

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Secretaría de Investigación y Postgrado. Maestrías en Madera, Celulosa y Papel

Maestrando
Gabriel Darío Keil

Determinación de la durabilidad adquirida a través de métodos de degradación acelerada en madera endurecida de álamo (*Populus deltoides cv StonevilJe 66*)

**Tesis de Maestría presentada para obtener el título de “Magíster en Ciencias de la Madera, Celulosa y Papel”
OTM**

Director
Ing. Marcelo Carranza

Co Director
Ing. Obdulio Pereyra

Posadas, 2002



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
Facultad de Ciencias Forestales

“Determinación de la durabilidad adquirida a través de métodos de degradación acelerada en madera endurecida de álamo (*Populus deltoides* cv *Stoneville 66*)”

Gabriel Darío KEIL

**Tesis presentada para optar a la
Maestría en Ciencias de la Madera Celulosa y Papel,
Orientación Tecnología de la Madera**

Director: Marcelo CARRANZA

Codirector: Obdulio PEREYRA

A mis padres Jacobo y Albina.
A mi mujer Adriana.
A mi abuela María.

AGRADECIMIENTOS

A la Lic. Mónica Murace por su esfuerzo y dedicación puestos para la realización de los ensayos de biodegradación.

Al Ing. Marcelo Carranza por la lectura crítica de los borradores de esta Tesis.

A la Dra. Luján Luna, al Dr. Leopoldo Soibelzon y al Ing. Boris Díaz por su permanente apoyo para el análisis anatómico y en el arreglo del texto, gráficos y fotos.

A los colegas y amigos Marcelo Otaño e Ismael Andía por alentarme en dar este nuevo paso en mi formación Profesional.

A mis compañeras de promoción, las Licenciadas Claudia Taleb, Liliana Molina y María Vallejos, por su espíritu solidario y buen humor a lo largo de cursos, trabajos y exámenes.

A la Dra. Cristina Area en particular y a todo el personal del PROCyP en general, por la paciencia y vocación de servicio que me hicieron sentir como en mi casa estando a 1000 kilómetros de ella.

Al personal docente y administrativo de la Facultad de Ciencias Forestales de Eldorado, mencionando especialmente a la Ing. Alicia Borhen, al Ing. Obdulio Pereyra y al Ing. Miguel Angel López.

RESUMEN

El género *Populus* agrupa especies y clones implantados de importancia económica para la Argentina, entre los que se encuentra el *Populus deltoides* cv *Stoneville 66*, de gran difusión en el delta del Río Paraná, zona que posee la mayor concentración de plantaciones de este género. Una de las líneas de investigación recientes para la incorporación de tecnología a los productos forestales es la formación de compuestos madera plástico (CMP). Esta técnica de mejoramiento de las características originales de la madera consiste en impregnarla con un monómero y luego polimerizarlo, dentro de la madera, mediante una fuente de calor o rayos gamma. Los CMP cuentan con importantes aplicaciones en la industria de pisos para exteriores y tejas para techos, entre otros, debido a sus excelentes características físicas, mecánicas y de comportamiento al fuego, por esta razón adquieren importancia los datos sobre su durabilidad ante condiciones extremas de uso. No se encontraron antecedentes sobre ensayos de durabilidad en CMP, por lo tanto no existen antecedentes sobre una metodología normalizada para ensayos de biodegradación sobre estos compuestos. Como **hipótesis de trabajo** se consideró que la durabilidad adquirida de los CMP es mayor que la durabilidad natural de la madera que le dio origen, condición que lo hace apto para el uso en situaciones de riesgo, como piezas colocadas a la intemperie. Además es posible hallar el método de envejecimiento acelerado que mejor interprete la acción de los hongos xilófagos a través pruebas aceleradas en laboratorio. El **objetivo principal** de este trabajo consistió en determinar, mediante ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio, la durabilidad adquirida de la madera de álamo, *Populus deltoides* L. cv *Stoneville 66* (USA) impregnada con el monómero metacrilato de metilo polimerizado *in situ* mediante una fuente de calor y compararla con la durabilidad natural de la misma madera sin tratamiento alguno. Como **objetivo secundario** se planteó identificar la metodología más adecuada para realizar los ensayos de biodegradación con los CMP. En los ensayos preliminares se trabajó con dos metodologías (López & Deschamps y ASTM D-2017) y con dos tiempos de exposición (75

y 150 días). Los resultados obtenidos sobre la madera de álamo endurecida con metacrilato de metilo, demostraron que la metodología más apropiada es la propuesta por López & Deschamps, empleando la fórmula de Borlando para la evaluación de la pérdida de peso(%), con 150 días de exposición y aplicando una esterilización simple para la prevención de la contaminación con elementos extraños. En los ensayos finales y con la metodología seleccionada en los ensayos preliminares, se corroboró la agresividad de la cepa del hongo ensayado *Pycnoporus sanguineus*, produciendo principalmente degradación blanca selectiva. Considerando al CMP como un material "resistente" a la degradación según la tabla de durabilidad de la norma ASTM D - 2017, apto para usos al exterior sin contacto con el suelo y correspondiendo a la categoría de riesgo R3 de la norma IRAM 9600; recomendando su uso en cercas, estructuras para construcciones, vigas, columnas, pérgolas, muebles para jardín, revestimientos, juegos para niños y balaustradas. Cabe aclarar que la madera de álamo sin tratamiento fue categorizada como un material "no resistente", siendo no apto para su empleo en los usos recomendados para la categoría de riesgo R3.

CONTENIDOS

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
CONTENIDOS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE FOTOS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	xiv
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
CAPITULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. La Importancia de las Plantaciones de Alamo.....	6
2.2. Características de la Madera de <i>Populus deltoides</i>	8
2.2.1. Características Físicas y Anatómicas.....	8
2.2.2. Características Mecánicas.....	10
2.2.3. Características Estéticas.....	14
2.3. Agentes Destruidores de la Madera.....	14
2.3.1. Introducción.....	14
2.3.2. Hongos Xilófagos.....	15
2.3.3. Vías de Colonización.....	17
2.3.4. Acción sobre los Constituyentes de la Pared Celular.....	18
2.3.4.1. Celulosa.....	18
2.3.4.2. Lignina.....	19
2.3.4.3. Hemicelulosas.....	20
2.3.5. Tipos de Pudriciones en la Madera.....	21
2.3.5.1. Pudriciones Blancas.....	21
2.3.5.2. Pudrición Blanda.....	22
2.3.5.3. Pudrición Castaña.....	22
2.3.6. Efectos de la Pudrición sobre las Propiedades de la Madera.....	23
2.4. Durabilidad Natural y Durabilidad Adquirida.....	23
2.5. Producción del Compuesto Madera Plástico.....	25
2.5.1. Introducción.....	25
2.5.2. Método de Impregnación.....	27
2.5.3. Proceso de Curado.....	28
2.5.4. Otras Consideraciones Importantes.....	29
2.6. Características del Compuesto Madera Plástico.....	29
2.6.1. Introducción.....	29
2.6.2. Ensayos Físicos.....	30
2.6.2.1. Densidad Aparente Normal.....	30
2.6.2.2. Contracción Normal.....	31
2.6.2.3. Absorción de Agua.....	32
2.6.3. Ensayos Mecánicos.....	32
2.6.3.1. Dureza Janka.....	32
2.6.3.2. Flexión Estática.....	33
2.6.3.3. Compresión Perpendicular a las Fibras.....	33

	Pag.
2.6.3.4. Compresión Paralela a las Fibras.....	34
2.6.3.5. Corte Paralelo a las Fibras.....	34
2.6.4. Aspectos Importantes.....	35
2.7. Métodos para Determinar la Durabilidad.....	37
2.7.1. Introducción.....	37
2.7.2. Pruebas Aceleradas en Laboratorio.....	37
CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
3.1. Ensayos Preliminares.....	42
3.1.1. Materiales.....	42
3.1.1.1. Material Leñoso.....	42
3.1.1.2. Material Fúngico.....	43
3.1.2. Métodos.....	44
3.1.2.1. Preparación del Inóculo.....	44
3.1.2.2. Preparación de los Frascos de Pudrición.....	44
3.1.2.3. Acondicionamiento de las Probetas.....	46
3.1.2.4. Esterilización de los Materiales.....	48
3.1.2.5. Exposición del Material al Ataque Fúngico.....	48
3.1.3. Evaluación del Ensayo.....	48
3.1.3.1. Método de López & Deschamps.....	49
3.1.3.2. Norma ASTM D-2017.....	50
3.1.3.3. Fórmula de Borlando.....	50
3.1.3.4. Variación del Contenido de Humedad de las Probetas.....	51
3.1.3.5. Variación del Contenido de Humedad del Sustrato.....	53
3.1.3.6. Análisis Estadístico.....	53
3.1.3.7. Análisis Anatómico.....	54
3.1.3.8. Propiedades Físicas.....	55
3.2. Ensayos Finales.....	56
3.2.1. Materiales.....	56
3.2.1.1. Material Leñoso.....	56
3.2.1.2. Material Fúngico.....	57
3.2.2. Métodos.....	57
3.2.2.1. Preparación del Inóculo.....	57
3.2.2.2. Preparación de los Frascos de Pudrición.....	57
3.2.2.3. Acondicionamiento de las Probetas.....	57
3.2.2.4. Esterilización de los Materiales.....	58
3.2.2.5. Exposición del Material al Ataque Fúngico.....	58
3.2.3. Evaluación del Ensayo.....	58
3.2.3.1. Fórmula de Borlando.....	58
3.2.3.2. Análisis Estadístico.....	58
3.2.3.3. Análisis Anatómico.....	59
3.2.3.4. Clases de Resistencia.....	59

	Pag.
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
4.1. Ensayos Preliminares.....	62
4.1.1. Biodegradación.....	62
4.1.1.1. Análisis con Fórmula de Borlando del Material Inoculado.....	62
4.1.1.2. Método de ASTM D-2017 con Fórmula de Borlando.....	70
4.1.1.3. Método de López & Deschamps y Fórmula de Borlando..	74
4.1.1.4. Método y Fórmula de ASTM D-2017.....	79
4.1.1.5. Método y Fórmula según López & Deschamps.....	83
4.1.1.6. Esterilizado y Tindalizado.....	87
4.1.2. Análisis de los Valores Negativos de Pérdida de Peso(%).....	88
4.1.2.1. Empleando las Fórmulas de ASTM D-2017 y López & Deschamps.....	88
4.1.2.2. Empleando la Fórmula propuesta por Borlando.....	90
4.1.3. Variación del Contenido de Humedad de las Probetas.....	91
4.1.4. Variación del Contenido de Humedad del Sustrato.....	100
4.1.5. Análisis de los Datos de Densidad Aparente Normal.....	107
4.1.6. Análisis del Contenido de Humedad Inicial de las Probetas....	111
4.1.7. Análisis Anatómico.....	116
4.1.7.1. Método de López & Deschamps.....	116
4.1.7.2. Método según Norma ASTM D-2017.....	118
4.1.8. Conclusiones de los Ensayos Preliminares.....	120
4.1.9. Recomendaciones para los Ensayos Finales.....	123
4.2. Ensayos Finales.....	124
4.2.1. Biodegradación.....	124
4.2.1.1. Análisis General con Fórmula de Borlando.....	124
4.2.2. Valores Medios y Coeficientes de Variabilidad.....	131
4.2.3. Categorías de Riesgo.....	131
4.2.4. Análisis Anatómico.....	133
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	135
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 2.1. Densidad normal y coeficientes de variabilidad comparados.....	9
Tabla 2.2. Características anatómicas comparadas del leño de primavera.....	9
Tabla 2.3. Características anatómicas comparadas del leño de verano.....	10
Tabla 2.4. Resultados del ensayo de corte paralelo a las fibras.....	11
Tabla 2.5. Resultados del ensayo de dureza para ambos clones.....	12
Tabla 2.6. Resultados del ensayo de flexión estática.....	13
Tabla 2.7. Resultados del ensayo de compresión paralela a las fibras.....	13
Tabla 2.8. Principales hongos, tipo de podredumbre y géneros atacados.....	17
Tabla 2.9. Valores de densidad aparente normal al 15% de contenido de humedad.....	31
Tabla 2.10. Valores de contracción normal tangencial.....	31
Tabla 2.11. Aumento de peso del CMP durante tiempos crecientes de inmersión.....	32
Tabla 2.12. Valores de dureza Janka.....	32
Tabla 2.13. Parámetros correspondientes al ensayo de flexión estática.....	33
Tabla 2.14. Valores medios del ensayo de compresión perpendicular a las fibras.....	34
Tabla 2.15. Parámetros del ensayo de compresión paralela a las fibras.....	34
Tabla 2.16. Valores medios del ensayo de corte paralelo a las fibras.....	35
Tabla 2.17. Clasificación por resistencia de las maderas según la pérdida de peso.....	39
Tabla 2.18. Clasificación de las maderas según la norma ASTM D-2017.....	39
Tabla 2.19. Pérdida de peso de <i>Populus nigra cv Italica</i> de Santa Cruz.....	40
Tabla 3.1. Total de probetas y tipos de ensayos.....	43
Tabla 3.2. Distribución de las probetas en los distintos tratamientos.	49
Tabla 3.3. Distribución de las probetas de humedad para cada tiempo de observación.....	53
Tabla 3.4. Diseño factorial de dos niveles y tres factores.....	54
Tabla 3.5. Material observado en microscopio electrónico de barrido.....	55
Tabla 3.6. Distribución de las probetas en los distintos tratamientos.	58
Tabla 3.7. Diseño factorial de dos factores a dos niveles.....	59
Tabla 3.8. Tipo de resistencia en función de la pérdida de peso.....	60

	Pag.
Tabla 4.1. Efectos estimados para pérdida de peso(%).....	62
Tabla 4.2. Análisis de la varianza del diseño factorial original para pérdida de peso(%).....	63
Tabla 4.3. Análisis de la varianza del diseño factorial final para pérdida de peso(%).....	65
Tabla 4.4. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%). Fórmula de Borlando.....	66
Tabla 4.5. Valores medios de pérdida de peso(%) de los factores individuales.....	67
Tabla 4.6. Valores medios de pérdida de peso(%), de las Interacciones.....	68
Tabla 4.7. Pérdida de peso por fórmula de Borlando según norma ASTM.....	71
Tabla 4.8. Análisis con probetas esterilizadas simples y tindalizadas, fórmula de Borlando, norma ASTM.....	72
Tabla 4.9. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, norma ASTM.....	73
Tabla 4.10. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, norma ASTM.....	74
Tabla 4.11. Pérdida de peso, fórmula de Borlando, López & Deschamps.....	75
Tabla 4.12. Análisis con probetas esterilizadas simple y tindalizadas, fórmula de Borlando, López & Deschamps.....	76
Tabla 4.13. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, López & Deschamps.....	77
Tabla 4.14. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, López & Deschamps.....	78
Tabla 4.15. Porcentaje de pérdida de peso según norma ASTM D-2017.....	79
Tabla 4.16. Análisis de las probetas esterilizadas y tindalizadas, norma ASTM.....	80
Tabla 4.17. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), método y fórmula ASTM.....	81
Tabla 4.18. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), método y fórmula ASTM.....	82
Tabla 4.19. Porcentaje de pérdida de peso según López & Deschamps.....	83
Tabla 4.20. Análisis de las probetas esterilizadas y tindalizadas según López & Deschamps.....	84
Tabla 4.21. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), método y fórmula de López & Deschamps.....	85
Tabla 4.22. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), método y fórmula de López & Deschamps.....	86
Tabla 4.23. Esterilización. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%).....	87
Tabla 4.24. Cantidad (cursiva) y magnitud (normal) de los valores negativos según ASTM y López & Deschamps.....	89

	Pag.
Tabla 4.25. Cantidad (cursiva) y magnitud (normal) de los valores negativos según fórmula de Borlando.....	91
Tabla 4.26. Variación de contenido de humedad(%) de las probetas..	92
Tabla 4.27. Análisis de la varianza en la variación del Contenido de Humedad(%) de las probetas.....	94
Tabla 4.28. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, norma ASTM, CMP.....	95
Tabla 4.29. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, norma ASTM, Madera sin tratamiento....	96
Tabla 4.30. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, López & Deschamps, CMP.....	96
Tabla 4.31. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, López & Deschamps, Madera sin tratamiento.....	97
Tabla 4.32. Variación del contenido de humedad(%) del sustrato.....	100
Tabla 4.33. Análisis de la varianza en la variación del Contenido de Humedad(%) del sustrato.....	101
Tabla 4.34. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, norma ASTM, CMP.....	102
Tabla 4.35. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, norma ASTM, Madera sin tratamiento.....	103
Tabla 4.36. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, López & Deschamps, CMP.....	103
Tabla 4.37. Test de rango múltiple para el contenido de humedad del sustrato, López & Deschamps, Madera sin tratamiento....	104
Tabla 4.38. Densidad aparente normal(g/cm ³). Medias y coeficientes de variabilidad.....	107
Tabla 4.39. Análisis de la varianza de la densidad aparente normal...	108
Tabla 4.40. Test de rango múltiple para la densidad aparente normal, factor Madera.....	109
Tabla 4.41. Test de rango múltiple para la densidad aparente normal, factor Método.....	109
Tabla 4.42. Contenido de humedad inicial(%) de las probetas. Medias y contrastes.....	112
Tabla 4.43. Análisis de la varianza del contenido de humedad inicial(%) de las probetas.....	113
Tabla 4.44. Test de rango múltiple para contenido de humedad inicial(%) de las probetas.....	114
Tabla 4.45. Ensayos finales. Efectos estimados para pérdida de peso(%).....	125
Tabla 4.46. Análisis de la varianza del diseño factorial para pérdida de peso(%).....	126
Tabla 4.47. Ensayos finales. Valores medios de pérdida de peso(%)..	128
Tabla 4.48. Ensayos finales. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%).....	129
Tabla 4.49. Ensayos finales. Medias y coeficientes de variabilidad....	131
Tabla 4.50. Resistencia de la madera sin tratar y del CMP según la norma ASTM D-2017.....	132

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Fig. 4.1. Gráfico estandarizado para PERDIDA de PESO(%).....	64
Fig. 4.2. Gráfico de las interacciones para PERDIDA de PESO(%)..	64
Fig. 4.3. Medias e Intervalos de confianza para el 95% del factor Madera.....	68
Fig. 4.4. Medias e Intervalos de confianza para el 95% del factor Madera.....	69
Fig. 4.5. Medias e Intervalos de confianza para el 95% del factor Tiempo.....	69
Fig. 4.6. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. Norma ASTM en CMP.....	98
Fig. 4.7. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. ASTM en Madera Sin Tratar.....	98
Fig. 4.8. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. López & Deschamps en CMP.....	99
Fig. 4.9. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. López & Deschamps, Madera Sin Tratar.....	99
Fig. 4.10. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. Norma ASTM, CMP.....	105
Fig. 4.11. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. Norma ASTM, Madera Sin Tratar.....	105
Fig. 4.12. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. López & Deschamps, CMP.....	106
Fig. 4.13. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. López & Deschamps. Madera Sin Tratar.....	106
Fig. 4.14. Medias e Intervalos de confianza para el 95%. Densidad Aparente Normal para Madera.....	110
Fig. 4.15. Medias e Intervalos de confianza para el 95%. Densidad Aparente Normal en Métodos de Ensayo.....	110
Fig. 4.16. Medias e Intervalos de confianza al 95% del CH(%) inicial de las probetas. Factor Madera.....	115
Fig. 4.17. Medias e Intervalos de confianza al 95% del CH(%) inicial de las probetas. Factor Método.....	115
Fig. 4.18. Ensayos finales. Gráfico de los efectos estandarizados para Pérdida de Peso.....	126
Fig. 4.19. Ensayos finales. Gráfico de la interacción para Pérdida de Peso.....	127
Fig. 4.20. Ensayos finales. Medias e Intervalos de confianza para el factor Madera.....	130
Fig. 4.21. Ensayos finales. Medias e Intervalos de confianza para el factor Hongo.....	130

LISTA DE FOTOS

	Pag.
Foto 3.1. Frascos de pudrición. Madera sin tratar (P) y CMP (PM). Probetas inoculadas (I) y probetas testigo (T).....	46
Foto 3.2. Frascos de pudrición, Probetas inoculadas.....	47
Foto 3.3. Frascos de pudrición, Probetas testigo.....	47
Foto 4.1. López & Deschamps en madera inoculada.....	117
Foto 4.2. López & Deschamps en CMP inoculado.....	117
Foto 4.3. López & Deschamps en CMP sin inocular.....	117
Foto 4.4. ASTM D-2017 en madera inoculada.....	119
Foto 4.5. ASTM D-2017 en madera sin inocular.....	119
Foto 4.6. ASTM D-2017 en CMP inoculado.....	119
Foto 4.7. ASTM D-2017 en CMP sin inocular.....	119
Foto 4.8. Ensayos Finales. Canales de erosión.....	134
Foto 4.9. Ensayos Finales. Destrucción de la pared.....	134
Foto 4.10. Ensayos Finales. Corte transversal en MO.....	134

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

- A: Capacidad de Campo.
- ASTM: *American Society for Testing and Materials*.
- CHo: Contenido de Humedad en Base Anhidra.
- CHs: Contenido de Humedad del Sustrato.
- CHss: Contenido de Humedad del Suelo Seco al Aire.
- CMP: Compuesto Madera - Plástico.
- CV: Coeficiente de Variabilidad.
- FAA: Formol – Alcohol – Acido acético.
- Hih: Contenido de Humedad inicial en Base Húmeda.
- IRAM: Instituto Argentino de Racionalización de los Materiales.
- MDF: *Medium Density Fiberboard*.
- MEB: Microscopio Electrónico de Barrido.
- MERCOSUR: Mercado Común del Sur de América.
- MMA: Metacrilato de Metilo.
- MO: Microscopio Optico.
- P: Madera sin Tratar.
- Pef: Peso en Equilibrio Higroscópico Final.
- Pei: Peso en Equilibrio Higroscópico Inicial.
- Pfr: Peso del Frasco.
- Pi: Peso Inicial.
- PM: Madera Endurecida.
- Po: Peso Anhidro.
- PPPh: Porcentaje de Pérdida de Peso Referido al Peso en Equilibrio Higroscópico Inicial.
- PPPi: Porcentaje de Pérdida de Peso Referido al Peso Seco Inicial.
- Psf: Peso Anhidro del Suelo.
- Psi: Peso del Suelo Seco al Aire.
- PSL: Porcentaje de Sustancia Leñosa Perdida.
- SAGPyA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación.
- SLF: Sustancia Leñosa Final.
- SLI: Sustancia Leñosa Inicial.
- UNLP: Universidad Nacional de La Plata.

CAPITULO 1.
INTRODUCCION

INTRODUCCION

El género *Populus*, perteneciente a la familia de las Salicáceas, agrupa especies de importancia económica para la República Argentina. Este género carece de representantes nativos, así la totalidad de la madera del mercado nacional proviene de montes implantados.

La mayor concentración de plantaciones de álamos se encuentra en las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, tanto en la zona de islas del delta del río Paraná como en la parte continental y en menor escala en las zonas de riego y seco de las provincias de Mendoza, Río Negro, Neuquén y Santa Fe, totalizando unas 123.200 hectáreas cultivadas (1). La producción anual de madera de álamo se estima en 562.807 toneladas (2).

El empleo de la madera para un fin determinado depende principalmente de sus propiedades físicas, mecánicas y estéticas, características modificables, en distinto grado, con el tiempo.

La alteración del material leñoso puede ser de origen biológico y no biológico. Los agentes de destrucción biológica más importantes son los hongos xilófagos responsables de la pudrición de más del 80% de la madera puesta en servicio (3).

Las maderas no resisten de igual manera el ataque fúngico. La durabilidad o vida útil de las mismas depende de las características anatómicas del leño, de la presencia de extractivos, del tratamiento preservante realizado y de las condiciones de uso.

En las maderas que poseen baja durabilidad natural, como las que provienen de plantaciones de álamo, la preservación adquiere importancia y es así como surgieron procesos técnicos para incorporarles productos y con ellos aportarles una durabilidad mayor a la natural, "durabilidad adquirida".

Una de las líneas de investigación más recientes en el campo de los productos de madera es la formación de compuestos madera - plástico (CMP). Esta nueva técnica de mejoramiento de las

características originales de la madera consiste en impregnar los espacios vacíos del leño con una sustancia plástica, metacrilado de metilo, en estado monomérico con polimerización *in situ* mediante una fuente de calor o con la aplicación de rayos gamma, empleando peróxido de benzoilo u otro producto como catalizador en el primer caso.

El proceso de endurecimiento se realiza en dos etapas. La primera es una impregnación en autoclave por vacío - presión, en atmósfera inerte a fin de incorporar el producto en la totalidad de la madera y la segunda consiste en el curado de la madera impregnada mediante su exposición a temperatura de 80°C durante 8 horas o la exposición durante un tiempo variable a la acción de rayos gamma. El resultado es un material estructural con importantes características físico - mecánicas (4).

Sobre los CMP se realizaron ensayos físicos, mecánicos, de trabajabilidad y de propagación de llama; sin embargo, no se hallaron registros de ensayos de durabilidad adquirida.

Las investigaciones sobre biodegradación tienen por objetivo determinar la durabilidad de la madera maciza o compuestos de madera tanto en estado natural como preservada.

Los CMP cuentan con importantes aplicaciones en la industria de pisos para exteriores y tejas para techos, entre otras, debido a sus excelentes características físicas, mecánicas y de comportamiento al fuego, es por esta razón que los datos sobre durabilidad ante condiciones extremas de uso son importantes para caracterizar al producto.

Como hipótesis de trabajo se consideró que la durabilidad adquirida de los CMP es mayor que la durabilidad natural de la madera que le dio origen, condición que lo hace apto para el uso en situaciones de riesgo, como piezas colocadas a la intemperie. Además es posible hallar el método de biodegradación que mejor interprete la acción de los hongos xilófagos sobre los CMP a través pruebas aceleradas en laboratorio.

