadas.

Cinética de degradación: contenido de sólidos volátiles en función al tiempo

La Figura IV.18, presenta la cinética de degradación, contenido de sólidos volátiles de los materiales evaluados, pulpas ONP, OWP, y OCC, en función al tiempo de ensayo.

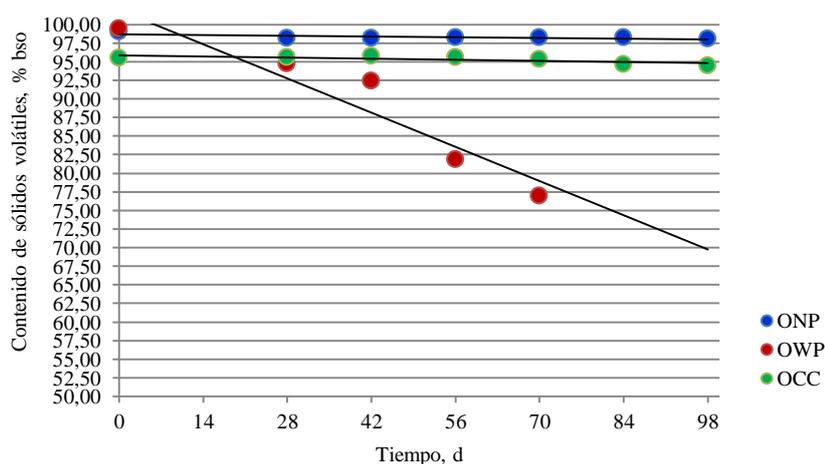


Figura IV.18. Cinética de degradación: contenido de sólidos volátiles en función al tiempo

Las pulpas OWP, sufren aproximadamente un 22% de pérdida de materia orgánica en función al tiempo de ensayo, mientras que las pulpas ONP y OCC, sufren aproximadamente una pérdida del 1%.

Cinética de degradación: contenido de lignina en función al tiempo

La Figura IV.19, presenta la cinética de degradación, contenido de lignina de los materiales evaluados, pulpas ONP, OWP, y OCC, en función al tiempo de ensayo.

En el caso de las pulpas OWP, no se consideró el contenido de lignina en función al tiempo, porque, por un lado el contenido de lignina de la muestra inicial es muy bajo (menor al 2%), y por el otro, se forma una “pseudo-lignina”, cuyo valor, en caso de considerar conduciría a error.

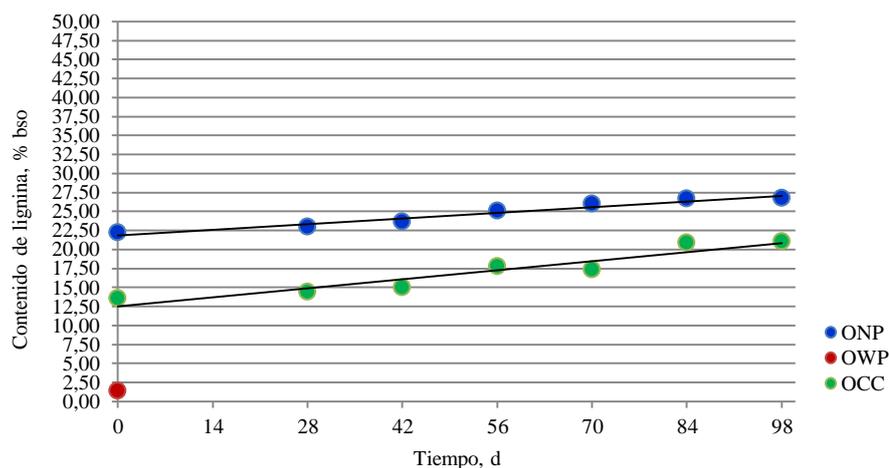


Figura IV.19. Cinética de degradación: contenido de lignina en función al tiempo

Las pulpas ONP y OCC, tienden a aumentar el contenido de lignina en función al tiempo de ensayo, lo cual permite estimar que los materiales no sufren degradación. Se presume que dicho comportamiento se debe, en parte al poder recalcitrante de la lignina, lo cual dificulta su degradación, y en parte, a que al degradarse otros materiales, la lignina queda más expuesta. Por lo que, se considera que a mayores tiempos de exposición, la lignina logrará estabilizarse y degradarse.

El contenido de lignina de los materiales es la razón principal del bajo nivel de biodegradabilidad de los mismos (Francou et al., 2008); pulpas que contiene más lignina en su composición, se degradan más lentamente porque la lignina interfiere con la biodegradación de la celulosa (Venelampi et al., 2003). La lignina es relativamente degradable en ambientes aeróbicos pero refractaria en los anaeróbicos, debido a la asociación física de la lignina con la celulosa (revestimiento) (Komilis & Ham, 2003). En investigaciones previas, (Komilis & Ham, 2003), sobre el proceso de biodegradación de componentes de residuos sólidos (mezclas de papeles, residuos de jardín y residuos de comida), en condiciones aeróbicas, los autores encontraron que los sustratos con altos contenidos iniciales de lignina presentan una degradación relativamente baja, resultados comparables con los encontrados en el trabajo de investigación.

Cinética de degradación: contenido de carbohidratos en función al tiempo

La Figura IV.20, presenta la cinética de degradación, pérdida de carbohidratos de los materiales evaluados, pulpas ONP, OWP, y OCC, en función al tiempo de ensayo.

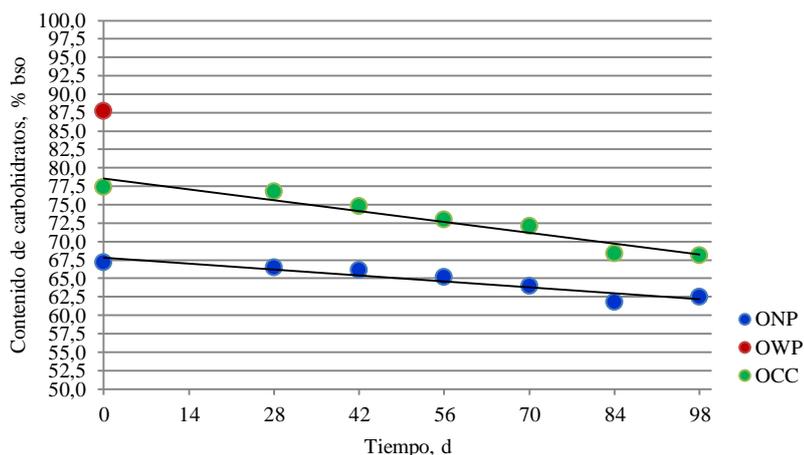


Figura IV.20. Cinética de degradación: contenido de carbohidratos en función al tiempo

Las pulpas ONP y OCC, tienden a disminuir el contenido de carbohidratos en función al tiempo de ensayo, lo cual permite estimar que los materiales sufren degradación en el tiempo de ensayo, con pérdida de celulosa y hemicelulosa. Al comparar la gráfica de contenido de carbohidratos, con la gráfica de contenido de lignina, se observa que los carbohidratos disminuyen proporcionalmente al aumento de lignina. La falta de degradación de la lignina puede ser debido a su poder recalcitrante que dificulta su degradación biológica; y su incremento puede ser debido a la degradación del material ligado a la misma.

En investigaciones previas, (Komilis & Ham, 2003), sobre el proceso de biodegradación de componentes de residuos sólidos (mezclas de papeles, residuos de jardín y residuos de comida), en condiciones aeróbicas, los autores informaron que la celulosa y la hemicelulosas, son responsables de más del 50% de la pérdida total de masa seca; y que la relación de celulosa a lignina disminuye durante el compostaje, siendo un indicador preciso de la descomposición del sustrato.

Fracción biodegradable

La Tabla IV.18, proporciona la fracción biodegradable estimada para cada material evaluado, pulpas ONP, OWP, y OCC.

Tabla IV.18. Fracción biodegradable estimada para pulpas secundarias

Material	Fracción biodegradable (%)	
	Determinada analíticamente	Obtenida de la literatura (Tchobanoglous et al., 1994)
ONP	0,20	0,22
OWP	0,79	0,82
OCC	0,43	0,47

La fracción biodegradable oscila entre 0,20 para pulpas ONP y 0,79 para pulpas OWP. Dichos resultados son comparables con aquellos valores de fracción biodegradable encontrados en la literatura.

La velocidad con la cual se degrada biológicamente un material es función de la composición del mismo y del contenido de nutrientes, humedad, temperatura, aireación y disponibilidad microbiana del medio que lo rodea (Andrady et al., 1992). Los resultados demostraron que, bajo iguales condiciones de nutrientes, humedad, temperatura, aireación y disponibilidad microbiana del medio, la composición del material juega un papel muy importante. Materiales con mayor contenido de carbohidratos en su composición alcanzan mayor degradación en menor tiempo, en comparación a aquellos materiales con mayor contenido de lignina en su composición, los cuales requieren un mayor tiempo para alcanzar niveles equivalentes de degradación, debido al poder recalcitrante de la lignina que dificulta la degradación del material. Dada la rápida degradación de las pulpas OWP, sería aconsejable para el diseño de contenedores biodegradables, combinar dicho material con pulpas ONP o pulpas OCC, o con otro material lignocelulósico con mayor contenido de lignina en su composición, para disminuir su deterioro biológico en función al tiempo.

IV.2. DISEÑO DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

IV.2.1. CONTENEDORES BIODEGRADABLES A BASE DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

De la optimización de las variables respuestas (III.2.3.4), correspondientes a las propiedades de drenabilidad, estructurales y mecánicas, evaluadas en hojas de laboratorio, según un diseño experimental de tipo mezcla, se obtuvieron las combinaciones ideales (Tabla III.8), para diseñar contenedores biodegradables resistentes, rígidos y permeables, con aptitud para el cultivo de plantas. Se formaron contenedores de paredes consistentes sin roturas, de forma piramidal truncada (Figura IV.21), cada uno de 5 g peso seco, con un volumen equivalente a 70 cm³.

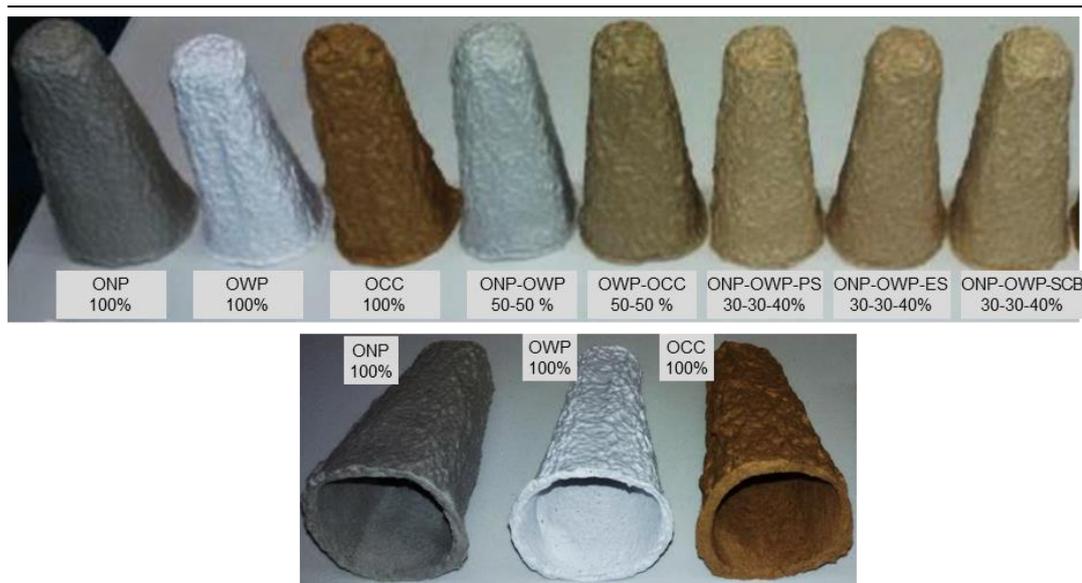


Figura IV.21. Contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos

IV.2.2. CINÉTICA DE SECADO

De la optimización de las variables respuestas (III.2.3.4), correspondientes a las propiedades de drenabilidad, estructurales y mecánicas, evaluadas en hojas de laboratorio, según un diseño experimental de tipo mezcla, se obtuvieron las combinaciones ideales (Tabla III.8), para diseñar contenedores biodegradables resistentes, rígidos y permeables, con aptitud para el cultivo de plantas.

Seguido a la formación, cada contenedor se sometió a un proceso de secado, para determinar la cinética de secado, mediante la curva de secado y la curva de velocidad de secado.

Curvas de secado

La Figura IV.22, presenta las curvas de secado para cada tipo de contenedor. En estas curvas se relaciona el contenido de humedad del sólido frente al tiempo de secado, operando en condiciones constantes de secado y circulación de aire sobre el contenedor a secar.

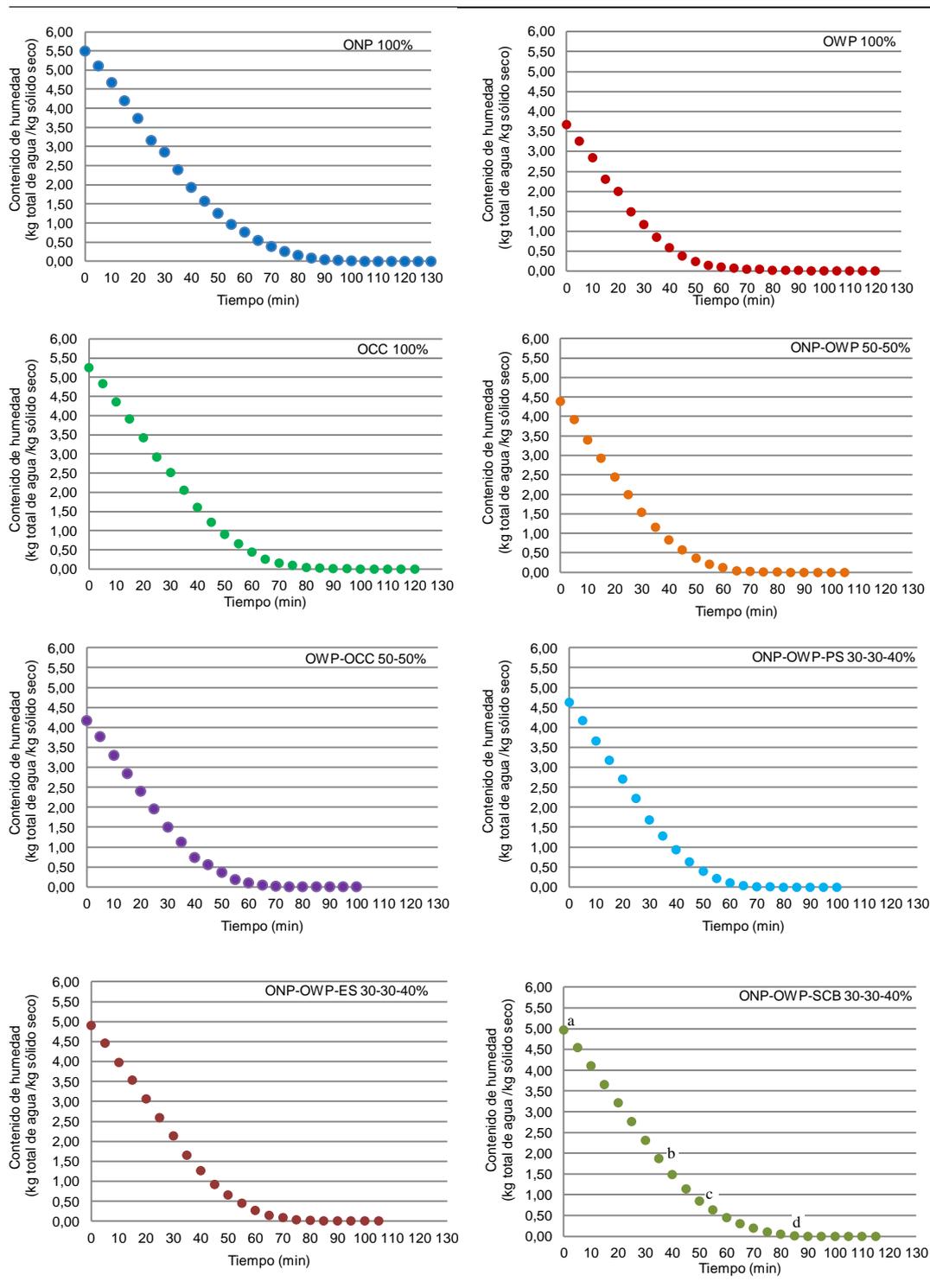


Figura IV.22. Curvas de secado

Nota: En la gráfica ONP-OWP-SCB 30-30-40%, se ejemplifican los periodos aproximados de secado: a-b velocidad de secado constante (desde humedad inicial hasta humedad crítica); b-c velocidad decreciente, periodo de secado superficial no saturado (desde humedad crítica hasta la humedad promedio); c-d velocidad decreciente, movimiento interno de los controles de humedad (desde humedad promedio hasta la humedad de equilibrio).

Al principio la humedad del contenedor, independientemente de su composición, disminuye linealmente con el tiempo de secado a una velocidad de secado constante hasta que la humedad del sólido alcanza un valor crítico, a partir del cual la

velocidad de secado comienza a disminuir, anulándose cuando la humedad del contenedor alcanza el valor de equilibrio con el aire (humedad libre igual a cero). El punto crítico se alcanza a los $(27,5 \pm 2,5)$ min, y el punto de equilibrio se alcanza a los (80 ± 10) min. Los contenedores biodegradables a base de pulpa pura ONP, parten de un contenido inicial de humedad levemente superior en comparación a las demás composiciones, y requieren un mayor tiempo para alcanzar el punto de equilibrio, lo que se puede atribuir a la mayor capacidad de las fibras de retener agua, mayor °SR (ver Figura IV.3), la cual queda ligada en los intersticios de las fibras, en comparación con las fibras de los demás materiales.

Curvas de velocidad de secado

La Figura IV.23, presenta las curvas de velocidad de secado para cada tipo de contenedor. En estas curvas se relaciona la velocidad de secado del sólido, es decir, rapidez en la eliminación de agua, frente al contenido de humedad del contenedor. Se presentan en general dos periodos (Ocon & Tojo, 1986):

- Período de velocidad constante: Se extiende desde la humedad inicial del sólido hasta alcanzar la humedad crítica. Dicha humedad crítica depende de las condiciones del aire de secado y del espesor del sólido a secar. Cuando se incrementa el espesor del sólido, disminuye el área de contacto por unidad de volumen y, ello induce a una reducción de la velocidad de secado. La superficie del material se encuentra cubierta por una capa de agua y la evaporación depende de la intensidad de paso de calor a través de la capa límite del aire o de la velocidad de difusión del vapor. La superficie húmeda del material se comporta como una superficie de agua no ligada. En este periodo la velocidad de difusión a través de la pared del sólido es equivalente a la velocidad de secado.
- Periodo de velocidad decreciente: Se extiende desde la humedad crítica hasta la humedad de equilibrio. En el primer periodo la velocidad de secado varía linealmente con la humedad; la velocidad de secado está regida por la evaporación del agua sobre la fracción de superficie húmeda. En el segundo periodo, la velocidad de secado desciende hasta un punto de equilibrio; se inicia cuando la superficie del material está seca; el transporte de humedad ocurre desde el interior del material hasta la superficie del mismo, por difusión.

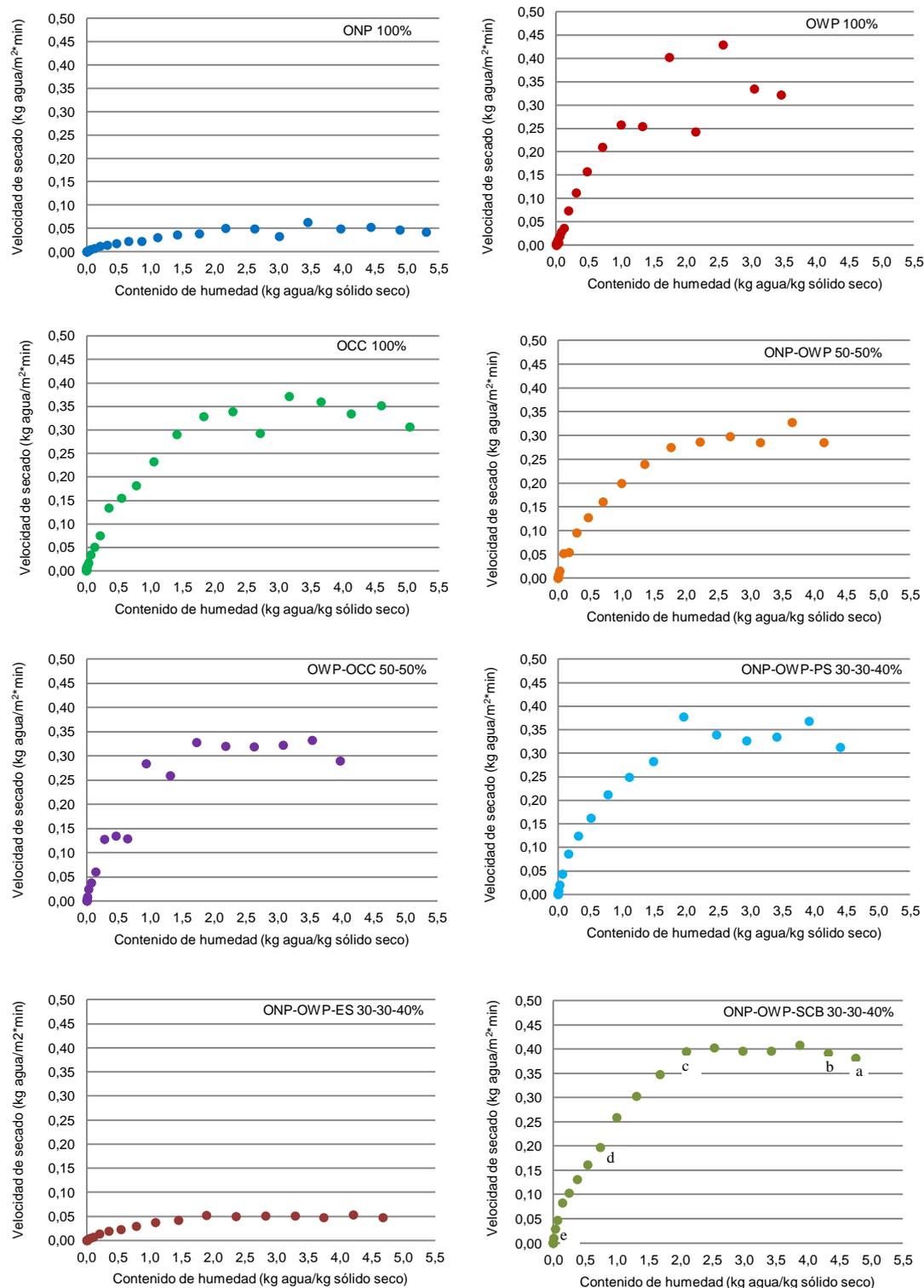


Figura IV.23. Curvas de velocidad de secado

Nota: En la gráfica ONP-OWP-SCB 30-30-40%, se ejemplifican los periodos aproximados de secado: a-b ajuste inicial; b-c velocidad de secado constante (desde humedad inicial hasta humedad crítica); c-d velocidad decreciente (desde humedad crítica hasta la humedad promedio); d-e velocidad decreciente, movimiento interno de los controles de humedad (desde humedad promedio hasta la humedad de equilibrio).

Se observa, independientemente de la composición del contenedor, una curva típica de velocidad de secado de papeles, con un periodo inicial de secado; un periodo de

secado constante, y un periodo de velocidad decreciente (Karlsson & Oyj, 2000). Los contenedores biodegradables son materiales porosos; se encuentran constituidos por materiales muy higroscópicos; su estructura física afecta la forma en que se secan; tienen un alto contenido inicial de humedad; luego de su formación se encuentran recubiertos por una delgada película de líquido, como consecuencia durante el primer periodo de secado, se observa una gran cantidad de pérdida de agua superficial (Alkahasawneh, 2007; Vieira, Estrella, & Rocha, 2007). Durante el secado de los materiales sólidos que lo componen, una gran parte de la humedad existe como agua superficial, agua libre o no ligada (Alkahasawneh, 2007; Vieira et al., 2007); al ser expuesto el material a aire relativamente seco, la evaporación comienza a tener lugar desde la superficie. Se observa un leve periodo de calentamiento inicial, que tiene lugar en los primeros 5 min, y ocurre por un aumento de la rapidez de evaporación debido a un aumento de la temperatura superficial. Luego se observa un periodo de velocidad de secado constante, donde el secado se produce principalmente por evaporación de la superficie saturada, y el movimiento del líquido se mantiene por la fuerza capilar; el contenido de humedad del producto es alto, la transferencia interna de humedad a la superficie y la evaporación en la superficie están en equilibrio, y el agua libre presente en la superficie se evapora, de manera constante y continua; la concentración de humedad superficial se reduce pero permanece elevada la concentración en el interior del material (Alkahasawneh, 2007; Vieira et al., 2007). Este periodo continúa hasta que la migración del agua desde el interior hacia la superficie del material, es suficiente para compensar la pérdida de agua en la superficie; el punto final que alcanza corresponde al contenido crítico de humedad, aproximadamente igual a $2 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$. Al alcanzar dicho punto, como el contenido de agua libre en la superficie es menor que el crítico, la superficie forma parches húmedos discontinuos, y a medida que avanza el secado, la película superficial de humedad se reduce por evaporación, y comienzan a aparecer zonas secas sobre la superficie (Alkahasawneh, 2007; Vieira et al., 2007). El coeficiente de transferencia de masa disminuye con el contenido superficial de agua libre, y comienza el primer periodo de velocidad decreciente; que es acompañado por un aumento de la temperatura superficial; dando lugar a un periodo de secado de la superficie no saturada (la velocidad varía en forma lineal con el contenido de humedad), y se logra eliminar completamente la capa de líquido superficial (agua no ligada), hasta alcanzar un contenido de humedad aproximado de $0,5 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$.

Desde dicho punto se observa, un segundo periodo, donde la velocidad de secado continua descendiendo hasta que el sólido alcanza el punto de equilibrio, donde se detiene el secado (velocidad de secado nula); en dicho trayecto ocurre un movimiento interno de los controles de humedad, y se alcanza eliminar el agua ligada (Alkahasawneh, 2007; Vieira et al., 2007). En el periodo de velocidad decreciente, el intercambio de masa y calor entre el aire de secado y el material húmedo se torna más difícil. El factor limitante es la migración de la humedad interna del material; la mayor resistencia del agua para migrar a la superficie hace que el proceso de secado se vuelva más lento; para que el agua no ligada pueda migrar se rompen los enlaces químicos (Vieira et al., 2007).

IV.3. CALIDAD DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

IV.3.1. PROPIEDADES FISICAS GENERALES

IV.3.1.1. Propiedades evaluadas sobre contenedores

La Tabla IV.19, proporciona los valores de gramaje, espesor, volumen específico, densidad aparente, resistencia y absorción de agua, para cada tipo de contenedor.

Tabla IV.19. Propiedades estructurales y mecánicas de contenedores biodegradables

Tipo de contenedor (Componente: Proporción)	Gramaje (g/m ²)	Espesor (mm)	Volumen específico (cm ³ /g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Resistencia a la Compresión (N*m/g)	Absorción de agua (g/m ²)
ONP 100%	450,05	3,07	6,82	0,15	0,38	2.654,35
OWP 100%	417,26	1,92	4,59	0,22	0,63	1.528,83
OCC 100%	447,87	2,75	6,14	0,16	0,49	2.166,02
ONP-OWP 50-50%	450,16	2,57	5,71	0,18	0,48	2.137,89
OWP-OCC 50-50%	436,51	2,24	5,13	0,20	0,58	1.764,79
ONP-OWP-PS 30-30-40%	466,30	3,23	6,94	0,14	0,28	2.159,46
ONP-OWP-ES 30-30-40%	473,69	3,19	6,72	0,15	0,33	2.368,48
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	490,98	3,83	7,81	0,13	0,36	3.412,70

El gramaje varía entre 417 y 491 g/m²; correspondiendo el mínimo a OWP 100% y el máximo a ONP-OWP-SCB 30-30-40%. El espesor varía entre 1,92 y 3,83 mm, correspondiendo el mínimo a OWP 100% y el máximo a ONP-OWP-SCB 30-30-40%; como consecuencia los contenedores biodegradables OWP 100%, adquieren un valor de volumen específico mínimo (4,59 cm³/g) y los contenedores biodegradables ONP-OWP-SCB 30-30-40 %, un valor de volumen específico máximo (7,81 cm³/g). En estos resultados es interesante recalcar, que el espesor, como consecuencia de la estructura del material, es mayor en las composiciones que tienen aserrines o bagazo,

y esto repercute en los valores de volumen específico. Al comparar los resultados entre contenedores biodegradables elaborados a base de pulpas puras o en mezcla entre sí, se observa que los resultados arrojan un mayor volumen específico para la composición 100% ONP; por lo cual, se concluye que estos presentan paredes de mayor rigidez en comparación a los contenedores biodegradables de las demás composiciones (a mayor volumen específico mayor rigidez). La densidad, como propiedad inversa al volumen específico adquiere, un valor mínimo ($0,13 \text{ g/cm}^3$) para ONP-OWP-SCB 30-30-40%, y un valor máximo ($0,22 \text{ g/cm}^3$) para OWP 100%; por lo cual, se concluye que los contenedores biodegradables OWP 100% presentan paredes de elevada resistencia mecánica y baja permeabilidad en comparación a los demás contenedores biodegradables (a mayor densidad, mayor resistencia mecánica y menor porosidad), lo cual se corrobora con los datos de resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión, varía entre 0,28 y 0,63 $\text{N}\cdot\text{m/g}$; correspondiendo el mínimo a ONP-OWP-PS 30-30-40% y el máximo a OWP 100%. Cuando se evalúa un material de mezclas, las propiedades de resistencia mecánica se encuentran entre las de mayor importancia, porque independientemente de su aplicación específica, estos materiales están diseñados para cumplir ciertas características en cuanto a forma, dureza y resistencia (Nechita et al., 2010). Contenedores con bajos rendimientos mecánicos, tendrán problemas de manipulación durante su uso en vivero, debido a una mayor fragilidad de los mismos (Castronuovo et al., 2015; A. Koeser, Kling, et al., 2013); por ello es importante que el contenedor tenga una resistencia suficiente, tanto en seco como en húmedo, para soportar el envasado, transporte y la manipulación (Evans et al., 2010). Si bien, se han encontrado buenos resultados en cuanto a resistencia mecánica de contenedores biodegradables a base de fibras celulósicas, el agregado de otros materiales como los residuos del procesamiento de la madera, rompen la continuidad de la red fibrosa afectando las propiedades de resistencia mecánica (Nechita et al., 2010). La absorción de los contenedores biodegradables varía entre 1.528,83 y 3.412,70 g/m^2 , correspondiendo el mínimo a OWP 100% y el máximo a ONP-OWP-SCB 30-30-40%. A mayor capacidad de absorción de agua, mayor será el ablandamiento de las paredes, y ello dará lugar a una reducción de las medidas de resistencia (Evans et al., 2010). Además, aquellos contenedores que presenten una mayor capacidad de absorción, van a retener mayor volumen de agua, y presentarán una tendencia a absorber la humedad retenida por el sustrato, secándolo y en consecuencia se deberá incrementar

el volumen y la frecuencia de riego, y ello propiciará un ambiente más húmedo en el vivero, y en consecuencia, se incrementará la proliferación de algas y hongos, lo cual debilitará la estructura del contenedor (Cypher & Fulcher, 2015b).

Considerando que se desea diseñar contenedores biodegradables de paredes rígidas y resistentes que soporten la manipulación en vivero, de paredes permeables para favorecer el traspaso de las raíces a través de estas debido a una estructura más abierta, y que a su vez no absorban grandes cantidades de agua para evitar resecar el sustrato; las variables respuestas se optimizaron mediante análisis estadístico para seleccionar el diseño óptimo que cumpla con dichas consideraciones. De la optimización de las variables, se tiene que, los contenedores biodegradables a base de la mezcla de pulpas OWP y OCC en proporción 50:50, presenta una óptima calidad, en cuanto a resistencia, rigidez, permeabilidad del material y absorción de agua. Este resultado coincide con la optimización por múltiples respuestas realizada a partir de los resultados de ensayos físicos sobre hojas de pulpas (punto IV.1.3.3).

IV.3.1.2. Correlación entre propiedades evaluadas en hojas de laboratorio con propiedades evaluadas en contenedores

Los resultados encontrados para propiedades relacionadas a la resistencia de contenedores biodegradables se correlacionaron con los resultados encontrados para propiedades relacionadas a la resistencia de hojas de 150 g/m² de gramaje. La Figura IV.24, presenta la relación que existe entre las variables analizadas y el coeficiente de correlación obtenido para cada par de variables.

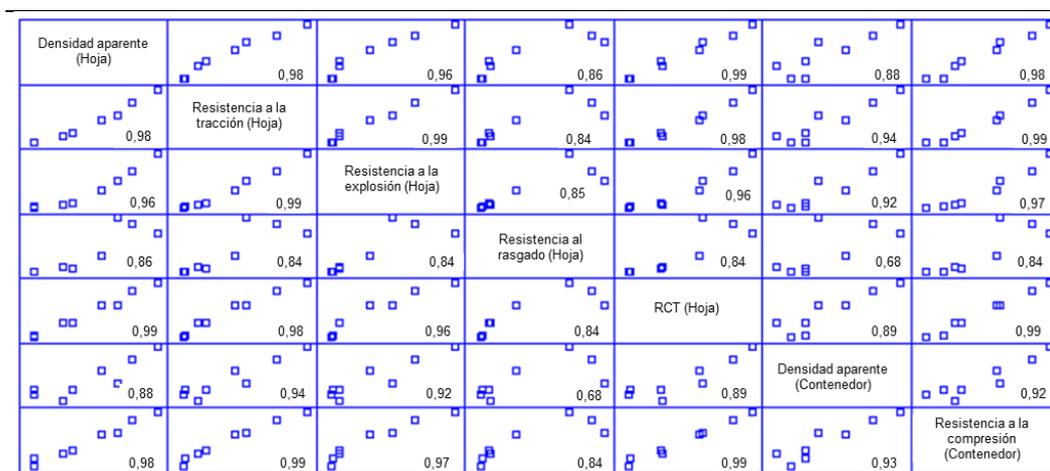


Figura IV.24. Correlación entre propiedades de resistencia hojas de 150 g/m² y contenedores biodegradables

Salvo rasgado que presenta un valor de ajuste más bajo, en todos los casos se observa un modelo lineal con un muy buen ajuste, con una correlación positiva. Los coeficientes de correlación permiten medir la fuerza de la relación lineal entre dos variables; entre más cercana sea la correlación a (-1) ó (+1), más fuerte es la relación. En el análisis realizado, los coeficientes obtenidos son cercanos a (+1), indicando una fuerte correlación entre los pares de variables, y resaltando que a medida que aumentan las variables del eje x, también aumentan las variables del eje y. Los pares de variables analizados arrojaron p-valores menores a 0,05, indicando que existe una correlación lineal estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95%.

IV.3.1.3. Propiedades evaluadas sobre el conjunto contenedor-sustrato

Se detallan los valores de cantidad total de agua retenida por el conjunto contenedor-sustrato en relación al volumen total de agua adicionada (100 mL). También se relaciona la cantidad de agua retenida por el sustrato de cada contenedor biodegradable respecto al control (contenedores de PP), para conocer la influencia de la composición de este sobre la capacidad de retención de agua del sustrato. En cada ensayo solamente varía el tipo de sustrato utilizado.

Sustrato A:

La Tabla IV.20, proporciona los valores de retención de agua del conjunto contenedor-sustrato, para el Sustrato A (mezcla de perlita y corteza de pino compostada en proporción 1:1).

Tabla IV.20. Retención de agua contenedor-sustrato A

Tipo de contenedor (Contenedor: Proporción)	Agua retenida por el conjunto contenedor-sustrato (%)	Agua drenada (%)	Agua retenida por el contenedor (%)	Agua retenida por el sustrato (%)	Agua retenida por el sustrato respecto al control	Agua retenida por el contenedor respecto al control
ONP 100%	34,72	65,28	34,72	0	0	100
OWP 100%	21,96	78,04	20,83	1,13	7,14	92,86
OCC 100%	30,91	69,09	30,05	0,85	5,40	94,60
ONP-OWP 50-50%	28,78	71,22	27,51	1,27	8,08	91,92
OWP-OCC 50-50%	27,98	72,02	25,06	2,92	18,49	81,51
ONP-OWP-PS 30-30-40%	36,26	63,74	35,84	0,42	2,67	97,33
ONP-OWP-ES 30-30-40%	33,31	66,69	33,31	0	0	100
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	39,53	60,47	39,53	0	0	100
PP 100% (control)	15,78	84,22	0	15,78	100,00	0,00

Del volumen total de agua adicionada (100 mL), el conjunto “contenedor biodegradable-sustrato”, retiene entre 21,96 y 39,53 % de agua; mientras que el

conjunto “contenedor control-sustrato”, retiene el 15,78 %, valor que corresponde a la capacidad de retención del sustrato, dado que el recipiente plástico tiene una capacidad de retención nula. Al comparar los valores de retención de agua de los contenedores biodegradables respecto al sustrato, teniendo en cuenta los resultados del control (capacidad de retención del sustrato del 15,78%), se observa que, en todos los casos, los contenedores biodegradables absorben el agua retenida por el sustrato, secando al mismo; siendo el efecto menos pronunciado en aquellas composiciones que presentan pulpas de OWP y pulpas de OCC, lo cual se corresponde con los resultados obtenidos en cuanto a capacidad de absorción de agua de contenedores biodegradables (Tabla IV.19). De los contenedores biodegradables evaluados, aquellos de composición OWP-OCC 50-50%, son los que absorben menor humedad del sustrato. Los contenedores biodegradables tienen una capacidad de retención entre 20,83 y 39,53%, correspondiendo el mínimo a OWP 100% y el máximo a ONP-OWP-SCB 30-30-40%.

Sustrato B:

La Tabla IV.21, proporciona los valores de retención de agua del conjunto contenedor-sustrato, para el Sustrato B (mezcla de corteza de pino compostada, estiércol de vaca termofusionada y turba en proporción 3:1:1).

Tabla IV.21. Retención de agua contenedor-sustrato B

Tipo de contenedor (Contenedor: Proporción)	Agua retenida por el conjunto contenedor- sustrato (%)	Agua drenada (%)	Agua retenida por el contenedor (%)	Agua retenida por el sustrato (%)	Agua retenida por el sustrato respecto al control	Agua retenida por el contenedor respecto al control
ONP 100%	43,72	56,28	40,30	3,42	15,10	84,90
OWP 100%	24,55	75,45	19,68	4,87	21,54	78,46
OCC 100%	36,49	63,51	30,07	6,42	28,39	71,61
ONP-OWP 50-50%	33,72	66,29	29,10	4,62	20,40	79,60
OWP-OCC 50-50%	33,09	66,91	26,93	6,16	27,22	72,78
ONP-OWP-PS 30-30-40%	36,52	63,47	30,64	5,88	26,01	73,99
ONP-OWP-ES 30-30-40%	37,23	62,60	37,23	0	0	100
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	49,68	50,32	46,50	3,18	14,05	85,95
PP 100% (control)	22,62	77,38	0,00	22,62	100,00	0,00

Del volumen total de agua adicionada (100 mL), el conjunto “contenedor biodegradable-sustrato”, retiene entre 24,55 y 49,68% de agua; mientras que el conjunto “contenedor control-sustrato”, retiene el 22,62%, valor que corresponde a la capacidad de retención del sustrato, dado que el recipiente plástico tiene una

capacidad de retención nula. Al comparar los valores de retención de agua de los contenedores biodegradables respecto al sustrato, teniendo en cuenta los resultados del control (capacidad de retención del sustrato del 22,62 %), se observa que, en todos los casos, los contenedores biodegradables absorben el agua retenida por el sustrato secando al mismo, siendo el efecto menos pronunciado en aquellas composiciones que presentan pulpas de OWP y pulpas de OCC, lo cual se corresponde con los resultados obtenidos en cuanto a capacidad de absorción de agua de contenedores biodegradables (Tabla IV.19). De los contenedores biodegradables evaluados, OCC 100% y OWP-OCC 50-50%, son los que absorben menor humedad del sustrato. Los contenedores biodegradables tienen una capacidad de retención entre 19,68 y 46,50 %, correspondiendo el mínimo a OWP 100%; y el máximo a ONP-OWP-SCB 30-30-40%.

Sustrato C:

La Tabla IV.22, proporciona la retención de agua del conjunto contenedor-sustrato para el Sustrato C (mezcla de corteza de pino compostada, cascarilla de arroz y perlita en proporción 3:1:1).