El objetivo principal de este trabajo consistió en determinar la durabilidad adquirida de la madera de álamo, *Populus deltoides* L. cv *Stoneville 66* (USA) impregnada con el monómero metacrilato de metilo polimerizado *in situ* mediante una fuente de calor y compararla con la durabilidad natural de la misma madera sin tratamiento alguno, mediante ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio.

Como objetivo secundario se planteó identificar la metodología que mejor se ajuste para realizar los ensayos de biodegradación en los CMP.

CAPITULO 2.
REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. La Importancia de las Plantaciones de Alamos

La mayor concentración de plantaciones de álamos se encuentra en las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, tanto en la zona de islas del delta del río Paraná como en la parte continental y en menor escala en las zonas de riego y secano de las provincias de Mendoza, Río Negro, Neuquén y Santa Fe totalizando unas 123.200 hectáreas cultivadas (1).

La región del delta del río Paraná presenta un ambiente óptimo para las forestaciones de salicáceas (sauces y álamos), debido a la existencia de suelos ricos en materia orgánica, abundante disponibilidad hídrica, clima templado - cálido y ubicación cercana a los grandes centros de consumo del país.

Esta región presenta la mayor superficie en el mundo forestada con sauces y álamos con 65.000 hectáreas, de las cuales el 42% corresponden a plantaciones jóvenes de 5 años o menos de edad. El 22% de la superficie está plantada con álamos, en los albardones y en tierras bajas bien drenadas que no permiten inundaciones temporarias y el resto son plantaciones de sauces en los bajos con drenaje insuficiente. El 71% de la superficie plantada se ubica en la provincia de Buenos Aires y el otro 29% en el delta Entrerriano (5).

Las salicáceas se cultivan en el delta del río Paraná desde mediados del siglo pasado, principalmente en base a selecciones efectuadas por los forestadores sobre especies introducidas, pues la única nativa es *Salix humboldtiana*. En la actualidad se utilizan unos veinte clones de álamos básicamente *Populus deltoides*, entre los que se destaca el *P. d. Stoneville 66*, e híbridos de *Populus nigra*. En el caso de los sauces se utiliza *Salix babilónica*, *Salix nigra* e híbridos entre *Salix babilónica* y *Salix alba* (5).

El material de plantación es de origen vegetativo, es decir que no se usan semillas, sino parte de los brotes obtenidos en estaqueros de los viveros forestales. Los distintos tipos de material de plantación que se utilizan para las forestaciones de álamo son: estacas de 50 a

70 cm de longitud, guías de 2 metros de longitud o barbados, que son estacas enraizadas, existiendo la posibilidad de usar barbados de raíces de 2 años y de tallos del año (2:1) o barbados de un año de raíz y tallo (1:1) (5).

La preparación del terreno de plantación consiste en acondicionar el campo para facilitar el drenaje de las zonas inundables, con posterior aplastamiento del pajonal por medio de rodillos con cuchillas. Sólo en los albardones, que son los terrenos más altos de las islas, es posible roturar el suelo del mismo modo que para instalar un cultivo agrícola.

La plantación se realiza en forma manual o mecánica, durante el invierno, con el material de vivero en receso vegetativo. La densidad de plantación va desde las 1.111 plantas/hectáreas con distancias de 3 x 3 metros entre plantas, hasta 700 plantas/hectáreas con distancias de 4 x 3,5 metros entre plantas (5).

Los cuidados posteriores a la plantación consisten en combatir la competencia de las malezas y proteger las plantas del ataque de plagas, especialmente roedores. Se realizan podas en aquellas plantaciones de calidad para la producción de madera de debobinado o aserrado de primera.

Los turnos de corta para los álamos varían entre los 10 y los 16 años, con tasas de crecimiento promedio de 15 a 20 m³/ha.año (2).

Las principales empresas industriales que consumen madera de álamo se ubican en las localidades de Tigre, Escobar, San Fernando, Zárate y San Pedro. En la zona de influencia cercana al delta del río Paraná existen 40 aserraderos, una planta de tableros de partículas, una planta debobinadora y una planta de celulosa.

Los precios de la madera de álamo se sitúan en: 13 pesos por tonelada en pié, para diámetros entre 12 y 20 cm; entre 30 y 40 pesos por tonelada para aserrado; entre 42 y 45 pesos por tonelada, en madera para debobinado de más de 30 cm de diámetro.

La producción total de madera en la zona es de aproximadamente 600.000 m³/año. El 60-70% de la producción es utilizada por Papel Prensa S.A., para la fabricación de papel para

diario, el resto es utilizado por la debobinadora y los aserraderos, entre los que se destacan dos de mayor producción con capacidad de 25.000 a 35.000 m³/año (5).

2.2. Características de la Madera de *Populus deltoides*

El empleo de la madera para un fin determinado depende principalmente de sus propiedades físicas, mecánicas y estéticas, características modificables, en distinto grado, con el tiempo.

2.2.1. Características físicas y anatómicas

La densidad de la sustancia leñosa es de 1,5 g/cm³, más o menos similar en todas las especies, siendo variable la cantidad de espacios vacíos. Este concepto es importante porque dependiendo de esta última variable, la madera admitirá mayor o menor volumen de monómero. Existen algunas especies refractarias a la impregnación, debido al taponamiento de los sistemas de conducción por resinas, torus aspirados y tilosis, dentro de estas especies no se encuentran los *Populus deltoides*.

La densidad de la madera varía entre especies, dentro de una misma especie, en un mismo árbol y hasta en una misma pieza de madera. Esto se debe a diversos factores tanto externos como propios del árbol que influyen sobre su crecimiento. Sin embargo se puede calcular una densidad promedio a un contenido de humedad dado, para la madera de una especie.

Los álamos presentan distintos valores de densidad aparente entre los clones, lo que pone de manifiesto el estricto control genético que se ejerce sobre las características de leño. En la tabla 2.1 se comparan los valores de densidad aparente normal de tres clones de *Populus deltoides*.

2.1. Densidad normal y coeficientes de variabilidad comparados.

<i>Populus deltoides</i>	Densidad [gr.cm⁻³]	CV [%]
<i>P. d. cv Stoneville 66</i>	0,4654 a	4,62
<i>P. d. cv A- 568-1</i>	0,3849 b	5,23
<i>P. d. cv "Harvard"</i>	0,3475 c	2,34

Para la columna letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.

Fuente: Otaño *et al.* (6).

Al presentar estos valores de densidad, la "porosidad" (espacios huecos llenos de aire o agua) de la madera es de alrededor del 70%, siendo una madera "penetrable" cuando se la impregna con cualquiera de los métodos industriales, característica muy importante para la formación de CMP.

Las características anatómicas estudiadas por Otaño *et al* (6) mostraron diferencias a nivel clonal (Tablas 2.2 y 2.3).

Tabla 2.2. Características anatómicas comparadas del leño de primavera.

<i>Populus deltoides</i>	Número de vasos/mm²	Diámetro de vasos [μ]	Grosor pared de fibra [μ]
<i>P. d. cv Stoneville 66</i>	57,30 a	47,54 a	2,04 a
<i>P. d. cv A- 568-1</i>	41,60 b	49,41 a	1,58 b
<i>P. d. cv "Harvard"</i>	46,20 b	47,22 a	1,40 b

En la columna letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.

Tabla 2.3. Características anatómicas comparadas del leño de verano.

<i>Populus deltooides</i>	Número de vasos/mm²	Diámetro de vasos [μ]	Grosor pared de fibra [μ]
<i>P. d. cv Stoneville 66</i>	104,30 a	34,73 a	3,10 a
<i>P. d. cv A- 568-1</i>	87,60 a	38,06 a	2,16 b
<i>P. d. cv "Harvard"</i>	81,67 a	36,94 a	2,28 b

Para la columna letras iguales agrupan tratamientos sin diferencias significativas.

Fuente: Otaño et al. (6).

En *P. d. cv Stoneville 66* se observa el número de vasos en el leño de primavera y el grosor de las paredes de las fibras en los leños de primavera y verano, significativamente mayores que en los otros dos clones. Estas observaciones junto con la mayor densidad de su madera, confirman lo hallado por Zobel & Talbert respecto de la interdependencia del carácter grosor de las paredes de las fibras y la densidad de la madera (8). Los resultados obtenidos demuestran la facilidad de penetración y absorción del preservante variable entre clones.

2.2.2. Características mecánicas

Para ilustrar las características mecánicas de los clones de *Populus deltooides*, se analizan cuatro propiedades de las más empleadas para el uso de la madera como material de construcción: corte paralelo a las fibras, dureza Janka, flexión estática y compresión perpendicular a las fibras.

En ambos clones, *P. d. cv Stoneville 66* y *P. d. cv Catfish 2*, la orientación tangencial acusó valores significativamente más altos de resistencia al corte paralelo a las fibras respecto a la radial (tabla 2.4).

No se encontraron diferencias significativas entre clones para cada orientación. Los coeficientes de variabilidad mostraron valores bajos.

Tabla 2.4. Resultados del ensayo de corte paralelo a las fibras.

Clon de álamo	corte	n°	promedio (Kg/cm ²)*	desvío estándar (Kg/cm ²)	C.V. (%)
<i>P. d. cv</i>	radial	10	73,13 a	3,39	3,08
<i>Catfish 2</i>	tangencial	10	91,75 bc	1,31	2,34
<i>P. d. cv</i>	radial	14	81,96 ab	2,65	2,51
<i>Ston. 66</i>	tangencial	15	95,61 c	3,14	1,77

*letras diferentes denotan diferencias significativas con test de Tukey ($p > 0,05$)

Fuente: Keil et al. (9).

En general, mayores valores de densidad de la madera determinan valores mayores de resistencia en las diferentes propiedades mecánicas (10). Esto se comprobó durante los diferentes ensayos, puesto que *P. d. cv Stoneville 66*, el clon de mayor densidad, generalmente tuvo los mayores valores de resistencia.

La menor resistencia al corte observada en la orientación radial encuentra su explicación en la disposición de los radios medulares (11). Si bien este es un comportamiento muy dependiente de la especie en cuestión ya que existe evidencia de situaciones inversas (12).

Las cuatro orientaciones ensayadas evidenciaron una mayor dureza en *P. d. cv Stoneville 66* siendo sólo la tangencial la única que mostró significancia estadística, respecto de los valores observados en *P. d. cv Catfish 2* (Tabla 2.5). Esta orientación manifestó a su vez, un comportamiento diferencial en cada clon respecto de la radial. En *P. d. cv Stoneville 66* por su parte, sí ocurrió diferencia significativa pero arrojando la orientación tangencial, el valor más alto.

Tabla 2.5. Resultados del ensayo de dureza para ambos clones.

Clon de álamo	corte	n°	promedio (Kg/cm ²)*	des. est. (Kg/cm ²)	anillo/cm.	C.V. (%)
<i>P. d. cv</i>	radial	16	180,01a	8,20	0,78a	7,88
	tangencial	20	170,96a	7,29	0,76a	12,07
<i>Catfish 2</i>	intermedio	5	189,56ab	13,90	0,69a	13,85
	transversal	20	291,52 d	7,29	0,76a	5,79
<i>P. d. cv</i>	radial	24	201,83ab	6,86	0,78a	11,01
	tangencial	24	240,08 c	6,86	0,78a	19,60
<i>Ston. 66</i>	intermedio	10	229,44 b c	10,14	0,82a	19,21
	transversal	24	323,22 d	6,86	0,78a	6,55

*letras diferentes denotan diferencias significativas con test de Tukey ($p>0,05$)

Fuente: Keil *et al.* (9).

Si bien los desvíos para las orientaciones radial, tangencial y transversal, se mostraron aceptables; el coeficiente de variabilidad marcó una gran variación interna en el caso tangencial para *P. d. cv Stoneville 66*.

Los valores obtenidos en la orientación transversal para cada clon se apartaron significativamente de las restantes orientaciones, conforme a lo esperado, pero sin acusar diferencias entre ellos.

La orientación intermedia (anillos de crecimiento a 45°) manifestó, al igual que la tangencial, un comportamiento diferencial en cada clon. En el caso de *P. d. cv Stoneville 66*, asumió un valor muy próximo a la media entre los valores radial y tangencial (221Kg/cm²) sin acusar diferencias significativas entre ellos.

El promedio de todas las observaciones en los valores de dureza fue de 208,01 Kg/cm² para *P. d. cv Catfish 2* y de 248,64 Kg/cm² para *P. d. cv Stoneville 66*.

La tabla 2.6 presenta los parámetros de flexión estática: tensión de rotura (TR), tensión en el límite de proporcionalidad (TLP), módulo de elasticidad (MOE) y módulo de rotura (MOR).

Tabla 2.6. Resultados del ensayo de flexión estática.

Clon de álamo	Parámetro*				Desvío estándar (CV%)			
	TR	TLP	MOE	MOR	TR	TLP	MOE	MOR
<i>P. d. cv Ston. 66</i>	649,6b	462,0 b	83100a	433,1b	83,82 (12,9)	71,45 (15,5)	14489 (17,4)	55,88 (12,9)
<i>P. d. cv Cattfish 2</i>	519,1a	373,3a	78823a	346,1a	56,62 (10,9)	53,68 (14,4)	8584 (10,9)	37,75 (10,9)

*letras diferentes denotan diferencias significativas con test de Tukey ($p > 0,05$)

Fuente: Keil et al. (9).

Los valores de TR, TLP y MOR fueron significativamente mayores en *P. d. cv Stoneville 66*. Corroborándose nuevamente lo acontecido para los ensayos de corte y dureza. Según Coronel, se comprobó que el incremento de la densidad aparente dentro de una especie, produce un aumento en los valores de la resistencia a la flexión estática (11). Esto se comprobó en el trabajo realizado por Keil et al (9), puesto que dentro de la especie *Populus deltoides*, el clon de mayor densidad aparente anhidra, *P. d. cv Stoneville 66*, acusó los mayores valores.

Tabla 2.7. Resultados del ensayo de compresión paralela a las fibras.

Clon de álamo	Parámetro*			Desvío estándar (CV%)			carga de rotura (kg)
	TR	TLP	MOE	TR	TLP	MOE	
<i>P. d. cv Ston. 66</i>	322,66 b	234,41a	105894a	3,93 (1,22)	7,35 (3,14)	12686,25 (12)	7750
<i>P. d. cv Cattfish 2</i>	302,20a	227,50a	82192a	3,24 (1,07)	5,33 (2,34)	6055,48 (7,37)	7140

*letras diferentes denotan diferencias significativas con test de Tukey ($p > 0,05$)

Fuente: Keil et al. (9).

En el ensayo de compresión paralela a las fibras, *P. d. cv Stoneville 66* registró diferencia significativa entre los valores de TR. Esto coincide con los valores más altos obtenidos para densidad anhidra y normal. Según Coronel, esta propiedad física es un excelente indicador de la resistencia a la compresión y puede ser empleada para obtener un mayor grado de exactitud de los resultados (7).

2.2.3. Características estéticas

Los caracteres estéticos están directamente ligados al valor decorativo u ornamental del leño y son perceptibles por los órganos sensoriales. Estos son color, olor, diseño, brillo, textura y grano.

La madera de álamo tiene un color que va desde blanco a blanco - cremoso pues no tienen sustancias colorantes o xilócromas. No tienen un olor pronunciado debido a la ausencia de sustancias volátiles. El diseño es liso porque sus elementos anatómicos son pequeños y apenas se perciben a ojo desnudo, siendo la coloración uniforme. No presenta brillo y tiene una coloración opaca, la textura es fina y homogénea, siendo una madera de grano derecho.

2.3. Agentes destructores de la madera

2.3.1. Introducción

La madera, desde el punto de vista tecnológico, se define como una sustancia orgánica de origen vegetal más o menos dura, compacta y fibrosa, con la cual el hombre construye diversos elementos como muebles, revestimientos, juegos, puentes, muelles, estructuras para techos, vigas y postes entre otros.

La madera fue desde siempre el principal material de construcción por su bajo precio, su existencia en formas y tamaños diversos, su alta resistencia con relación al peso, su facilidad de trabajo y acoplamiento, sus bajas conductibilidades térmica, eléctrica y acústica.

No se encontraron sustitutos a un costo razonable de la madera para la construcción de durmientes, postes para líneas aéreas y alambrados; en consecuencia está expuesta, en estas aplicaciones, al ataque de diversos agentes de destrucción.

El empleo de la madera para un fin determinado depende principalmente de sus propiedades físicas, mecánicas y estéticas, características alterables, en distinto grado.

La madera, en sus diversas formas, está sometida a distintos tipos de deterioro desde el momento en que se la saca del bosque. Los hongos lignícolas, en especial aquellos que la pudren y los insectos xilófagos causan grandes daños a la madera almacenada o en servicio. Los animales destructores marinos son una amenaza seria y constante para los pilotes y otros objetos de madera expuestos al agua salada. Además, ésta se vuelve inservible a causa del desgaste mecánico y a la acción del fuego. La intemperie provoca una verdadera desintegración de este material en determinadas condiciones de uso (3).

2.3.2. Hongos Xilófagos

La alteración del material leñoso puede ser de origen biológico y no biológico. Los agentes de destrucción biológica más importantes son los hongos xilófagos, responsables de la pudrición en más del 80% de la madera puesta en servicio, debido a su eficiencia en la colonización del sustrato leñoso por su hábito de crecimiento (3).

Los factores que influyen en el desarrollo de los hongos en la madera son:

* Humedad. El contenido de humedad en la madera que favorece el deterioro por estos organismos es mayor al punto de saturación de las fibras (PSF), valor que oscila entre un 30% y un 50% de humedad. Por debajo del 20% su acción es prácticamente nula.

* Temperatura. La temperatura óptima está entre los 20 y 30°C. La actividad fúngica cesa por debajo de los 3°C y por encima de los 40°C.

* Oxígeno. Es el elemento fundamental para el desarrollo de estos organismos. El tenor de oxígeno adecuado es superior al 20% de volumen de oxígeno por volumen de madera.

El cuerpo vegetativo de los hongos (talo) es miceliar y está constituido por un conjunto de hifas, a este tipo de cuerpo se lo denomina "talo filamentoso". Este talo crece por ramificaciones que le permite cubrir en forma rápida la superficie a colonizar.

Los hongos son colonizadores eficientes debido a que cada extremo de una hifa constituye un punto de penetración en el leño, a su importante actividad enzimática y a su capacidad de traslocar las sustancias depolimerizantes.

Los hongos que degradan a la madera son los xilófagos. La degradación implica un cambio de las propiedades químicas y físicas del material leñoso.

La degradación que se manifiesta en la madera en servicio es causada por organismos que la colonizaron cuando ésta formaba parte del xilema secundario de los árboles, antes de que fueran apeados.

Hay muchos hongos que habitan la madera produciendo efectos variables en ella. Según el desarrollo que estos organismos tengan en su interior o sobre ella y el tipo de deterioro que ocasionen podemos diferenciarlos en 3 grupos:

- * Hongos causantes de pudrición (carie o podredumbre).
- * Hongos cromógenos.
- * Mohos.

Los hongos que causan carie son los verdaderos responsables de la destrucción de la madera. Los cromógenos, si bien no alteran su estructura, son considerados en particular, los responsables del azulado.

La naturaleza de los hongos atacantes determina la coloración de la madera; ésta se torna blanquecina a causa de la acción de enzimas que degradan la celulosa, hemicelulosa y principalmente la lignina (podredumbre blanca) o castaña por la intervención de enzimas que hidrolizan a la celulosa (podredumbre castaña). Este tipo

de podredumbre se caracteriza por la aparición de hendiduras en la dirección de las fibras y los radios leñosos, así como a lo largo de los anillos de crecimiento produciendo la disgregación de la madera en trozos cúbicos, de esto resulta el nombre de podredumbre cúbica que también se le da.

A modo de ejemplo se citan en la tabla 2.8 los principales hongos, el tipo de podredumbre y los géneros forestales susceptibles de ser atacados.

Tabla 2.8. Principales hongos, tipo de podredumbre y géneros atacados.

Especie Fúngica	Podredumbre Producida	Genero Forestal Susceptible a su Ataque
<i>Ganoderma lucidum</i>	Blanca	<i>Pinus, Salix y Populus</i>
<i>Coriolus versicolor</i>	Blanca	<i>Pinus y Araucaria</i>
<i>Phellinus andinopatagonicus</i>	Blanca fibrosa	<i>Nothofagus</i>
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	Blanca fibrosa	<i>Salix y Populus</i>
<i>Coriolellus malicola</i>	Castaña o cúbica	<i>Salix</i>
<i>Laetiporus sulphureus</i>	Castaña o cúbica	<i>Populus y Eucalyptus</i>

Fuentes: Markham & Bazin (13); López, S (14) y Deschamps & Wright(15).

2.3.3. Vías de Colonización

Las vías de entrada son varias: heridas, ramas muertas, rámulas, rizomorfas, cuerpos fructíferos en suelo, raíz y ápices dañados, entre otras. Una vez que el patógeno ingresó se ubica en las células que constituyen el duramen debido a la mayor tensión de oxígeno que existe en él; el pasaje entre los distintos tipos celulares es a través de las punteaduras de las células y por medio de perforaciones que ellos originan. Luego avanzan por las vías de

colonización longitudinal: vasos, traqueidas, fibras y parénquima axial; y transversal: parénquima y traqueidas radiales (13).

Las vías de colonización presentan, en muchos casos, barreras como gomas, resina, tálides, capas internas de un anillo de crecimiento, bandas de fibras y torus aspirados en las punteaduras areoladas. Estas barreras aumentan la resistencia a la colonización y en consecuencia, le otorgan mayor durabilidad natural (14).

Las vías de colonización pueden ser consideradas también como vías de nutrición, ya que es mediante la degradación de las paredes, de las cuales los hongos se nutren, donde comienza el proceso de alteración química de la madera.

2.3.4. Acción sobre los Constituyentes de la Pared Celular

Los constituyentes más importantes de la pared celular: celulosa, hemicelulosa y lignina, debido a su alto peso molecular, no pueden ser utilizados directamente por los hongos como sustrato para su crecimiento, en consecuencia, es necesaria su depolimerización a compuestos simples, de bajo peso molecular, para poder ser utilizados.

La depolimerización es enzimática. Las enzimas son en su mayoría exoenzimas que se liberan por los ápices de las hifas.

2.3.4.1. Celulosa. La celulosa es un polímero lineal de moléculas de glucosa unidas por enlaces β 1-4 glucosídicos. Este polímero es de alto peso molecular y de estructura cristalina.

La celulosa constituye el marco estructural o esqueleto de las paredes celulares, se presenta a modo de fibras que se organizan en microfibrillas y éstas a su vez se empaquetan formando las macrofibrillas. Las microfibrillas están constituidas por moléculas de celulosa, en éstas se diferencian las micelas que forman una zona de celulosa cristalina y otra de celulosa paracristalina o amorfa.

La depolimerización de la celulosa (celulolisis) se produce por vía enzimática (celulasas). Las tres enzimas más importantes son las endoglucanasas, las exoglucanasas o celobiohidrolasas y las

glucosidasas, éstas actúan sinérgicamente. También intervienen otras enzimas que realizan una actividad enzimática auxiliar. Este modelo de celulosisis fue propuesto por White en el año 1987 (14).

En los hongos de pudrición castaña, que aparentemente no producen exoglucanasas, el ataque inicial de la celulosa sería por medio de un sistema que resulta de la asociación entre el peróxido de hidrógeno de origen fúngico y extracelular junto al hierro que se encuentra en la madera como Fe^{+++} . Este hierro para interactuar con el peróxido es reducido por el ácido oxálico también producido por los hongos, siendo su carácter también extracelular. De este modo el Fe^{++} y el agua oxigenada constituyen el primer paso de la depolimerización (15).

2.3.4.2. Lignina. La lignina es un polímero aromático complejo de alto peso molecular, amorfo, tridimensional, insoluble en agua, formado por unidades de fenil propano.

La polimerización se da a partir de la oxidación de los precursores primarios: coniferil alcohol, cumaril alcohol y sinapil alcohol; unidos por uniones carbono - carbono y aril - éter.

La polimerización de la lignina se lleva a cabo luego de la deposición de los polisacáridos y se inicia por oxidación enzimática de los precursores fenoxi radicales (6).

En función del precursor que predomina en la formación de la lignina tendremos el tipo guayacil lignina, que surge por mayor concentración del precursor coniferil alcohol y se encuentra en las Gimnospermas y en algunos tipos celulares de Angiospermas. Si el sinapil alcohol es el precursor que predomina, tendremos siringil lignina, frecuente en Angiospermas.

La laminilla media y los ángulos celulares contienen la mayor concentración de lignina.

La lignina es altamente resistente a la degradación y hasta el momento los únicos organismos capaces de transformarla eficientemente, llevándola a dióxido de carbono y agua, son los hongos de pudrición blanca.

La depolimerización es vía enzimática. Las enzimas más importantes son: lignin peroxidasa, manganeso oxidas y lacasa; existiendo además una actividad enzimática auxiliar (16).

Evidencias químicas y fisiológicas demuestran la degradación de la lignina como su biosíntesis, predominantemente oxidativa, aunque también puedan participar reacciones de reducción.

Los hongos lignolíticos son capaces de inclinar el balance entre polimerización y depolimerización a favor de la fragmentación, posiblemente por remoción de estos fragmentos de bajo peso molecular de las mezclas de reacción por glicosilación o metilación (16).

2.3.4.3. Hemicelulosas. Las hemicelulosa son heteropolímeros, constituidos por distintos tipos de azúcares y ácidos orgánicos. Se caracterizan por su solubilidad y bajo peso molecular, quizás éste sea el motivo por el cual son depolimerizadas por endoenzimas.

Las hemicelulosas son los primeros componentes de la pared celular atacados por los hongos causantes de pudrición debido a la menor extensión de sus cadenas, a la solubilidad y a la localización expuesta alrededor de las microfibrillas de celulosa.