Tabla IV.22. Retención de agua contenedor-sustrato C

Tipo de Contenedor (Contenedor: Proporción)	Agua retenida por el conjunto contenedor-sustrato (%)	Agua drenada (%)	Agua retenida por el contenedor (%)	Agua retenida por el sustrato (%)	Agua retenida por el sustrato respecto al control	Agua retenida por el contenedor respecto al control
ONP 100%	50,67	49,33	37,10	13,57	42,95	57,05
OWP 100%	35,66	64,34	20,31	15,35	48,57	51,43
OCC 100%	49,63	50,37	33,18	16,45	52,06	47,94
ONP-OWP 50-50%	43,65	56,35	27,40	16,25	51,43	48,57
OWP-OCC 50-50%	47,61	52,38	30,98	16,63	52,64	47,36
ONP-OWP-PS 30-30-40%	54,24	45,76	40,91	13,33	42,19	57,81
ONP-OWP-ES 30-30-40%	53,13	46,87	37,53	15,60	49,37	50,63
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	64,96	35,04	49,79	15,17	47,99	52,01
PP 100% (control)	31,65	68,35	0	31,65	100,00	0

Del volumen total de agua adicionada (100 mL), el conjunto “contenedor biodegradable-sustrato”, retiene entre 35,66 y 64,96 % de agua; mientras que el conjunto “contenedor control-sustrato”, retiene el 31,65 %, valor que corresponde a la capacidad de retención del sustrato, dado que el recipiente plástico tiene una capacidad de retención nula. Al comparar los valores de retención de agua de los contenedores biodegradables respecto al sustrato, teniendo en cuenta los resultados

del control (capacidad de retención del sustrato del 34,65%), se observa que, en todos los casos, los contenedores biodegradables absorben el agua retenida por el sustrato, secando al mismo; siendo el efecto menos pronunciado en aquellas composiciones que presentan pulpas de OWP y pulpas de OCC, lo cual se corresponde con los resultados obtenidos en cuanto a capacidad de absorción de agua de contenedores biodegradables (Tabla IV.19). De los contenedores biodegradables evaluados, OCC 100% y OWP-OCC 50-50%, son los que absorben menor humedad del sustrato. Los contenedores biodegradables tienen una capacidad de retención entre 20,31 y 49,79 %, correspondiendo el mínimo a OWP 100% y el máximo a ONP-OWP-SCB 30-30-40%.

De los resultados obtenidos para cada sustrato evaluado (Tablas IV.20; IV.21; IV.22), se observa que, la composición de estos influye en gran medida sobre la retención de agua del mismo en función a su capacidad de absorción-drenado; sin embargo, independiente del tipo de sustrato, se observa que, la capacidad de retención de agua de un tipo de contenedor no varía, por lo cual, la retención entre contenedor-sustrato estará íntimamente relacionada con la capacidad de retención del sustrato. En comparación con el control se observa que, para mantener las mismas condiciones de humedad del sustrato, la cantidad de riego debería ser aproximadamente el doble que la utilizada para contenedores plásticos. Estos resultados son consistentes con los encontrados por (Beeks & Evans, 2013b; Evans et al., 2015, 2010; Evans & Karcher, 2004; A. Koeser, Lovell, et al., 2013), quienes informaron que los contenedores biodegradables plantables, independientemente de su composición, presentan una mayor pérdida de agua en comparación con los contenedores plásticos tradicionales, por lo cual, durante su uso en vivero, requieren más agua y riegos más frecuentes. Cuando las paredes del contenedor son permeables al agua, como es el caso de los contenedores a base de papel, hay una tasa mayor de pérdida de agua tanto por drenado como por evaporación a través de las paredes y, debido a ello, se requieren irrigaciones más frecuentes en comparación con los contenedores de paredes no permeables, como los contenedores plásticos (Evans et al., 2010). La permeabilidad (porosidad) de las paredes también tiene una influencia marcada sobre el volumen y frecuencia de riego; debido a la pérdida de agua a través de la pared, los contenedores biodegradables plantables pueden requerir un volumen de agua de dos a tres veces mayor que los contenedores plásticos

tradicionales (Cypher & Fulcher, 2015b); como consecuencia, usar el mismo régimen de riego en contenedores biodegradables y contenedores plásticos, puede dar como resultado plantas con menor crecimiento y un mayor tiempo de permanencia en vivero para alcanzar cultivos equivalentes debido a al efecto del estrés hídrico (Evans & Hensley, 2004). Es importante considerar la disponibilidad de humedad del sustrato y la tolerancia al estrés hídrico del cultivo, ya que ambos factores pueden alterar el desarrollo y supervivencia de la planta (X. Wang et al., 2015). Una solución posible, para reducir el consumo de agua cuando se trabajan con contenedores biodegradables plantables de paredes laterales porosas, es utilizar bandejas transportadoras de plástico (Evans et al., 2015), o bien, un sustrato con mayor poder de retención de la humedad (Cypher & Fulcher, 2015b). En lo que respecta al drenado de agua por las paredes del contenedor, (Evans & Karcher, 2004) informaron que los contenedores biodegradables pierden una mayor proporción de agua a través de sus paredes en comparación con los contenedores plásticos; y a su vez, entre contenedores biodegradables, en función a su composición, varía la proporción de agua perdida; por ejemplo, los contenedores biodegradables de fibras de pluma pierden más agua que los contenedores de plástico, pero pierden significativamente menos agua que los contenedores biodegradables de papel; lo cual se debe principalmente a que, los contenedores biodegradables de fibras de plumas son hidrófobos (presentan una barrera más resistente al agua), en comparación con los contenedores biodegradables de papel que son hidrofílicos. En aquellos casos donde se utilizan sistemas de riego por subirrigación, los contenedores biodegradables absorben el agua de riego por las paredes, retrasando la absorción del líquido de riego por el sustrato (Beeks & Evans, 2013b), mientras que en aquellos casos que utilizan sistemas de riego por irrigación, los contenedores biodegradables absorben el agua de riego que circula por el sustrato y el líquido de riego retenido por el sustrato, hasta alcanzar su saturación, secando el sustrato.

IV.3.2. APTITUD EN VIVERO

IV.3.2.1. Calidad de plantas cultivadas: Atributos morfológicos

La calidad de las plantas cultivadas se estimó a partir de los datos de altura y biomasa seca de cada plántula. Dichos atributos permiten predecir de forma adecuada el desempeño de una plántula, y determinar el efecto de la composición de

los contenedores y otros factores sobre la calidad de las mismas. Esto es importante porque si se requiere un mayor tiempo para alcanzar los volúmenes requeridos, aumentan los insumos y los costos de producción.

En el cultivo de la hierba aromática, menta (*Mentha arvensis*), con un periodo de ensayo de 6 semanas, y en el cultivo de la hortaliza de hoja verde, acelga (*Beta vulgaris* var. cicla), con un periodo de ensayo de 8 semanas, se alcanzó una supervivencia del 100%; resultados esperados, dado que dicha variable no depende del tipo de contenedor ni de la rusticidad de las especie; esta variable generalmente se relaciona con la calidad de la planta, estrés hídrico, aumento de la temperatura del sustrato, deficiencia de minerales, ataque de plagas, entre otros (H. J. M. Flores et al., 2010). En cambio, en el caso del cultivo de la especie forestal, eucalipto (*Eucalyptus grandis*), con un periodo de ensayo de 10 semanas, se alcanzó una supervivencia del 40%; como consecuencia de un lote de estacas de baja calidad y estrés hídrico; en función a ello, el análisis estadístico se llevó a cabo considerando solamente los tipos de contenedores que alcanzaron dicha proporción de sobrevivencia.

Cultivo de la hierba aromática, menta (*Mentha arvensis*)

Al realizar un análisis de varianza, considerando como variables, “Altura de plántula”; “Peso seco parte aérea”, y “Peso seco parte radicular”, y como factor “Tipo de contenedor”, se obtuvo para las tres variables analizadas, un p-valor < 0,05, indicando que hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables medidas entre un nivel de tipo de contenedor y otro, a un nivel de confianza del 95%. La Tabla IV.23, muestra los valores de las medias obtenidas a partir del análisis de varianza, correspondiente a las variables, “Altura de plántula”; “Peso seco parte aérea”, y “Peso seco parte radicular”, para cada tipo de contenedor, y la comparación entre parejas de medias según el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla IV.23. Valores medios de atributos morfológicos para menta

Tipo de contenedor (Componente: proporción)	Menta (<i>Mentha arvensis</i>). Tiempo en vivero: 6semanas.		
	Altura de plántula (cm)	Peso seco parte aérea (g)	Peso seco parte radicular (g)
ONP 100%	15,60 ab	0,42 a	0,26 ab
OWP 100%	15,32 a	0,38 abc	0,27 a
OCC 100%	14,67 a	0,34 c	0,22 cd
ONP-OWP 50-50%	15,89 ab	0,39 abc	0,25 abc
OWP-OCC 50-50%	15,07 a	0,36 abc	0,24 abc
ONP-OWP-PS 30-30-40%	15,10 a	0,34 bc	0,22 cd
ONP-OWP-ES 30-30-40%	17,34 b	0,41 ab	0,21 cd
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	14,83 a	0,37 abc	0,19 d
PP 100% (control)	19,34 c	0,52 d	0,23 bc

Nota: Para cada columna, letras diferentes indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias, según procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten al menos una letra en común, según procedimiento LSD de Fisher, a un nivel de confianza del 95%.

Se observa para la variable “Altura de plántula”, que existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las medias obtenidas para los diferentes contenedores biodegradables. Las alturas oscilan entre 14,67 cm para plantas cultivadas en OCC 100% y 19,34 cm para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de altura inferior que aquellas cultivadas en contenedores de PP. Para la variable “Peso seco parte aérea”, existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor PP y las medias obtenidas para los diferentes contenedores biodegradables. Los pesos secos de las partes aéreas oscilan entre 0,34 g para plantas cultivadas tanto en OCC 100% como en ONP-OWP-PS 30-30-40%, y 0,52 g para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de peso seco de parte aérea inferior que aquellas cultivadas en contenedores de PP. Para la variable “Peso seco parte radicular”, existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las medias obtenidas para los contenedores biodegradables OWP 100% y ONP-OWP-SCB 30-30-40%. Los pesos secos de las partes radiculares oscilan entre 0,19 g para plantas cultivadas en ONP-OWP-SCB 30-30-40%, y 0,27 g para plantas cultivadas en OWP 100%. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan en general (excepto aquellos con aserrín o bagazo en su composición), valores medios de peso seco de la parte radicular, superiores a aquellas cultivadas en contenedores PP.

Cultivo de la hortaliza de hoja verde, acelga (*Beta vulgaris* var.cicla)

Al realizar un análisis de varianza, considerando como variables, “Altura de plántula”; “Peso seco parte aérea”, y “Peso seco parte radicular”, y como factor “Tipo de contenedor”, se obtuvo para las tres variables analizadas, un p-valor<0,05, indicando que hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables medidas entre un nivel de tipo de contenedor y otro, a un nivel de confianza del 95%. La Tabla IV.24, muestra los valores de las medias obtenidas a partir del análisis de varianza, correspondiente a las variables, “Altura de plántula”; “Peso seco parte aérea”, y “Peso seco parte radicular”, para cada tipo de contenedor; y la comparación entre parejas de medias según el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla IV.24. Valores medios de atributos morfológicos para acelga

Tipo de contenedor (Componente: Proporción)	Acelga (<i>Beta vulgaris</i> var.cicla). Tiempo en vivero: 8 semanas.		
	Altura de plántula (cm)	Peso seco parte aérea (g)	Peso seco parte radicular (g)
ONP 100%	16,98 abc	0,05 ab	0,03 a
OWP 100%	17,14 ab	0,06 bc	0,04 abc
OCC 100%	15,60 bcd	0,04 a	0,03 abc
ONP-OWP 50-50%	16,86 abc	0,08 cd	0,05 bcd
OWP-OCC 50-50%	16,64 abc	0,08 d	0,06 d
ONP-OWP-PS 30-30-40%	17,63 a	0,07 bc	0,05 cd
ONP-OWP-ES 30-30-40%	14,94 b	0,06 ab	0,03 ab
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	15,57 cd	0,06 bc	0,05 abcd
PP 100% (control)	20,54 e	0,19 e	0,12 e

Nota: Para cada columna, letras diferentes indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias, según procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que comparten al menos una letra en común, según procedimiento LSD de Fisher, a un nivel de confianza del 95%.

Se observa, para la variable “Altura de plántula”, que existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor PP y las medias obtenidas para los diferentes contenedores biodegradables. Las alturas oscilan entre 14,94 cm para plantas cultivadas en ONP-OWP-ES 30-30-40% y 20,54 cm para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de altura inferior que aquellas cultivadas en contenedores de PP. Para la variable “Peso seco parte aérea”, existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las medias obtenidas para los diferentes contenedores biodegradables. Los pesos secos de las partes aéreas oscilan entre 0,04 g para plantas cultivadas en OCC 100% y 0,19 g para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentaron valores medios de peso seco de parte aérea inferior que aquellas cultivadas en

contenedores de PP. Para la variable “Peso seco parte radicular”, existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las medias obtenidas para los diferentes contenedores biodegradables. Los pesos secos de las partes radiculares oscilan entre 0,03 g para plantas cultivadas en ONP 100%; OCC 100% y ONP-OWP-ES 30-30-40%, y 0,12 g para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de peso seco de la parte radicular inferiores a aquellas cultivadas en contenedores de PP.

Cultivo de la especie forestal, eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

Al realizar un análisis de varianza, considerando como variables, “Altura de plántula”; “Peso seco parte aérea”, y “Peso seco parte radicular”, y como factor “Tipo de contenedor”, se obtuvo para la variable “altura de planta”, un p-valor > 0,05, indicando que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables medidas entre un nivel de tipo de contenedor y otro, a un nivel de confianza del 95%; y para las dos variables restantes analizadas, un p-valor < 0,05, indicando que hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las variables medidas entre un nivel de tipo de contenedor y otro, a un nivel de confianza del 95%. La Tabla IV.25, muestra los valores de las medias obtenidas a partir del análisis de varianza, correspondiente a las variables, “Altura de plántula”; “Peso seco parte aérea”, y “Peso seco parte radicular”, para cada tipo de contenedor; y la comparación entre parejas de medias según el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla IV.25. Valores medios de atributos morfológicos para eucalipto

Tipo de contenedor (Componente: Proporción)	Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>). Tiempo en vivero: 10 semanas.		
	Altura de plántula (cm)	Peso seco parte aérea (g)	Peso seco parte radicular (g)
ONP 100%	*	*	*
OWP 100%	10,14 ab	0,24 a	0,04 a
OCC 100%	*	*	*
ONP-OWP 50-50%	9,94 ab	0,12 b	0,02 b
OWP-OCC 50-50%	9,59 ab	0,19 c	0,04 a
ONP-OWP-PS 30-30-40%	9,34 a	0,17 c	0,02 b
ONP-OWP-ES 30-30-40%	*	*	*
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	9,72 ab	0,10 b	0,03 ab
PP 100% (control)	10,83 b	0,24 a	0,13 c

Nota: Para cada columna, letras diferentes indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias, según procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, a un nivel de confianza del 95%. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan al menos una letra en común, según procedimiento LSD de Fisher, a un nivel de confianza del 95%. *Supervivencia nula.

Se observa para la variable “Altura de plántula”, que existen diferencias significativas únicamente entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las

medias correspondientes a los contenedores biodegradables ONP-OWP-PS 30-30-40%. Las alturas oscilan entre 9,34 cm para plantas cultivadas en ONP-OWP-PS 30-30-40% y 10,83 cm para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de altura inferior que aquellas cultivadas en contenedores de PP. Para la variable “Peso seco parte aérea”, existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las medias correspondientes a los contenedores biodegradables ONP-OWP 50-50%; OWP-OCC 50-50%; ONP-OWP-PS 30-30-40% y ONP-OWP-SCB 30-30-40%. Los pesos secos de las partes aéreas oscilan entre 0,10 g para plantas cultivadas en ONP-OWP-SCB 30-30-40%; y 0,24 g para plantas cultivadas en OWP 100%, así como en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables, a excepción de los contenedores biodegradables de OWP 100%, presentan valores medios de peso seco de parte aérea inferiores que aquellas cultivadas en contenedores de PP. Para la variable “Peso seco parte radicular”, existen diferencias significativas entre las medias correspondientes al contenedor de PP y las medias obtenidas para los diferentes contenedores biodegradables. Los pesos secos de las partes radiculares oscilan entre 0,02 g para plantas cultivadas tanto en ONP-OWP 50-50% como en ONP-OWP-PS 30-30-40%, y 0,13 g para plantas cultivadas en PP. Las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de peso seco de la parte radicular inferiores que aquellas cultivadas en contenedores de PP.

En términos generales, los estudios realizados muestran que no hay interacción entre las especies ensayadas y la composición de los contenedores; y, dentro de una misma especie, si bien en algunos casos, se observan diferencias significativas en el rendimiento entre los contenedores biodegradables de composiciones diferentes, dicha diferencia, numéricamente, es prácticamente despreciable. Sin embargo, si existen diferencias significativas en el rendimiento, entre plantas cultivadas en contenedores biodegradables y aquellas cultivadas en contenedores plásticos, alcanzando mayor desarrollo en estos últimos. La Figura IV.25, ilustra el desarrollo de las plantas cultivadas en los distintos tipos de contenedores para cada especie ensayada (la misma permite observar el desarrollo alcanzado por las plántulas pero no permite comparar el rendimiento entre estas, dado que las ilustraciones no están en escala).

Menta (*Mentha arvensis*)

Periodo en vivero: 6 semanas.



Acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*)

Periodo en vivero: 8 semanas.



Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

Periodo en vivero: 10 semanas.



Figura IV.25. Plantas cultivadas en contenedores biodegradables

Nota: Las imágenes ilustradas no se encuentran en escala, por lo cual no son de utilidad para comparar los rendimientos alcanzados en cada tipo de contenedor.

Los resultados obtenidos son consistentes con los encontrados por (Evans & Hensley, 2004; A. Koeser, Lovell, et al., 2013; Kuehny et al., 2011), quienes informaron, un mayor crecimiento de plantas cultivadas en contenedores plásticos en

comparación a aquellas cultivadas en contenedores biodegradables. En investigaciones previas (Evans & Hensley, 2004), los autores han determinado como causante del menor crecimiento de plantas cultivadas en contenedores biodegradables en comparación a aquellas cultivadas en contenedores plásticos, el estrés hídrico, debido al uso de un sistema de riego uniforme (igual volumen y frecuencia de riego para todos los contenedores). Bajo condiciones de riego uniforme el sustrato dispuesto en contenedores biodegradables, a base de materiales lignocelulósicos, se reseca en un menor tiempo en comparación con el sustrato dispuesto en contenedores de PP (mantienen su humedad constante); afectando la falta de disponibilidad de agua la calidad del cultivo. (Amoroso et al., 2010), informaron como otra posible causa del menor crecimiento de plantas cultivadas en contenedores biodegradables en comparación a aquellas cultivadas en contenedores plásticos, el estrés moderado por la “poda aérea radicular”, como consecuencia del reemplazo de la punta de la raíz y la regeneración de la misma por la planta; en los contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos, las raíces traspasan las paredes de estos, favoreciendo a la “poda aérea radicular”, lo cual no ocurre en los contenedores de PP. Otros autores atribuyeron el menor crecimiento de plantas cultivadas en contenedores biodegradables en comparación con aquellas cultivadas en contenedores plásticos, a la porosidad de las paredes de estos. Los contenedores de paredes porosas (contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos), tienen un mayor consumo de agua debido a la pérdida de agua a través de las paredes, y en consecuencia, requieren un mayor volumen y frecuencia de riego en comparación a aquellos de paredes no porosas (contenedores de PP), para alcanzar rendimientos equivalentes (Amoroso et al., 2010; Evans et al., 2015, 2010; A. Koeser, Lovell, et al., 2013; S. Nambuthiri et al., 2013). Bajo un sistema de riego uniforme, se observa en un mismo porta contenedor, que aquellos contenedores biodegradables de las filas laterales sufren mayor resecamiento del sustrato, y como consecuencia las plantas cultivadas en estos sufren mayor estrés en comparación a aquellas de las filas paralelas a los laterales. También, se ha encontrado que, los contenedores de paredes porosas, permiten el enfriamiento del sustrato por evaporación, evitando, en épocas de altas temperaturas, daños en las raíces por calentamiento, favoreciendo la supervivencia de la plántula (Cypher & Fulcher, 2015b; Susmitha Nambuthiri, Geneve, et al., 2015). Los contenedores de paredes porosas, permiten que las raíces perforen y atraviesen las paredes, y ello, disminuye

el enrollamiento de las raíces (Cypher & Fulcher, 2015b), y favorece el desarrollo de la estructura radicular, con óptimo desarrollo de ramificaciones secundarias (Schettini et al., 2013), favoreciendo la supervivencia de la plántula al ser trasplantada. La composición del contenedor tiene gran influencia en la estructura radicular; se observa que dentro de una misma especie existen diferencias en la estructura radicular en función al tipo de contenedor utilizado (Figura IV.26). Además, en función a la composición del contenedor y al sistema radicular de la especie ensayada, las raíces traspasan las paredes del contenedor en mayor o menor grado; así en los cultivos de menta y eucalipto, con sistema radicular invasivo, las raíces atraviesan las paredes, en cambio en los cultivos de acelga las raíces no llegan a perforar las paredes (Figura IV.27).