Las enzimas responsables de su depolimerización son las hemicelulasas. Estas se producen tempranamente en los procesos de pudrición y están asociadas con la degradación de las ligninas.

Las hemicelulasas degradan las hemicelulosas en la pared celular adyacente al lumen y se introducen progresivamente en la pared secundaria abriendo canales para permitir el acceso de las enzimas degradadoras de la lignina de mayor peso molecular.

Las hemicelulasas también proveen de energía a los hongos ya que la lignina por sí sola no puede ser utilizada como sustrato para el crecimiento del hongo. La pérdida de hemicelulosa siempre acompaña a la remoción de lignina.

El patrón de ataque es análogo al de la degradación de la celulosa producida por las celulasas, sin embargo las exoenzimas

están ausentes, reflejando probablemente el bajo grado de polimerización de las hemicelulosas.

Cabe destacar que las hemicelulosas son heteropolímeros constituidas por distintos tipos de azúcar, cadenas laterales y grupos sustituyentes. Los procesos enzimáticos involucrados en la degradación son complicados y están comenzando a ser elucidados.

La hemicelulosa más común es el xilano, por eso nos referimos a las xilanasas como las enzimas responsables del proceso de depolimerización. Los xilanos están constituidos por xilosa, azúcar simple de cinco carbonos unidos por enlaces glicosídicos. Las enzimas involucradas se denominan xilasas y xilosidasas.

2.3.5. Tipos de Pudriciones en la Madera

Se identifican dos tipos de pudriciones: blancas y castañas, sobre la base del color característico que adquiere la madera.

Las pudriciones blancas se caracterizan porque el agente causal tiende a destruir más lignina que celulosa, quedando un resto de celulosa pura de color más o menos blanco, la densidad del leño disminuye y consecuentemente aumenta la humedad en estas zonas.

En las pudriciones castañas el micelio vegetativo degrada solamente la celulosa, quedando un resto fácilmente friable compuesto de lignina, hay también disminución de la densidad de la madera y aumento de la retención de agua.

Existe un tercer tipo, la podredumbre blanda, que se presenta en madera de obra en contacto con el suelo. Los postes o travas colocados en el suelo sin tratamiento preservante previo son atacados por varias especies de hongos que viven normalmente en el mismo suelo (15).

2.3.5.1. Pudriciones Blancas. Dentro de este tipo de pudrición podemos distinguir a dos patrones básicos de degradación: simultánea y selectiva.

La degradación simultánea implica una disminución de todos los componentes de la pared celular, se distingue por la formación de

agujeros y senderos de erosión en la región próxima a la hifa. El proceso de descomposición comienza en el estrato de la pared próximo al lumen celular y se extiende progresivamente hacia la laminilla media, originando un gradual adelgazamiento de la pared celular. Este tipo de degradación se observa en la delignificación de la pared secundaria y de la laminilla media y no se observa un ataque sustancial sobre la celulosa de los estratos S1 y S2.

La degradación selectiva se caracteriza por la remoción selectiva de lignina y hemicelulosa sin una disminución importante de celulosa, que permanece bajo la forma de microfibrillas (17).

2.3.5.2. Putridión Blanda. Este término se utiliza para describir la degradación de la madera en ambientes húmedos, producida por hongos que pertenecen a la Subdivisión Ascomycotina y Deuteromycotina.

Se diferencian dos tipos de pudriciones blandas, denominadas Tipo 1 y Tipo 2. En el primer caso se observan cavidades cilíndricas en la pared secundaria y en el Tipo 2 la pared secundaria es degradada completamente producto de un proceso de erosión gradual. La laminilla media queda intacta, persiste en estados avanzados de degradación y esto es lo que la diferencia del patrón de degradación producido en una pudrición blanca simultánea, donde la laminilla media queda totalmente destruida.

Los hongos que causan pudriciones blandas afecta a la matriz celular por medio de la formación de cavidades (Tipo 1) o por erosión (Tipo 2). El Tipo 1 es común en coníferas y el Tipo 2 en latifoliadas.

2.3.5.3. Putridión Castaña. Los hongos de pudrición castaña degradan preferentemente a la celulosa y hemicelulosa de la pared celular. La colonización del tejido leñoso está confinada a los estratos S1 y S2, que están menos lignificados, de la pared secundaria. La laminilla media compuesta, altamente lignificada, es resistente al ataque (17).

2.3.6. Efectos de la pudrición sobre las propiedades de la madera.

La alteración de las características físicas y químicas de la madera atacada está relacionada con la intensidad de la pudrición y los efectos específicos de las especies fúngicas atacantes.

El color normal de la madera se modifica y ciertos colores característicos se difunden por toda la madera alterada.

La resistencia a la flexión, tracción, compresión y la densidad se reducen y provocan un aumento en su susceptibilidad a los efectos del secado, al tiempo que se alteran otras propiedades como la conductividad térmica y eléctrica.

Uno de los efectos característicos de la pudrición incipiente es el ablandamiento y la elevada fragilidad que le aporta a la madera de modo que el material afectado tiende a romperse bajo la tensión mecánica que se produce en las operaciones de descortezado, astillado y cribado con poca deformación, fractura lisa y sin astillas, así como la resistencia, color y otras propiedades importantes de la pulpa producida.

2.4. Durabilidad Natural y Durabilidad Adquirida

La capacidad del material leñoso para resistir el ataque de los hongos, los insectos, el desgaste mecánico y la acción de los agentes atmosféricos se define como "durabilidad". Dada la preponderancia de la acción de los hongos sobre los otros agentes causantes de la destrucción, la durabilidad se refiere generalmente a la resistencia de la madera a la acción fúngica.

La durabilidad de la madera o resistencia natural a la pudrición es una propiedad variable. Ciertas maderas son notables por su resistencia al ataque de hongos y su empleo suele recomendarse en lugares donde debe usarse material no tratado en contacto con la tierra o en otras situaciones. Otras maderas son de durabilidad intermedia como así también están aquellas conocidas por su

facilidad para deteriorarse, entre las que se incluye la madera de álamo.

Los factores implicados en las diferencias de durabilidad son numerosos, algunos están relacionados con las características de la madera y otros con su utilización.

La albura, a diferencia del duramen, es propensa a la pudrición. Esto contrasta con las condiciones existentes en el árbol vivo en el que el duramen es la parte que normalmente se encuentra afectada, debido a que la humedad de la albura es lo suficientemente elevada como para reducir la cantidad de oxígeno por debajo del mínimo, necesario para el desarrollo de los hongos.

En las maderas de duramen durable, la cantidad de albura existente influye en su durabilidad cuando se expone a condiciones favorables para la pudrición.

En algunas especies la buena durabilidad se debe a la presencia de sustancias (extractivos) que se depositan en el duramen cuando las células parenquimáticas pierden el protoplasma y mueren. Estas sustancias son polifenoles tóxicos para los hongos e insectos y es por este motivo que se los considera como preservantes naturales de la madera; algunos de éstos son los ácidos shiquímico, cinámico y cafeico, éstos se encuentran en cantidades variables. Algunas de estas sustancias químicas son solubles en agua y otras en compuestos orgánicos como el alcohol - benceno.

Con respecto a la densidad, algunos autores sostienen que ésta puede servir como criterio de durabilidad. Las maderas densas y de colores oscuros por lo general son más durables. La madera densa es poco porosa y por lo tanto cuenta con menos posibilidades de acceso de agua y de oxígeno.

También es necesario tener en cuenta el grado de estacionamiento de la madera, en especial si se usa en ambientes confinados donde existen diferentes valores de humedad. En consecuencia, la madera no estacionada retiene su contenido de agua durante un tiempo lo suficientemente prolongado como para dar lugar al desarrollo de los hongos, a diferencia de la madera

estacionada que ante las mismas condiciones se comporta satisfactoriamente.

En algunas especies se comprobó una relación entre la durabilidad y la velocidad de crecimiento, árboles con bajos valores de crecimiento aportan maderas de alta durabilidad.

Los datos sobre la durabilidad en servicio dan una buena orientación sobre la vida que deba esperarse de las diferentes maderas, aunque están influenciados por las condiciones de temperatura y humedad del suelo y del aire, composición y características del suelo, precipitaciones y en general, por todos los factores que puedan influir sobre el proceso vital de los agentes causantes de la pudrición.

Se denomina “durabilidad natural” a la resistencia de la madera sin tratar al ataque de hongos, insectos, desgaste mecánico y la acción de los agentes atmosféricos; reservando el término de “durabilidad adquirida” para la resistencia de las maderas tratadas con algún producto preservante.

En las maderas que poseen baja durabilidad natural, como las que provienen de plantaciones de álamo, la preservación adquiere importancia y es así como surgieron procesos técnicos para incorporarles productos y con ellos aportarles una durabilidad mayor a la natural, “durabilidad adquirida” (3).

2.5. Producción del Compuesto Madera - Plástico

2.5.1. Introducción

Una de las líneas de investigación más recientes en el campo de la impregnación de la madera es la formación de compuestos madera - plástico (CMP). Esta nueva técnica de mejoramiento de las características originales de la madera, consiste en impregnar los espacios vacíos del leño con una sustancia plástica, metacrilado de metilo en estado monomérico, con polimerización *in situ*, empleando peróxido de benzoilo como catalizador cuando la polimerización se

realiza mediante una fuente de calor y prescindiendo del uso de catalizador cuando la polimerización es realizada mediante la acción de rayos gamma (18).

Los compuestos madera - plástico (CMP) se forman a partir de la unión de un producto natural (madera) y un producto sintético (plástico). El desarrollo de los CMP constituye una línea de mejoramiento de los productos realizados con madera.

El proceso de endurecimiento se realiza en dos etapas. La primera es una impregnación en autoclave por vacío - presión en atmósfera inerte a fin de incorporar el producto en la totalidad de la madera y la segunda consiste en el curado de la madera impregnada mediante su exposición a temperatura de 80°C durante 8 horas o a la acción de rayos gamma. El resultado es un material estructural con importantes características físico - mecánicas (4).

La producción y evaluación de los CMP en laboratorio se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo (18):

- * Corte y pulido de las probetas según las especificaciones de las normas a emplear.
- * Estabilización al aire libre de las probetas hasta que lleguen al contenido de humedad de equilibrio con el ambiente, comprobado por medio de pesos constantes sucesivos.
- * Obtención del peso y del volumen de las probetas, por medio de balanza analítica con 0.01 gramos de precisión y mediante desplazamiento de agua, respectivamente.
- * Preparación del producto endurecedor, constituido por una mezcla de monómero y catalizador en proporciones preestablecidas.
- * Impregnación de las probetas con el empleo de un método industrial de vacío y presión.
- * Envoltura de las probetas impregnadas con papel de aluminio para evitar la evaporación del producto endurecedor.
- * Curado en estufa eléctrica, en condiciones restringidas de concentración de oxígeno con temperatura y tiempos preestablecidos.
- * Aireación de las probetas curadas para eliminar toda fracción de monómero no polimerizado.

- * Obtención del peso y del volumen de las probetas endurecidas.
- * Realización de ensayos físicos y mecánicos de las probetas sin tratar y endurecidas.
- * Evaluación y análisis.

Existen dos criterios en cuanto al tipo de madera a utilizar. Se ha pensado en esta técnica para mejorar maderas blandas y baratas, como en Sudáfrica, donde la investigación ha estado centrada en torno a madera de *Pinus spp.*, debido al déficit de maderas duras. En Estados Unidos, en cambio, se utilizan maderas semiduras en la industria de CMP para parquet, teniendo en cuenta la menor absorción de monómero. Analizando el precio de este producto, se obtienen costos finales similares que cuando se emplea una madera más barata pero se utiliza mayor cantidad de producto endurecedor (20).

Más allá de que la madera sea blanda o dura, se necesita madera de alta calidad, libre de defectos, para producir un producto de excelentes características.

2.5.2. Método de Impregnación

El método de impregnación empleado es Bethell pero sin vacío final, también denominado de "célula llena".

El contenido de humedad de la madera recomendable para el uso de este método es por debajo del punto de saturación de las fibras, siendo ideal el contenido de humedad de equilibrio higroscópico, es decir del 15% aproximadamente.

El equipo de impregnación debe contar con un cilindro de presión o autoclave; un tanque de trabajo para almacenamiento del producto preservante y llenado del autoclave por gravedad; un tubo de nitrógeno para generar hasta 14 kg/cm² de presión en atmósfera inerte, con manómetros de presión interna y salida respectivamente y regulador; una bomba para generar hasta 700 mm Hg de vacío, con motor de ½ HP de potencia; manómetro; vacuómetro; conexiones de mangueras y caños con llaves esféricas de ¼ de vuelta (18).

El proceso se inicia introduciendo la madera en el autoclave, se cierra el mismo y se comienza a dar vacío, con la ayuda del vacío se terminan de ajustar las tuercas de la tapa, se alcanza un vacío de 700 mm de Hg y se mantiene durante 30 minutos (18).

Luego se llena el autoclave con el producto endurecedor, aprovechando el vacío generado en el autoclave. Seguidamente se realiza presión sobre el endurecedor y la madera en el autoclave hasta alcanzar un valor de 10 kg/cm², este valor de presión se mantiene durante 60 minutos (18).

Finalizada la impregnación, se retorna el impregnante remanente al tanque de trabajo, se abre el autoclave, se extraen las probetas impregnadas y se envuelven con papel de aluminio inmediatamente. A diferencia del método Bethell tradicional no se realiza vacío final debido a la volatilidad del producto (18).

El empleo de monómeros introduce algunas variantes a los métodos de impregnación tradicionales. Por ejemplo, es necesario evitar la presencia de oxígeno debido a su carácter inhibitorio de la polimerización vía radicales libres, por lo tanto se recurre al gas nitrógeno para dar presión y a la vez generar una atmósfera inerte (18).

2.5.3. Proceso de Curado

La polimerización del monómero dentro de la madera, también denominada "curado", se logra cubriendo las probetas con doble envoltura con papel de aluminio y colocándolas en horno eléctrico provisto de termómetro y termostato (18).

El horno eléctrico se regula a una temperatura de $80 \pm 5^{\circ}\text{C}$, con atmósfera inerte provocada por el pasaje de una corriente de nitrógeno gaseoso, para evitar la combustión de los gases, combustión que se produce en presencia de oxígeno. En las condiciones mencionadas las probetas permanecen en el horno durante 8 horas (18).

El curado también puede realizarse mediante la exposición de la madera impregnada a rayos gamma durante tiempos variables.

2.5.4. Otras Consideraciones Importantes

El metacrilato de metilo (MMA) presenta una serie de ventajas entre las que podemos mencionar su gran facilidad para impregnar madera de álamo y otras maderas semilivianas y de densidad media, debido fundamentalmente a su baja viscosidad. Es incoloro y existe la posibilidad de colorearlo con productos que no inhiban la reacción de polimerización (18).

Como desventajas se señalan: su alta volatilidad, la producción de vapores molestos y su inflamabilidad (18).

El catalizador siempre es necesario cuando se emplea metacrilato de metilo como endurecedor y una fuente de calor para la polimerización, es común el uso de peróxido de benzoilo (18).

La cantidad de producto endurecedor incorporado a la madera puede superar los 500 kilogramos por metro cúbico de madera de álamo. Variando los tiempos y valores de presión aplicados en el proceso de impregnación se pueden lograr leves aumentos en la carga de producto, o disminución de la misma, siendo éste un punto importante a analizar en un futuro trabajo sobre costos de producción relacionados con la utilización de los productos endurecidos (18).

2.6. Características del Compuesto Madera - Plástico

2.6.1. Introducción

Sobre los CMP se realizaron ensayos físicos, mecánicos, de trabajabilidad y de propagación de llama; sin embargo, no se hallaron registros de ensayos de durabilidad adquirida.

Los CMP cuentan con importantes aplicaciones en la industria de pisos para exteriores y tejas para techos debido a sus excelentes características físicas, mecánicas y de comportamiento al fuego, por esta razón es sumamente importante contar con datos sobre durabilidad ante condiciones externas de uso (21).

La primer patente que utilizó madera endurecida con un monómero polimerizado *in situ* mediante radiaciones, data de 1958 (19).

El uso de los CMP polimerizados mediante acción térmica comenzó en el año 1966 con la fabricación de tacos de billar, continuándose con la producción de tacos de hockey, partes de armas y cabos de instrumentos de corte. En el año 1971 la empresa AMF Bowling Division comenzó con la producción de componentes de instrumentos musicales, tacos de golf y otros productos para la industria textil. Inglaterra, Japón, Alemania e Italia también emplearon los CMP a escala comercial (20).

Los CMP fueron producidos industrialmente en Estados Unidos, donde en 1976 ya existían 3 fábricas de parquet que empleaban como materia prima los CMP polimerizados mediante radiación (21). En Chile, en la década del 80, se comenzó a producir el Neowood, empleando *Pinus radiata* D. Don endurecido con la impregnación de un monómero, polimerizado en su interior a alta temperatura con la acción de un líquido inerte (22).

Brasil, en laboratorio, produjo CMP empleando madera de *Pinus elliotti* (20); en Chile, además de pino radiata, se trabajó con álamo (23) y en Estados Unidos, a escala industrial, se emplearon maderas de roble americano, pino blanco y abedul.

En Argentina se utilizaron, hasta el presente, maderas de álamo, pino, sauce y aglomerado polimerizados con radiación (24) y madera de álamo con polimerización mediante el uso de una fuente de calor (18).

2.6.2. Ensayos Físicos

2.6.2.1. Densidad aparente normal. Según Andía *et al* (18) el cambio de los valores de densidad aparente normal, obtenida al 15% del contenido de humedad, se muestra en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Valores de densidad aparente normal al 15% de contenido de humedad.

Parámetro Evaluado	Promedio en madera (g/cm³)	Promedio en CMP (g/cm³)	Aumento en (%)
Densidad aparente normal	0,42	0,8	90

Fuente: Andía *et al* (18)

Es decir que se aumenta en un 90% los valores densidad aparente normal en el CMP, pasando de ser una madera semiliviana (0.42 g/cm³) a un compuesto semipesado (0.8 g/cm³) (18).

2.6.2.2. Contracción normal. Del análisis estadístico del trabajo realizado por Andía *Et al* (18) surgieron diferencias significativas entre la madera y el CMP en los valores de contracción normal tangencial y radial (Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Valores de contracción normal tangencial.

Parámetro Evaluado	Promedio en madera (g/cm³)	Promedio en CMP (g/cm³)	Disminución en (%)
Contracción normal radial máxima	3,61	1,68	50
Contracción normal tangencial máxima	8,67	6,51	25

Fuente: Andía *et al* (18)

Es decir que el CMP contrae un 50% menos en sentido tangencial y un 25% menos en el sentido radial con respecto a la madera sin tratar (18).

2.6.2.3. Absorción de agua. El aumento de peso en probetas de CMP sumergidas en agua durante distintos tiempos por Andía *et al* (18) se muestra en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Aumento de peso del CMP durante tiempos crecientes de inmersión.

Inmersión (horas)	Aumento de peso (%)
24	16,87
48	19,81
144	28,77
384	44,21

Fuente: Andía *et al* (18)

Estos valores indican una gran estabilidad dimensional del CMP. Como referencia se toma el valor de absorción de agua de un producto de alta calidad como lo es el tablero de fibra de mediana densidad (MDF), en el cual los porcentajes de aumento de peso van desde 14 al 30% en inmersión durante 24 horas (18).

2.6.3. Ensayos Mecánicos

2.6.3.1. Dureza Janka. El cambio de los valores de dureza del CMP, encontrado por Andía *et al* (18), se muestra en la tabla 2.12, para los tres planos de estudio.

Tabla 2.12. Valores de dureza Janka.

Plano de Ensayo	Promedio en madera de álamo (kg/cm ²)	Promedio en CMP (kg/cm ²)	Aumento en (%)
Tangencial	158,31	782,11	394
Radial	161,35	736,72	357
Transversal	251,69	937	273

Fuente: Andía *et al* (18)

Es decir que se experimentó un aumento entre el 270 y el 394% en los valores de dureza, según el plano ensayado, en el CMP con respecto al material sin tratar (18).

2.6.3.2. Flexión estática. El cambio en los parámetros de flexión estática en el CMP con respecto a la madera, según Andía *et al* (18), se muestra en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Parámetros correspondientes al ensayo de flexión estática.

Parámetro Evaluado	Promedio en madera (kg/cm²)	Promedio en CMP (kg/cm²)	Aumento en (%)
Tensión en el límite de proporcionalidad	451,17	884,99	96
Tensión de rotura	612,91	1186,29	94
Módulo de elasticidad en flexión (MOE)	62886,4	100786,99	60

Fuente: Andía *et al* (18)

Se produjo un aumento entre el 60 y el 96% en los parámetros de flexión estática del CMP comparado con la madera sin tratar (18).

2.6.3.3. Compresión perpendicular a las fibras. El cambio en el valor medio correspondiente al ensayo de compresión perpendicular a las fibras encontrado por Andía *et al* (18), se muestra en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Valores medios del ensayo de compresión perpendicular a las fibras.

Parámetro Evaluado	Promedio en madera (kg/cm²)	Promedio en CMP (kg/cm²)	Aumento en (%)
Carga para alcanzar una impronta de 2,5 mm	55,46	151,66	173

Fuente: Andía *et al* (18)

El CMP mostró un excepcional aumento en el valor de resistencia a la compresión perpendicular a las fibras (18).

2.6.3.4. Compresión paralela a las fibras. El cambio en los parámetros correspondiente al ensayo de compresión paralela a las fibras según Andía *et al* (18), se muestra en la tabla 2.15.

Tabla 2.15. Parámetros del ensayo de compresión paralela a las fibras.

Parámetro Evaluado	Promedio en madera (kg/cm²)	Promedio en CMP (kg/cm²)	Aumento en (%)
Tensión en el límite de proporcionalidad	192,06	383,12	99
Tensión de rotura	284,14	536,54	89

Fuente: Andía *et al* (18)

El CMP duplicó los valores correspondientes a los parámetros medidos en el ensayo de compresión paralela a las fibras, con respecto a la madera (18).

2.6.3.5. Corte paralelo a las fibras. Del análisis estadístico realizado por Andía *et al* (18), surgieron diferencias significativas en los valores

correspondientes a la tensión de rotura en el ensayo de corte paralelo a las fibras en orientación tangencial, mientras que para la orientación radial no se encontraron diferencias significativas entre el CMP y la madera.

Tabla 2.16. Valores medios del ensayo de corte paralelo a las fibras.

Parámetro Evaluado	Promedio en madera (g/cm²)	Promedio en CMP (g/cm²)	Aumento en (%)
Corte paralelo tangencial	57,51	79,49	38

Fuente: Andía *et al* (18)

Para provocar el corte paralelo tangencial en el CMP se tuvo que producir una tensión de rotura 38% mayor que para la madera sin tratar (18).

2.6.4. Aspectos Importantes

Algunas características de resistencia mecánica aumentan considerablemente en el CMP, como la dureza, con un aumento del orden del 300% y compresión perpendicular a las fibras, con aumento del 170% (18).

Otras características duplican sus valores como resistencia a la flexión estática, a la compresión paralela a las fibras y densidad aparente normal. La tensión de rotura para producir el corte paralelo tangencial aumenta cerca del 40% (18).

La disminución de los valores de contracción, del orden del 25 al 50% según la orientación, junto a los bajos valores de absorción de agua del CMP en inmersión lo califican como un material de muy buena estabilidad dimensional (18).

Puede concluirse que la madera endurecida es más densa, dura, resistente a la compresión, más rígida y resistente al corte tangencial, con mejores características de estabilidad dimensional que la madera sin tratar (18).

Algunas propiedades importantes de los monómeros son su precio, disponibilidad, dosis y calor de polimerización, contracción volumétrica al polimerizar, facilidad de manejo y de impregnación.

El MMA tiene un punto de ebullición de 100°C, un calor de polimerización de 130 Kcal/kg, una viscosidad de 143 Kp a 30°C y un valor G (número de moléculas que reaccionan por 100 eV absorbidos) de 6,7; formando un tipo de polímero caracterizado como duro y tenaz (23).

Se produce en la madera una polimerización *in situ* que involucra sólo la formación de homopolímero dentro de la matriz celular, una vez formado el polímero es imposible de remover sin destruir la madera debido a su forma y tamaño (23).

Además de las propiedades medidas en los ensayos es necesario mencionar otras características del CMP:

- * Mientras mayor sea la retención de plástico, mayor será la densidad del producto y mayores las propiedades mecánicas que dependen de él, hasta ciertos límites (18).

- * La retención de MMA debe estar en función del producto que se va a fabricar con el CMP, de los costos del monómero en particular y del proceso general (18).

- * La superficie irregular del producto recién curado lleva necesariamente a realizar algún tipo de terminación, ya sea cepillado y/o lijado y pulido, que representa una pérdida del alrededor del 10% del material en la instalación de un parquet (18).

- * Se manifiesta un notorio aumento de la resistencia a la abrasión al lijar las superficies del CMP (18).

- * Es recomendable el endurecimiento de las piezas de madera con sus dimensiones de uso, en estudios realizados sobre material endurecido no predimensionado se registraron pérdidas de hasta el 47% del material, con la consecuente reducción de ganancias (23).

- * Una limitante para el desarrollo a gran escala de los CMP ha sido el costo de los materiales y de producción. Estudios realizados en Sudáfrica calcularon un 41% de mano de obra, 4% de irradiación y 55% de materiales, para un parquet empleando una mezcla de

poliéster - estireno como endurecedor; de los materiales el 83% del costo fue de monómero, 8% de madera 4% de gas nitrógeno y 5% otros, en madera de *Pinus spp.* Estudios sobre parquet fabricado en Estados Unidos con madera de encina y MMA como catalizador registraron un 50% del costo para la madera, 25% del monómero y 25% para mano de obra y otros gastos (23).