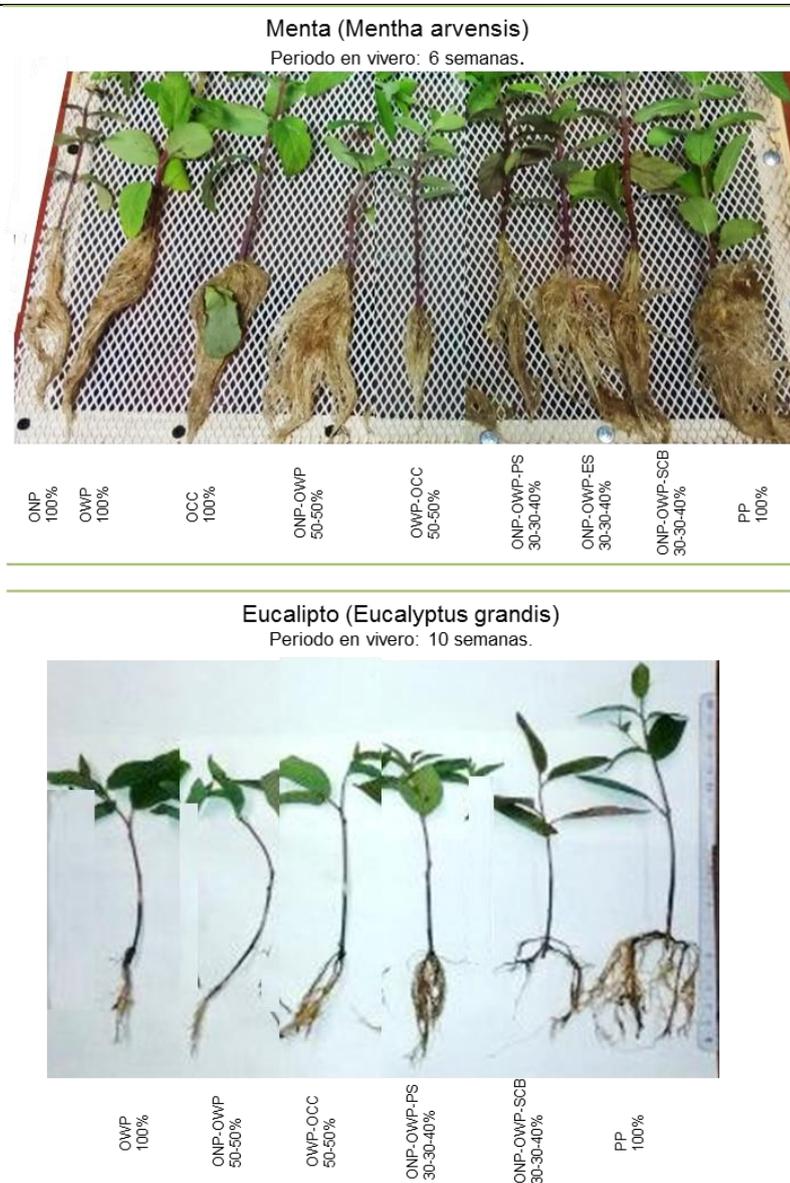


Figura IV.26. Estructura radicular en función al tipo de contenedor utilizado

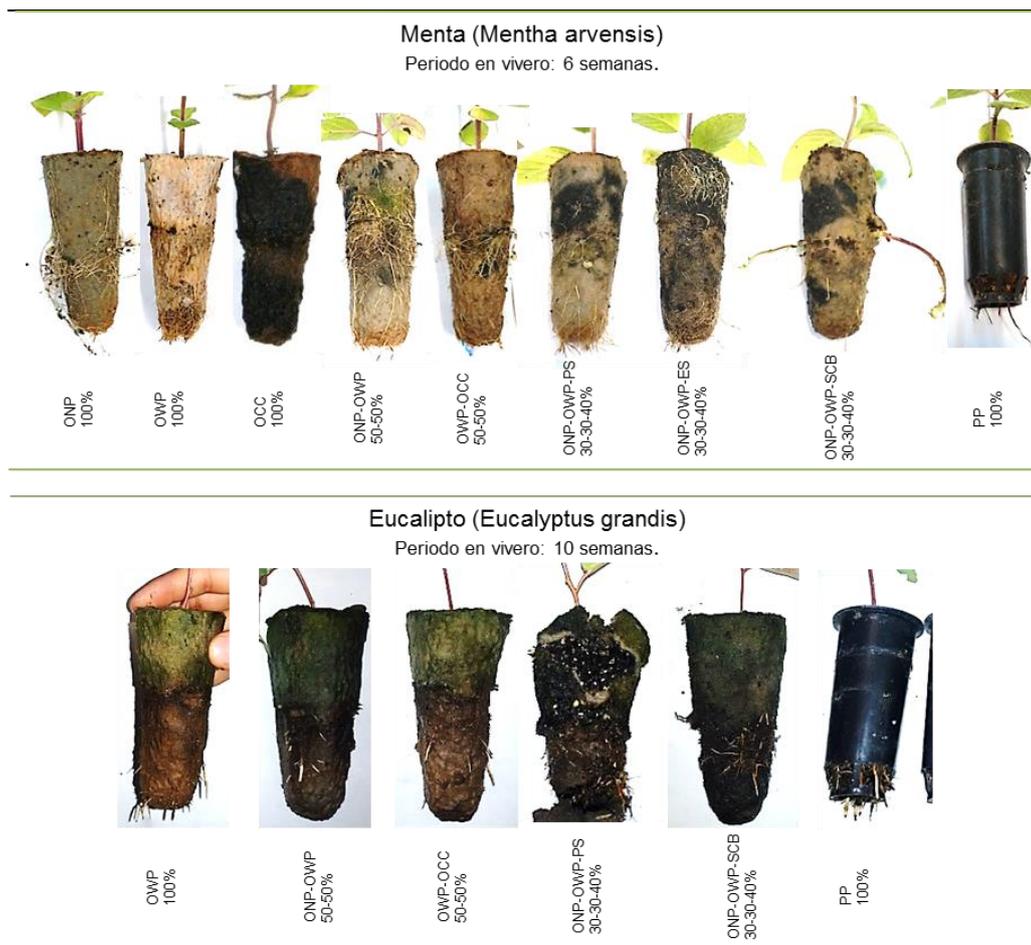


Figura IV.27.Traspasso de las raíces por las paredes de contenedores biodegradables

Resultados contrarios a los obtenidos en cuanto a crecimiento de plantas cultivadas en contenedores, fueron los resultados reportados por (Beeks & Evans, 2013a; V. Candido et al., 2008; Castronuovo et al., 2015; Kuehny et al., 2011), quienes han informado que existe una interacción significativa entre las especies de plantas y la composición del contenedor, siendo, mayor el crecimiento de plantas en contenedores biodegradables, en comparación con los contenedores plásticos tradicionales. La diferencia entre los resultados del trabajo de investigación y los encontrados por dichos autores, puede ser consecuencia de las variaciones de las condiciones de ensayo: contenedor biodegradable utilizado (composición, volumen, propiedades); especie cultivada (floral, hortícola, otras), sistema de irrigación (riego no uniforme, sistemas de subirrigación/ irrigación; frecuencia/volumen de riego), épocas estacionales (verano/invierno), periodo de crecimiento (cultivo a corto/largo plazo).

IV.3.2.2. Desarrollo de hongos y algas en las paredes de contenedores biodegradables

A lo largo de los ensayos se observó y se registró el desarrollo de algas y hongos en las paredes de los contenedores biodegradables (Figura IV.28).

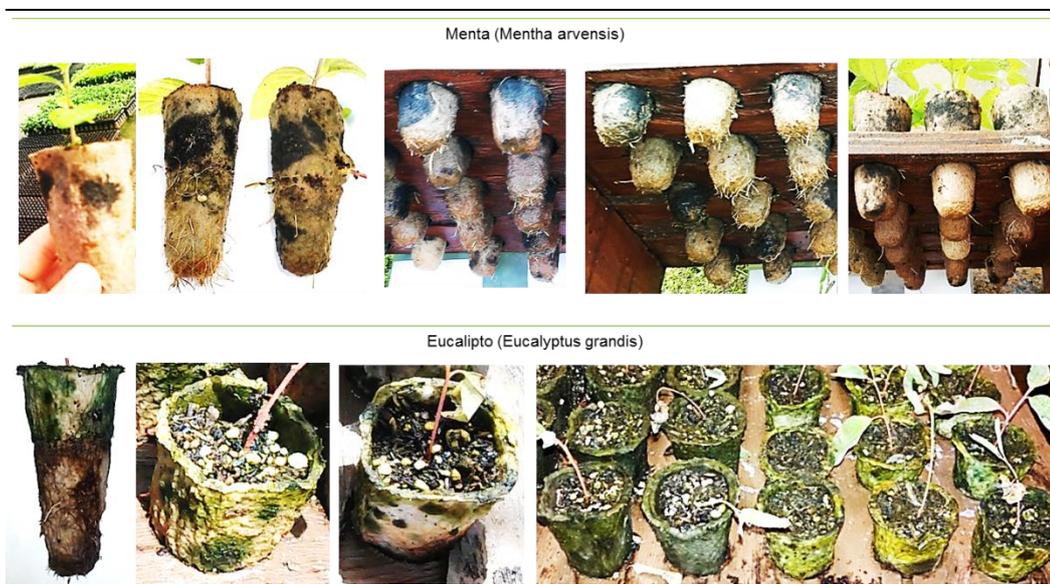


Figura IV.28. Desarrollo de algas y hongos en paredes de contenedores biodegradables

En el cultivo de menta, con un periodo de ensayo de 6 semanas, se registraron colonias de hongos (moho) en las paredes de los diferentes tipos de contenedores biodegradables. A partir de la segunda semana de ensayo se registraron colonias de hongos en ONP-OWP-PS 30-30-40%; ONP-OWP-ES 30-30-40%; y de ONP-OWP-SCB 30-30-40%; y luego de la tercer semana se registraron colonias en los demás tipos de contenedores biodegradables. Finalizado el periodo de ensayo, se registró una cobertura en pared por hongos, de aproximadamente un 70% en ONP-OWP-PS 30-30-40%; ONP-OWP-ES 30-30-40%, y de ONP-OWP-SCB 30-30-40%; mientras que en las composiciones restantes alcanzo aproximadamente un 40%. Los contenedores PP no presentaron desarrollo de algas y hongos.

En el cultivo de acelga, con un periodo de ensayo de 8 semanas, no se registró desarrollo de algas ni de hongos sobre las paredes de los contenedores ensayados.

En el cultivo de eucalipto, con un periodo de ensayo de 10 semanas, se registraron algas y colonias de hongos (moho) en las paredes de los diferentes tipos de contenedores biodegradables. A partir de la tercera semana de ensayo se registraron colonias de hongos en ONP-OWP-PS 30-30-40%; ONP-OWP-ES 30-30-40%; y de ONP-OWP-SCB 30-30-40%; en la quinta semana de ensayo, se registraron colonias

sobre las paredes de ONP 100% y ONP-OWP 50-50%; y luego de la sexta semana se registraron colonias en los demás tipos de contenedores biodegradables. A partir de la séptima semana se desarrollaron algas sobre las paredes, se registró presencia de algas desde la parte central a la parte superior de cada contenedor biodegradable. En la décima semana, periodo final de ensayo, se registró una cobertura de pared de aproximadamente un 70% en contenedores biodegradables con materiales de secundarios en su composición, mientras que los restantes tipos alcanzaron aproximadamente un 40%. En cuanto al desarrollo de algas, se registró una cobertura de pared de aproximadamente un 90% en ONP-OWP-PS 30-30-40%; ONP-OWP-ES 30-30-40%; y de ONP-OWP-SCB 30-30-40%; de aproximadamente 70% en ONP 100% y ONP-OWP 50-50% y, aproximadamente 50% en los demás tipos de contenedores biodegradables evaluados. Los contenedores de PP no registraron presencia ni de algas ni hongos en sus paredes.

El desarrollo de algas y hongos en las paredes de contenedores biodegradables se relaciona con las condiciones ambientales del vivero; en el caso del cultivo de menta y de eucalipto, los factores físicos del ambiente favorecen el desarrollo de dichos microorganismos; ambiente con elevado contenido de humedad, elevado contenido de agua libre y temperaturas entre 25-30°C, condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos; en el caso del cultivo de acelga, humedad y temperatura ambiente, sin contenido de agua libre, factores físicos que no favorecen el desarrollo de microorganismos; además se observó variación del porcentaje de cobertura de pared en función a la especie ensayada, composición del contenedor biodegradable y periodo de ensayo. Los resultados son consistentes con los encontrados por (Beeks & Evans, 2013b), quienes informaron que los contenedores biodegradables, presentan crecimiento de algas y hongos en las paredes y que el porcentaje de cobertura difiere con la composición del mismo: obtuvieron un 10% de cobertura de pared en contenedores biodegradables de papel kraft; 80% de cobertura en contenedores biodegradables de fibras de madera, y 0% de cobertura en contenedores de PP. El crecimiento de algas y hongos sobre las paredes se ve favorecido con la permeabilidad al agua y la capacidad de absorción del contenedor, dado que proporcionan un ambiente favorable para el crecimiento de los mismos (Evans et al., 2010). Los contenedores biodegradables hidrofílicos, como lo son los aquellos a base de materiales lignocelulósicos, se humedecen más fácilmente cuando se los irriga, en

comparación a aquellos de tipo hidrofóbicos, y en consecuencia, tienden a presentar un mayor crecimiento de algas y hongos en sus paredes (Evans & Karcher, 2004). Otro factor que afecta tanto a los tipos de organismos desarrollados, como a la cantidad de crecimiento de estos sobre las paredes, es la diferencia en la composición química del contenedor biodegradable; en el caso de los contenedores biodegradables de materiales lignocelulósicos estos están constituidos por carbohidratos estructurales (lignina, celulosa y hemicelulosas), fuente de nutrientes de microorganismos, lo que favorece el crecimiento de algas y hongos (Evans & Karcher, 2004).

IV.3.2.3. Deterioro estructural de contenedores biodegradables

A lo largo de los ensayos se observó y se registró el deterioro estructural de las paredes de los contenedores biodegradables (Figura IV.29).

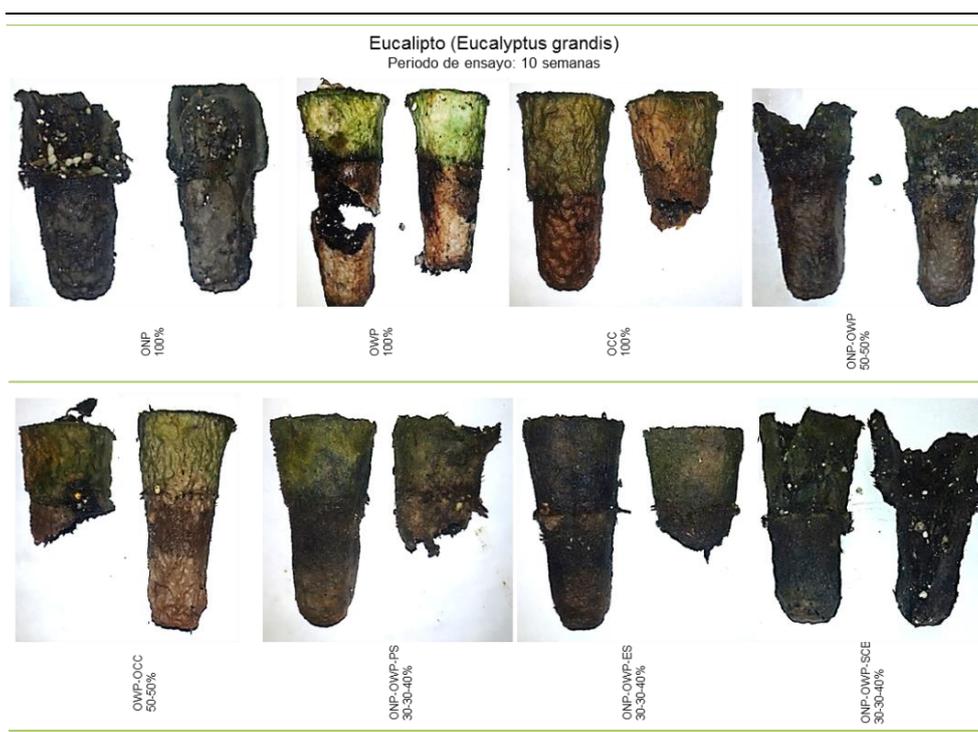


Figura IV.29. Deterioro estructural de paredes de contenedores biodegradables

En el cultivo de menta, con un periodo de ensayo de 6 semanas, no se registró daño estructural en las paredes de los contenedores biodegradables, a excepción de las lesiones producidas por el desarrollo radicular de las plántulas, las cuales perforan y atraviesan las paredes de los mismos; en general presentaron buena durabilidad.

En el cultivo de acelga, con un periodo de ensayo de 8 semanas, no se registró daño estructural en las paredes de los contenedores biodegradables; estos presentaron buena durabilidad.

En el cultivo de eucalipto, con un periodo de ensayo de 10 semanas, se registró daño estructural en las paredes de los contenedores biodegradables, en algunos casos se observó, lesiones normales a casusa de la perforación de las raíces al atravesar las paredes, y en otros casos más severos se observó rotura en la superficie de los bordes, a causa del impacto del agua de riego, y, rasgado en la superficie lateral y basal, como consecuencia del debilitamiento de la estructura por el elevado desarrollo de microorganismos unido a un ambiente muy húmedo, sumado al peso del sustrato (Figura IV.29). Los contenedores biodegradables presentaron buena durabilidad hasta la séptima semana de ensayo, luego se empezaron a deteriorar (Tabla IV.26). La menor durabilidad para el cultivo de eucaliptos, en comparación con las demás especies cultivadas, se atribuye al uso de condiciones ambientales más severas (mayor riego, mayor temperatura, mayor contenido de agua libre) y al mayor desarrollo de algas y hongos en las paredes. Esto indica que existe interacción entre el deterioro del contenedor biodegradable y la especie cultivada, ya que en función a esta, varían las condiciones de vivero (Candido et al., 2008; Evans y Karcher, 2004; Evans et al., 2010).