2.7. Métodos para determinar la durabilidad

2.7.1. Introducción

La durabilidad de las maderas se determina, en forma real o comparativa, por medio de métodos de laboratorio o “pruebas aceleradas” denominadas así por su corta duración y métodos de campo o “cementorios”, considerados pruebas definitivas de durabilidad. Estos métodos son agrupados en función de sus características más salientes, como el tiempo que demandan en aportar resultados, los procedimientos involucrados y el tipo de información a obtener, entre otras.

Los métodos de laboratorio permiten obtener resultados sobre la resistencia ofrecida por distintas maderas para varias especies de hongos en un período de meses, a diferencia de los métodos a campo que ofrecen resultados después de varios años (de 10 a 30 años) de su instalación.

2.7.2. Pruebas Aceleradas en Laboratorio

Las pruebas aceleradas permiten obtener información respecto de la durabilidad o resistencias comparativa de una madera, de la efectividad de un producto preservante o del desempeño de una cepa fúngica determinada.

Estos ensayos demandan:

* Control preciso en las técnicas y procedimientos de laboratorio para establecer el ensayo en condiciones de asepsia.

* Control de las variables más importantes involucradas en el proceso como la temperatura, la humedad relativa y el contenido de humedad del sustrato.

* Simplificación del objeto de estudio, generalmente reducido a pocas maderas, productos de madera, productos preservantes o cepas fúngicas ensayadas.

Para la realización de ensayos de durabilidad en laboratorio se conocen tres metodologías: la propuesta por López & Deschamps de Argentina, la propuesta por la escuela norteamericana (normas ASTM) y la propuesta por la escuela europea.

La metodología norteamericana consiste en el cultivo de un hongo xilófago en un medio artificial (agar extracto de malta) disperso en cajas de Petri o erlenmeyers; una vez que la cepa se desarrolló en el medio de cultivo se coloca sobre una tablilla de madera denominada *feeders strip* que se instala sobre el sustrato, colonizada la tablilla, se coloca sobre ella la probeta de madera cuya durabilidad se quiere determinar.

En la metodología europea también se usa medio artificial, la diferencia radica en que sobre el agar malta se colocan pequeñas probetas de albura de *Pinus sylvestris* inoculadas con el hongo de ensayo, sobre las que, una vez colonizadas por el micelio, se instalan las probetas de madera cuya durabilidad natural se desea evaluar. Según López & Deschamps, metodología Argentina, se coloca el inóculo directamente sobre la cara transversal superior de cada una de las probetas a ensayar y éstas se entierran el 50% de su tamaño en el sustrato (25).

En los tres métodos se obtienen resultados en períodos de 3 a 6 meses. También se usan para determinar la eficacia de los preservantes en maderas tratadas (durabilidad adquirida).

Si bien los resultados obtenidos no permiten establecer la durabilidad real de una madera para distintas condiciones de servicio, sí permiten comparar el desempeño particular entre distintas maderas, hongos o preservantes.

De acuerdo al porcentaje de pérdida de peso con respecto al peso original, se pueden clasificar las maderas empleando la tabla 2.17 o la recomendada por la norma ASTM D-2017 (Tabla 2.18), (26).

Tabla 2.17. Clasificación por resistencia de las maderas según la pérdida de peso.

Categoría de resistencia	Pérdida de peso(%)
Muy resistentes	< 5%
Resistentes	5% - 10%
Moderadamente resistentes	10% - 20%
No resistentes	20% - 30%
Sin resistencia	> 30%

Tabla 2.18. Clasificación de las maderas según la norma ASTM D-2017.

Pérdida de peso (%)	Peso residual (%)	Tipo de resistencia
0 - 10	90 - 100	Altamente resistente
11 - 24	76 - 89	Resistente
25 - 44	56 - 75	Moderadamente resistente
45 - mas	55 - menos	No resistente

Es importante tener presente que estos tipos de comparaciones son relativos y si bien una madera puede ser clasificada como resistente por los resultados de laboratorio, las condiciones edafoclimáticas de servicio pueden condicionar resultados diferenciales.

Ensayos de durabilidad natural realizados en laboratorio usando esta metodología con madera de *Populus nigra* cv. *Italica* de procedencia santacruceña expuestos a la acción de tres cepas xilófagas aportaron los datos de la tabla 2.19.

Tabla 2.19. Pérdida de peso de *Populus nigra cv Italica* de Santa Cruz.

<i>Populus nigra cv Italica</i>		Pérdida de peso (%)
Según	Gobernador Gregores	14,61
Procedencia	Los Antiguos	20,18
Según Cepa	<i>Lentinus lepideus</i>	7,36
Fúngica	<i>Phelinus igniarius</i>	18,37
	<i>Coriolus versicolor</i>	33,34

Fuente: Díaz *et al* (27)

Como se observa en la tabla 2.19, en la madera de Los Antiguos se registró la mayor pérdida de peso en 50 días de ensayo. Esta es menos densa con respecto a la Gobernador Gregores, hecho que permite suponer mayor susceptibilidad al ataque (27).

CAPITULO 3.
MATERIALES Y METODOS

3.1. Ensayos Preliminares

3.1.1. Materiales

3.1.1.1. Material Leñoso. Se trabajó con probetas de madera de álamo (*Populus deltoides cv Stoneville 66*) obtenida de una plantación comercial, con turno de corta de 12 años, del delta del río Paraná (34° 45' S, 59° 05' W), Provincia de Buenos Aires.

Las probetas de 20 mm de lado, con superficie pulida y libre de defectos (grietas, rajaduras, nudos, pudrición, manchas), fueron clasificadas como probetas endurecidas (PM) y sin endurecer (P).

Las probetas P se obtuvieron a partir de listones de álamo en carpintería. Las probetas PM se cortaron de listones de madera endurecida con 567 Kg de MMA por metro cúbico de madera y polimerizada mediante fuente de calor, de 5 x 5 x 20 cm cuya dimensión mayor correspondió al sentido paralelo a las fibras.

La cantidad de material obtenido fue: 124 probetas P y 124 probetas PM, numeradas correlativamente.

Las probetas P y PM fueron separadas en 3 grupos (Tabla 3.1):

- * Para ensayos de durabilidad natural y adquirida.
- * Para evaluar la variación del contenido de humedad durante el tiempo de ensayo.
- * Para calcular el contenido de humedad inicial promedio del material.

De las 128 probetas destinadas para los ensayos de durabilidad se separaron al azar 64 (32 P y 32 PM) para los ensayos de biodegradación según lo indican la norma ASTM y la metodología propuesta por López & Deschamps. Con las probetas restantes (32 P y 32 PM) se realizaron ensayos aplicando las metodologías mencionadas con una modificación, la tinalización (triple esterilizado) del sustrato (26) y la del sustrato con las probetas (25).

La determinación de la variación del contenido de humedad del material endurecido y sin endurecer se realizó sobre un total de 48

probetas (24 P y 24 PM) para cada una de las metodologías sin modificación (Tabla 3.1).

La obtención del contenido de humedad inicial de las probetas P y PM permitió calcular el porcentaje de sustancia leñosa perdida por cada una de las probetas expuestas a degradación según la metodología ensayada, con y sin modificación.

Para la obtención de los valores de densidad aparente normal de la madera y del CMP, se evaluaron otras 256 probetas.

Tabla 3.1. Total de probetas y tipos de ensayos.

Probetas	Ensayos	Número de probetas
Sin tratar (P) Total: 124	Durabilidad natural y adquirida	64
	Variación del contenido de humedad	48
	Contenido de humedad inicial	12
Endurecidas (PM) Total: 124	Durabilidad natural y adquirida	64
	Variación del contenido de humedad	48
	Contenido de humedad inicial	12

3.1.1.2. Material Fúngico. La especie seleccionada fue *Pycnopus sanguineus* (L. ex Fr.) Murr., Bull., hongo xilófago cedido por el Instituto C. Spegazzini, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP.

La elección de *Pycnopus sanguineus* se debió a que en nuestro país fue hallado en asociación con salicáceas como *Salix alba*, sobre rollizos en el delta del río Paraná, en la zona del Río Carabelas y Canal VI (Provincia de Buenos Aires); sobre *Populus spp.* en Capital Federal; en Esquina, Corrientes, a orillas del río Guayquiraró sobre rollizos quemados de *Salix humboldtiana*; río Paranacito, islas del Ibicuy sobre rollizos estibados de *Salix alba* de un año de corte (28). Sobre rollizo semipodrido de *Populus spp.*,

INTA Delta (28); sobre *Salix spp.* y *Populus spp.* en el Noreste Argentino (29).

Asimismo, Wright & Deschamps en su trabajo "Deterioro fúngico de salicáceas en el Delta", concluyeron que *Pycnoporus sanguineus* produce valores elevados de decaimiento en tres meses, cuando se ensaya en laboratorio la pérdida de peso seco en madera de sauce álamo (*Salix alba var. calva*), (28).

3.1.2. Métodos

Las dos metodologías empleadas fueron la propuesta por López & Deschamps en el trabajo "Estudio comparativo de la patología de maderas de árboles cultivados en la provincia de Buenos Aires" (25) y la establecida por la norma ASTM D-2017, "*Standard Method of Accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods*", conocida como "*soil block*" (26).

3.1.2.1. Preparación del inóculo. Como medio de cultivo se empleó agar extracto de malta (20 g de agar - agar, 10 g de malta, 2 g de peptona y 1000 ml de agua destilada), esterilizado en autoclave a 1,5 kg/cm² de presión durante 20 minutos.

En forma previa a la siembra del inóculo en cajas de Petri, se adicionó a cada una de ellas 200 ml de una solución de estreptomocina en agua destilada estéril a 0,5%. El material fue cultivado en estufa a 27°C durante 15 días.

3.1.2.2. Preparación de los Frascos de Pudrición. En los frascos de pudrición se brindaron las condiciones requeridas para la biodegradación a través de un sustrato humedecido con agua destilada. Dicho sustrato, según López & Deschamps, se formó con 212 g de una mezcla de tierra vegetal y arena (166 g y 46 g, respectivamente), humedecidos por 43 ml de agua destilada, empleando en este caso 16 frascos. En forma preliminar, el sustrato fue secado durante 3 días a 105 ± 2°C y tamizado en malla de 0,5 mm.

Otro grupo de 16 frascos se llenó, según lo indica la norma ASTM, con 150 g de tierra vegetal seca al aire, de pH 7,7 y capacidad de campo de 39,7 a la que se le agregó 57 cm³ de agua destilada; en este caso el contenido de agua a agregar se determinó por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Vol. agua(cm}^3\text{)} = (1.30 A - \text{CHss}) \times [\text{Psi} / (100 + B)] \quad (1)$$

A(%): capacidad de campo.

CHss(%): contenido de humedad del suelo seco al aire.

Psi(g): peso del suelo seco al aire colocado en cada frasco.

Para determinar el valor de B se pesaron 150 gramos de suelo seco al aire, éste se colocó en estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 12 horas y posteriormente se pesó. Para obtener el contenido de humedad del suelo se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{CHss (\%)} = \frac{(\text{Psi} - \text{Psf})}{\text{Psf}} \times 100 \quad (2)$$

CHss(%): contenido de humedad del suelo seco al aire.

Psi(g): peso del suelo seco al aire.

Psf(g): peso anhidro del suelo.

Además de la tierra vegetal y el agua en cada frasco se colocaron 2 *feeders strips* (112 en total), que fueron tablillas cortadas de madera de álamo sin endurecer, de 3 mm de espesor y 20 mm de lado, usados para los ensayos de durabilidad y variación de contenido de humedad (26).

Los frascos se taparon con algodón envuelto en papel de aluminio (Foto 3.1) para evitar la deshumidificación del medio y se esterilizaron en autoclave a 1,5 kg/cm² de presión durante 30 minutos (30).

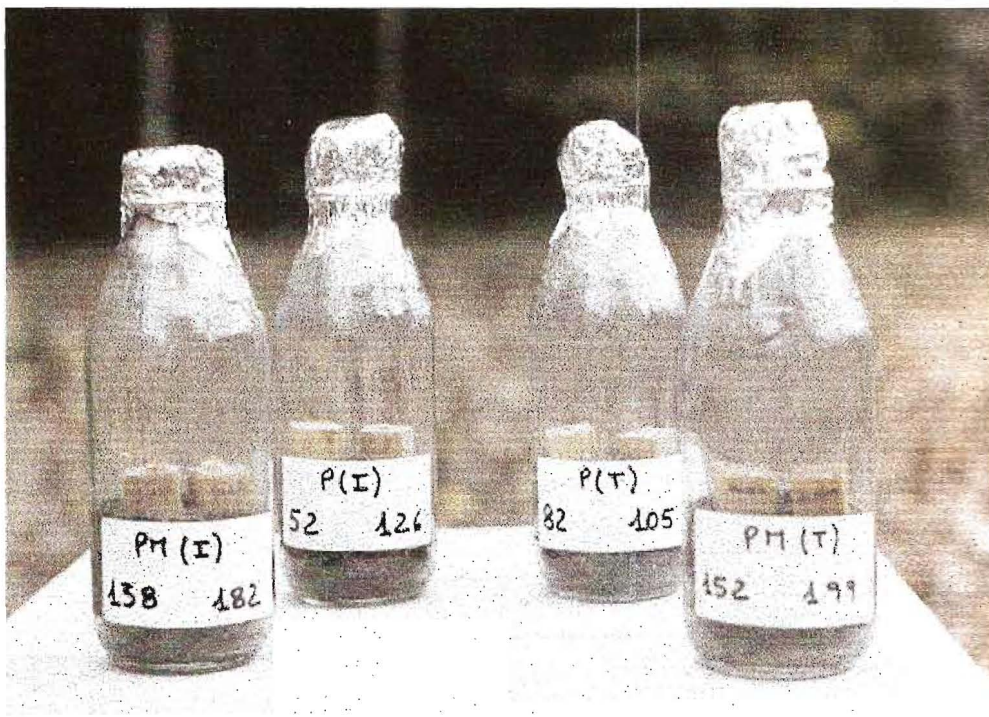


Foto 3.1. Frascos de pudrición. Madera sin tratar (P) y CMP (PM), Probetas inoculadas (I) y probetas testigo (T).

3.1.2.3. Acondicionamiento de las Probetas. De acuerdo con la metodología propuesta por la norma ASTM un grupo de 32 probetas (16 P y 16 PM) se pesó en balanza analítica para obtener su peso considerado como peso en equilibrio inicial (P_{ei}) y posteriormente se esterilizaron en autoclave, dentro de cajas de Petri, a 1 kg/cm^2 de presión durante 20 minutos.

Otras 32 probetas fueron secadas durante 3 días en estufa a 80°C . Luego se sacaron y pesaron diariamente hasta que la diferencia de peso entre dos pesadas consecutivas fue de $\pm 0,02$ gramos. Los valores obtenidos se consideraron como peso seco inicial (P_{si}); posteriormente se humectaron por inmersión en agua destilada durante 24 horas y se colocaron de a pares en los frascos enterradas hasta el 50% de su altura. Los frascos se taparon con tapones de algodón cubiertos por papel de aluminio (fotos 3.2 y 3.3) y se esterilizaron en autoclave a $1,5 \text{ kg/cm}^2$ de presión durante 30 minutos (25).

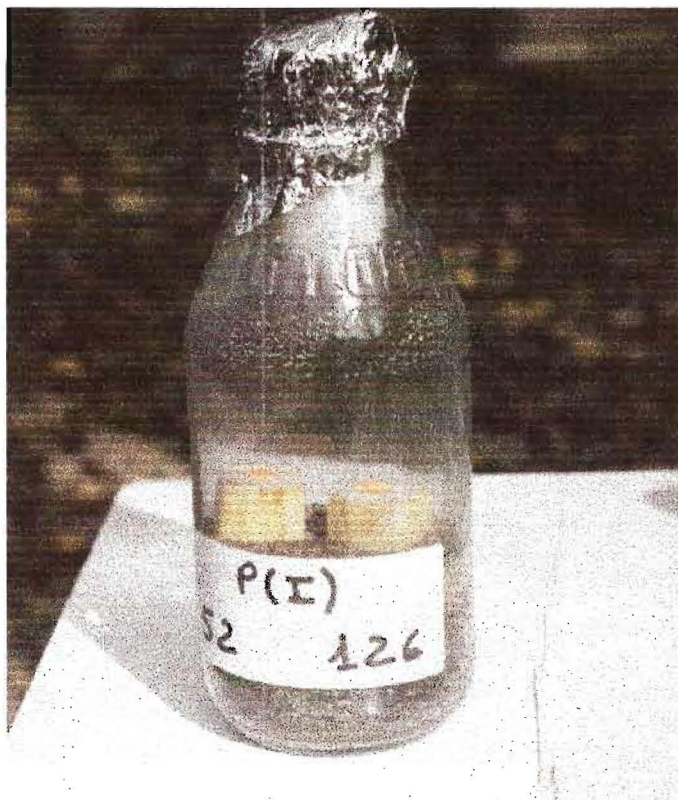


Foto 3.2. Frasco de pudrición, Probetas inoculadas.

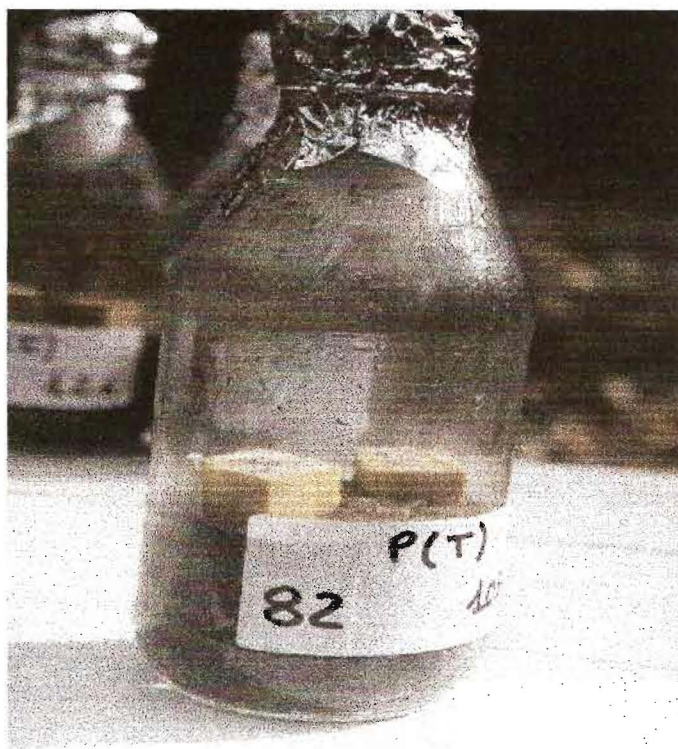


Foto 3.3. Frasco de pudrición, Probetas testigo.

3.1.2.4. Esterilización de los Materiales. Para la esterilización se compararon dos técnicas, por un lado una esterilización simple y por el otro un tindalizado (triple esterilización a intervalos de 24 hs), a los efectos de evaluar las posibles diferencias existentes en cuanto a la contaminación del material y a la predisposición de la madera y el CMP a la biodegradación.

3.1.2.5. Exposición del Material al Ataque Fúngico. La inoculación de las probetas (8 P y 8 PM por tratamiento) se realizó colocando sobre la cara transversal superior de cada una de ellas, trozos de micelio de 1 cm de diámetro, obtenidos de colonias de 15 días de desarrollo (25).

La inoculación según la norma ASTM se realizó con trozos de micelio fúngico colocados sobre el sustrato (tierra vegetal) próximo a cada *feeders strips*. Cubiertas las tablillas por las hifas del hongo (20-25 días) se colocaron las probetas (8 P y 8 PM por tratamiento) sobre ellas.

En ambos casos se trabajó con la misma cantidad de probetas (P y PM) sin inocular como material testigo y con las dos metodologías se efectuaron dos observaciones, a los 75 y a los 150 días, respectivamente.

3.1.3. Evaluación del Ensayo

Las metodologías ensayadas con las modificaciones propuestas (esterilización simple y tindalizado), junto a los dos tiempos de evaluación y la distribución del número de probetas para cada uno de ellos se detallan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Distribución de las probetas en los distintos tratamientos.

Método	Esterilización	Tiempo de ensayo (días)			
		75		150	
López & Deschamps	Simple	4 P (I)	4 P (T)	4 P (I)	4 P (T)
		4 PM (I)	4 PM (T)	4 PM (I)	4 PM (T)
	Tindalización	4 P (I)	4 P (T)	4 P (I)	4 P (T)
		4 PM (I)	4 PM (T)	4 PM (I)	4 PM (T)
ASTM D-2017	Simple	4 P (I)	4 P (T)	4 P (I)	4 P (T)
		4 PM (I)	4 PM (T)	4 PM (I)	4 PM (T)
	Tindalización	4 P (I)	4 P (T)	4 P (I)	4 P (T)
		4 PM (I)	4 PM (T)	4 PM (I)	4 PM (T)

P = probetas sin tratar PM = probetas del CMP

(I) = Probetas inoculadas (T) = Probetas testigos

La primer evaluación de pérdida de peso y de sustancia leñosa se realizó a los 75 días de iniciados los ensayos sobre el 50% de las probetas, mientras que en las restantes la lectura se efectuó a 150 días. Al final de cada período se procedió a la limpieza de las probetas con pincel a los efectos de eliminar los restos de micelio.

3.1.3.1. Método de López & Deschamps. De acuerdo con López & Deschamps, las probetas degradadas se colocaron en estufa a 75°C durante 3 días, posteriormente se pesó a diario con balanza analítica hasta comprobar una diferencia de $\pm 0,02$ gramos. Estos valores se consideraron como peso seco final (Psf) (25).

La evaluación de la pérdida de peso se realizó aplicando la fórmula de Leutritz:

$$PPPs(\%) = \frac{(P_{si} - P_{sf})}{P_{si}} \times 100 \quad (3)$$

PPPs(%): porcentaje de pérdida de peso referida al peso seco inicial de las probetas.

Psi(g): peso seco inicial de las probetas obtenido luego de permanecer 3 días en estufa a 80°C.

Psf(g): peso seco de las probetas cumplido el tiempo de ensayo y colocadas en estufa a 75°C por 2 días.

3.1.3.2. Norma ASTM D-2017. El material ensayado según ASTM se sacó de los frascos, se limpió y se dejó orear en ambiente bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Luego se pesó diariamente hasta comprobar diferencias de $\pm 0,02$ gramos. Los valores obtenidos fueron considerados como peso en equilibrio final (Pef).

En este caso la fórmula para el cálculo de la pérdida de peso fue la siguiente:

$$PPPh(\%) = \frac{(P_{ei} - P_{ef})}{P_{ei}} \times 100 \quad (4)$$

PPPh(%): pérdida porcentual de peso referida al peso en equilibrio inicial de las probetas.

Pei(g): peso de equilibrio higroscópico inicial de las probetas antes de ser expuestas a biodegradación.

Pef(g): peso de equilibrio higroscópico final de las probetas expuestas a biodegradación.

3.1.3.3. Fórmula de Borlando. Para la totalidad de las probetas, P y PM, ensayadas por ambas metodologías se calculó el porcentaje de sustancia leñosa perdida empleando la fórmula de Borlando (31):

$$PSL(\%) = \frac{(SLI - SLF)}{SLI} \times 100 \quad (5)$$

PSL(%): porcentaje de sustancia leñosa perdida.

SLI(g): sustancia leñosa inicial.

SLF(g): sustancia leñosa final.

La SLF se obtuvo luego de los ensayos, utilizando el peso de las probetas colocadas en estufa durante 2 días a $102 \pm 3^\circ\text{C}$.

Para el cálculo de la SLI se empleó la fórmula:

$$\text{SLI} = P_i - \left(P_i \times \frac{\text{Hih}}{100} \right) \quad (6)$$

SLI(g): sustancia leñosa inicial.

P_i (g): peso de equilibrio higroscópico inicial de las probetas para biodegradación.

Hih(%): contenido de humedad inicial en base húmeda.

Por su parte la humedad inicial se calculó aplicando la fórmula:

$$\text{Hih}(\%) = \frac{(P_i - P_o)}{P_i} \times 100 \quad (7)$$

Hih(%): contenido de humedad inicial en base húmeda.

P_i (g): peso de equilibrio higroscópico inicial de las probetas para contenido de humedad.

P_o (g): peso anhidro de las probetas para contenido de humedad, obtenido al pesarlas después de ser colocadas en estufa a $102 \pm 3^\circ\text{C}$ por 2 días.

La humedad inicial (Hih) se obtuvo a partir de una muestra de 12 probetas P y 12 PM tomadas como referencia para la totalidad de probetas ensayadas.

3.1.3.4. Variación del Contenido de Humedad de las Probetas. Los ensayos de variación de contenido de humedad de las probetas se realizaron para cada una de las metodologías de trabajo propuestas para los ensayos de durabilidad y por lo tanto, la esterilización del material y la preparación de los frascos de pudrición se realizó del modo descrito. Se trabajó sobre un total de 48 probetas (24 P y 24 PM) por método.

El tiempo total de ensayo fue de 150 días, con lecturas al inicio del ensayo, 25, 50, 75, 100 y 150 días. Como día 0 se consideró el contenido de humedad antes de la esterilización del material (25); para ASTM se calculó el contenido de humedad de las probetas luego de ser esterilizadas.

En cada uno de los tiempos de observación propuestos se extrajeron 8 probetas (4P y 4PM) por método de trabajo. El material se pesó en balanza analítica y posteriormente se colocó en estufa a $102 \pm 3^\circ\text{C}$ durante tres días para obtener el peso anhidro de cada una de las probetas y de este modo evaluar el porcentaje de humedad de las mismas en cada uno de los tiempos definidos y su variación con respecto al contenido de humedad del material al comenzar los ensayos.

Para las probetas que se usaron según el método de López & Deschamps se consideró, como contenido de humedad inicial, al porcentaje de agua en base anhidra que cada una de éstas absorbió luego de sumergirlas por 24 horas en agua destilada; por lo tanto luego de humectarlas se pesaron inmediatamente (25). Para las probetas usadas según ASTM el contenido de humedad inicial fue la humedad que tenían en equilibrio. Para evaluar el contenido de humedad en cada período se usó la siguiente fórmula:

$$\text{CHo}(\%) = \frac{(\text{Ph} - \text{Po})}{\text{Po}} \times 100 \quad (8)$$

CHo(%): contenido de humedad de las probetas en base anhidra.

Ph(g): peso húmedo correspondiente al día de observación (0, 25, 50, 75, 100, 150).

Po(g): peso anhidro (probetas en horno a $102 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 72 horas)

El número de probetas empleadas se detallan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Distribución de las probetas de humedad para cada tiempo de observación.

Método	Tipo de Probeta	Días					
		0	25	50	75	100	150
López &	P (madera)	4	4	4	4	4	4
Deschamps	PM (CMP)	4	4	4	4	4	4
ASTM	P (madera)	4	4	4	4	4	4
D-2017	PM (CMP)	4	4	4	4	4	4

3.1.3.5. Variación del Contenido de Humedad del Sustrato.

Simultáneamente con los ensayos de variación del contenido de humedad de las probetas, se evaluó también la variación del contenido de humedad del sustrato para cada metodología y en los tiempos definidos. Los ensayos se realizaron sobre un total de 48 frascos (24 para cada metodología).

Una vez extraídas las probetas de los frascos, éstos se pesaron. Los valores obtenidos se consideraron como peso húmedo; posteriormente se colocaron en estufa a $102 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 3 días, se pesaron nuevamente obteniendo el peso anhidro; se pesaron los frascos vacíos y se aplicó la fórmula siguiente:

$$\text{CHs(\%)} = \frac{(\text{Ph} - \text{Pfr}) - (\text{Po} - \text{Pfr})}{(\text{Po} - \text{Pfr})} \times 100 \quad (9)$$

CHs(%): contenido de humedad del sustrato.

Ph(g): peso húmedo del sustrato más el frasco.

Pfr(g): peso del frasco vacío.

Po(g): peso anhidro del sustrato más el frasco.

3.1.3.6. Análisis Estadístico. Al conjunto de datos de cada variable se le calcularon: la media, el desvío standard y el coeficiente de variabilidad, para el análisis de esta última variable se adoptó la clasificación propuesta por Pimentel Gómes menor del 10%, bajo; entre 10 y 20%, medio y mayor del 20%, alto (32).

Para la evaluación general de los datos de biodegradación del material inoculado, aplicando la fórmula de Borlando en el cálculo de la pérdida de peso(%), se empleó un diseño estadístico "factorial", de tres factores con dos niveles en cada factor (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Diseño factorial de dos niveles y tres factores.

Factores de Estudio	Niveles	
	inferior	superior
A- Tipo de madera	CMP	Sin tratar
B- Método de biodegradación	ASTM D-2017	López & Deschamps
C- Tiempo de exposición	75 días	150 días

Asimismo se realizó un análisis de la varianza con los valores de pérdida de peso del material inoculado y el material testigo sin inocular.

Para la evaluación de cada metodología por separado se realizó un análisis de la varianza de tres factores (madera, tiempo y hongo) con dos niveles cada uno, en el caso del factor hongo estos niveles fueron: testigo como nivel inferior e inoculado como nivel superior.

Para la evaluación de la variación de los contenidos de humedad de las probetas y del sustrato se realizó un análisis de la varianza de un factor (contenido de humedad) con varios niveles: 0, 25, 50, 75, 100 y 150 días.

En la evaluación de la esterilización se empleó un diseño factorial de cuatro factores (madera, método, tiempo y esterilización) con dos niveles, en el caso del factor esterilización estos niveles fueron: esterilización simple como nivel inferior y tindalizado (triple esterilización) como nivel superior.

En todos los casos la variable dependiente fue la "pérdida de peso" expresada en porcentaje.

3.1.3.7. Análisis Anatómico. En las probetas del ensayo de biodegradación el análisis anatómico se realizó a través de

observaciones en microscopio óptico (MO) y microscopio electrónico de barrido (MEB). En este último se trabajó sobre un total de 8 muestras a 150 días de ensayo y en los tres planos de estudio de cada muestra (radial, tangencial y transversal); el material observado se detalla en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Material observado en microscopio electrónico de barrido.

Muestra	Método de Ensayo	Días de Exposición	Probeta	Tratamiento de la Madera	Tipo de Exposición
1	López & Deschamps	150	P118	sin endurecer	inoculada
2	López & Deschamps	150	P187	sin endurecer	testigo
3	López & Deschamps	150	PM260	tratada	inoculada
4	López & Deschamps	150	PM32	tratada	testigo
5	ASTM D-2017	150	P96	sin endurecer	inoculada
6	ASTM D-2017	150	P2	sin endurecer	testigo
7	ASTM D-2017	150	PM118	tratada	inoculada
8	ASTM D-2017	150	PM245	tratada	testigo

3.1.3.8. Propiedades Físicas. En la evaluación de la densidad aparente normal (D_n) se aplicó la siguiente fórmula (33).

$$D_n(\text{g.cm}^{-3}) = \frac{P_{sa}(\text{g})}{V_{sa}(\text{cm}^3)} \quad (10)$$

$P_{sa}(\text{g})$ = peso de la probeta seca al aire

$V_{sa}(\text{cm}^3)$ = volumen de la probeta seca al aire

El contenido de humedad (CH) se determinó utilizando la fórmula (7), de acuerdo con la norma IRAM 9532 (34).

Las probetas se pesaron en balanza analítica con precisión de 0.01 gramos. El volumen se obtuvo por el método de desplazamiento de agua (7). El secado total de las probetas se realizó en un horno eléctrico provisto de termómetro y termostato a $102 \pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 72 horas.

3.2. Ensayos Finales

3.2.1. Materiales

3.2.1.1. Material Leñoso. Se trabajó, del mismo modo que en los ensayos preliminares, con probetas cúbicas de 20 mm de lado, de álamo (*Populus deltoides cv Stoneville 66*), endurecidas y sin endurecer. La madera fue obtenida de una plantación comercial, con turno de corta de 12 años, del delta del río Paraná, Provincia de Buenos Aires.

La cantidad de material obtenido fue: 120 probetas P y 120 probetas PM, numeradas correlativamente.

Las probetas P y PM fueron separadas en 2 grupos:

- * Para ensayos de durabilidad natural y adquirida.
- * Para calcular el contenido de humedad inicial promedio del material.

De las 120 probetas destinadas para los ensayos de durabilidad se clasificaron aquellas totalmente libre de defectos.

Se eligieron 96 probetas para biodegradación, ensayando 48 P y 48 PM.

La obtención del contenido de humedad inicial de las probetas se realizó a partir de una muestra de 60 probetas P y 60 probetas PM, para calcular el porcentaje de sustancia leñosa perdida por cada una de las probetas expuestas a degradación (31).

3.2.1.2. Material Fúngico. La especie seleccionada fue *Pycnoporus sanguineus* (L. ex Fr.) Murr., Bull., debido a los resultados satisfactorios hallados en los ensayos preliminares. La cepa fúngica fue cedida por el Instituto Spegazzini, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP.

3.2.2. Métodos

La metodología empleada fue la propuesta por López & Deschamps en el trabajo "Estudio comparativo de la patología de maderas de árboles cultivados en la provincia de Buenos Aires", seleccionada sobre la base de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares (25).

3.2.2.1. Preparación del inóculo. El inóculo se preparó de igual forma que la descrita en el punto 3.1.2.1. de los ensayos preliminares.

3.2.2.2. Preparación de los Frascos de Pudrición. En los frascos de pudrición se brindaron las condiciones requeridas para su biodegradación a través de un sustrato humedecido con agua destilada. Dicho sustrato, según López & Deschamps, fue compuesto por 212 g de una mezcla de tierra vegetal y arena (166 g y 46 g, respectivamente), humedecidos por 43 ml de agua destilada, empleando en este caso 60 frascos, conteniendo 2 probetas cada frasco. En forma preliminar, el sustrato fue secado durante 3 días a $102 \pm 3^\circ\text{C}$ y tamizado en malla de 0,5 mm (25).

3.2.2.3. Acondicionamiento de las Probetas. Las probetas se secaron durante 3 días en estufa a 80°C . Luego se extrajeron y pesaron diariamente hasta que la diferencia de peso entre dos pesadas consecutivas fue de ± 0.02 gramos. Los valores obtenidos se consideraron como peso seco inicial (Psi); posteriormente se humectaron por inmersión en agua destilada durante 24 horas y se colocaron de a pares en los frascos enterradas hasta el 50% de su altura. Los frascos se taparon con tapones de algodón cubiertos por

papel de aluminio y se esterilizaron en autoclave a 1,5 kg/cm² de presión durante 30 minutos.

3.2.2.4. Esterilización de los Materiales. Los materiales fueron sometidos a una esterilización simple.

3.2.2.5. Exposición del Material al Ataque Fúngico. La inoculación de las probetas se realizó colocando sobre la cara transversal superior de cada una de ellas, trozos de micelio de 1 cm de diámetro, obtenidos de colonias de 15 días de desarrollo. Efectuándose una observación a los 150 días.

3.2.3. Evaluación del Ensayo

La distribución de las 98 probetas libres de defectos seleccionadas de un total de 120, se detalla en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Distribución de las probetas en los distintos tratamientos.

	Inoculadas	Testigos
CMP	24	24
Madera sin tratar	24	24

La evaluación de pérdida de peso y de sustancia leñosa se realizó a los 150 días de iniciados los ensayos, limpiándose las probetas con pincel a los efectos de eliminar los restos de micelio.

3.2.3.1. Fórmula de Borlando. Para la totalidad de las probetas, P y PM, ensayadas se calculó el porcentaje de sustancia leñosa perdida empleando la fórmula de Borlando (31).

La humedad inicial (Hi) se obtuvo a partir de una muestra de 60 probetas P y 60 PM tomadas como referencia para la totalidad de probetas ensayadas.

3.2.3.2. Análisis Estadístico. Al conjunto de datos de cada variable se le calcularon: la media, el desvío standard y el coeficiente de

variabilidad, para el análisis de esta última variable se adoptó la clasificación propuesta por Pimentel Gómes (32).

Para la evaluación general de los datos de biodegradación, aplicando la fórmula de Borlando en el cálculo de la pérdida de peso(%), se empleó un diseño factorial de dos factores a dos niveles (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Diseño factorial de dos factores a dos niveles.

Factores de Estudio	Niveles	
	inferior	superior
Tipo de madera	CMP	Sin tratar
Acción fúngica	Testigo	Inoculada

En todos los casos la variable dependiente fue la “pérdida de peso” expresada en porcentaje.

3.2.3.3. Análisis Anatómico. Las probetas biodegradadas se analizaron con el objeto de determinar el tipo de degradación, a través de observaciones en microscopio electrónico de barrido (MEB) sobre cortes del material con bisturí, montados sobre platinas sin tratamiento previo y posteriormente metalizadas con un baño de oro - paladio. Además se estudió el material en microscopio óptico (MO), fijado con formol - alcohol - ácido acético (FAA), los mismos fueron incluidos en Praplast y los cortes (10-12 μm) fueron teñidos con safranina *fast - green*.

3.2.3.4. Clases de Resistencia. La evaluación de la durabilidad natural y adquirida de la madera de álamo se realizó siguiendo lo especificado en la norma ASTM D-2017 en la que se definen clases de resistencia a la biodegradación del material de ensayo en función de su pérdida de peso o de su peso residual (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Tipo de resistencia en función de la pérdida de peso.

Pérdida de peso (%)	Peso residual (%)	Tipo de resistencia
0 -10	90 - 100	altamente resistente
11 -24	76 - 89	resistente
25 -44	56-75	moderadamente resistente
45 o más	55 o menos	no resistente

CAPITULO 4.
RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Ensayos Preliminares

4.1.1. Biodegradación

4.1.1.1. Análisis con Fórmula de Borlando del Material Inoculado. El análisis de biodegradación aplicando la fórmula de Borlando, basada en la sustancia leñosa inicial obtenida por fórmula (indirectamente) y la sustancia leñosa final obtenida por pesada directa del material biodegradado, fue realizado aplicando un diseño factorial, empleando la totalidad de los datos del material inoculado.

En segundo lugar se realizó un análisis de la varianza para determinar las diferencias significativas entre los niveles de los tres factores y sus interacciones de segundo orden.

El cálculo de la pérdida de peso (variable dependiente) empleando la fórmula de Borlando elimina el efecto de la variación de peso debido a contenidos de humedad distintos durante el ensayo.

Análisis del diseño factorial

Los efectos medios estimados para la variable dependiente, se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Efectos estimados para pérdida de peso(%).

Causa	Efectos Estimados	+/-
Media General	28,33	1,27
A: Madera	28,24	2,54
B: Método	16,32	2,54
C: Tiempo	10,56	2,54
AB: Madera x Método	11,63	2,54
AC: Madera x Tiempo	5,93	2,54
BC: Método x Tiempo	3,27	2,54

El error standard está basado sobre el error puro con 56 grados de libertad

En la tabla se puede observar que el mayor efecto (28,24%) se logró con la madera endurecida en relación la madera sin impregnar, lo que nos indicó una gran diferencia entre la durabilidad de ambos.

El factor método fue el segundo en importancia en cuanto a su efecto (16,32%). El factor tiempo fue el que menor efecto individual ejerció (10,56%).

La interacción madera - método tuvo un efecto similar al factor individual del tiempo (11,63%), siendo superior al efecto combinado de madera y tiempo (5,93%) y al efecto de la interacción método - tiempo (3,27%).

La tabla anterior se completa con la tabla 4.2 que expresa el análisis de la varianza para detectar la significación o no de los efectos individuales y de las interacciones.

Tabla 4.2. Análisis de la varianza del diseño factorial original para pérdida de peso(%).

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
A: Madera	12763,1	1	12763,1	122,0	0,0000*
B: Método	4261,32	1	4261,32	40,74	0,0000*
C: Tiempo	1784,53	1	1784,53	17,06	0,0001*
AB	2163,99	1	2163,99	20,69	0,0000*
AC	563,53	1	563,53	5,39	0,0239*
BC	171,58	1	171,58	1,64	0,2055
Lack of fit	53,53	1	53,53	0,51	0,4773
Error Puro	5856,9	56	104,59		
Total (corr.)	27618,4	63			

* Factores e interacciones significativos.

R-cuadrado = 78,60%

R-cuadrado (ajustado para los grados de libertad) = 76,35%

Error Standard = 10,18

Error medio absoluto = 6,08

De esta tabla se desprende que las interacciones madera - método (AB) y madera - tiempo (AC) fueron significativas.

La interacción método - tiempo fue no significativa. Los factores individuales madera, método y tiempo fueron significativos.

El desajuste no significativo indicó la validez del modelo elegido para el análisis de los resultados.

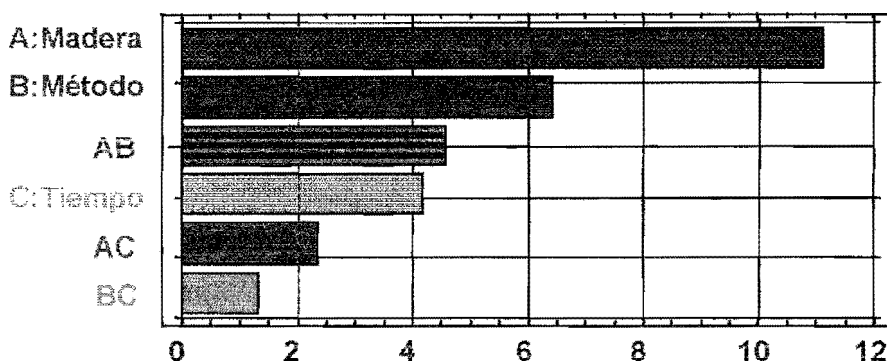


Figura 4.1. Gráfico estandarizado para PERDIDA de PESO (%).

El gráfico 4.1 muestra los efectos y la significación o no de los factores individuales y sus interacciones, ilustrando los valores de las tablas 4.1 y 4.2.

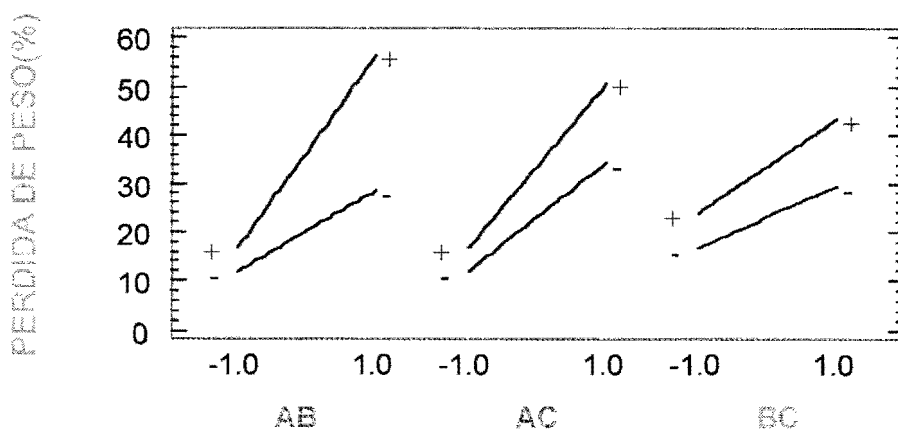


Figura 4.2. Gráfico de las Interacciones para PERDIDA DE PESO(%)

El gráfico de las interacciones (figura 4.2) ilustra la diferencia entre aquella no significativa, con líneas paralelas (letras color azul), de las interacciones significativas con líneas que se cortan (color rojo).

Eliminando la interacción no significativa, no varía el análisis el análisis en forma importante (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Análisis de la varianza del diseño factorial final para pérdida de peso(%).

	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
A: Madera	12763,1	1	12763,1	122,03	0,0000*
B: Método	4261,32	1	4261,32	40,74	0,0000*
D: Tiempo	1784,53	1	1784,53	17,06	0,0001*
AB	2163,99	1	2163,99	20,69	0,0000*
AC	563,52	1	563,52	5,39	0,0239*
<i>Lack of fit</i>	225,10	2	112,55	1,08	0,3478
Error Puro	5856,9	56	104,59		
Total (corr.)	27618,4	63			

* Factores e interacciones significativos.

R-cuadrado = 77,98%

R-cuadrado (ajustado para los grados de libertad) = 76,08%

Error Standard del estudio = 10,24

Error absoluto de la media = 6,02

El R^2 indica que la recta propuesta por el análisis estadístico explica casi el 78% de los resultados, que si bien es menor de 90% sigue siendo aceptable para este tipo de experimentos (35).

Análisis de la varianza con fórmula de Borlando

El análisis de la varianza corrobora que los tres factores individuales y las interacciones madera – método y madera - tiempo son significativos, siendo la interacción método - tiempo no significativa (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%). Fórmula de Borlando.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Efectos Principales					
A: Madera	14613,5	1	14613,5	321,02	0,0000*
B: Método	5366,84	1	5366,84	117,89	0,0000*
C: Tiempo	2519,41	1	2519,41	55,34	0,0000*
Interacciones					
AB	1491,41	1	1491,41	32,76	0,0000*
AC	246,76	1	246,76	5,42	0,0235*
BC	26,38	1	26,38	0,58	0,4496
Residual	2594,79	57	45,52		
Total(corr.)	26859,1	63			
Error puro					

* Factores e interacciones significativas para el 95% de confianza.

En la tabla 4.5 se muestran los valores medios, el error standard y los límites de confianza al 95%, para los tres factores de estudio y sus niveles superior e inferior.

Tabla 4.5. Valores medios de pérdida de peso(%) de los factores individuales.

Nivel	Cantidad	Media	Error Standard	Límite Inferior	Límite Superior
Media general	64	27,34			
Madera					
Madera	32	42,45	1,19	40,06	44,84
CMP	32	12,23	1,19	9,84	14,61
Método					
ASTM	32	18,18	1,19	15,79	20,57
L & D	32	36,49	1,19	34,11	38,88
Tiempo					
75 días	32	21,06	1,19	18,67	23,45
150 días	32	33,61	1,19	31,22	36,00

En la tabla 4.6 se muestran los valores medios, el error standard y los límites superior e inferior, al 95% de confianza, para las tres interacciones de segundo orden.

Tabla 4.6. Valores medios de pérdida de peso(%) de las Interacciones.

Nivel	Cant.	Media	Error Standar	Límite Inferior	Límite Superior
Interacción Madera - Método					
Sin Tratar x ASTM	16	7,89	1,68	4,52	11,27
Sin Tratar x L&D	16	16,55	1,68	13,18	19,93
CMP x ASTM	16	28,46	1,68	25,08	31,84
CMP x L & D	16	56,43	1,68	53,05	59,81
Interacción Madera - Tiempo					
Sin Tratar x 75 días	16	7,91	1,68	4,54	11,29
Sin Tratar x150días	16	16,54	1,68	13,16	19,91
CMP x 75 días	16	34,21	1,68	30,83	37,59
CMP x 150 días	16	50,68	1,68	47,31	54,06
Interacción Método - Tiempo					
ASTM x 75 días	16	12,55	1,68	9,17	15,92
ASTM x 150 días	16	23,81	1,68	20,43	27,19
L & D x 75 días	16	29,58	1,68	26,20	32,96
L & D x 150 días	16	43,41	1,68	40,03	46,79

Las figuras 4.3. 4.4. y 4.5 ilustran los puntos medios, los intervalos de confianza y en consecuencia, las diferencias significativas entre el nivel superior y el inferior de los tres factores de estudio.

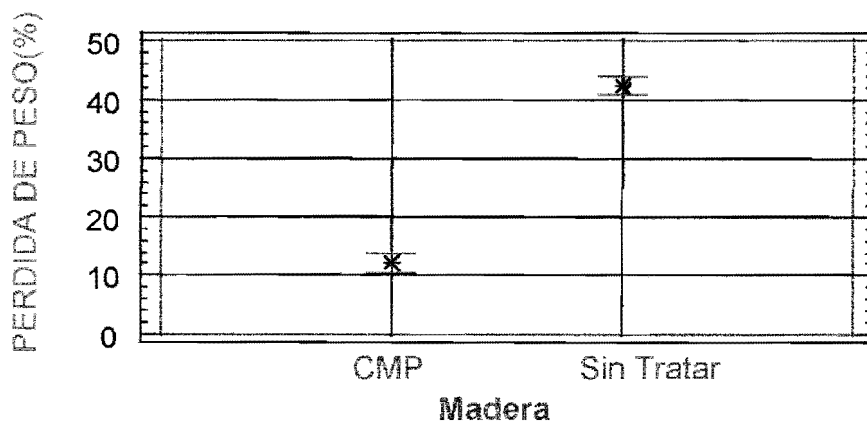


Figura 4.3. Medias e Intervalos de Confianza para el 95% del factor madera.

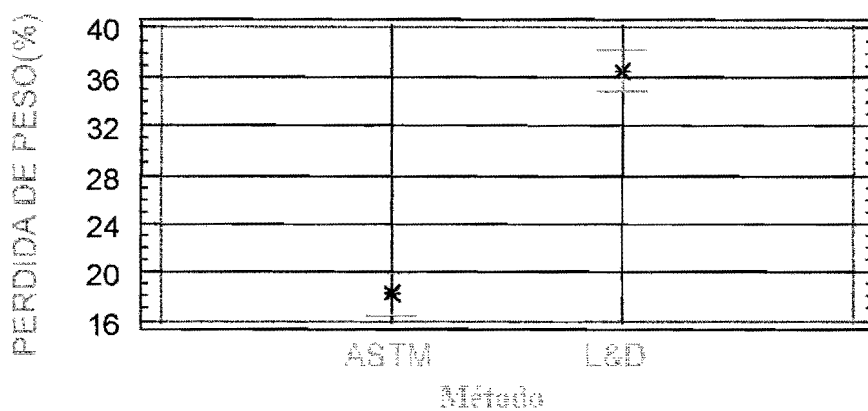


Figura 4.4. Medias e Intervalos de Confianza para el 95% del factor Método.

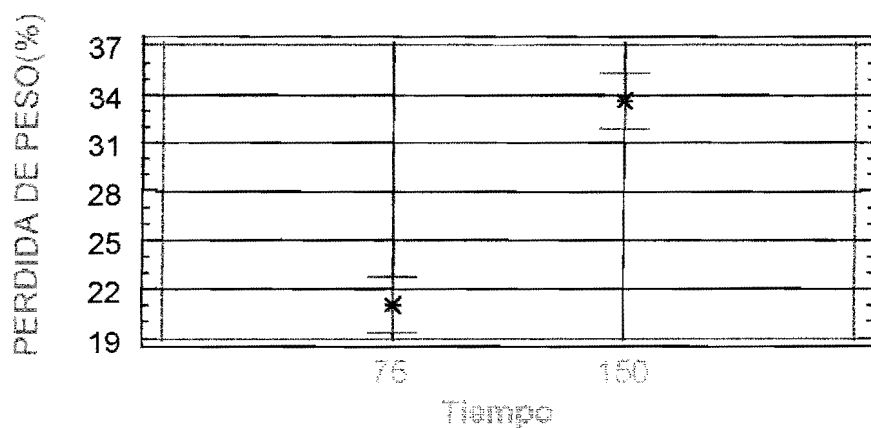


Figura 4.5. Medias e Intervalos de Confianza para el 95% del factor Tiempo.

En primer lugar se ubicó el contraste entre la madera y el CMP, con un 30% más de deterioro de la madera de álamo con respecto al CMP (42% y 12%, respectivamente), indicándonos *a priori* que este último resiste mejor al ataque fúngico que la madera del mismo clon de álamo sin tratamiento.

En segundo lugar se observó el contraste entre los métodos, produciendo un 18% más de degradación el método propuesto por López & Deschamps que ASTM (36% y 18%, respectivamente), señalando al primero como mucho más agresivo que el segundo.

El contraste cercano al 12% producido en los ensayos a 150 días con respecto a los 75, nos indica que el mayor lapso de exposición es un tiempo más conveniente para este tipo de ensayo. Se dieron valores de degradación del 21% a los 75 días y del 33% a los 150 días de exposición.