Tabla IV.26. Deterioro estructural de contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de eucalipto

Tipo de contenedor	Porcentaje de contenedores con rotura de pared	Observación
ONP 100%	27%	Daño en la superficie de los bordes
OWP 100%	13%	Daño en la superficie lateral media y en la superficie basal
OCC 100%	13%	Daño en la superficie lateral media y en la superficie basal
ONP-OWP 50-50%	27%	Daño en la superficie de los bordes
OWP-OCC 50-50%	20%	Daño en la superficie lateral media y en la superficie basal
ONP-OWP-PS 30-30-40%	60%	Daño tanto en la superficie de los bordes como en la superficie lateral media y la superficie basal.
ONP-OWP-ES 30-30-40%	40%	Daño en la superficie lateral media y en la superficie basal
ONP-OWP-SCB 30-30-40%	40%	Daño en la superficie de los bordes

En investigaciones previas (V. Candido et al., 2008; Vincenzo Candido et al., 2011) sobre el deterioro estructural de contenedores biodegradables, los autores informaron que, las paredes de estos durante su uso en vivero, se vieron afectadas por

microlesiones, tanto en la superficie basal y lateral, como en el borde superior, no siendo aptos para cultivos a largo plazo, como es el caso de las especies forestales. Por lo cual, considerando que los contenedores biodegradables contribuyen a la disminución de la acumulación de desechos, y en la mayoría de los casos favorece el desarrollo del cultivo en comparación con los contenedores plásticos tradicionales, para reducir los problemas de deterioro estructural cuando se utilizan en cultivos a largo plazo, se recomienda la incorporación de aditivos de resistencia en la composición (V. Candido et al., 2008; Lopez & Camberato, 2011). Entre los factores que incrementan el debilitamiento y/o la degradación de la estructura, se encuentran, el crecimiento de algas y hongos en las paredes y la frecuencia de riego y la humedad del contenedor. Mayores frecuencias de riego, aumentan la humedad del ambiente, y la cantidad de agua libre, y ello favorece al desarrollo de algas y hongos, y en consecuencia alteran las propiedades estructurales de las paredes, disminuyen las propiedades de resistencia y la durabilidad (Cypher & Fulcher, 2015b; Lopez & Camberato, 2011). Un contenedor plantable está diseñado para degradarse en el suelo cuando se instalan, esto hace que también sean susceptibles al deterioro durante su uso en vivero, por lo cual, como es importante que estos mantenga su integridad estructural durante el uso en vivero, se debe establecer una relación entre durabilidad en vivero y degradación en suelo. En el caso de los contenedores biodegradables a base materiales lignocelulósicos, tanto en el vivero como en el suelo, existen las condiciones medioambientales que favorecen la tendencia a la degradación; sin embargo, la degradación prematura que tiene lugar en el vivero, como consecuencia de las condiciones de calor y humedad que favorecen la proliferación de algas y hongos disminuyendo la resistencia estructural del contenedor, debe ser reducida o evitada para poder aumentar la durabilidad del contenedor durante el tiempo de producción (Dall, 1997). Otro factor que influye en el deterioro, además de la composición, es la especie cultivada en los mismos, debido, entre otras variables, al crecimiento radicular (Li et al., 2015; Nechita et al., 2010), ya que, plantas con sistemas de raíces ramificadas o fasciculares, producen un gran deterioro físico de las paredes, en comparación con aquellas especies con raíces pivotantes (Evans & Karcher, 2004; Nechita et al., 2010).

V. CONCLUSIONES

V.1. CONCLUSIONES INDIVIDUALES

V.1.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

La primer parte del trabajo de investigación consistió en la caracterización y evaluación de materiales lignocelulósicos reciclados, para determinar su aptitud como materia prima para el diseño de contenedores biodegradables. Las materias primas de trabajo seleccionadas son: papel de diario, papel de oficina y cartón corrugado, provenientes de residuos sólidos urbanos de la provincia de Misiones; aserrín de pino y de eucalipto, residuos forestales de la industrialización primaria de la madera de las principales especies cultivadas en la provincia de Misiones; y bagazo de caña de azúcar, residuo agrícola de la industria azucarera de la provincia de Misiones.

Caracterización química de materiales lignocelulósicos

De las características químicas de los materiales lignocelulósicos, la hemicelulosas y la lignina son las más importantes en cuanto a las propiedades del contenedor biodegradable; las hemicelulosas mejoran los enlaces interfibras, aumentan el hinchamiento de las fibras y mejoran las propiedades de resistencia; la lignina, reduce la capacidad de hinchamiento, rigidiza la fibra, disminuye los enlaces fibra-fibra, disminuye las propiedades de resistencia y aumenta el volumen específico. En función a ello y considerando que los valores de contenido de lignina varían de 2,82% sbs para OWP a 22,45% sbs para ONP; y de 22,37% sbs para SCB a 29,70% sbs para ES; y que los valores de contenido de carbohidratos varían de 62,24% sbs para ONP a 76,18% sbs para OWP; y de 55,13% sbs para ES a 62,49% sbs para SCB, se concluye que las pulpas secundarias de tipo OWP, favorecerán la formación de enlaces entre fibras y las propiedades de resistencia del producto final.

Dimensiones morfológicas de pulpas secundarias

De las características morfológicas de las fibras celulósicas, la longitud, espesor y ancho de pared se encuentran entre las características más importantes. Fibras de mayor longitud favorecen las propiedades de resistencia, tienen más puntos de

contacto y mayor capacidad de enlace. Los finos mejoran la consolidación de la red fibrosa y la formación de enlaces por su gran superficie específica. Fibras anchas con paredes delgadas son fáciles de colapsar, menos rígidas, con mayor superficie de contacto; favorecen a las propiedades que dependen del área de enlace interfibra como tracción y explosión. En función a ello, y considerando que, las pulpas OCC presentan en su composición un mayor porcentaje de fibras largas (48%) que las pulpas ONP (27%) y las pulpas OWP (27%), valores determinados por clasificación; las pulpas OCC presentan mayor longitud ponderada en peso (1,2 mm), que las pulpas ONP (0,9 mm) y las pulpas OWP (0,9 mm), valores determinados por FQA; las pulpas ONP presentan un mayor porcentaje de finos (41%), que las pulpas OWP (23%) y las pulpas OCC (29%), valores determinados por FQA; y que las fibras de pulpas ONP presentan un mayor ancho de fibra (24 μm) que las pulpas OWP (19 μm) y las pulpas OCC (22 μm), valores determinados por FQA; se concluye que las pulpas secundarias OCC favorecen la capacidad de enlace entre fibras y con ello las propiedades de resistencia; y que las pulpas ONP favorecen por su elevado contenido de finos la formación de la red fibrosa y las propiedades de rigidez del producto final.

Propiedades físicas de materiales lignocelulósicos:

Propiedades de drenabilidad

La naturaleza hidrofílica de las fibras celulósicas desempeña un papel importante ya que la estructuración de la red fibrosa ocurre en medio acuoso. Las medidas de capacidad de drenado son importantes durante la formación, un excesivo drenado es un indicativo de una formación deficiente, de un mayor flujo de agua atravesando las fibras, de un mayor contenido de fibras enteras, bajo contenido de finos y baja fibrilación; y pulpas con mayor capacidad de retener agua (menor capacidad de drenado) son un indicativo de una mayor superficie de enlace, de mayor capacidad de formación de enlace fibra-fibra, y por lo tanto mayores propiedades de resistencia. Entre las medidas de capacidad de drenado y de retención de agua, ésta última es más específica; un excesivo contenido de finos puede alterar los resultados, dando lugar por ejemplo a mayores valores de WRV y menores valores de °SR para una misma pulpa. En función a ello, y considerando que las pulpas puras de tipo ONP ofrecen mayor resistencia al drenado (32 °SR) en comparación a las pulpas puras de

tipo OWP (27 °SR) y las pulpas puras de tipo OCC (23 °SR), y que al combinar dichas pulpas con SCB, los valores se incrementan, mientras que con PS y ES, disminuyen; y que las pulpas puras de tipo OWP presentan mayor capacidad de retención de agua (1,25 g/g) en comparación con las pulpas puras de tipo ONP (1,20 g/g) y con las pulpas puras de tipo OCC (1,10 g/g), y que al combinar dichas pulpas con aserrín o bagazo los valores decrecen; y considerando además los elevados contenidos de finos de las pulpas ONP en comparación a las pulpas OWP, se concluye que, las pulpas OWP, tienen mayor capacidad de hinchamiento, mayor fibrilación, mayor capacidad de formar enlaces fibra-fibra, y por lo tanto favorecen las propiedades de resistencia.

Propiedades estructurales y mecánicas

Con pulpas puras ONP se maximizan las propiedades de volumen específico y rigidez; con pulpas puras OWP se maximizan las propiedades de densidad, resistencia a la tracción, resistencia al reventamiento, resistencia a la compresión RCT y resistencia al paso del aire; con pulpas puras OCC se maximizan las propiedades de resistencia a la tracción en húmedo y resistencia al rasgado. En las mezclas de pulpas secundarias, las propiedades varían, dependiendo de la propiedad individual, el porcentaje de mezcla y el tipo de pulpa secundaria utilizada. En mezclas de pulpas secundarias con aserrín o bagazo, las propiedades varían, dependiendo del tipo de material, PS, ES o SCB, y el porcentaje presente en la mezcla; siendo la influencia desfavorable en todos los casos.

Optimización de propiedades físicas

La optimización de las propiedades de drenabilidad, propiedades estructurales y mecánicas, permitió encontrar la combinación de materiales lignocelulósicos que maximizan las propiedades de rigidez y de resistencia y minimizan las propiedades de resistencia al paso del aire. La pulpa pura OWP optimiza en forma individual las respuestas densidad, índice de resistencia a la tracción, índice de resistencia a la explosión y RCT; la pulpa pura OCC optimiza en forma individual las respuestas índice de resistencia al rasgado e índice de resistencia a la tracción en húmedo; y la pulpa pura ONP, optimiza en forma individual la respuesta rigidez; la mezcla de pulpa ONP, pulpa OWP y material secundario en proporción 30:30:40, optimiza en forma individual la respuesta resistencia al flujo de aire; y la mezcla de pulpa ONP y

pulpa OWP, en proporción 50:50, optimiza en forma individual la respuesta WRV; la mezcla de pulpa OWP y pulpa OCC en proporción 50:50, optimiza en forma simultánea todas las variables respuestas analizadas, permitiendo concluir que con dicha mezcla se obtendrán contenedores biodegradables de óptima calidad, en cuanto a resistencia, rigidez y permeabilidad.

Propiedades reológicas de pulpas secundarias

El retículo fibroso fuertemente estructurado y la formación de flóculos, en especial en las pulpas OCC y OWP, dan como resultado un comportamiento de fluido no-newtoniano (pseudoplástico) con propiedades viscoelásticas. Las características y propiedades de las fibras, la consistencia de la suspensión y la formación de flóculos, influye fuertemente sobre los parámetros reológicos. Fibras más flexibles y de mayor longitud dan lugar a un mayor contacto entre fibras adyacentes y mayor número de enlaces incrementando el esfuerzo de fluencia; a mayor área de contacto entre las fibras, y una estructura fibrosa más cerrada, se alcanzan mayores valores de esfuerzo de fluencia. A medida que aumenta la consistencia de la suspensión fibrosa, se alcanza un mayor número de contacto entre fibras y mayor resistencia del entramado fibroso y con ello aumenta el esfuerzo de fluencia, observándose los mayores efectos al 3% de consistencia para todas las pulpas de estudio, en especial para las pulpas OWP. La viscosidad aparente aumenta a medida que aumenta la consistencia de la suspensión fibrosa, independientemente del tipo de pulpa. La viscosidad aparente a velocidad de cizalla cero, aumenta con la consistencia de la suspensión, comportamiento atribuible al proceso de sedimentación de las fibras. Por lo tanto se concluye que para obtener una buena formación durante el proceso de moldeado, evitando formación de flóculos, la consistencia de trabajo debe ser inferior al 3%.

Efectos fitotóxicos de materiales lignocelulósicos.

Los macro y micronutrientes evaluados (DQO, cobre, calcio, manganeso, magnesio, hierro, carbonato, cloruro, nitritos, nitratos, fosfatos y sulfatos) se encuentran en bajas proporciones, en comparación con las concentraciones de los elementos esenciales consideradas aceptables para la mayoría de las plantas superiores, por lo cual se concluye que estos no presentan efectos fitotóxicos.

Los valores de conductividad oscilan entre 0,08 ms/cm para extractos ONP y 0,52 ms/cm para extractos de OCC, es decir, los materiales lignocelulósicos de estudio

tienen baja conductividad, son materiales no salinos. Considerando que, los síntomas de daño pueden ocurrir cuando los valores de conductividad son $>0,5$ ms/cm, se concluye que los materiales lignocelulósicos de estudio no presentan efectos fitotóxicos.

Los extractos acuosos de OWP y OCC se encuentran en un rango de pH neutro (7-7,3), los extractos de ONP en un rango de pH ligeramente ácido (6-6,2), los extractos de PS y SCB en un rango de pH ácido (4,9-5,48), mientras que los extractos de ES se encuentran en un rango fuertemente ácido (4,3-4,4). Considerando que la mayoría de las plantas, pueden crecer sin sufrir desórdenes fisiológicos a pH entre 4 y 8, se concluye que los materiales de estudio no presentan efectos fitotóxicos.

Los extractos de ONP, OWP, OCC, PS y ES, presentan valores de IG mayores al 80%; mientras que los extractos de SCB presentan valores de IG menores al 50%. Considerando que valores de IG menores a 50% indican alta fitotoxicidad; y que valores de IG mayores a 80%, indican ausencia o leve fitotoxicidad; se concluye que los materiales ONP, OWP, OCC, PS y ES, no presentan o presentan leve efecto fitotóxico, proporcionando un medio adecuado para el cultivo de plantas; mientras que el material SBC, presenta un alto efecto fitotóxico, no siendo un medio apto para el cultivo de plantas. Sin embargo, como los materiales secundarios se utilizan en baja proporción en las mezclas (40%), se evaluó este efecto en vivero, descartando su toxicidad sobre el cultivo.

Considerando los resultados obtenidos de macro y micronutrientes, pH, conductividad e índice de germinación, para los extractos acuosos evaluados, se concluye que la fitotoxicidad de un material no solamente depende de los efectos adversos de los componentes sino también de las interacciones entre estos, ya que los efectos inhibitorios pueden estar dados por las sustancias químicas que componen el material, sus posibles efectos aditivos o sinérgicos; antagónicos; de potenciación o inhibición.

Cinética de biodegradación de pulpas secundarias

En el periodo de evaluación (98 días), todos los materiales de estudio sufrieron degradación. A los 70 d se alcanza una pérdida del 50% del material a base de OWP, mientras que para ONP y OCC, a igual tiempo de ensayo se logra una reducción aproximada del 10 y 15 % del material inicial, respectivamente; a los 98 d se alcanza

una degradación del 30% del material a base de OCC y 25% del material a base de ONP. Bajo iguales condiciones de nutrientes, humedad, temperatura, aireación y disponibilidad microbiana del medio, la composición del material juega un papel muy importante, se obtiene una mayor degradación en menor tiempo a mayor contenido de carbohidratos y menor contenido de lignina. El contenido de lignina de los materiales es la razón principal del bajo nivel de biodegradabilidad de los mismos, debido a su poder recalcitrante y debido a que interfiere con la biodegradación de la celulosa.

Se concluye que, los materiales en suelo se degradarán de manera eficiente, en aproximadamente 98 días. Para poder mantener la integridad estructural de los contenedores biodegradables durante su uso en vivero, considerando que la composición química de los mismos y las condiciones de humedad y temperatura a los cuales serán expuestos son variables favorables para la proliferación de microorganismos degradativos, es aconsejable para el diseño de contenedores biodegradables combinar las pulpas secundarias, en especial la pulpa OWP, con materiales que tengan mayor contenido de lignina en su composición para reducir el ataque por microorganismos y con ello el deterioro biológico en función al tiempo.

V.1.2. DISEÑO DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

La segunda parte del trabajo de investigación consistió en diseño de contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos reciclados, papel de diario, papel de oficina y cartón corrugado, aserrín de pino y de eucalipto, y bagazo de caña de azúcar, y en la evaluación de la cinética de secado de los contenedores biodegradables formados.

Formación de contenedores biodegradables

Las condiciones óptimas del moldeo de contenedores biodegradables a base de materiales lignocelulósicos reciclados (paredes consistentes, sin roturas, de peso aproximadamente constante) son: suspensión fibrosa a una consistencia del 0,50 % y velocidad de agitación de la suspensión a 300 rpm, con tiempos de succión de 6 s. A partir de dichas condiciones se moldean contenedores biodegradables de composición (material-proporción): ONP 100%; OWP 100%; OCC 100%; ONP:OWP 50:50 %; OWP:OCC 50:50%; ONP:OWP:PS 30:30:40; ONP:OWP:ES

30:30:40; y ONP:OWP:SCB 30:30:40%; de forma piramidal truncada, de aproximadamente 5 g secos cada uno, con un volumen equivalente a 70 cm^3 .

Cinética de secado

De las curvas de secado, se concluye que los contenedores biodegradables a base de pulpa pura ONP, dado que parten de un contenido inicial de humedad levemente superior en comparación a las demás composiciones, requieren un mayor tiempo de secado para alcanzar el punto de equilibrio ($80 \pm 10 \text{ min}$).

Los contenedores biodegradables, independientemente de la composición, presentan una curva típica de velocidad de secado, un leve periodo de calentamiento inicial, que tiene lugar en los primeros 5 min; un periodo de secado constante cuyo punto final corresponde al contenido crítico de humedad, el cual, es de aproximadamente $2 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ y; un periodo de velocidad decreciente, formado por primer período, donde la velocidad varía en forma lineal con el contenido de humedad, que se extiende hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente $0,5 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$; y un segundo periodo, donde la velocidad de secado continua descendiendo hasta que el sólido alcanza el punto de equilibrio, donde se detiene el secado. La velocidad de secado más baja es para los contenedores biodegradables a base de pulpa pura ONP y a base de mezclas de ONP, OWP y ES en proporción 30:30:40.

V.1.3. CALIDAD DE CONTENEDORES BIODEGRADABLES

Propiedades estructurales y mecánicas

El espesor de pared (1,92 a 3,83 mm), como consecuencia de la estructura del material, es mayor en las composiciones que tienen aserrín o bagazo, y ello repercute en los valores de volumen específico ($4,59$ a $7,81 \text{ cm}^3/\text{g}$). Entre contenedores biodegradables elaborados a base de pulpas secundarias, los de pulpa pura ONP adquieren el máximo valor de volumen específico ($6,82 \text{ cm}^3/\text{g}$); por lo cual, se concluye que estos presentan paredes de elevada rigidez en comparación a los demás. La densidad ($0,13$ a $0,22 \text{ g}/\text{cm}^3$), como propiedad inversa al volumen específico, es mayor en las composiciones sin aserrín o bagazo, correspondiendo el máximo valor ($0,22 \text{ g}/\text{cm}^3$) a los contenedores biodegradables en base a pulpa pura OWP; por lo cual, se concluye que estos presentan paredes de elevada resistencia mecánica y baja

permeabilidad en comparación a los demás. La resistencia a la compresión (0,28 a 0,63 N*m/g), es mayor en las composiciones sin aserrín o bagazo, correspondiendo el máximo (0,63 N*m/g) a los contenedores biodegradables en base a pulpa pura OWP. La absorción de agua (1529 a 3413 g/m²), también es menor en las composiciones sin aserrín o bagazo, correspondiendo el mínimo (1529 g/m²) a contenedores biodegradables en base a pulpa pura OWP. De la optimización de las variables, se concluye que, los contenedores biodegradables en base a la mezcla de pulpas OWP y OCC, en proporción 50:50, presentan una óptima calidad, en cuanto a resistencia, rigidez y permeabilidad.

Propiedades evaluadas sobre el conjunto contenedor-sustrato

De la evaluación de la capacidad de retención de agua del conjunto contenedor-sustrato se tiene que, tomando como referencia la retención de agua en el sustrato contenido en el contenedor plástico, el sustrato A (mezcla de perlita y corteza de pino compostada en proporción 1:1) retiene 15,78% del total de agua adicionada; el sustrato B (mezcla de corteza de pino compostada, estiércol de vaca termofusionada y turba en proporción 3:1:1) retiene el 22,62% del total de agua adicionada; y el sustrato C (mezcla de perlita, corteza de pino compostada y cascarilla de arroz en proporción 3:1:1) retiene el 31,65% del total de agua adicionada, por lo cual, se concluye que la capacidad de retención de agua para el conjunto contenedor-sustrato, varía en función al tipo de sustrato utilizado. Al comparar los valores de retención de agua de los contenedores biodegradables respecto al sustrato, se concluye que, en todos los casos, estos absorben el agua retenida por el sustrato secando al mismo; siendo la composición OWP-OCC 50-50%, la que absorbe en menor proporción la humedad del sustrato en comparación a las demás composiciones. Sin embargo, independientemente del tipo de sustrato utilizado, la capacidad de retención de agua de los diferentes contenedores biodegradables es constante; por lo cual, se concluye que la retención de agua entre contenedor-sustrato está íntimamente relacionada con la capacidad de retención del sustrato y que para mantener las mismas condiciones de humedad del sustrato en contenedores biodegradables y contenedores plásticos, la cantidad de riego debe ser aproximadamente el doble en contenedores biodegradables.