4.1.1.2. Método de ASTM D-2017 con Fórmula de Borlando. Los cálculos se hicieron sobre los datos originales obtenidos de los ensayos según norma ASTM D-2017, incluyendo el material empleado como testigo. En primer lugar se analiza la tabla 4.7 con los valores medios y sus coeficientes de variabilidad. En la segunda parte se presentan los datos a través de un análisis de la varianza.

Valores medios y coeficientes de variabilidad.

La tabla 4.7 muestra los datos analizados por separado entre el material esterilizado simple y el tinalizado (triple esterilización), empleando 4 repeticiones por tratamiento.

Tabla 4.7. Pérdida de peso por fórmula de Borlando según norma ASTM.

Ensayo de Biodegradación			CMP		Madera	
			Sin Tratar		Sin Tratar	
Fórmula de Borlando y			Pp(%)	Pp(%)	Pp(%)	Pp(%)
Norma ASTM D-2017			75	150	75	150
			días	días	días	días
Inoculada	Esterilizado	Media	4,73	11,51	21,20	38,56
		simple	CV(%)	67,29	47,62	19,89
	Tindalizado	Media	5,56	11,80	16,40	33,39
		CV(%)	89,83	44,08	70,53	30,76
Testigo	Esterilizado	Media	1,65	2,68	0,57	1,42
		simple	CV(%)	37,63	55,06	110,0
	Tindalizado	Media	1,75	3,23	3,13	6,53
		CV(%)	17,01	11,46	66,15	51,07

Los coeficientes de variabilidad fueron medios, altos y muy altos. En este ensayo se trabajó con las mismas 64 probetas evaluadas según la fórmula de pérdida de peso que propone la norma ASTM.

Las probetas testigos prácticamente no manifestaron pérdidas de peso a los 150 días, lo que indica que el material no se contaminó con cepas de hongos xilófagos extraños al ensayo y que no tuvo influencia la hidratación o deshidratación de las mismas.

La pérdida de peso sigue siendo mayor a los 150 días que a los 75 días de ensayo y mayor en el material sin endurecer que al endurecido, mostrando valores con rangos muy acotados.

En las probetas endurecidas la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 4 y 5% y en el 11% a los 150 días de exposición.

En las probetas de madera sin tratar la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 16 y 21% y entre el 33 y 38% a los 150 días de exposición.

La tabla 4.8 muestra el análisis sin diferenciar por método de esterilización, empleando aquí 8 repeticiones por tratamiento.

Tabla 4.8. Análisis con probetas esterilizadas simples y tindalizadas, fórmula de Borlando, norma ASTM.

Biodegradación		CMP		Madera Sin Tratar	
		Pp(%)	Pp(%)	Pp(%)	Pp(%)
Fórmula de Borlando y		75 días	150 días	75 días	150 días
Norma ASTM D-2017					
Inoculada	Media	5,14	11,65	18,80	35,97
	CV(%)	(75,85)	(42,47)	(44,99)	(31,11)
Testigo	Media	1,70	2,96	1,85	3,97
	CV(%)	(26,70)	(35,14)	(106,47)	(88,85)

Los coeficientes de variabilidad fueron medios, altos y muy altos. En este ensayo se trabajó con las mismas 64 probetas evaluadas según la fórmula de pérdida de peso propuesta por la norma ASTM D-2017.

Análisis de la varianza.

En la tabla 4.9 se muestra el análisis de la varianza para la metodología de la norma ASTM D-2017 aplicando la fórmula de Borlando.

Tabla 4.9. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, norma ASTM.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Efectos Principales					
A: Madera	1532,14	1	1532,14	46,60	0,0000*
B: Hongo	3730,77	1	3730,77	113,4	0,0000*
C: Tiempo	732,65	1	732,65	22,28	0,0000*
Interacciones					
AB	1354,98	1	1354,98	41,21	0,0000*
AC	132,88	1	132,88	4,04	0,0491*
BC	412,49	1	412,49	12,54	0,0008*
Residual	1874,25	57	32,88		
Total(corr.)	9770,16	63			

* Factores e interacciones significativas para el 95% de confianza.

En el análisis de esta tabla se observa que existen diferencias significativas entre los niveles de los tres factores: madera, hongo y tiempo, así como también en sus interacciones de segundo grado. La interacción madera por tiempo, si bien es significativa, está al límite (muy cercana a 0.05) para el 95% de confianza.

Los valores medios de los niveles en cada factor y sus diferencias significativas, para el 95% de confianza, se observan en la tabla 4.10.

ensayos según López & Deschamps, incluyendo dos datos de pérdida de peso del material testigo. En primer lugar se analiza la tabla 4.11 con los valores medios y sus coeficientes de variabilidad. En la segunda parte se presentan los datos a través de un análisis de la varianza.

Valores medios y coeficientes de variabilidad.

La tabla 4.11 muestra los datos analizando por separado el material esterilizado y el tindalizado, empleando 4 repeticiones por tratamiento.

Tabla 4.11. Pérdida de peso, fórmula de Borlando, López & Deschamps.

Ensayo de Biodegradación Fórmula de Borlando y López & Deschamps			Madera Sin Tratar		CMP		
			Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	
			Esterilizado	Media	8,78	65,28	16,18
	simple	CV(%)	16,79	20,05	30,38	58,28	
Inoculada	Tindalizado	Media	51,32	69,96	12,57	36,07	
		CV(%)	22,94	14,80	83,93	77,35	
Testigo	Esterilizado	Media	3,03	13,47	7,27	9,42	
		simple	CV(%)	96,72	57,21	42,83	145,81
	Tindalizado	Media	6,72	9,57	6,53	9,07	
		CV(%)	61,73	42,70	37,34	69,42	

Las probetas testigo sufrieron pérdidas de peso más importantes que para ASTM, llegando a valores aproximados al 9% a los 150 días de ensayo.

La pérdida de peso sigue siendo mayor a los 150 días con respecto a los 75 días de ensayo y mayor en el material sin endurecer con respecto al endurecido, mostrando valores con rangos muy acotados.

En las probetas endurecidas la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 12 y 16% y entre el 28 y 36% a los 150 días de exposición.

En las probetas sin tratar la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 49 y 51% y entre el 65 y 70% a los 150 días de exposición.

La tabla 4.12 muestra el análisis sin diferenciar entre el material esterilizado y tindalizado, empleando 8 repeticiones por tratamiento.

Tabla 4.12. Análisis con probetas esterilizadas simple y tindalizadas, fórmula de Borlando, López & Deschamps.

Ensayo de Biodegradación Fórmula de Borlando y López & Deschamps		CMP		Madera Sin Tratar	
		Pp(%) 75 días	Pp(%) 150 días	Pp(%) 75 días	Pp(%) 150 días
Inoculada	Media	13,77	32,03	50,05	67,62
	CV(%)	(62,92)	(67,42)	(18,95)	(16,58)
Testigo	Media	6,85	9,25	5,14	11,52
	CV(%)	(36,83)	(103,39)	(76,24)	(52,78)

Con el doble de repeticiones por tratamiento con respecto al análisis de la tabla 4.12 se siguen dando los coeficientes de variabilidad medios y altos, lo que indicaría la necesidad de seguir aumentando el número de repeticiones.

Análisis de la varianza.

En la tabla 4.13 se muestra el análisis de la varianza para la metodología de López & Deschamps, aplicando la fórmula de Borlando.

Tabla 4.13. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, López & Deschamps.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Efectos Principales					
A: Madera	5484,98	1	5484,98	48,55	0,0000*
B: Hongo	16927,8	1	16927,8	149,85	0,0000*
C: Tiempo	1922,0	1	1922,0	17,01	0,0001*
Interacciones					
AB	5172,22	1	5172,22	45,78	0,0000*
AC	0,52	1	0,52	0,00	0,9458
BC	638,47	1	638,47	5,65	0,0208*
Residual	6439,21	57	112,96		
Total(corr.)	36585,2	63			

* Factores e interacciones significativas para el 95% de confianza.

En esta tabla se observa que existen diferencias significativas entre los niveles de los tres factores: madera, hongo y tiempo, como así también en sus interacciones madera por hongo y hongo por tiempo, no siendo significativa la interacción madera por tiempo.

Los valores medios de los niveles en cada factor y sus diferencias significativas se observan en la tabla 4.14.

Tabla 4.14. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), fórmula de Borlando, López & Deschamps.

Para Madera			
Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
CMP	32	15,06	X
Sin Tratar	32	33,58	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Sin Tratar - CMP		18,51*	5,32
Para Hongo			
Hongo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
Testigo	32	8,06	X
Inoculada	32	40,58	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Inoculada-Testigo		32,52*	5,32
Para Tiempo			
Tiempo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
75 días	32	18,84	X
150 días	32	29,80	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
75 días – 150 días		-10,96*	5,32

* denota diferencias estadísticamente significativas.

En la tabla 4.14 se observan diferencias significativas entre los niveles de los tres factores, encontrándose los mayores valores de pérdida de peso(%) en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, con contrastes de 18,5%; 32,5% y 11%, respectivamente.

En todos los niveles y factores, los valores de pérdida de peso(%) superaron ampliamente a los obtenidos con la metodología propuesta por la norma ASTM D-2017 (Tabla 4.10).

4.1.1.4. Método y fórmula de ASTM D-2017. Hay que considerar que en este ensayo no se toman en consideración las variaciones del contenido de humedad de las probetas, ya que para la obtención de la pérdida de peso porcentual se considera la diferencia en peso de la probeta en equilibrio higroscópico, antes y después de la biodegradación, a los 75 y 150 días respectivamente, con respecto al peso en equilibrio inicial.

Valores medios y coeficientes de variabilidad

Los valores promedios y los coeficientes de variabilidad se muestran en la tabla 4.15. En los cuadros que no hay valores, se observó que el material de estudio no experimentó pérdida de peso.

Tabla 4.15. Porcentaje de pérdida de peso según norma ASTM D-2017.

Ensayo de Biodegradación Norma ASTM D-2017			CMP		Madera Sin Tratar	
			Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	Pp(%) 75días	Pp(%) 150días
Inoculada	Esterilizado simple	Media	2,95	5,98	21,52	32,00
		CV(%)	83,14	103,95	20,88	44,73
	Tindalizado	Media	5,11	7,29	16,80	26,61
		CV(%)	94,92	33,84	66,2	43,08
Testigo	Esterilizado simple	Media	0,92	-	1,76	-
		CV(%)	60,34	-	35,10	-
	Tindalizado	Media	0,66	-	3,89	-
		CV(%)	60,02	-	36,18	-

En esta tabla se observa que los coeficientes de variabilidad en todos los casos fueron elevados, lo que nos estaría mostrando la necesidad de aumentar el número de repeticiones. La norma ASTM D-2017 recomienda trabajar con 4 repeticiones por ensayo, que fue el número de repeticiones utilizado en esta etapa. Se evaluaron un total de 64 probetas.

Las probetas testigo prácticamente no manifestaron pérdidas de peso. Algunas de ellas aumentaron de peso debido a su hidratación, estos valores se analizan posteriormente a partir del punto 4.1.2.

En las probetas endurecidas, la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 3 y 5% y el 6 y 7% para los 150 días de exposición.

En las probetas sin tratar la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 17 y 21% y el 27 y 32% para los 150 días de exposición.

No hubo diferencias en cuanto al material esterilizado simple y tindalizado, este último dio valores levemente más altos para las probetas endurecidas y un poco más bajos para las probetas sin tratar con respecto al material esterilizado.

El análisis global de todo el material puede ser observado en la tabla 4.16. donde se realizaron 8 repeticiones por tratamiento.

Tabla 4.16. Análisis de las probetas esterilizadas y tindalizadas, norma ASTM.

Ensayo de Biodegradación		CMP		Madera Sin Tratar	
		Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	Pp(%) 75días	Pp(%) 150días
Norma ASTM D-2017	Media	3,87	6,64	19,16	29,31
	CV(%)	(9,06)	(64,64)	(43,16)	(42,3)
Testigo	Media	0,79	-	2,82	-
	CV(%)	(59,29)	-	(53,84)	-

Sólo en CMP inoculado y con 75 días de exposición se verificó un bajo coeficiente de variabilidad, mientras que en los restantes fue elevado.

Análisis de la varianza

En la tabla 4.17 se muestra el análisis de la varianza para la metodología de la norma ASTM D-2017 aplicando la fórmula que propone la misma norma.

Tabla 4.17. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), método y fórmula ASTM.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Efectos Principales					
A: Madera	1630,54	1	1630,54	51,10	0,0000*
B: Hongo	3024,18	1	3024,18	94,78	0,0000*
C: Tiempo	93,84	1	93,84	2,94	0,0918
Interacciones					
AB	1316,96	1	1316,96	41,27	0,0000*
AC	24,60	1	24,60	0,77	0,3836
BC	285,35	1	285,35	8,94	0,0041*
Residual	1818,71	57	31,90		
Total(corr.)	8194,2	63			

* Factores e interacciones significativas para el 95% de confianza.

En el análisis de esta tabla se observa que existen diferencias significativas entre los niveles de los factores madera y hongo, no siendo significativas las diferencias entre los dos niveles del factor tiempo. Las interacciones madera - hongo y hongo - tiempo fueron significativas, mientras que la interacción madera - tiempo no fue significativa, para el 95% de confianza.

Los valores medios de los niveles en cada factor y sus diferencias significativas al 95% de confianza, se observan en la tabla 4.18.

Tabla 4.18. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), método y fórmula ASTM.

Para Madera			
Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
CMP	32	2,72	X
Sin Tratar	32	12,82	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Sin Tratar - CMP		10,09*	2,82
Para Hongo			
Hongo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
Testigo	32	0,90	X
Inoculada	32	14,64	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Inoculada - Testigo		13,74*	2,82
Para Tiempo			
Tiempo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
75 días	32	6,56	X
150 días	32	8,98	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
75 días – 150 días		-2,42	2,82

* denota diferencias estadísticamente significativas.

En la tabla 4.18 se observa que existen diferencias significativas entre los niveles de los factores madera y hongo, no existiendo diferencias significativas entre los dos tiempos empleados, encontrándose los mayores valores de pérdida de peso(%) en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, siendo el contraste de este último no significativo con respecto a 75 días de exposición. Corresponde observar que los contrastes fueron del 10% para madera, del 14% para hongo y del sólo el 2% para tiempo.

4.1.1.5. Método y fórmula según López & Deschamps. Este ensayo minimiza el efecto de la variación del contenido de humedad de las probetas en los cálculos. Sin embargo, cierta humedad sigue presente, ya que el cálculo se realiza sobre la base de la diferencia de peso antes y después de la degradación, secando las probetas en horno a 80 y 75°C, respectivamente, no siendo suficiente para eliminar la totalidad del agua higroscópica de las mismas.

Valores medios y coeficientes de variabilidad

En la tabla 4.19 se muestran los valores promedios y los coeficientes de variabilidad de la pérdida de peso(%) experimentada por las probetas tratadas según la metodología de López & Deschamps y aplicando la fórmula que los mismos autores proponen.

La ausencia de algunos valores de coeficientes de variabilidad se debe a que el cálculo del promedio se hizo sobre dos probetas solamente, por pérdida de las restantes.

Tabla 4.19. Porcentaje de pérdida de peso según López & Deschamps.

Ensayo de Biodegradación		CMP		Madera		
		Sin Tratar		Sin Tratar		
López & Deschamps		Pp(%)	Pp(%)	Pp(%)	Pp(%)	
		75días	150días	75días	150días	
Inoculada	Esterilizado	Media	16,7	24,9	46,50	62,57
	simple	CV(%)	28,4	64,49	17,41	22,34
	Tindalizado	Media	12,25	33,7	57,21	65,16
		CV(%)	91,4	85,43	18,41	22,05
Testigo	Esterilizado	Media	7,34	19,57	4,72	8,90
	simple	CV(%)	39,66	-	73,70	79,64
	Tindalizado	Media	6,81	6,91	7,58	3,08
		CV(%)	28,46	99,47	50,67	-

Los coeficientes de variabilidad en todos los casos fueron elevados, lo que nos estaría demostrando la necesidad de aumentar

el número de repeticiones, se trabajó con 4 repeticiones por ensayo a fin de poder compararlo con el método propuesto por la norma ASTM, ya que López & Deschamps no especifican el número de repeticiones. Se evaluaron un total de 64 probetas.

Las probetas testigo prácticamente manifestaron una pérdida de peso muy baja, entre 5 y 8%, con valores extremos del 19 y 3% para las probetas tratadas y esterilizadas y las tindalizadas sin tratamiento, respectivamente.

La pérdida de peso fue mayor a los 150 días con respecto a los 75 días de ensayo y mayor aún en el material sin endurecer con respecto al endurecido.

En las probetas endurecidas la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 12 y 16% y el 25 y 33% para los 150 días de exposición.

En las probetas sin tratar la pérdida de peso a los 75 días se ubicó entre el 47 y 57% y el 62 y 65% para los 150 días de exposición.

No hubo diferencias en cuanto al material esterilizado simple y tindalizado.

El análisis global de todo el material tratado puede ser observado en la tabla 4.20, con 8 repeticiones por tratamiento.

Tabla 4.20. Análisis de las probetas esterilizadas y tindalizadas según López & Deschamps.

Ensayo de Biodegradación López & Deschamps		CMP		Madera Sin Tratar	
		Pp(%) 75 días	Pp(%) 150 días	Pp(%) 75 días	Pp(%) 150 días
Inoculada	Media	13,75	29,28	51,86	63,87
	CV(%)	(67,11)	(75,54)	(20,08)	(20,66)
Testigo	Media	7,03	11,13	6,35	5,99
	CV(%)	(31,09)	(78,89)	(58,36)	(102,88)

En la tabla se observa que los coeficientes de variabilidad siguen siendo elevados aún con 8 repeticiones por tratamiento.

Análisis de la varianza

En la tabla 4.21 se muestra el análisis de la varianza para la metodología de López & Deschamps aplicando la fórmula propuesta por los mismos autores.

Tabla 4.21. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%), método y fórmula de López & Deschamps.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Efectos Principales					
A: Madera	4831,29	1	4831,29	43,24	0,0000*
B: Hongo	17127,0	1	17127,0	153,29	0,0000*
C: Tiempo	820,39	1	820,39	7,34	0,0089*
Interacciones					
AB	5758,53	1	5758,53	51,54	0,0000*
AC	28,59	1	28,59	0,26	0,6149
BC	698,80	1	698,80	6,25	0,0153*
Residual	6368,42	57	111,72		
Total(corr.)	35633,0	63			

* Factores e interacciones significativas para el 95% de confianza.

En el análisis de esta tabla se observa que existen diferencias significativas entre los niveles de los tres factores: madera, hongo y tiempo, así como también en sus interacciones madera - hongo y hongo - tiempo, no siendo significativa la interacción madera - tiempo.

Los valores medios de los niveles en cada factor y sus diferencias significativas, al 95% de confianza, se observan en la tabla 4.22.

Tabla 4.22. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%), método y fórmula de López & Deschamps.

Para Madera			
Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
CMP	32	14,63	X
Sin Tratar	32	32,01	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Sin Tratar - CMP		17,37*	5,29
Para Hongo			
Hongo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
Testigo	32	6,96	X
Inoculada	32	39,68	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Inoculada - Testigo		32,71*	5,29
Para Tiempo			
Tiempo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
75 días	32	19,74	X
150 días	32	26,90	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
75 días - 150 días		-7,16*	5,29

* denota diferencias estadísticamente significativas.

En la tabla 4.22 se observa que existen diferencias significativas entre los niveles de los tres factores, encontrándose los mayores valores de pérdida de peso(%) en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, con contrastes de 17, 32 y 7%, respectivamente.

En todos los niveles y factores los valores de pérdida de peso(%) superaron ampliamente a los obtenidos por la metodología y

la fórmula de cálculo propuestas por la norma ASTM D-2017 (Tabla 4.18).

4.1.1.6. Esterilizado y Tindalizado. En la tabla 4.23 se muestra el análisis de la varianza de un diseño factorial con cuatro factores (madera, método, tiempo y esterilización) para el análisis del factor esterilización y sus interacciones con los otros cuatro factores de estudio, contrastando el material esterilizado simple (nivel inferior) con el material tindalizado (nivel superior), tomando la totalidad de los datos del material inoculado, obtenidos por las dos metodologías de ensayo y con la fórmula de Borlando para el cálculo de la pérdida de peso.

Tabla 4.23. Esterilización. Análisis de la varianza para pérdida de peso(%).

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
A: Madera	13912,2	1	13912,2	95,40	0,0000*
B: Método	8950,11	1	8950,11	61,37	0,0000*
C: Tiempo	2961,81	1	2961,81	20,31	0,0000*
D: Esteriliz.	2,68	1	2,68	0,02	0,8927
AB	1763,79	1	1763,79	12,10	0,0011*
AC	0,27	1	0,27	0,00	0,9658
AD	87,05	1	87,05	0,60	0,4435
BC	49,63	1	49,63	0,34	0,5624
BD	109,93	1	109,93	0,75	0,3896
CD	14,80	1	14,80	0,10	0,7514
Lack of fit	511,01	5	102,20	0,70	0,6255
Error puro	6999,74	48	145,83		
Total (corr)	35363	63			

* Factores e interacciones significativas para el 95% de confianza.

R-cuadrado = 78,76%

R-cuadrado (ajustado para los grados de libertad) = 74,75%

Error Standard = 11,90

Error medio absoluto = 8,06

En la tabla 4.23 se observa que no existen diferencias significativas entre los dos métodos de esterilización. Tampoco son significativas las interacciones entre este último y los otros tres factores de estudio (AD, BD y CD).

Este ensayo demostró que aplicando un tindalizado, esterilizado más agresivo, no se afecta el material ni lo predispone a un mayor ataque fúngico. No obstante, al no encontrar indicios importantes de contaminación, una esterilización simple resulta suficiente para este tipo de ensayo.

4.1.2. Análisis de los Valores Negativos de Pérdida de Peso(%)

4.1.2.1. Empleando las fórmulas de ASTM D-2017 y López & Deschamps. Sobre un total de 128 probetas evaluadas, 25 probetas dieron valores negativos, es decir el 19% del material ensayado no se pudo emplear para el cálculo del valor medio y del coeficiente de variabilidad en el análisis de los resultados. Los valores negativos se concentraron en los 150 días de ensayo (22 probetas) y la mayoría sobre probetas endurecidas, en 17 ocasiones. Se registró un aumento entre 5 y 6% en el peso de las probetas.

Para la fórmula de ASTM se verificó la mayor cantidad de valores negativos (16 probetas) contra 9 obtenidas con el ensayo de López & Dechamps, representando el 25 y 14%, respectivamente.

Tabla 4.24. Cantidad (cursiva) y magnitud (normal) de los valores negativos según ASTM y López & Deschamps.

Valores negativos de Pérdida de Peso		Madera		CMP		
		Sin Tratar				
		Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	
ASTM	Inoculada	Esterilizado	1	-	1	
		simple	-	-7,88	-	-0,95
		Tindalizado	-	-	-	1 -1,10
	Testigo	Esterilizado		3		4 -3,78;
			simple	-	-7,14; -8,41; -8,56	-
		Tindalizado		2		4 -5,76;
			simple	-	-5,92; -0,32; -1,03	-
	L & D	Inoculada	Esterilizado			2 -1,87;
			simple	-	-	-
		Tindalizado	-	-	-	-
Testigo		Esterilizado	1	1	1	3 -2,18;
	simple	-8,46	-0,74	-4,94	-2,54; -7,29	
	Tindalizado	-	1 -2,88	-	1 -6,40	

4.1.2.2. Empleando la fórmula propuesta por Borlando. Sobre un total de 128 probetas evaluadas, sólo 5 probetas dieron valores negativos, es decir que el 3.9% del material ensayado no se pudo emplear para el cálculo del valor medio y del coeficiente de variabilidad en el análisis de los resultados. Todos los valores negativos se dieron sobre material endurecido, que osciló entre el 2 y 8% de aumento de peso y correspondieron: tres a 75 días y los dos restantes a los 150 días de ensayo, todos pertenecientes al método propuesto por López & Deschamps.

Esto nos estaría indicando que la fórmula de Borlando expresa con mayor exactitud los datos de biodegradación evaluados a partir de la pérdida de peso, eliminando totalmente el efecto de la variación del contenido de humedad de las probetas al comienzo y al final del ensayo.

Tabla 4.25. Cantidad (cursiva) y magnitud (normal) de los valores negativos según fórmula de Borlando.

Valores negativos de Pérdida de Peso según Fórmula de Borlando		Madera		CMP		
		Sin Tratar				
		Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	Pp(%) 75días	Pp(%) 150días	
ASTM	Inoculada	Esterilizado	-	-	-	-
		simple	-	-	-	-
	Testigo	Tindalizado	-	-	-	-
		Esterilizado	-	-	-	-
		simple	-	-	-	-
		Tindalizado	-	-	-	-
L & D	Inoculada	Esterilizado	-	-	2	-
		simple	-	-	-2,67;	-
	Testigo	Tindalizado	-	-	-8,3	-
		Esterilizado	-	-	1	1
		simple	-	-	-5,96	-3,32
		Tindalizado	-	-	-	1
					-1,96	

4.1.3. Variación del Contenido de Humedad (%) de las Probetas

Se realizaron cuatro repeticiones para la obtención de los valores de contenido de humedad de las probetas por cada tratamiento, es decir que se hicieron un total de 96 determinaciones.

Valores medios y coeficientes de variabilidad

Los valores medios y los coeficientes de variabilidad del contenido de humedad de las probetas a lo largo del ensayo se muestran en la tabla 4.26.

Tabla 4.26. Variación del contenido de humedad(%) de las probetas.

Método	Probeta		Día					
			0	25	50	75	100	150
ASTM	Sin	CH(%)	11,48	33,07	29,18	32,86	49,80	32,14
	Tratar	CV(%)	18,33	20,22	26,11	9,24	34,65	8,29
	CMP	CH(%)	6,06	26,94	22,16	20,23	12,12	15,24
		CV(%)	33,72	56,24	71,09	45,61	10,81	27,84
L & D	Sin	CH(%)	85,58	164,6	146,8	160,07	129,03	116,23
	Tratar	CV(%)	16,63	7,10	22,26	23,88	7,44	22,90
	CMP	CH(%)	20,04	26,88	30,52	40,92	61,52	46,44
		CV(%)	49,77	15,58	27,37	55,37	59,91	32,33

Según la norma ASTM, en probetas sin tratar, el contenido de humedad a lo largo del ensayo varió desde 11,5% al inicio, hasta un máximo cercano al 50% a los 100 días. Los otros cuatro puntos evaluados dieron un valor aproximado al 30%. Los coeficientes de variabilidad fueron bajos a los 75 y 150 días; medios, al inicio del ensayo y altos a los 50 y 100 días.

En las probetas endurecidas, el contenido de humedad a lo largo del ensayo varió desde 6% al inicio, hasta un máximo cercano al 27% a los 25 días, los otros puntos evaluados dieron un valor ligeramente superior al 20% para 50 y 75 días y del 12 y 15% para los 100 y 150 días respectivamente. Estos contenidos de humedad por debajo del 20% harían poco probable el deterioro fúngico, pues el mínimo contenido de humedad requerido se encuentra en el 20% (3).

Por lo expuesto y haciendo abstracción de otros factores predisponentes, se puede inferir que las probetas sin tratamiento sufrirán un mayor deterioro al superar, en la mayoría de los casos, el umbral del 20%. Los coeficientes de variabilidad fueron muy altos entre los 25 y 75 días; bajo a los 100 días; altos al inicio y al final del ensayo.

En el ensayo según López & Deschamps el contenido de humedad de las probetas fue muy superior al determinado por ASTM, alcanzado valores superiores al 100% para madera sin tratar, lo que

pudo llegar a afectar el desarrollo fúngico por condiciones de anaerobiosis debida a la reducción de los tenores de oxígeno. En estas probetas el ensayo se inició con 85% de contenido de humedad ascendiendo a más del 100% durante el resto del ensayo, con picos de 160% a los 25 y 75 días. Coeficientes de variabilidad bajos se encontraron al inicio y a los 100 días y altos, ligeramente superiores al 20%, para el resto de los puntos evaluados.

En el ensayo según López & Deschamps para madera endurecida el contenido de humedad fue ligeramente superior que para ASTM, pero muy inferiores comparándolos con los contenidos determinados en las probetas sin tratar en el ensayo de López & Deschamps. Contenido de humedad inicial del 20%, con un pico del 60% a los 100 días y valores intermedios entre 30 y 40% serían *a priori* óptimos para el desarrollo de los hongos xilófagos (3).

Cabe aclarar que López & Deschamps proponen la inmersión de las probetas durante 24 horas antes de iniciar la etapa de biodegradación propiamente dicha.

Análisis de la varianza

En la tabla 4.27 se presentan los análisis de la varianza para la variación del contenido de humedad de las probetas durante los 150 días de ensayo, para las dos metodologías de estudio y para las dos condiciones del material.

Tabla 4.27. Análisis de la varianza en la variación del Contenido de Humedad(%) de las probetas.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Método ASTM. Compuesto Madera - plástico					
Entre grupos	1121,32	5	224,26	2,31	0,0869
Dentro del grupo	1747,22	18	97,06		
TOTAL	2868,53	23			
Método ASTM. Madera Sin Tratar					
Entre grupos	2982,98	5	596,59	8,57	0,0003*
Dentro del grupo	1252,35	18	69,57		
TOTAL	4235,33	23			
Método de López & Deschamps. Compuesto Madera - plástico					
Entre grupos	4627,94	5	925,58	2,77	0,0504
Dentro del grupo	6021,56	18	334,53		
TOTAL	10649,5	23			
Método de López & Deschamps. Madera Sin Tratar					
Entre grupos	17881,0	5	3576,19	7,66	0,0005*
Dentro del grupo	8403,8	18	466,87		
TOTAL	26284,8	23			

* indica diferencias significativas para el 95% de confianza.

En esta tabla se observa que en el CMP, empleando cualquiera de los dos métodos de biodegradación, no existieron diferencias significativas entre los contenidos de humedad de las probetas obtenidos a los 0, 25, 50, 75, 100 y 150 días de comenzada la exposición. En la madera sin tratar se observaron diferencias significativas en los contenidos de humedad determinados en los puntos mencionados en el párrafo anterior.

La tabla 4.28 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad de las probetas en cada uno de los puntos de estudio para el CMP ensayado según la norma ASTM D-2017.

Tabla 4.28. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, norma ASTM, CMP.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
0	4	6,06	X
100	4	12,12	XX
150	4	15,23	XXX
75	4	20,22	XXX
50	4	22,15	XX
25	4	26,84	X

Aquí se observa que hubo un aumento significativo del contenido de humedad de las probetas después del inicio y hasta la mitad del ensayo (75 días), luego tuvo una significativa caída a los 100 días, logrando un leve incremento hacia el final del ensayo (figura 4.6).

La tabla 4.29 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad de las probetas en cada uno de los puntos de estudio para la madera sin tratamiento ensayada según la norma ASTM D-2017.

Tabla 4.29. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, norma ASTM, Madera sin tratamiento.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
0	4	11,48	X
50	4	29,18	X
150	4	32,13	X
75	4	32,86	X
25	4	33,67	X
100	4	49,8	X

Aquí se observa que hubo un aumento significativo del contenido de humedad de las probetas después del inicio y hasta los 75 días, acentuándose a los 100 días de ensayo, para luego descender a los niveles anteriores hacia el final del mismo (figura 4.7).

La tabla 4.30 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad de las probetas en cada uno de los puntos de estudio para el CMP ensayado según la metodología de López & Deschamps.

Tabla 4.30. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, López & Deschamps, CMP.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
0	4	19,42	X
25	4	26,88	X
50	4	30,52	X
75	4	40,92	XX
150	4	46,44	XX
100	4	61,52	X

Aquí se observa que el contenido de humedad fue aumentando en forma paulatina desde el inicio hasta los 100 días de ensayo,

donde llegó a un máximo, para luego caer levemente hacia el final del ensayo (figura 4.8).

La tabla 4.31 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad de las probetas en cada uno de los puntos de estudio para la madera sin tratar ensayada según la metodología de López & Deschamps.

Tabla 4.31. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) de las probetas, López & Deschamps, Madera sin tratamiento.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
0	4	85,57	X
150	4	116,23	XX
100	4	129,03	XX
50	4	146,82	XXX
75	4	160,07	XX
25	4	164,67	X

En la tabla 4.31 se observa que hubo un aumento muy significativo del contenido de humedad de las probetas hasta la mitad del ensayo (75 días), para luego descender hacia el final del mismo (figura 4.9).

En las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra la evolución del contenido de humedad al cabo de los 150 días de ensayo, para ambas metodologías y en las dos condiciones de la madera, ilustrando los valores de las tablas 4.28, 4.29, 4.30 y 4.31, respectivamente.

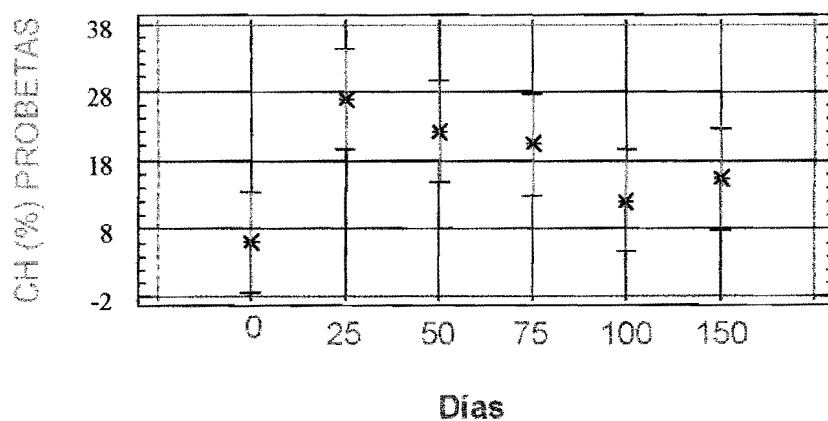


Figura 4.6. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. Norma ASTM en CMP.

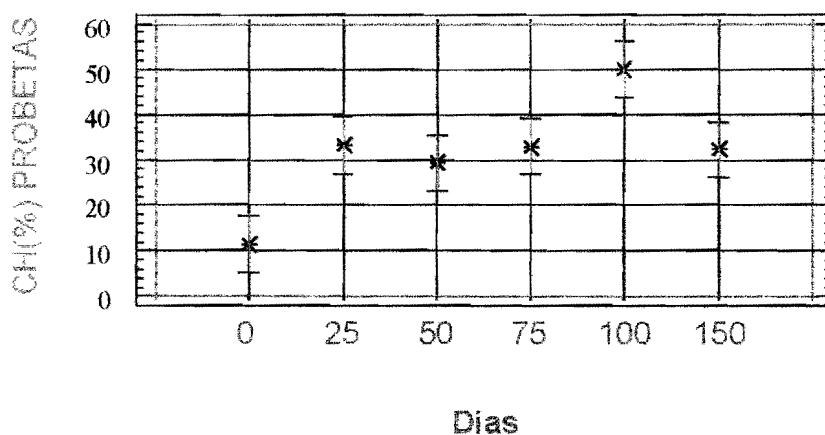


Figura 4.7. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. ASTM en Madera Sin Tratar.

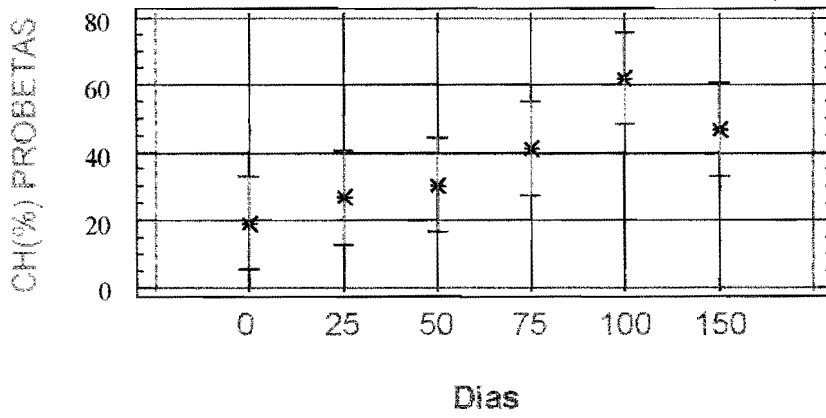


Figura 4.8. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. López & Deschamps en CMP.

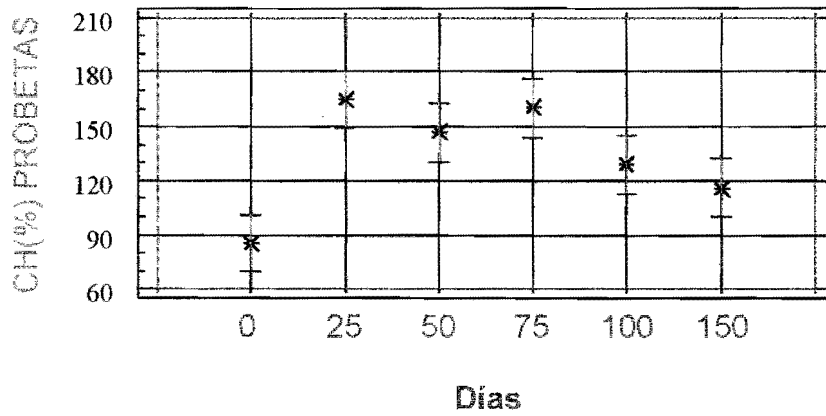


Figura 4.9. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) de las Probetas, para el 95%. López & Deschamps, Madera sin Tratar.

4.1.4. Variación del contenido de humedad (%) del sustrato

Se realizaron dos determinaciones del contenido de humedad del sustrato al final de cada período y por cada tratamiento, promediando ambos valores. Se realizaron en total 48 determinaciones.

Valores medios del contenido de humedad del sustrato

Los valores medios del contenido de humedad del sustrato a lo largo del ensayo se muestran en la tabla 4.32.

Tabla 4.32. Variación del contenido de humedad(%) del sustrato.

Método	Probeta	Día					
		0	25	50	75	100	150
ASTM	Sin Tratar	30,81	38,10	37,50	40,98	29,17	33,86
	CMP	33,33	43,34	43,34	41,18	34,71	27,39
L & D	Sin Tratar	15,91	13,64	25,55	16,52	13,64	16,08
	CMP	11,07	8,52	18,42	18,22	11,31	15,81

Para los ensayos realizados siguiendo la norma ASTM D-2017. el contenido de humedad del sustrato fue variando entre 30 y 43%, alcanzando el valor máximo para las probetas sin tratamiento a los 75 días (41%) y a los 25 y 50 días (43%) en las probetas endurecidas.

Siguiendo el método de López & Deschamps, los valores de humedad fueron menores comparados con el anterior. Estos valores fluctuaron entre 8 y 25% con niveles máximos en el día 50 para madera sin tratar y CMP.

Análisis de la varianza

En la tabla 4.33 se presentan los análisis de la varianza para la variación del contenido de humedad del sustrato durante los 150 días de ensayo, en las dos metodologías de estudio y para las dos condiciones del material.

Tabla 4.33. Análisis de la varianza en la variación del Contenido de Humedad(%) del sustrato.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
Método ASTM. Compuesto Madera - plástico					
Entre grupos	417,02	5	83,40	2,51	0,1471
Dentro del grupo	199,62	6	33,27		
TOTAL	616,65	11			
Método ASTM. Madera Sin Tratar					
Entre grupos	209,03	5	41,80	1,35	0,3582
Dentro del grupo	185,63	6	30,93		
TOTAL	394,67	11			
Método de López & Deschamps. Compuesto Madera - plástico					
Entre grupos	172,77	5	34,55	2,56	0,1417
Dentro del grupo	80,94	6	13,49		
TOTAL	253,71	11			
Método de López & Deschamps. Madera Sin Tratar					
Entre grupos	199,60	5	39,92	6,77	0,0187*
Dentro del grupo	35,36	6	5,89		
TOTAL	234,97	11			

* indica diferencias significativas para el 95% de confianza.

En esta tabla se observa que sólo existieron diferencias significativas en el contenido de humedad del sustrato obtenido a los 0, 25, 50, 75, 100 y 150 días de comenzada la exposición cuando se aplicó el método de López & Deschamps en madera sin tratar. El método ASTM no presentó diferencias en el contenido de humedad del sustrato a lo largo del experimento y tampoco existieron

diferencias significativas cuando se empleó el método de López & Deschamps en CMP.

La tabla 4.34 muestra el test de rango múltiple, al 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad del sustrato en cada uno de los puntos de estudio para el CMP ensayado según la norma ASTM D-2017.

Tabla 4.34. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, norma ASTM, CMP.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
150	2	27,39	X
0	2	33,33	XX
100	2	34,70	XX
75	2	41,17	XX
50	2	43,33	X
25	2	43,33	X

Aquí se observa que no hubo diferencias significativas en el contenido de humedad del sustrato desde el inicio y hasta el final del ensayo (figura 4.10).

La tabla 4.35 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad del sustrato en cada uno de los puntos de estudio para la madera sin tratamiento ensayada según la norma ASTM D-2017.

Tabla 4.35. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, norma ASTM, Madera sin tratamiento.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
100	2	29,16	X
0	2	30,80	X
150	2	33,85	X
50	2	37,50	X
25	2	38,09	X
75	2	40,98	X

Aquí se observa que no hubo diferencias significativas en el contenido de humedad del sustrato desde el inicio y hasta el final del ensayo (figura 4.11).

La tabla 4.36 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad del sustrato en cada uno de los puntos de estudio para el CMP ensayado según la metodología de López & Deschamps.

Tabla 4.36. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, López & Deschamps, CMP.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
25	2	8,52	X
0	2	11,06	XX
100	2	11,31	XX
150	2	15,81	XX
75	2	18,22	X
50	2	18,41	X

Aquí se observa que el contenido de humedad del sustrato no varió en forma significativa a lo largo del ensayo (figura 4.12).

La tabla 4.37 muestra el test de rango múltiple de los valores del contenido de humedad del sustrato en cada uno de los puntos de estudio y para la madera sin tratamiento ensayada según la metodología de López & Deschamps.

Tabla 4.37. Test de rango múltiple para el contenido de humedad(%) del sustrato, López & Deschamps, Madera sin tratamiento.

Día	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
100	2	13,34	X
25	2	13,64	X
0	2	15,91	X
150	2	16,08	X
75	2	16,52	X
50	2	25,54	X

En la tabla 4.37 se observa un aumento muy significativo del contenido de humedad del sustrato a los 50 días de iniciado el ensayo, volviendo luego a los valores iniciales, no existiendo diferencias significativas entre los 0, 25, 75, 100 y 150 días de ensayo (figura 4.13).

En las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 se observa la gráfica de la evolución del contenido de humedad del sustrato al cabo de 150 días de ensayo para ambas metodologías y en las dos condiciones de la madera, ilustrando los valores de las tablas 4.34, 4.35, 4.36 y 4.37, respectivamente.

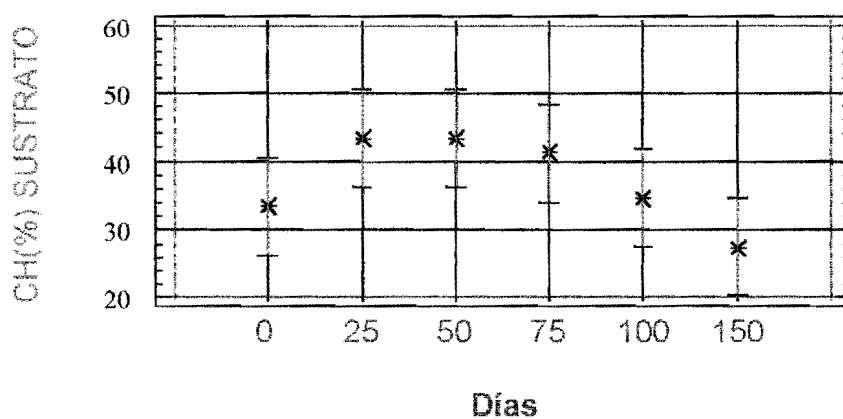


Figura 4.10. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. Norma ASTM, CMP.

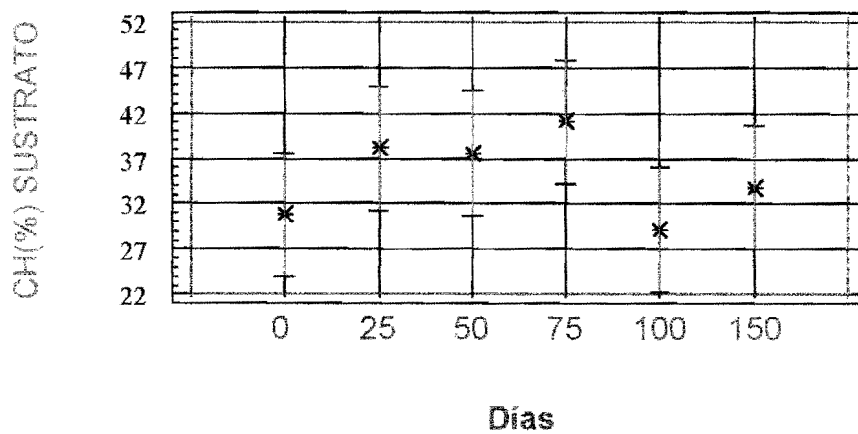


Figura 4.11. Medias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. Norma ASTM, Madera Sin Tratar.

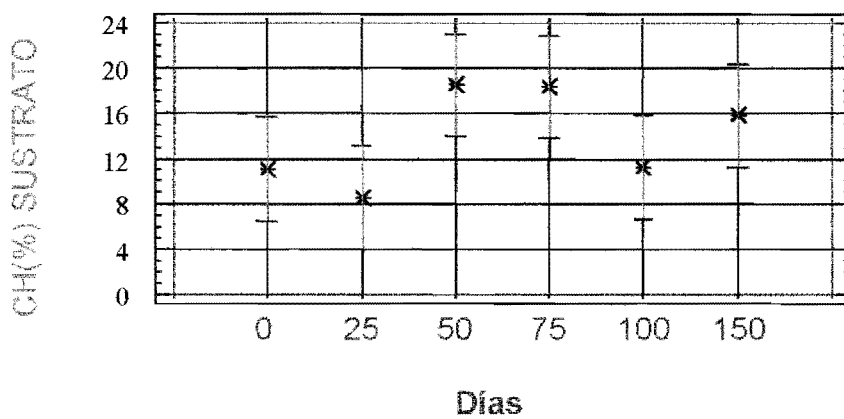


Figura 4.12. Médias e Intervalos de confiança del CH(%) del Sustrato, para el 95%. López & Deschamps, CMP.

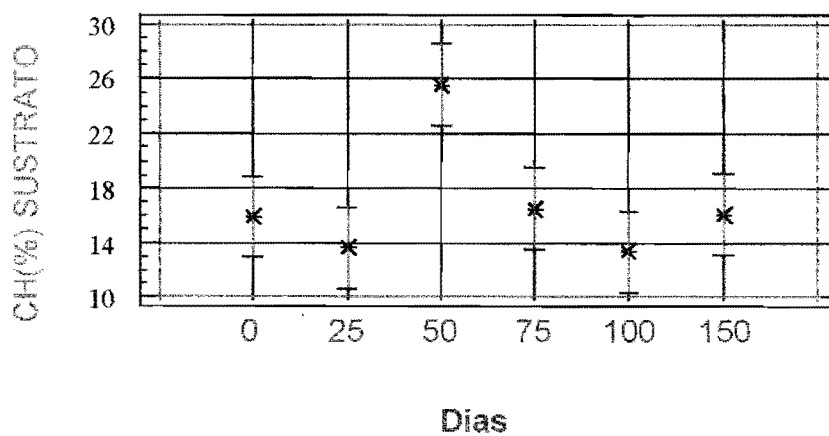


Figura 4.13. Médias e Intervalos de confianza del CH(%) del Sustrato, para el 95%. López & Deschamps. Madera Sin Tratar.

4.1.5. Análisis de los datos de densidad aparente normal

Los valores medios y coeficientes de variabilidad de la densidad aparente normal fueron calculados según la norma IRAM 9544 (33), evaluándose un total de 256 probetas.

El contenido de humedad de equilibrio higroscópico que tenía el material al momento de determinar la densidad aparente normal fue del 12% en madera sin endurecer y del 6% para el CMP, determinados bajo las mismas condiciones de humedad relativa (60%) y temperatura ambiente (20°C). En el cálculo de los contenidos de humedad se siguió la norma IRAM 9532 (34).

Valores medios y coeficientes de variabilidad

Los valores medios y los coeficientes de variabilidad de la densidad aparente normal de las probetas sin endurecer y endurecidas se muestran en la tabla 4.38.

Tabla 4.38. Densidad aparente normal (g/cm^3). Medias y coeficientes de variabilidad.

MADERA		Sin Tratar		CMP	
MÉTODOS		ASTM	L & D	ASTM	L & D
Para Variación del	Media	0,40	0,38	0,70	0,72
Cont. de Humedad	CV (%)	8,36	7,95	20,3	14,2
Para Ensayos de	Media	0,40	0,43	0,70	0,74
Biodegradación	CV (%)	10,8	8,38	14,7	6,83

Los valores de la densidad aparente normal de la madera sin endurecer fueron de $0,40 \text{ g/cm}^3$ y de la madera endurecida de $0,72 \text{ g/cm}^3$, es decir un 78% superior a la primera.

La variabilidad de los datos fue baja (menor al 10%) para los valores de las probetas de madera sin tratar empleadas en ambos ensayos y para los dos métodos. Para el CMP se encontró baja variabilidad en López & Deschamps para biodegradación y valores

medios (entre 10 y 20%) para los otros tres casos debido a una cierta desuniformidad en el endurecimiento de los CMP (18).

Análisis de la varianza

En la tabla 4.39 se presentan los análisis de la varianza de la densidad aparente normal, para las dos metodologías de estudio y para las dos condiciones del material.

Tabla 4.39. Análisis de la varianza de la densidad aparente normal.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Madera	3,07	1	3,07	740,7	0,0000*
B: Método	0,03	1	0,03	9,45	0,0026*
INTERACCION					
Madera x Método	0,0007	1	0,0007	0,18	0,6756
Residual	0,51	124	0,004		
Total (Corr.)	3,63	127			

* indica diferencias significativas para el 95% de confianza.

En la tabla 4.39 se observan diferencias significativas en la densidad aparente normal entre la madera sin endurecer y el CMP, al igual que en la densidad del material empleado por los dos métodos.

La tabla 4.40 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores de densidad aparente normal según el tipo de madera ensayado.

Tabla 4.40. Test de rango múltiple para la densidad aparente normal, factor Madera.

Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
Sin Tratar	64	0,41	X
CMP	64	0,72	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
Sin Tratar - CMP	-0,31*	0,02

* Denota diferencias estadísticamente significativas.

Aquí se observa que las diferencias entre la densidad aparente normal del material sin tratar y del CMP fueron significativas (figura 4.14).

La tabla 4.41 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores de densidad aparente normal según el método de ensayo empleado.

Tabla 4.41. Test de rango múltiple para la densidad aparente normal, factor Método.

Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
ASTM	64	0,55	X
López & Deschamps	64	0,58	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
ASTM - L & D	-0,03*	0,02

* Denota diferencias estadísticamente significativas.

Puede apreciarse que las diferencias entre la densidad aparente normal del material sin tratar y del CMP empleados en los dos ensayos fueron significativas, si bien las probetas fueron elegidas al azar. La diferencia fue de sólo 0.03 g/cm³ (figura 4.15).