Calidad de plantas cultivadas

Para el cultivo de la hierba aromática, menta (*Mentha arvensis*), con un periodo de ensayo de 6 semanas, las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de altura y de peso seco de parte aérea inferiores que aquellas cultivadas en contenedores de PP; y valores medios de peso seco de la parte radicular superiores a aquellas cultivadas en contenedores de PP, excepto en contenedores biodegradables con aserrín o bagazo en su composición. Para el cultivo de la hortaliza de hoja verde, acelga (*Beta vulgaris* var. cicla), con un periodo de ensayo de 8 semanas, las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan, valores medios de altura, de peso seco de parte aérea y de peso seco de la parte radicular, inferiores a aquellas cultivadas en contenedores de PP. Para el cultivo de la especie forestal, eucalipto (*Eucalyptus grandis*), con un periodo de ensayo de 10 semanas, las plantas cultivadas en contenedores biodegradables presentan valores medios de altura inferior que aquellas cultivadas en contenedores de PP; valores medios de peso seco de parte aérea inferior que aquellas cultivadas en contenedores de PP, a excepción de los contenedores biodegradables de OWP 100%; y valores medios de peso seco de la parte radicular inferior a aquellas cultivadas en contenedores de PP. Se concluye que no hay interacción entre las especies ensayadas y la composición de los contenedores; y dentro de una misma especie, si bien, en algunos casos, se observan diferencias en el rendimiento entre contenedores biodegradables de composiciones diferentes, dicha diferencia es prácticamente despreciable; sin embargo, si existen diferencias en el rendimiento entre plantas cultivadas en contenedores biodegradables y aquellas cultivadas en contenedores plásticos; alcanzando mayor desarrollo en estos últimos.

Desarrollo de hongos y algas en las paredes de contenedores biodegradables

Los diferentes tipos de contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de menta presentan, a partir de la segunda semana de ensayo, colonias de hongos (moho) en las paredes de los de contenedores biodegradables, en especial en aquellos con aserrín o bagazo en su composición alcanzando una cobertura de pared aproximada del 70%, y las composiciones restantes un 40%; los diferentes tipos de contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de acelga no presentan desarrollo de algas ni de hongos sobre sus paredes; y los diferentes tipos de contenedores biodegradables

utilizados en el cultivo de eucalipto presentan, a partir de la tercera semana de ensayo, algas y colonias de hongos (moho) en las paredes de los diferentes tipos de contenedores biodegradables, alcanzando una cobertura de pared aproximada del 90% aquellos con aserrín o bagazo en su composición, y entre un 50-70% las composiciones restantes. Las condiciones ambientales del vivero utilizadas para el cultivo de menta y eucalipto (el elevado contenido de humedad, elevado contenido de agua libre y temperaturas entre 25-30°C) favorecen el desarrollo de microorganismos; a diferencia de las condiciones ambientales del vivero utilizadas para el cultivo de acelga (humedad y temperatura ambiente, sin contenido de agua libre). Se concluye que, el desarrollo de algas y hongos en las paredes de los contenedores biodegradables se relaciona con las condiciones ambientales del vivero; y que la proporción de cobertura de pared varía en función de las condiciones de cultivo de cada especie, composición del contenedor biodegradable y periodo de ensayo.

Deterioro estructural de contenedores biodegradables

Los diferentes tipos de contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de menta, no presentan daño estructural en sus paredes, a excepción de las lesiones producidas por el desarrollo radicular de las plántulas, las cuales perforan y atraviesan las paredes de los mismos sin dificultad; y presentan buena durabilidad. Los diferentes tipos de contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de acelga, no presentan daño estructural en sus paredes y presentan buena durabilidad. Los contenedores biodegradables utilizados en el cultivo de eucalipto presentan daño estructural en sus paredes, en algunos casos son lesiones normales a causa de la perforación de las raíces al atravesar las paredes, y en otros casos más severos rotura de los bordes a causa del impacto del agua de riego, como así también rasgado en la superficie lateral y basal como consecuencia del debilitamiento de la estructura por el elevado desarrollo de microorganismos unido a un ambiente muy húmedo, sumado al peso del sustrato, siendo mayormente afectados los contenedores biodegradables con aserrín o bagazo en su composición. En general, en el caso de eucalipto, los distintos tipos de contenedores biodegradables presentan buena durabilidad hasta la séptima semana de ensayo y luego disminuye.

Se concluye que el deterioro estructural de las paredes se encuentra influenciado según sea la especie cultivada al variar con estas las condiciones ambientales del vivero (mayor riego, mayor temperatura y mayor contenido de agua libre, causan mayor daño estructural), y esto a su vez repercute en el desarrollo de microorganismos en las paredes del contenedor biodegradable (a mayor desarrollo de microorganismos mayor daño estructural).

V.2. CONCLUSIÓN GENERAL

El objetivo de este trabajo de investigación es determinar las condiciones óptimas para el diseño de contenedores biodegradables a partir de residuos sólidos urbanos, forestales o agroindustriales, utilizando el proceso de moldeo de pulpa.

A partir de la investigación se concluye que:

- Las condiciones óptimas de moldeo para pulpas de fibras secundarias con/ sin aserrín o bagazo son: suspensión acuosa a una consistencia del 0,50% y velocidad de agitación a 300 rpm, con tiempos de succión de 6 s. Se forman contenedores biodegradables de forma piramidal truncada de aproximadamente 5 g secos.
- Los resultados de evaluación de fitotoxicidad, biodegradación y propiedades estructurales y mecánicas de hojas de laboratorio, sirven para predecir el comportamiento de contenedores biodegradables destinados al cultivo.
- Los contenedores biodegradables con aserrín o bagazo en su composición no son aptos; presentan baja resistencia, un elevado desarrollo de algas y hongos en sus paredes, y baja durabilidad.
- Los contenedores biodegradables de pulpa OWP y OCC en proporción 50:50, corresponden al diseño óptimo. Son contenedores biodegradables de paredes rígidas, resistentes y permeables, con baja capacidad de absorción de agua, bajo desarrollo de algas y hongos en sus paredes, y buena durabilidad en vivero. Permiten un buen desarrollo del cultivo.
- Los contenedores biodegradables resultan adecuados para cultivos a corto plazo.
- Los contenedores biodegradables permiten el cultivo de plantas de calidad. El desarrollo de las plantas en estos es menor que aquellas cultivadas en contenedores plásticos.

V.3 CONTINUIDAD DEL TRABAJO

En investigaciones posteriores se propone:

- Incorporar aditivos a la mezcla de pulpas, que sean biocompatibles, biodegradables y no tóxicos, con actividad antimicrobiana y antifúngica, que además permitan mejorar la resistencia en húmedo.
- Aplicar recubrimientos a los contenedores, amigables con el medio ambiente, para aumentar la durabilidad en vivero de los contenedores, mejorando las propiedades de resistencia y de barrera microbiana y al agua.
- Realizar ensayos de aptitud en vivero con diferentes cultivos a corto y largo plazo.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO DE TESIS

Publicaciones científicas

Yanina S. Aguerre and Graciela B. Gavazzo. "Lignocellulosic recycled materials to design molded products: Optimization of physical and mechanical properties." *Journal of Materials Science and Engineering A* 6 (7-8) pp 222-231. 2016. ISSN: 2161-6213.

Presentaciones en Simposios, Congresos y Jornadas Científicas

Yanina S. Aguerre y Graciela B. Gavazzo. "Ensayos con plantas para determinar toxicidad de macetas biodegradables. Revisión". VIII Jornadas de Investigación Científico-Tecnológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones. Posadas, Misiones. 2011. Formato: Trabajo completo y póster.

Yanina S. Aguerre y Graciela B. Gavazzo. "Características del papel periódico post-consumo para ser usado como materia prima en la fabricación de macetas biodegradables". 2º Feria Internacional. 8º Congreso Regional del Ambiente. Rosario. 2012. Formato: Trabajo completo y presentación oral.

Yanina S. Aguerre y Graciela B. Gavazzo. "Fitotoxicidad de papel reciclado. Ensayos preliminares". 45º Congreso y exposición internacional de Celulosa y Papel. VII Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel. ABTCP. CIADICYP. San Paulo. Brasil. 2012. Formato: Trabajo completo y póster.

Yanina S. Aguerre y Graciela B. Gavazzo. "Biodegradación de Papeles Reciclados. Ensayos Preliminares." Jornadas Científico Tecnológicas. 40º Aniversario de la Universidad Nacional de Misiones. Posadas, Misiones. 2013. Formato: Trabajo completo y presentación oral.

Yanina S. Aguerre y Graciela B. Gavazzo. "Rapidez de degradación de papeles reciclados." Simposio Internacional sobre Materiales Lignocelulosicos en el contexto del 13er Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales. SAM-CONAMET. Puerto Iguazú, Misiones. 2013. Formato: Trabajo completo y póster.

María B. Pezuc; Yanina S. Aguerre; Ángel Balanda, Guillermo Salvatierra y Graciela B. Gavazzo. "Ensayos de aptitud de contenedores biodegradables para la germinación." XXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. INTA EEA y Asociación de Ing. Agr. del Nordeste de E.R. Concordia, Entre Ríos. 2014. Formato: Póster.

Yanina S. Aguerre; Beatriz M. Krutki; Graciela B. Gavazzo. "Morfología de materiales lignocelulósicos reciclados". IX Jornadas de Investigación Científico-Tecnológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones. Posadas, Misiones. 2015. Formato: Trabajo completo y presentación oral.

Yanina S. Aguerre y Graciela B. Gavazzo. “Macetas a partir de materiales reciclados”. IX Jornadas de Investigación Científico-Tecnológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones. Posadas, Misiones. 2015. Formato: Presentación oral.

Yanina S. Aguerre and Graciela B. Gavazzo. “Recycled lignocellulosic materials for obtaining molded products. Part I: Evaluation of physical and mechanical properties”. 3° Congreso Iberoamericano sobre Biorrefinerías (CIAB), 4° Congreso Latinoamericano sobre Biorrefinerías, y 2° Simposio Internacional sobre Materiales Lignocelulósicos. Concepción, Chile. 2015. Formato: Poster.

Yanina S. Aguerre and Graciela B. Gavazzo. Biocontainers made from lignocellulosic recycled materials: Evaluation of physical-mechanical properties. 10th World Congress of Chemical Engineering. International Symposium on Lignocellulosic Materials. Barcelona, Spain. 2017. Formato: Poster.

PROYECTOS QUE FINANCIARON ESTE TRABAJO DE TESIS

Proyecto “Recipientes biodegradables aptos para cultivos”, código 16Q444, FCEQyN, UNaM.

Proyecto “Sistema de laboratorio para la obtención de pulpa moldeada que permita la evaluación del proceso y las materias primas”, código 16Q493, FCEQyN, UNaM.

Proyecto “Innovación de materiales y su aplicación para la obtención de recipientes biodegradables adecuados para su utilización en viveros”, 16QPDS-CI315 PDS CIN-CONICET, FCEQyN, UNaM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, Y., Cayama, J., Gómez, E., Reyes, N., Dickon, R., & García, E. (2006). Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias*, 6(3), 220–227.
- Acosta, Y., Paolini, J., & Benítez, E. (2004). Índice de humificación y prueba de fitotoxicidad en residuos orgánicos de uso agrícola potencial. *Rev. Fac. Agron.*, (21), 383–394.
- Aguilar, B. B., Ramírez, L. B., Casillas, R. R., & Urquiza, M. R. (2008). *Proceso para la elaboración de papel Tissue* (Primera). Jalisco, México: Amateditorial.
- Aguilar, H. S. (2014). *El diseño y color de contenedor afecta el desarrollo radical de tres especies de pino*. Insitución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Aguilar, N., Galindo, G. M., Fortanelli, J. M., & Contreras, C. S. (2009). ¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México? *Revista de Globalización, Competitividad y Gobernabilidad*, 3(1), 62–75. <http://doi.org/10.3232/GCG.2009.V3.N1.03>
- Aguilar Rivera, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII(1), 189–197.
- Aguilar, S. E. (2001). *Potencial de uso de pulpa mecánica a la piedra en diferentes calidades de papel y cartón*. Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Argentina.
- Ali, I. (2013). *Study of the mechanical behavior of recycled fibers . Applications to papers and paperboards .* Université de Grenoble.
- Alkahasawneh, H. E. (2007). *Drying behavior of fractionated fibers*. Western Michigan University, Kalamazoo, Michigan.
- Álvarez, A., Salgado, R., García, E., Domínguez, M., Granandos, J., Aguirre, A., ... Mendoza, A. (2012). Aprovechamiento Integral de los materiales lignocelulósicos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(4), 140–150.
- Alvarez, J. V. L., Larrucea, M. A., Bermúdez, P. A., & Chicote, B. L. (2009). Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions. *Waste Management*, 29(5), 1514–9. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.025>
- Amoroso, G., Frangi, P., Piatti, R., Ferrini, F., Fini, A., & Faoro, M. (2010). Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience*, 45(12), 1824–1829. <http://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1824>
- Andrady, A. L., Parthasarathy, V. R., & Song, Y. (1992). Biodgradation of paperboards: Loss in strength and weight of paperboard packaging materials under aerobic soil-exposure conditions. *Tappi Journal*, 75(4), 203–205.
- Anino, P., & Pizzo, F. (2016). *Informes de cadenas de valor. Azúcar*. Argentina.
- Araújo, A. S. F., Sahyoun, F. K., & Monteiro, R. T. R. (2001). Evaluation of toxicity of textile sludge compost on seed germination and root elongation of soybean and wheat. *Rev. Ecosistema*, 26(2), 117–119.
- Area, M. C., Felissia, F. E., & Vallejos, M. E. (2009). Ethanol-water fractionation of sugar cane bagasse catalyzed with acids. *Cellulose Chemistry and Technology*, 43(7–8), 271–279.
- Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2012). *Biorrefinería a partir de residuos lignocelulósicos. Conversión de residuos a productos de alto valor agregado* (Primera). Editorail Académica Española.
- Arroyo, L. E. (1996). La industria de los viveros en Argentina. *Horticultura Internacional*, 13(Agosto).

- ASTM International. (1995). <http://doi.org/10.1520/E0011-95>
- Atalla, R. H. (2011). Structural Changes in Cellulose During Papermaking and Recycling. *MRS Proceedings*, 266, 229. <http://doi.org/10.1557/PROC-266-229>
- Atkinson, C. F., Jones, D. D., & Gauthier, J. J. (1996). Biodegradability and microbial activities during composting of poultry litter. *Poultry Science* 75, 75, 608–617.
- Ávila, J. L. M. (2012). *Estudio del comportamiento electro-reológico de suspensiones de fibras celulósicas bajo la influencia de aditivos químicos funcionales utilizados ampliamente en la industria papelería (agentes de retención y drenaje)*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Báez, M. C. D., Granados, Y. P., Ronco, A., Sobrero, C., Rossini, G. B., Feola, G., ... Sánchez-Bain, A. (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas*. (G. Castillo Morales, Ed.) (1° edición). Ottawa, Canadá: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. <http://doi.org/1-55250-147-7>
- Barnes, H. A. (2000). *A handbook of elementary rheology*. Aberystwyth, Reino Unido: The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. <http://doi.org/10.1002/pc.750060405>
- Beeks, S. A., & Evans, M. R. (2013a). Growth of Cyclamen in Biocontainers on an Ebb-and-Flood Subirrigation System. *HortTechnology*, 23(April), 173–176.
- Beeks, S. & Evans, M. (2013b). Physical properties of biocontainers used to grow long-term greenhouse crops in an ebb-and-flood irrigation system. *HortScience*, 48(6), 732–737.
- Bekendam, J., & Grob, R. (1979). *Handbook for seedling evaluation* (Segunda). Zurich, Switzerland: International Seed Testing Association.
- Benitez, J. B., Koga, M. E. T., Otero D'Almeida, M. L., Felissia, F. E., Park, S. W., & Area, M. C. (2014). Office paper recyclability: first recycling. *O Papel*, 75(7), 54–61.
- Bennington, C. P. J., Kerekes, R. J., & Grace, J. R. (1990). The yield stress of fibre suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68, 748–757. <http://doi.org/10.1002/cjce.5450680503>
- Biermann, C. J. (1996). *Handbook of Pulping and Papermaking*. Elsevier Science & Technology Books. <http://doi.org/10.1016/B978-012097362-0/50008-X>
- Bohórquez-Echeverry, P., & Campos-Pinilla, C. (2007). Evaluación de Lactuca sativa Y Selenastrum capricornutum como indicadores de toxicidad en aguas. *Universitas Scientiarum*, 12(2), 83–98.
- Boopathy, R., Beary, T., & Templet, P. J. (2001). Microbial decomposition of post-harvest sugarcane residue. *Bioresource Technology*, 79(1), 29–33. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00034-7](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00034-7)
- Bousfield, D. (2008). Rheological issues in the paper industry. *Rheology Reviews*, 47–70.
- Brancato, A., Walsh, F. L., Sabo, R., & Banerjee, S. (2007). Effect of recycling on the properties of paper surfaces. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(26), 9103–9106. <http://doi.org/10.1021/ie070826a>
- Braz, A. (2007). *El libro del papel. Diccionario práctico*. (1° Edición). Buenos Aires: Canson. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Brida, M. A. O. (2008). *Crecimiento vegetal en suelos biorremediados con enmiendas orgánicas en el NO de Patagonia*. Escuela Superior de Salud y Ambiente. Universidad Nacional del Comahue.

- Brumfield, R. G., Devincintis, A. J., Wang, X., Thomas Fernandez, R., Nambuthiri, S., Geneve, R. L., ... Ryan Stewart, J. (2015). Economics of utilizing alternative containers in ornamental crop production systems. *HortTechnology*, 25(1), 17–25.
- Buamscha, M. G., Contardi, L. T., Dumroese, R. K., Enricci, J. A., Escobar, R., Gonda, H. E., ... Wilkinson, K. M. (2012). *Producción de plantas en viveros forestales*. (Consejo Federal de Inversiones (CFI), C. de I. y E. F. A. P. (CIEFAP), & U. N. de la P. S. J. B. (UNPSJB), Eds.) (1° edición). Buenos Aires: Artes gráficas integradas.
- Buligon, E. A. (2012). *Análisis de la cuantificación de finos y fibrilación externa y su impacto en la calidad del papel*.
- Burkhardt, S. J. (2010). *Forest residues as a potential feedstock for a biorefinery: material balance and pretreatment strategies*. University of Washington.
- Cabalova, V., Kacik, F., Geffert, A., & Kacikova, D. (2011). The effects of paper recycling and its environmental impact. In E. Broniewicz (Ed.), *Environmental Management in Practice* (p. 448). InTech. <http://doi.org/10.5772/23110>
- Camberato, D. M., & Lopez, R. G. (2010). Biocontainers For Long-Term Crops. *Greenhouse Grower*, 27–28.
- Candido, V., Castronuovo, D., & Miccolis, V. (2011). The use of biodegradable pots for the cultivation of poinsettia. In *Acta Horticulturae* (Vol. 893, pp. 1147–1154).
- Candido, V., Miccolis, V., Castronuovo, D., & Manera, C. (2008). Poinsettia (*Euphorbia pulcherrima*) cultivation in biodegradable pots: Mechanical and agronomical behaviour of pots and plants traits. *Acta Horticulturae*, 801 PART 2, 1563–1570.
- CANFOR. (2010a). *Pulp Refining Seminar. Part I: Basics*. Canadá.
- CANFOR. (2010b). *Pulp Refining Seminar. Part II: Selected Topics*. Canadá.
- Carrillo, J. G., & Castellanos, R. G. (2014). Caracterización físico-mecánica de un cartón reciclado formulado para aplicaciones en contenedores de plantas. In *7° Encuentro de Expertos en Residuos Sólidos*.
- Carrillo, L. (2003). Actividad microbiana en suelo. In *Microbiología Agrícola*. Salta, Argentina: Universidad Nacional de Salta.
- Carvalho, M. , Ferreira, P. , Martins, A., & Figueiredo, M. M. (1997). A comparative study of two auto- mated techniques for measuring fiber length. *Tappi Journal*, 80(2), 137–142.
- Casanova, A. (2006). *Manual de Reciclaje de Residuos Agrícolas dentro de la Buenas Prácticas Agrícolas*. Chile.
- Castronuovo, D., Picuno, P., Manera, C., Scopa, A., Sofo, A., & Candido, V. (2015). Biodegradable pots for Poinsettia cultivation: Agronomic and technical traits. *Scientia Horticulturae*, 197, 150–156. <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.025>
- Celis, J., Sandoval, M., Zagal, E., & Briones, M. (2006). Efecto de la adición de biosólidos urbanos y de salmoneicultura sobre la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un suelo patagónico. *RC Suelo Nutr. Veg*, 6(3), 13–25.
- Clark, J. d' A . (1985). *Pulp Technology and Treatment for Paper* (2° Edition). United States of America: Miller Freeman Publications.
- Cuadros, S. (2008). *Residuos agrícolas , forestales y lodos*. España.
- Cypher, Q., & Fulcher, A. (2015a). *Beyond plastic pots. Part 1: Compostable, Plantable and Other Containers for Nursery Crop Production*. Tennessee, EE. UU.
- Cypher, Q., & Fulcher, A. (2015b). *Beyond plastic pots. Part 3: Plantable Containers for Nursery Crop Production*. Tennessee, EE. UU.

- Cypher, Q., & Fulcher, A. (2015c). *Beyond plastic pots. Part 4: Comparison of Alternative Nursery Containers*. Tennessee, EE. UU.
- Dall, P. E. (1997). Procedimiento para la fabricación de un contenedor para horticultura, de pulpa moldeada, resistente a la degradación. España.
- Damani, R., Powell, R. L., & Hagen, N. (1993). Viscoelastic characterization of medium consistency pulp suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *71*, 676–684. <http://doi.org/10.1002/cjce.5450710504>
- DAR. (2013). *Sector azucarero argentino. Región Productiva: NOA, Misiones y Santa Fé*.
- Delfín-Alcalá, I., & Durán de Bazúa, C. (2003). Biodegradación de residuos urbanos lignocelulósicos por Pleurotus. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *19*(1), 37–45.
- Dennis, J. H., Lopez, R. G., Behe, B. K., Hall, C. R., Yue, C., & Campbell, B. L. (2010). Sustainable production practices adopted by greenhouse and nursery plant growers. *HortScience*, *45*(8), 1232–1237. <http://doi.org/10.1590/S0013-7531201000080001>
- Derakhshandeh, B., Hatzikiriakos, S. G., & Bennington, C. P. J. (2010). The apparent yield stress of pulp fiber suspensions. *Journal of Rheology*, *54*(5), 1137–1154. <http://doi.org/10.1122/1.3473923>
- Derakhshandeh, B., Kerekes, R. J., Hatzikiriakos, S. G., & Bennington, C. P. J. (2011). Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review. *Chemical Engineering Science*, *66*(15), 3460–3470. <http://doi.org/10.1016/j.ces.2011.04.017>
- Didone, B. M., Saxena, P., Brillhuis-meijer, E., Tosello, G., Bissacco, G., Mcaloon, T. C., Howard, T. J. (2017). Moulded Pulp Manufacturing : Overview and Prospects for the Process Technology. <http://doi.org/10.1002/pts.2289>
- Didone, M., & Tosello, G. (2016). Potential of impulse drying technology for molded pulp products manufacture. *Progress in Paper Physics Seminar 2016*, 9–15.
- Diorio, L. A., Forchiassin, F., Papinutti, V. L., & Sueldo, D. V. (2003). Actividad enzimática y degradación de diferentes tipos de residuos orgánicos por *Saccobolus saccoboloides* (Fungi, Ascomycotina). *Revista Iberoamerica de Micología*, *20*, 11–15.
- Domínguez, A. S. (2010). *Evaluación de las propiedades físicas, físico-químicas y de la fitotoxicidad de composts comerciales para su uso en la formulación de sustratos de cultivo*. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Eagleton, D. G., & Marcondes, J. A. (1994). Cushioning properties of moulded pulp. *Packaging Technology and Science*, *7*, 65–72.
- Easy y Romipack proponen macetas biodegradables para regalar a mamá. (2016). Retrieved December 15, 2016, from <http://www.logisticasud.enfasis.com/notas/17837-easy-y-romipack-proponen-macetas-biodegradables-regalar-mama>
- ECOEMBES. (2008). *Proyecto de Análisis de Bioplásticos*.
- Elias, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora* (Segunda ed). España: Díaz de Santos.
- Ellis, R. L., & Sedlachek, K. (1993). Recycled vs. virgin fiber characteristics: a comparison. *Tappi Journal*, *76*(2), 143–146.
- Emino, E. R., & Warman, P. R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, *12*(4), 342–348. <http://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702203>
- Evans, M. R., & Hensley, D. L. (2004). Plant growth in plastic, peat, and processed poultry feather fiber growing containers. *HortScience*, *39*(5), 1012–1014.

- Evans, M. R., & Karcher, D. (2004). Properties of plastic, peat, and processed poultry feather fiber growing containers. *HortScience*, 39(5), 1008–1011.
- Evans, M. R., Koeser, A. K., Bi, G., Nambuthiri, S., Geneve, R., Lovell, S. T., & Ryan Stewart, J. (2015). Impact of biocontainers with and without shuttle trays on water use in the production of a containerized ornamental greenhouse crop. *HortTechnology*, 25(1), 35–41.
- Evans, M. R., Taylor, M., & Kuehny, J. (2010). Physical properties of biocontainers for greenhouse crops production. *HortTechnology*, 20(3), 549–555.
- Fagro. (2012). Nutrición vegetal. Retrieved May 11, 2017, from <http://www.fagro.mx/nutricion-vegetal.html>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1984). *Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter & Co.
- Fernandes Diniz, J. M. B., Gil, M. H., & Castro, J. A. A. M. (2004). Hornification - Its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Science and Technology*, 37(6), 489–494. <http://doi.org/10.1007/s00226-003-0216-2>
- Ferrer, M. N. de V. (2002). Optimización de múltiples respuestas por el método de la función de conveniencia para un diseño de mezclas. *Revista Investigación Operacional*, 23(1), 83–89.
- Fertilop. (2011). Llegan las macetas biodegradables.
- Flores, C. (2009). La problemática de los desechos sólidos. *Economía*, 27(XXXIV), 121–144.
- Flores, H. J. M., Magaña, J. J. G., Manuel, V., Ávalos, C., Orozco, G., Yolanda, Y., & Vega, M. (2010). Características morfológicas de plántulas de dos especies forestales tropicales propagadas en contenedores biodegradables y charolas styroblock. *Rev. Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8).
- Fox, M., & Noike, T. (2004). Wet oxidation pretreatment for the increase in anaerobic biodegradability of newspaper waste. *Bioresource Technology*, 91(3), 273–281. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.06.001>
- Francou, C., Linères, M., Derenne, S., Villio-Poitrenaud, M. Le, & Houot, S. (2008). Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology*, 99(18), 8926–8934. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.071>
- Gaitán, D., & Pérez, L. (2007). *Aislamiento y evaluación de microorganismos celulolíticos a partir de residuos vegetales frescos y en compost generados en un cultivo de crisantemo (Dentranthema grandiflora)*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Gariglio, N. F., Buyatti, M. a., Pilatti, R. a., Russia, D. E. G., & Acosta, M. R. (2002). Use of a germination bioassay to test compost maturity of willow (*Salix* sp.) sawdust. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 30, 135–139. <http://doi.org/10.1080/01140671.2002.9514208>
- Gavazzo, G. B. (2010). Utilización y propiedades de la pulpa moldeada. In *VI Congreso Argentino de Ingeniería Química*. Mar del Plata, Argentina.
- Gavazzo, G. B., Lanouette, R., & Valade, J. L. (2005). Production of molded pulp at laboratory scale. *Progress in Paper Recycling*, 14(2), 20–25.
- Gavazzo, G. B., & Pavlik, C. A. (2008a). *Características de pulpas recicladas de papeles de oficina, cartones corrugados y periódicos y sus mezclas*. V Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel.

- Gavazzo, G. B., & Pavlik, C. A. (2008b). Influencia de la materia prima en la operación de moldeado de pulpas y en las propiedades del producto final. In *V Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel*. Guadalajara, México.
- Gilman, E. F., Harchick, C., & Paz, M. (2010). Effect of Container Type on Root Form and Growth of Red Maple. *Journal of Environmental Horticulture*, 28(1), 1–7.
- Gómez, T. M. S. (2009). Caracterización microbiológica del proceso de compostaje a partir de residuos azucareros. *Agronomía Tropical*, 59(3), 309–316.
- Gooding, R. W., & Olson, J. . (2001). Fractionation in a Bauer-McNett Classifier. *Journal of Pulp and Paper Science*, 27(1), 423–428.
- Göttsching, L., & Pakarinen, H. (2000). *Papermaking Science and Technology: Recycled Fiber and Deinking. Book 7*. (J. Gullichsen & H. Paulapuro, Eds.). Helsinki, Finland: Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI.
- Guerra, V. I. (2013). Cuando los nutrientes esenciales se vuelven tóxicos. Retrieved May 11, 2017, from <http://inta.gob.ar/noticias/cuando-los-nutrientes-esenciales-se-vuelven-toxicos>
- Gurav, S. P., Bereznitski, A., Heidweiller, A., & Kandachar, P. V. (2003). Mechanical properties of paper-pulp packaging. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1325–1334. [http://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00104-0](http://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00104-0)
- Gutiérrez, A., & Martínez, A. T. (1996). Mecanismo de biodegradación de la lignina. *Revista Iberoamericana de Micología*, (13), 18–23.
- Hall, C. R., Behe, B. K., Campbell, B. L., Dennis, J. H., Lopez, R. G., & Yue, C. (2010). The appeal of biodegradable packaging to US floral consumers. *HortScience*, 45(4), 583–591. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hidalgo, J., Estrada, M., & Luengo, M. (2007). Bioensayos de fitotoxicidad de residuos orgánicos en lechuga y ballica anual realizados en un suelo alfisol degradado. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(3), 51–60.
- Hoffmann, J. (2000). Compression and cushioning characteristics of moulded pulp packaging. *Packaging Technology and Science*, 13(5), 211–220. [http://doi.org/10.1002/1099-1522\(200009\)13:5<211::AID-PTS515>3.0.CO;2-0](http://doi.org/10.1002/1099-1522(200009)13:5<211::AID-PTS515>3.0.CO;2-0)
- Hon, D., & Shiraishi, N. (2000). *Wood and cellulosic chemistry*. (D. Hon & N. Shiraishi, Eds.) (second edi). New York, United States: Marcel Dekker. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hortal, J. G. (1988). *Constituyentes fibrosos de pastas y papeles*. (Departamento Ingeniería Textil y Papelera. Especialidad Papelera y Gráfica., Ed.). Girona: Edigraf.
- Horticom News. (2010). Macetas biodegradables. Retrieved from <http://horticom.com/pd/article.php?sid=50828>
- Howard, R. C. (1990). The effects of recycling on paper quality. *Journal of Pulp and Paper Science*, 16(5), 143–149.
- Howard, R. C., & Bichard, W. (1992). The basic effects of recycling on pulp properties. *Journal of Pulp and Paper Science*, 18(4), 151–159.
- Hubbe, M. A., Nazhad, M., & Sánchez, 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.
- Hubbe, M. A., Venditti, R. A., & Rojas, O. J. (2007). What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review. *BioResources*, 2(4), 739–788. <http://doi.org/10.15376/biores.2.4.739-788>

Hunt, J. F., Tamasy-Bano, M., & Nyist, H. (1999). Part II - Modelling the Drying of Three-Dimensional Pulp Moulded Structures - Drying Data Obtained from Flat Panels using Virgin and Recycled Paper Fibre. In *4th International Conference on the Development of Wood Science, Wood Technology and Forestry*. Missenden Abbey, UK.

ICIDCA. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. (L. O. G. Taupier & S. R. Bugallo, Eds.) (Tercera). La Habana, Cuba.

INTA. (2016). Caña de azúcar: símbolo de identidad cultural y desarrollo local. Retrieved January 1, 2016, from <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=17968>

IPT. (1988). *Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. Volume I*. (V. T. T. Varalta, Ed.) (2^o). São Paulo, Brasil: Escola SENAI "Theobaldo de Nigris".

ISO. (1998). *Standards Handbook: Paper, board and pulps* (Second). France.

Ji, H., Wang, H., & Chen, J. (2008). Mechanical behaviors of molded pulp material. *Spie*, 7375, 73756D–73756D–5. <http://doi.org/10.1117/12.839376>

Johansson, A. (2011). *Correlations between fibre properties and paper properties*. KTH, School of Chemical Science and Engineering (CHE), Estocolmo, Suecia.

Karlsson, M., & Oyj, M. (2000). *Papermaking Science and Technology: Part 2. Drying. Book 9*. (J. Gullichsen & H. Paulapuro, Eds.). Helsinki, Finland: Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI.

Kayhanian, M. (1995). Biodegradability of the organic fraction of municipal solid waste in a high-solids anaerobic digester. *Waste Management & Research*, 13(2), 123–136. [http://doi.org/10.1016/S0734-242X\(95\)90114-0](http://doi.org/10.1016/S0734-242X(95)90114-0)

Kerekes, R. (2006). Rheology of fibre suspensions in papermaking: An overview of recent research. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 21(5), 598–612. <http://doi.org/10.3183/NPPRJ-2006-21-05-p598-612>

Kirwan, M. J. (2005). *Paper and Paperboard. Packaging Technology*. (M. J. Kirwan, Ed.) (1^o). London, UK: Blackwell Publishing Ltd.

Klemm, D., Philipp, B., Heinze, T., Heinze, U., & Wagenknecht, W. (1998). *Comprehensive Cellulose Chemistry: Volume I. Fundamentals and analytical Methods* (Vol. 1). Federal Republic of Germany: Wiley-VCH. <http://doi.org/10.1002/3527601929>

Klock, U., & Sulato de Andrade, A. (2013). *Química da madeira*. Curitiba, Brasil.

Koeser, A. K. (2013). *Performance and Environmental Impacts of Biocontainers in Horticultural Crop Production Systems*. University of Illinois at Urbana, Urbana, Illinois.

Koeser, A., Kling, G., Miller, C., & Warnock, D. (2013). Compatibility of biocontainers in commercial greenhouse crop production. *HortTechnology*, 23(2), 149–156.

Koeser, A., Lovell, S. T., Evans, M., & Stewart, J. R. (2013). Biocontainer water use in short-term greenhouse crop production. *HortTechnology*, 23(2), 215–219.

Kolybaba, M., Tabil, L. G., Panigrahi, S., Crerar, W. J., Powell, T., Wang, B., ... Dakota, N. (2003). Biodegradable Polymers : Past , Present , and Future. In *2003 CSAE/ASAE Annual Intersectional Meeting Sponsored by the Red River Section of ASAE Quality Inn & Suites*. North Dakota, USA. <http://doi.org/10.13031/2013.41300>

Komilis, D. P., & Ham, R. K. (2003). The effect of lignin and sugars to the aerobic decomposition of solid wastes. *Waste Management*, 23(5), 419–23. [http://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00062-X](http://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00062-X)

Komulainen, P. (2015). Potential of Papermaking Fibers. Retrieved January 16, 2017, from <http://es.slideshare.net/Peeke/potential-of-papermaking-fibers>

- Komulainen, P. (2016). Modern Papermaking. Retrieved March 12, 2017, from <http://es.slideshare.net/Peeke/potential-of-papermaking-fibers>
- Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. (Thomson, Ed.) (2°). México: Thomson Learning.
- Kuehny, J. S., Taylor, M., & Evans, M. R. (2011). Greenhouse and landscape performance of bedding plants in biocontainers. *HortTechnology*, 21(2), 155–161.
- Laivins, G. V., & Scallan, A. M. (1996). The influence of drying and beating on the swelling of fines. *Journal of Pulp and Paper Science*, 22(5), 178–183.
- Lallana, V. H., & Lallana, M. del C. (2014). Nutrición vegetal. In *Manual de prácticas de fisiología vegetal* (pp. 43–45). Concepción del Uruguay, Uruguay: Eduner.
- Landis, T. D., Dumroese, R. K., & Haase, D. L. (2010). *The Container Tree Nursery Manual: Volume 7. Seedling Processing, Storage, and Outplanting*. Washington, DC: U.S.: Department of Agriculture, Forest Service.
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1990). *The container tree nursery manual. Volume 2: Containers and growing media*. Washington, U.S.: Department of Agriculture, Forest Service.
- Law, K. N., Valade, J. L., & Li, Z. (1996). Recycling behavior of thermomechanical pulp: effects of refining energy. *Tappi Journal*, 79(10), 181–186.
- Law, K. N., Valade, J. L., & Quan, J. (1996). Effects of recycling on papermaking properties of mechanical and high yield pulps: Part I: Hardwood pulps. *Tappi Journal*, 79(3), 167–174.
- Lerena, S. D. (1997). La importancia del envase en la producción de plantas forestales. *Quercus*, 134, 34–37.
- Leschine, S. B. (1995). Cellulose degradation in anaerobic environments. *Annual Review of Microbiology*, 49, 399–426. <http://doi.org/10.1146/annurev.mi.49.100195.002151>
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G., & Steyer, J. P. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*, 45(4), 431–440. <http://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.11.018>
- Levin, L. N. (1998). *Biodegradación de materiales lignocelulósicos por Trametes trogii (Aphyllphorales, Basidiomycetes)*. Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Levlin, J.-E., & Söderhjelm, L. (2000). *Papermaking Science and Technology: Pulp and Paper Testing. Book 17*. (J. Gullichsen & H. Paulapuro, Eds.). Helsinki, Finland: Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI.
- Li, T., Bi, G., Niu, G., Nambuthiri, S. S., Geneve, R. L., Wang, X., ... Zhao, X. (2015). Feasibility of using biocontainers in a pot-in-pot system for nursery production of river birch. *HortTechnology*, 25(1), 57–62.
- Limón, J., Rodriguez, M. A., Sánchez, J., & Tlapa, D. A. (2012). Metodología bayesiana para la optimización simultánea de múltiples respuestas. *Informacion Tecnologica*, 23(2), 151–166. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200017>
- Lina, W., Toshio, M., Yo-Ichi, M., Yoshiaki, A., & Yasuharu, T. (2013). Development of biodegradable seedling pot using Konjac by-product of industrial waste. *Journal of Textile Engineering*, 59(3), 43–49.
- Lopez, R., & Camberato, D. (2011). Growth and development of “Eckespoint Classic Red” poinsettia in biodegradable and compostable containers. *HortTechnology*, 21(4), 419–423.
- Lumiainen, J. J. (1992). Refining recycled fibers: advantages and disadvantages. *Tappi Journal*, 92–97.

- Ma, B. X., Soh, A. K., & Wang, B. (2004). A design database for moulded pulp packaging structure. *Packaging Technology and Science*, 17, 193–204.
- Madrid, C., Quevedo, V., & Andrade, E. (2000). Estudio de la biotransformación aeróbica de los desechos lignocelulósicos pergamino de café (Coffen arabica L .) y tallos de pasto guinea (Panicum maximum). *Rev. Fac. Agron*, 505–517(17), 505–517.
- Madrid, F., López, R., Cabrera, F., & Murillo, J. M. (2001). Caracterización de los composts de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarrasa (Huelva). *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetal*, 16(1), 105–117.
- Martínez, I. G., Rodríguez, J. J. P., Sánchez, A. T., & González-gonzález, L. R. (2008). Compostas 2. Evaluación de la presencia de metales pesados en compostas. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria*, 7(7), 91–99.
- Martínez, K. Y. P., & Toso, E. A. V. (2015). Planejamento da Produção na Indústria de Embalagens em polpa moldada. *Gestão & Produção*.
- McCabe, K. G., Schrader, J. A., Madbouly, S., Grewell, D., & Graves, W. R. (2014). Evaluation of biopolymer-coated fiber containers for container-grown plants. *HortTechnology*, 24(4), 439–448.
- Mezger, T. G. (2011). *The rheology handbook* (3^o edition). Hanover, Germany: Vincentz Network GmbH & Co. KG.
- Ministerio Relaciones Exteriores Comercio Internacional y Culto. (2011). *Sector de la industria de pasta de madera, papel y cartón*. Buenos Aires, Argentina.
- Minuto, G., Minuto, A., Pisi, L., Tinivella, F., Guerrini, S., Versari, M., ... Amprimo, I. (2008). Use of compostable pots for potted ornamental plants production. *Acta Horticulturae*, 367–372.
- Mogollón, G., García Hortal, J., & León, W. (2008). Materias primas fibrosas. In M. C. Area (Ed.), *Panorama de la Industria de Celulosa y Papel en Iberoamérica* (1^o, p. 568). Argentina: INNOVACIÓN DIGITAL S.A. de C. V.
- Molded Fiber Packaging Applications. (2017). Retrieved May 22, 2017, from <https://imfa.org/i4a/pages/index.cfm?pageID=3283>
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. (Grupo Noriega, Ed.) (2^o). México: Limusa S.A.
- Mooney, B. P. (2009). The second green revolution? Production of plant-based biodegradable plastics. *Biochem J*, 418(2), 219–232. <http://doi.org/10.1042/bj20081769>
- Mora, A. E. G. (2006). *Estudio de la degradación de residuos lignocelulósicos derivados del procesamiento industrial del cranberry*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Nambuthiri, S., Fulcher, A., Koeser, A. K., Geneve, R., & Niu, G. (2015). Moving toward sustainability with alternative containers for greenhouse and nursery crop production: A review and research update. *HortTechnology*, 25(1), 8–16.
- Nambuthiri, S., Geneve, R. L., Sun, Y., Wang, X., Thomas Fernandez, R., Niu, G., ... Fulcher, A. (2015). Substrate temperature in plastic and alternative nursery containers. *HortTechnology*, 25(1), 50–56.
- Nambuthiri, S., Schnelle, R., Fulcher, A., Geneve, R., Koeser, A., Verlinden, S., & Conneway, R. (2013). *Alternative Containers for a Sustainable Greenhouse and Nursery Crop Production*.
- Nazhad, M. M. (2005). Recycled fiber quality-A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 11(3), 314–329.

- Nechita, P., Dobrin, E., Ciolacu, F., & Bobu, E. (2010). The biodegradability and mechanical strength of nutritive pots for vegetable planting based on lignocellulose composite materials. *BioResources*, 5(7), 1102–1113.
- Niskanen, K. (2000). *Papermaking Science and Technology: Paper Physics. Book 16.* (J. Gullichsen & H. Paulapuro, Eds.). Helsinki, Finland: Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI.
- Noguchi, T., Miyashita, M., Seto, J., & Kawano, M. (1997). Development of Moulded Pulp Materials for the Packaging of Electronic Equipment, *10*(September 1996), 161–168.
- Norashikin, M. Z., & Ibrahim, M. Z. (2009). The potential of natural waste (corn husk) for production of environmental friendly biodegradable film for seedling. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58(10), 176–180.
- Nuñez, C. E. (2008a). Confección de preparados para microscopía de fibras. Retrieved from www.cenunez.com.ar
- Nuñez, C. E. (2008b). Pulpa y Papel I: Química de la madera. Extractivos. Retrieved November 10, 2016, from <http://www.cenunez.com.ar/articulos.php?cid=2>
- Nyist, H., Hunt, J. F., Tamásy-bánó, M., Composites, W., & Woodscience, F. (1998). Modeling drying of three-dimensional pulp molded structures. Part I, Experimental program. In *11th International Drying Symposium* (pp. 349–356). Halkidiki, Greece.
- Observatorio Nacional para la Gestión de RSU. (2012a). Datos Estadísticos de Misiones. Retrieved November 18, 2016, from <http://observatoriorsu.ambiente.gob.ar/estadisticas/17/misiones>
- Observatorio Nacional para la Gestión de RSU. (2012b). Datos nacionales. Diagnóstico de la situación. Retrieved November 18, 2016, from <http://observatoriorsu.ambiente.gob.ar/estadisticas/2/datos-nacionales>
- Observatorio Nacional para la Gestión de RSU. (2016). Datos nacionales. Mapas críticos nacionales en gestión de residuos urbanos. Retrieved November 18, 2016, from <http://observatoriorsu.ambiente.gob.ar/estadisticas/2/datos-nacionales>
- Ocon, J., & Tojo, G. (1986). Problemas de ingeniería química. Operaciones básicas. Tomo 1. Aguilar.
- OpTest Equipment Inc. (2012). *Operation Manual. Fiber Quality Analyzer. FQA-360.* Ontario, Canada.
- Paine, F. A. (1991). *The Packaging User's Handbook.* (F. A. Paine, Ed.) (1^o). Glasgow, UK: Chapman&Hall. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Paradelo, R., Moldes, A., Rodríguez, M., & Barral, M. (2008). Relationship between heavy metals and phytotoxicity in composts. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 6(2), 143–151.
- Pavlik, C. A., & Gavazzo, G. B. (2013). Relación entre propiedades biométricas de las fibras y las propiedades físicas y ópticas de papeles reciclados. In *Jornadas Científico Tecnológicas. 40mo Aniversario de la UNaM.* Posadas, Argentina.
- Pazo, J. R. (2008). *Estudio de lignina y lípidos en madera de eucalipto: Caracterización química en distintas especies y su evolución durante la fabricación y blanqueo químico y enzimático de la pasta de papel.* Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- PendlePace Ltd. (2005). *UK Market Review of Moulded Paper Pulp Executive summary. R&D Report: Paper.* Banbury: The Waste & Resources Action Programme.
- Pérez, D., Fandos, C., Scandaliaris, J., Mazzone, L., Soria, F., & Scandaliaris, P. (2007). *Estado actual y evolución de la productividad del cultivo de caña de azúcar en Tucumán y el noroeste argentino en el período 1990-2007.* Tucumán, Argentina.

- Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., De La Rubia, T., & Martínez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: An overview. *International Microbiology*, 5(2), 53–63. <http://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>
- Pérez, M. L. S. (2011). *Perfil del proceso de secado de pulpa y sus efectos en las propiedades del producto final*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Pérez, Y. G., Albear, E. M., Pérez, N., Sánchez, D. M., & Pérez, G. A. (2012). Aplicación de un bioensayo ecotoxicológico en la evaluación de una mezcla compleja ambiental. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 12(1), 839–845.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Octava). McGraw-Hill.
- Pettersen, R. C. (1984). The chemical composition of wood. In R. M. Rowell (Ed.), *The chemistry of solid wood. Advances in Chemistry, Vol. 207*. (pp. 57–126). Washington, U.S.: American Chemical Society. <http://doi.org/10.1021/ba-1984-0207.ch002>
- Pommier, S., Llamas, A. M., & Lefebvre, X. (2010). Analysis of the outcome of shredding pretreatment on the anaerobic biodegradability of paper and cardboard materials. *Bioresource Technology*, 101(2), 463–8. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.034>
- Postemsky, P. D., Marinangeli, P. A., & Curvetto, N. R. (2016). Recycling of residual substrate from *Ganoderma lucidum* mushroom cultivation as biodegradable containers for horticultural seedlings. *Scientia Horticulturae*, 201, 329–337. <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.021>
- Pozzi, M. T., Filippín, A. J., Matías, C., & Hammann, A. (2010). Posibilidad de uso del alpechín en fertilización de tierras agrícolas. *Informacion Tecnologica*, 21(4), 117–123. <http://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4312it.09>
- Prieto Ruiz, J. Á., Domínguez Calleros, P. A., Cornejo Oviedo, E. H., & Nívar Cháidez, J. de J. (2007). Efecto del envase y del riego en vivero en el establecimiento de *Pinus cooperi* Blanco en dos condiciones de sitio. *Maderas y Bosques*, 13(1), 79–97.
- Prinsen, P. (2010). *Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interes industrial y análisis estructural de sus ligninas*. Facultad de Química, Sevilla, España.
- Pulkkinen, I., Ala-Kaila, K., & Aittamaa, J. (2006). Characterization of wood fibers using fiber property distributions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(7), 546–554. <http://doi.org/10.1016/j.cep.2005.12.003>
- Ramírez Romero, P., & Mendoza Cantú, A. (2008). *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México*. (1^o edición). México: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Instituto nacional de ecología. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ramoa, M. V. (2014). *Producción de plantines. Floricultura/Horticultura*. Reconquista, Argentina.
- Richard, T. (1996). The Effect of Lignin on Biodegradability. Retrieved May 15, 2017, from <http://compost.css.cornell.edu/calc/lignin.html>
- Rivera-Cruz, M. del C., Trujillo-Narcía, A., Miranda de la Cruz, M. A., & Maldonado Chávez, E. (2005). Evaluación toxicológica de suelos contaminados con petróleos nuevo e intemperizado mediante ensayos con leguminosas. *Interciencia*, 30(6), 326–331.
- Robertson, G., Olson, J., Allen, P., Chan, B. E. N., & Seth, R. (1999). Measurement of fiber length, coarseness, and shape with the fiber quality analyzer. *Tappi Journal*, 82(10), 93–98.
- Rodríguez Laguna, R. (2010). *Manual de prácticas de viveros forestales* (1^o edición). México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

- Rojas, C., Orellana, R., Sotomayor, E., & Varnero, M. (2005). Fitotoxicidad de extractos de residuos orgánicos y su efecto sobre el índice de germinación de rabanito y pepino. *RC Suelo Nutr. Veg*, 61–66.
- Rojas, O., Briceño, M. I., & Avendaño, J. (2012). *Fundamentos de reología*. Mérida, Venezuela.
- Rowell, R. M. (2005). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. United States of America: Taylor & Francis Group. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.070>
- S., L., Divo de Sesar, M. ., & Vilella, F. (2009). Efecto del tamaño de celdas y citoquininas en el crecimiento de plantas de petunia. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 78, 31–36.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M. de laLuz, & Neaman, A. (2007). Métodos de análisis de tejidos vegetales. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., & Mora, M. de la L. (2005). Métodos de análisis de compost. (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ed.). Santiago, Chile.
- Saiz-Jimenez, C. (1984). Degradación microbiana de subproductos lignocelulosicos. Sevilla, España.
- Salazar, C. M. V. (2016). *Manejo del bagazo en la agroindustria de la caña panelera en el nordeste antioqueño a partir de la gestión integral de residuos: Estudio de caso municipio de Yolombo*. Universidad de Manizales. Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas, Manizales, Colombia.
- Sánchez, A. T. (2008). *Determinación de la actividad alelopática de extractos*. Tesina de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Sánchez, C. (2009). Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27(2), 185–194. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.001>
- Sánchez, J. H., Fajardo, M. E., & Quintana, G. C. (2016). Viscoelastic properties of pulp suspensions of bleached sugarcane bagasse: Effects of consistency and temperature. *BioResources*, 11(4), 8355–8363.
- Sánchez, J., Quintana, G., & Fajardo, M. (2015). Rheology of pulp suspensions of bleached sugarcane bagasse: Effect of consistency and temperature. *Tappi Journal*, 14(9), 2–4.
- Schettini, E., Santagata, G., Malinconico, M., Immirzi, B., Scarascia Mugnozza, G., & Vox, G. (2013). Recycled wastes of tomato and hemp fibres for biodegradable pots: Physico-chemical characterization and field performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 70, 9–19. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.002>
- Scott, W. E. (1995). The fundamental aspects of paper properties. In *Properties of Paper: An Introduction*. TAPPI Press.
- Selim, S. M., Zayed, M. S., & Atta, H. M. (2012). Evaluation of phytotoxicity of compost during composting process. *Nature and Science*, 10(2), 70–77.
- Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina. (2002). Residuos industriales. Ley 25.612. Argentina.
- Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina. (2006). Gestion integral de residuos sólidos urbanos. Ley 13592. Buenos Aires, Argetnina.
- Sha, J., Nikbakht, A., Wang, C., Zhang, H., & Olson, J. (2015). Ton the yield stress of chemical pulp fibre suspensionshe effect of concentration and freeness. *BioResources*, 10(3), 4287–4299. <http://doi.org/10.15376/biores.10.3.4287-4299>

- Silva, T. A. da, Mocchiutti, P., Zanuttini, M. A., & Ramosa, L. P. (2006). Chemical characterization of pulp components in unbleached softwood kraft fibers recycled with the assistance of a laccase/HBT system. *Bioresources*, 2(4), 616–629.
- Sixta, H. (2006). *Handbook of Pulp*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Sjöström, E. (1981). *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications* (2^o). New York: Academic Press.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2012). NREL, National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <http://www.nrel.gov>
- Smook, G. A. (1990a). Características de la madera y de las fibras de pulpa de madera. In M. J. Kocurek (Ed.), *Manual para técnicos de pulpa y papel*. Atlanta, U.S.A.: TAPPI Press.
- Smook, G. A. (1990b). Fabricación del papel-parte seca. In M. J. Kocurek (Ed.), *Manual para técnicos de pulpa y papel*. Atlanta, U.S.A.: TAPPI Press.
- Smook, G. A. (1990c). Introducción. In M. J. Kocurek (Ed.), *Manual para técnicos de pulpa y papel*. Atlanta, U.S.A.: TAPPI Press.
- Smook, G. A. (1990d). Propiedades y ensayos de pulpas y papeles. In M. J. Kocurek (Ed.), *Manual para técnicos de pulpa y papel*. Atlanta, U.S.A.: TAPPI Press.
- Smook, G. A. (1990e). Utilización de fibras secundarias. In M. J. Kocurek (Ed.), *Manual para técnicos de pulpa y papel*. Atlanta: TAPPI Press.
- Sørensen, B. G., & Hoffmann, J. (2004). Moisture-induced effects on stacking strength of moulded-fibre packaging in varying environmental conditions. *Packaging Technology and Science*, 17, 257–265.
- Spangenberg, R. J. (1993). *Secondary fiber recycling*. Atlanta, U.S.A.: TAPPI Press.
- Spence, K. L., Venditti, R. A., Habibi, Y., Rojas, O. J., & Pawlak, J. J. (2010). The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: Mechanical processing and physical properties. *Bioresource Technology*, 101(15), 5961–5968. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.104>
- Sridach, W., Hodgson, K. T., & Nazhad, M. M. (2006). Biodegradation and recycling potential of barrier coated paperboards. *BioResources*, 2(2), 179–192.
- Stenius, P. (2000). *Papermaking Science and Technology: Forest Products Chemistry. Book 3*. (J. Gullichsen & H. Paulapuro, Eds.). Helsinki, Finland: Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI.
- Stoffel, R. B. (2016). *Fraccionamiento de aserrín de pino destinado a una biorrefinería forestal*. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Straeter, C. (2004, October). Pruebas sobre diversas características de las macetas biodegradables. *Horticultura*.
- Stratton, R. A. (1991). Characterization of Fiber-Fiber Bond Strength from Paper Mechanical Properties. In *International Paper Physics Conference*. Kona, Hawaii: The Institute of Paper Science and Technology.
- Sundholm, J. (2000). *Papermaking Science and Technology: Mechanical Pulping. Book 5*. (J. Gullichsen & H. Paulapuro, Eds.). Helsinki, Finland: Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI.
- Sutjipto, E. R., Li, K., Pongpattanasuegsa, S., & Nazhad, M. M. (2008). Effect of recycling on paper properties. *TAPPSA Journal*.
- Tchobanoglous, G., Theissen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos. Volumen I*. (A. G. Brage, Ed.). Madrid: Impresos y Revistas, S.A.

- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1991). *International Standard Book. TAPPI Useful Methods*. Atlanta, USA: TAPPI Press.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2001). *Test Methods. 2000-2001 TAPPI*. Atlanta, USA: TAPPI Press.
- Teresa, M., & Remigio, B. (2011). A Review on the Use of Phytotoxicity as a Compost Quality Indicator. *Dynamic Soil, Dynamic Plant. Global Science Books*, 5(2), 36–44.
- 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 (ICS'99)* (pp. 625–647).
- Tiquia, S. M. (2010). Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. *Chemosphere*, 79(5), 506–512.
<http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.02.040>
- Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y., & Hodgkiss, I. J. (1996). Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 93(3), 249–256.
[http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00080-1](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00080-1)
- Tortosa, G. (2013). Índice de germinación de Zucconi, la prueba más usada para saber la madurez de un compost. Retrieved July 10, 2015, from
<http://www.compostandociencia.com/2013/12/test-de-zucconi-o-indice-de-germinacion-de-un-compost-html/>
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itavaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology*, 72(2), 169–183.
[http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)
- Turrado, J., Dávalos, M. F., Fuentes, F. J., & Saucedo, A. R. (2012). Envases de Cartón para Líquidos como Fuente de Fibra Secundaria. *Informacion Tecnologica*, 23(3), 59–66.
<http://doi.org/10.4067/S0718-07642012000300008>
- Turrado, J., Saucedo, A. R., Ramos, J., & Reynoso, M. L. (2008). Comportamiento de la fibra de celulosa reciclada en el proceso de hidratación. *Informacion Tecnologica*, 19(5), 129–136. <http://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3955it.07>
- Uasuf, A., & Hilbert, J. (2012). *El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)* (Vol. 3). Buenos Aires, Argentina.
- UIA. (2007). Cadena del Azúcar en la Región Noroeste. In *6to Foro Federal de la Industria. Región Noroeste*. Salta, Argentina.
- Vargas-Radillo, J., Salazar-Ríos, E., Lucia, B.-R., Pérez-Centeno, A., Urquiza, M. R., Antonio, R. R., José, R.Q. (2015). Pasta blanqueada y azúcares fermentables a partir de médula de bagazo de caña. *Madera y Bosques*, 21(2), 117–130.
- Varnero, M., Rojas, C., & Orellana, R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(1), 28–37.
- Velázquez, G. A. S. (2012). *Plan de manejo de residuos en la industria azucarera. Caso de estudio: Ingenio Adolfo López Mateos, OAXACA*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Venelampi, O., Weber, A., Rönkkö, T., & Itävaara, M. (2003). The biodegradation and disintegration of paper products in the composting environment. *Compost Science and Utilization*, 11(3), 200–209. <http://doi.org/10.1080/1065657X.2003.10702128>
- Vieira, M. G. A., Estrella, L., & Rocha, S. C. S. (2007). Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp. *Drying Technology*, 25(10), 1639–1648.
<http://doi.org/10.1080/07373930701590806>

- Vieira, M. G. A., & Rocha, S. C. S. (2007). Drying conditions influence on physical properties of recycled paper. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(10), 955–963. <http://doi.org/10.1016/j.cep.2007.06.006>
- Virgili, A. (1996). *Introducción a la fertilización con microelementos*. Welgro Micromix. (Comercial Química Massó S.A. División Agro., Ed.) (2^o edición). Barcelona, España.
- Wang, X., Thomas Fernandez, R., Cregg, B. M., Auras, R., Fulcher, A., Cochran, D. R., ... Geneve, R. L. (2015). Multistate evaluation of plant growth and water use in plastic and alternative nursery containers. *HortTechnology*, 25(1), 42–49.
- Wang, Z., Cai, Y., & Jing, Y. (2012). Molded pulp material structure parameters on the performance of the buffer. *Energy Procedia*, 17, 1872–1877. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.325>
- Wang, Z. W., & Li, X. F. (2014). Effect of strain rate on cushioning properties of molded pulp products. *Materials and Design*, 57, 598–607. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.019>
- Warman, P. R. (1999). Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity. *Compost Science & Utilization*, 7(3), 33–37. <http://doi.org/10.1080/1065657X.1999.10701972>
- Wathén, R. (2006). *Studies on fiber strength and its effect on paper properties*. Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- Wistara, N., & Young, R. a. (1999). Properties and treatments of pulps from recycled paper . Part I . Physical and chemical properties of pulps. *Cellulose*, 6(4), 291–324. <http://doi.org/10.1023/a:1009221125962>
- Woodske, D. (2012). *Performance of biodegradable nursey containers*. British, Columbia.
- Xiao, Y., & Shao, Z. (2015). Effect of temperature on the static compression of molded pulp products. In *5th International Conference on Civil Engineering and Transportation* (pp. 1786–1791). Guangzhou, China: Atlantis Press.
- Yamauchi, M., Masuda, S., & Kihara, M. (2006). Recycled pots using sweet potato distillation lees. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(2), 183–194. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.10.008>
- Yue, C., Hall, C. R., Behe, B. K., Campbell, B. L., Lopez, R. G., & Dennis, J. H. (2010). Investigating Consumer Preference for Biodegradable Containers. *J. Environ. Hort.*, 28(4), 239–243.
- Zanuttini, M. (2008). Propiedades del papel. In M. C. Area (Ed.), *Panorama de la Industria de Celulosa y Papel en Iberoamérica* (1^o, p. 568). Argentina: INNOVACIÓN DIGITAL S.A. de C. V.
- Zanuttini, M. (2012). Aspectos generales. In M. Zanuttini (Ed.), *Reciclado celulósico* (1^o, p. 303). Santa Fé. Argentina.
- Zapata, N., Guerrero, F., & Polo, A. (2005). Evaluación de corteza de pino y residuos urbanos como componentes de sustratos de cultivo, 65(4), 378–387.
- Zeng, X., Retulainen, E., Heinemann, S., & Fu, S. (2012). Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 27(2), 335–342. <http://doi.org/10.3183/NPPRJ-2012-27-02-p335-342>
- Zubillaga, M. S., Branzini, A., & Lavado, R. S. (2008). Problemas de Fitotoxicidad en Compost. *Rev. Pilquen*, X(9), 1–9.
- Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., & De Bertoldi, M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle*, 22(4), 27–29. <http://doi.org/10.2500/ajra.2009.23.3339>