En las figuras 4.14 y 4.15 se muestra la gráfica de la densidad aparente normal de las probetas empleadas en las dos metodologías y en las dos condiciones de la madera, ilustrando los valores de las tablas 4.40 y 4.41, respectivamente.

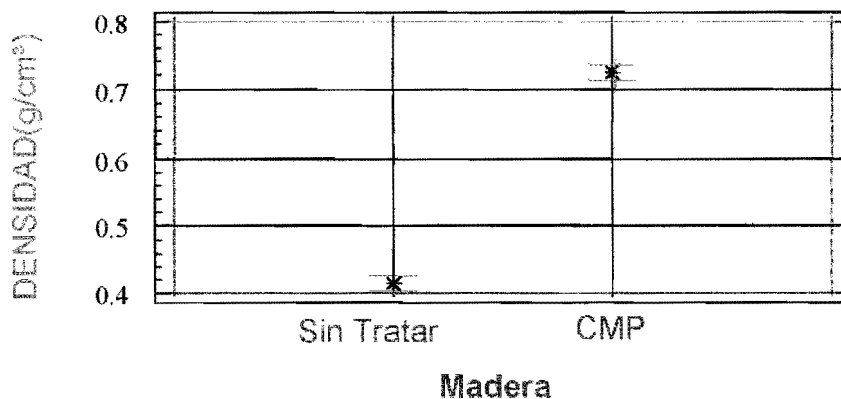


Figura 4.14. Medias e Intervalos de confianza para el 95%. Densidad Aparente Normal para Madera.

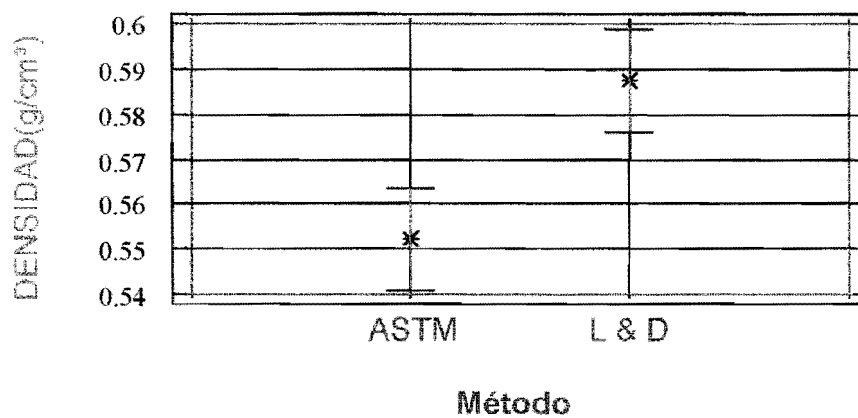


Figura 4.15. Medias e Intervalos de confianza para el 95%. Densidad Aparente Normal en Métodos de Ensayo.

4.1.6. Análisis del contenido de humedad inicial de las probetas

Los valores medios y coeficientes de variabilidad correspondientes al contenido de humedad inicial de las probetas fueron evaluados según la norma IRAM 9532, sobre un total de 96 probetas (33).

Este análisis es muy importante porque los hongos xilófagos tienen un rango de contenidos de humedad en el cual desarrollan su actividad (3).

Cada método varía en cuanto a la hidratación o no de las probetas antes de ser colocadas en los frascos de pudrición. ASTM directamente trabaja con las probetas en su contenido de humedad de equilibrio higroscópico, mientras que López & Deschamps proponen una inmersión en agua destilada de las probetas durante 24 horas antes de ser colocadas en los frascos.

También cada material, la madera sin tratar por un lado y el CMP por el otro, tienen distintos grados de afinidad con el agua por lo que se manifestará en distintos contenidos de humedad.

Valores medios y contrastes

Los valores medios y la heterogeneidad de los grupos del contenido de humedad inicial de las probetas se muestran en la tabla 4.42. En este análisis se tomaron por separado los datos correspondientes a cada metodología y se evaluaron con un análisis de la varianza de un solo factor (madera), con el objetivo de conocer los valores medios del contenido de humedad de cada material y en cada método.

Tabla 4.42. Contenido de humedad inicial(%) de las probetas. Medias y contrastes.

Método	Madera	Cantidad	Media (CH%)	Grupos Homogéneos
López & Dechamps	CMP	24	20,03	X
	Sin Tratar	24	85,57	X
	Contraste	Diferencia	Límites +/-	
	CMP - Sin Tratar	-65,53*	7,14	
ASTM	CMP	24	6,06	X
	Sin Tratar	24	11,48	X
	Contraste	Diferencia	Límites +/-	
	CMP - Sin Tratar	-5,42*	1,20	

En la tabla 4.42 se observa que al trabajar con el material en equilibrio, ASTM tiene valores más bajos del contenido de humedad inicial de las probetas, siendo prácticamente la mitad el contenido de humedad del CMP con respecto a la madera sin tratar, 6% y 11,4%, respectivamente.

La inmersión que propone López & Deschamps durante 24 horas, hace que se eleve más de tres veces el contenido de humedad inicial del CMP (20%) y cerca de 8 veces el contenido de humedad de las probetas sin tratar (85,5%), con respecto a la humedad de equilibrio.

En lo referente al rango de contenidos de humedad ideal para el desarrollo de los hongos, con López & Deschamps se logra un valor ideal, resultando bajo en el caso de ASTM, puesto que la mayoría de los hongos xilófagos se desarrollan cuando el material tiene un contenido de humedad por encima de 20% (3).

Cabe aclarar que a medida que se desarrolla el ensayo, estos contenidos de humedad se van elevando según lo analizado en el punto 4.1.3.

Análisis general de la varianza

En la tabla 4.43 se presenta el análisis de la varianza de los datos del contenido de humedad inicial de las probetas, tomando la totalidad de los datos y realizando un análisis de la varianza de dos factores (madera y método). El objetivo, en este caso, fue la evaluación de las diferencias significativas o no del contenido de humedad entre los métodos.

Tabla 4.43. Análisis de la varianza del contenido de humedad inicial (%) de las probetas.

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Método	46538,4	1	46538,4	599,1	0,0000*
B: Madera	30209,4	1	30209,4	388,9	0,0000*
INTERACCION					
AB	21683,8	1	21683,8	279,1	0.0000*
Residual	7145,81	92	77,67		
Total (Corr.)	105577,0	95			

* indica diferencias significativas para el 95% de confianza.

En la tabla 4.43 se observan diferencias significativas en el contenido de humedad inicial entre los dos métodos y entre los dos materiales (madera sin tratar y CMP), siendo también significativa la interacción entre ambos factores.

La tabla 4.44 muestra el test de rango múltiple, para el 95% de confianza, de los valores del contenido de humedad inicial de las probetas según métodos y materiales.

Tabla 4.44. Test de rango múltiple para contenido de humedad inicial (%) de las probetas.

Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
CMP	48	13,05	X
Sin Tratar	48	48,52	X
Contraste		Diferencia	+/- Límites
CMP - Sin Tratar		-35,47*	3,57
ASTM	48	8,77	X
L & D	48	52,80	X
Contraste		Diferencia	+/- Límites
ASTM – L & D		-44,03*	3,57

* Denota diferencias estadísticamente significativas.

Aquí se observan las diferencias del contenido de humedad inicial de las probetas en el material, encontrando contrastes de 35,5% entre el CMP y el material sin tratar, siendo los contenidos de humedad de cada uno de ellos del 13% y 48%, respectivamente.

También se observaron diferencias significativas del contenido de humedad inicial de las probetas entre los métodos, encontrando contrastes de 44% entre ASTM y López & Deschamps, siendo los contenidos de humedad de cada uno de ellos del 8,8% y 52,8%, respectivamente.

En las figuras 4.16 y 4.17 se observa la gráfica que ilustra los valores de la tabla 4.44.

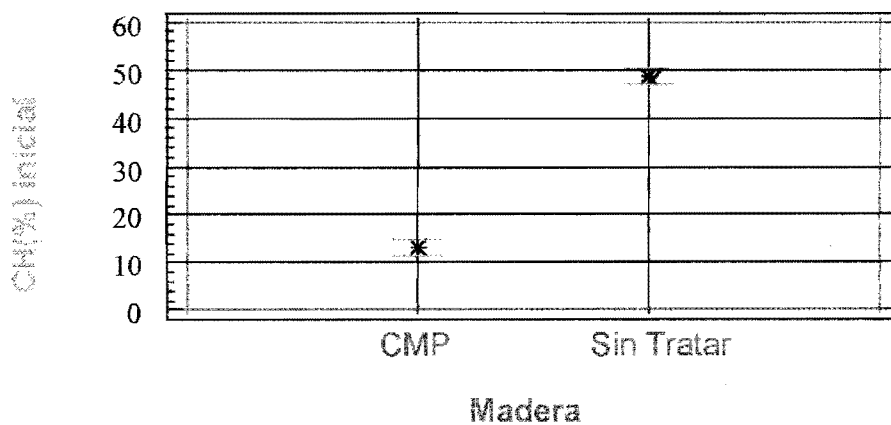


Figura 4.16. Medias e Intervalos de Confianza al 95% del CH(%) inicial de las probetas. Factor Madera.

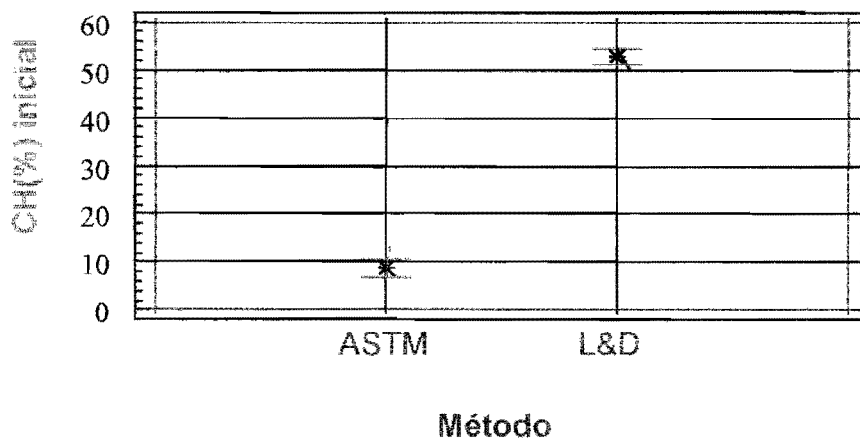


Figura 4.17. Medias e Intervalos de Confianza al 95% del CH(%) inicial de las probetas. Factor Método.

4.1.7. Análisis anatómico

4.1.7.1. Método de López & Deschamps. Las características más importantes observadas en MEB según la muestra analizada, fueron fotografiadas y se detallan en los puntos siguientes.

Madera sin tratar inoculada. En la foto 4.1 (5576), con un aumento de 750x, se observa en corte tangencial a la madera con ataque de hongos cuyas hifas se han desarrollado en el lumen de los vasos, éstos aún conservan las paredes intactas.

Madera sin tratar y sin inocular. En las probetas testigo, sin inocular, no se detectó la presencia de hongos contaminantes, por lo tanto no se registraron fotos de las mismas.

CMP inoculado. En la foto 4.2 (5577), con un aumento de 500x, se observa en corte transversal al MMA impregnando totalmente los lúmenes y paredes de los vasos y fibras, generando una barrera física para el ingreso del hongo.

CMP sin inocular. En la foto 4.3 (5579), con un aumento de 350x, se observa en corte transversal a los vasos con impregnación anular, cubriendo parcialmente el lumen y sin taponamiento. Además no se observa la presencia de hongos contaminantes.

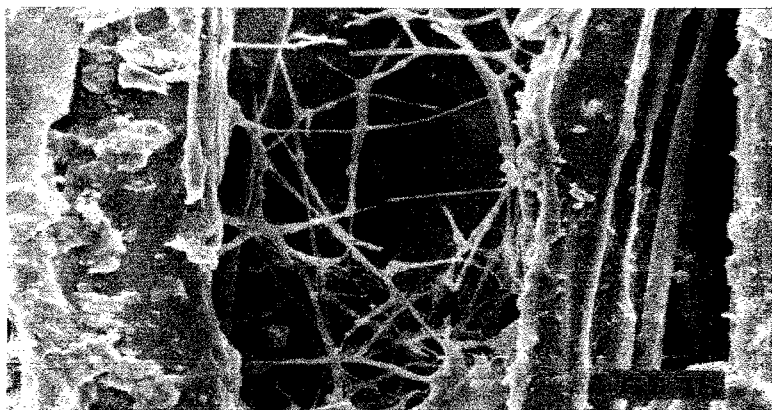


Foto 4.1. López y Deschamps en madera inoculada.

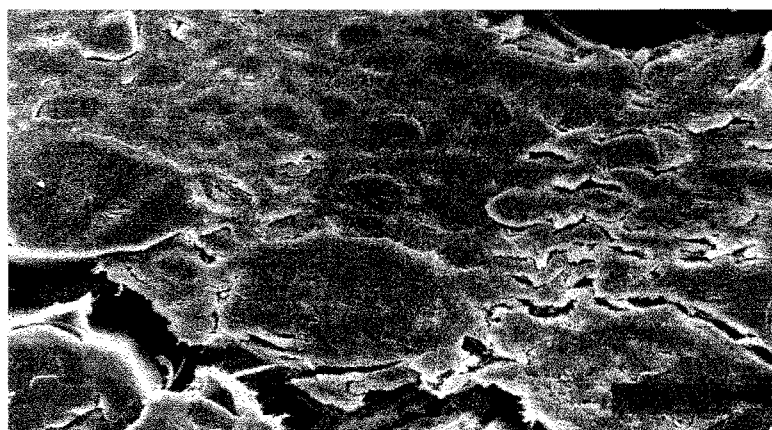


Foto 4.2. López y Deschamps en CMP inoculado.

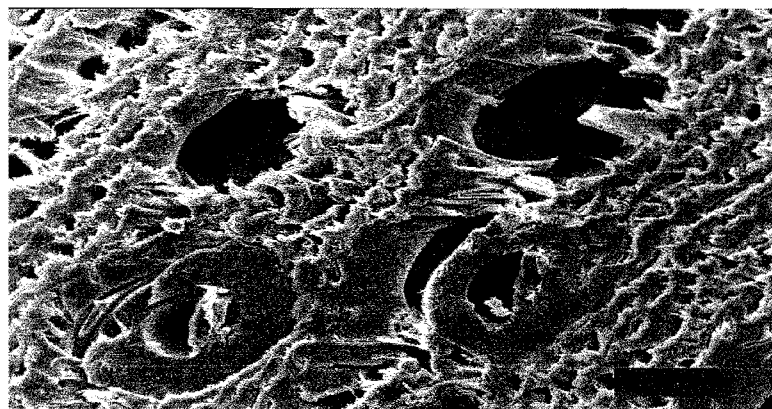


Foto 4.3. López y Deschamps en CMP sin inocular.

4.1.7.2. Método según Norma ASTM D-2017. Las características más importantes observadas en MEB según la muestra analizada, fueron fotografiadas y se detallan en los puntos siguientes.

Madera sin tratar inoculada. En la foto 4.4 (5581), con un aumento de 350x, se observa en corte transversal a la madera con hifas desarrolladas en los lúmenes de los cuatro vasos.

Madera sin tratar y sin inocular. En la foto 4.5 (5583), con un aumento de 350x, se observa en corte transversal al lumen de un vaso totalmente invadido por un hongo contaminante que ha sobrevivido a la esterilización del material.

CMP inoculada. En la foto 4.6 (5584), con un aumento de 350x, se observa en un corte transversal a los vasos con MMA totalmente taponados en el ángulo superior derecho, con taponamiento parcial en forma anular en el ángulo inferior izquierdo. Además se observa el desarrollo del hongo en los lúmenes de los vasos que no han sido cubiertos con MMA.

CMP sin inocular. En la foto 4.7 (5586), con un aumento de 350x, se observa en un corte tangencial donde el MMA ha taponando los vasos en forma longitudinal, se forma un cilindro que no se une a las paredes y se mueve cuando se gira la muestra en el MEB, el cilindro de MMA es interrumpido por la placa cribosa que une a los vasos en forma longitudinal. No se observan hongos contaminantes.

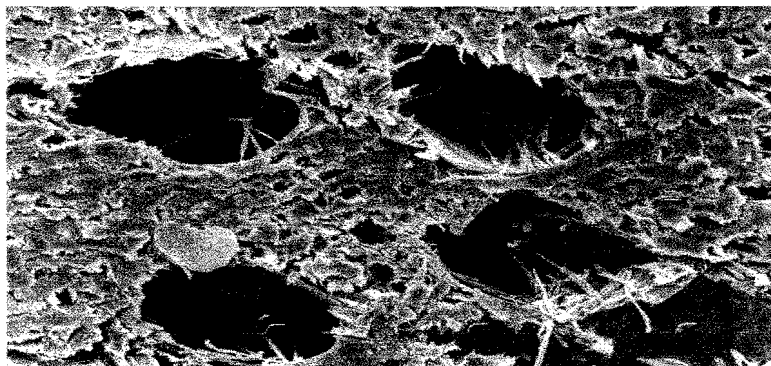


Foto 4.4. ASTM D-2017 en madera inoculada.

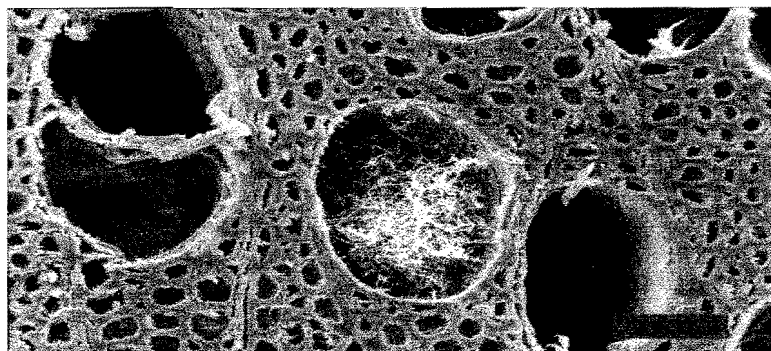


Foto 4.5. ASTM D- 2017 en madera sin inocular.

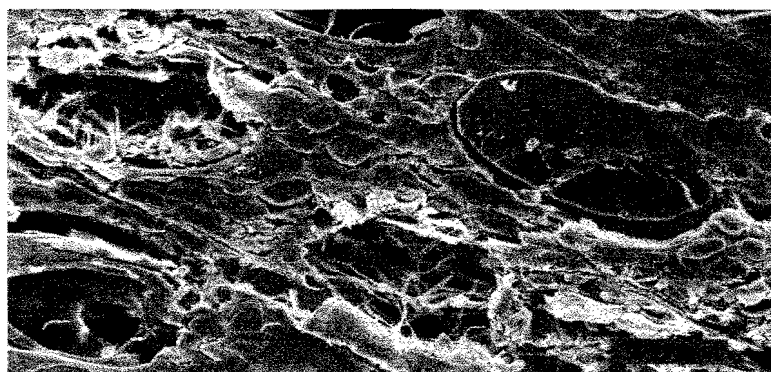


Foto 4.6. ASTM D-2017 en CMP inoculado.

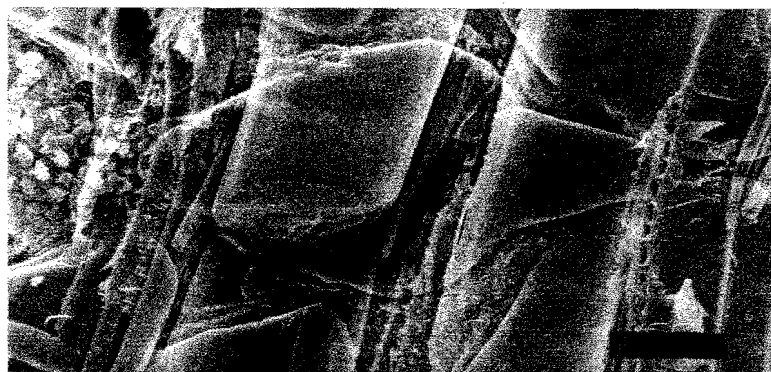


Foto 4.7. ASTM D-2017 en CMP sin inocular.

4.1.8. Conclusiones de los Ensayos Preliminares

Biodegradación. Análisis general según la fórmula de Borlando

Los contrastes de los tres factores de estudio fueron significativos. El mayor de ellos se dio entre el material de estudio indicándonos *a priori* que el CMP resiste mejor al ataque fúngico que la madera del mismo clon de álamo sin tratamiento. En segundo lugar se ubicó el contraste entre los métodos, indicando al método de López & Deschamps como el más agresivo que el propuesto por la norma ASTM D-2017. En tercer lugar se ubicó el factor tiempo indicando que los 150 días de exposición son más recomendados para este tipo de estudios.

Biodegradación. Norma ASTM D-2017 con la fórmula de Borlando

Existieron diferencias significativas entre los niveles de los tres factores, encontrándose los mayores valores de pérdida de peso en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, con contrastes de 9%, 15% y 6%, respectivamente.

Los coeficientes de variabilidad fueron medios, altos y muy altos lo que nos indica la necesidad de aumentar el número de repeticiones.

Biodegradación. López & Deschamps y fórmula de Borlando

Existieron diferencias significativas entre los niveles de los tres factores, encontrándose los mayores valores de pérdida de peso en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, con contrastes de 18%, 32% y 11%, respectivamente.

En todos los niveles y factores, los valores de pérdida de peso superaron ampliamente a los obtenidos por la metodología propuesta por la norma ASTM D-2017.

Biodegradación. Método y fórmula según Norma ASTM D-2017

Existieron diferencias significativas entre los niveles de los factores madera y hongo, no arrojando diferencias significativas entre

los dos tiempos empleados. Los mayores valores de pérdida de peso se produjeron en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, con contrastes de 10%, 14% y 2%, respectivamente.

Los coeficientes de variabilidad en todos los casos fueron altos y muy altos lo que nos estaría indicando la necesidad de aumentar el número de repeticiones, a pesar de que la norma recomienda trabajar con igual número de repeticiones a las empleadas.

Biodegradación. Método y fórmula según López & Deschamps

Existieron diferencias significativas entre los niveles de los tres factores, encontrándose los mayores valores de pérdida de peso en madera sin tratar, inoculada y con 150 días de exposición, con contrastes de 17%, 32% y 7%, respectivamente.

Los coeficientes de variabilidad en todos los casos fueron altos y muy altos lo que nos estaría demostrando la necesidad de aumentar el número de repeticiones.

En todos los niveles y factores los valores de pérdida de peso superaron ampliamente a los obtenidos por la metodología y la fórmula de cálculo propuestas por la norma ASTM D-2017.

Biodegradación. Esterilizado simple y Tindalizado

No existieron diferencias significativas entre los dos métodos de esterilización (esterilización simple y tindalizado). Tampoco fueron significativas las interacciones entre el factor esterilización y los otros tres factores de estudio (madera, método y tiempo). La contaminación fue insignificante, por lo tanto una esterilización simple es suficiente para evitar la contaminación del material de ensayo, si bien la tindalización no lo afectó.

Análisis de los Valores Negativos de Pérdida de Peso(%)

Empleando las fórmulas propuestas por cada metodología, ASTM registró la mayor cantidad de valores negativos (el 25% de los mismos) en contraposición con el 14% obtenidos con López & Deschamps.

Empleando la fórmula de Borlando sólo un 3,9 % del material ensayado presentó valores negativos de pérdida de peso. Esto nos estaría indicando que la fórmula de Borlando expresa con mayor exactitud los datos de biodegradación evaluados a partir de la pérdida de peso, eliminando totalmente el efecto de la variación del contenido de humedad de las probetas entre el inicio y el final del ensayo.

Variación del Contenido de Humedad (%) de las Probetas

En el CMP, para ambos métodos de biodegradación, no se produjeron diferencias significativas entre los contenidos de humedad de las probetas obtenidos a los 0, 25, 50, 75, 100 y 150 días de comenzada la exposición.

En la madera sin endurecer se observaron diferencias significativas en los contenidos de humedad determinados en los intervalos mencionados en el párrafo anterior.

Variación del contenido de humedad(%) del sustrato

Sólo existieron diferencias significativas entre el contenido de humedad del sustrato obtenido a los 0, 25, 50, 75, 100 y 150 días de comenzada la exposición, cuando se aplicó el método de López & Deschamps en madera sin tratar. El método propuesto por ASTM no presentó diferencias en el contenido de humedad del sustrato a lo largo del experimento y tampoco existieron diferencias significativas cuando se empleó el método de López & Deschamps en CMP.

Análisis de los datos de densidad aparente normal

Los valores de la densidad aparente normal de la madera sin endurecer fueron de 0,40 g/cm³ y de la madera endurecida mayor, de

0,72 g/cm³, es decir un 78% superior a la primera (diferencia significativa).

La variabilidad de los datos fue baja para los valores de las probetas sin endurecer empleadas en ambos ensayos y para los dos métodos. En el material endurecido se encontró baja variabilidad en López & Deschamps para Biodegradación y valores medios para los otros tres casos debido a una cierta desuniformidad en el endurecimiento del CMP.

Análisis del contenido de humedad inicial(%) de las probetas

Existieron diferencias significativas en el contenido de humedad inicial de las probetas, con valores bajos en CMP, 6% y 20% según el método, y valores más altos en madera sin tratar (11,48 y 85,57%).

También se observan diferencias significativas del contenido de humedad inicial de las probetas entre los métodos, encontrando valores bajos en ASTM (8,8%) y altos, producto de la inmersión inicial de las probetas en López & Deschamps (52,8%), en el análisis general.

Análisis anatómico

En el corte transversal de los vasos se observó una impregnación total en forma de cilindro, parcial en forma anular y sin taponamiento con MMA; no obstante ello se detectó el desarrollo de las hifas del hongo en los lúmenes de los vasos que no habían sido cubiertos con MMA, indicando la acción no fungicida del mismo.

En el material testigo se observó muy baja presencia de hongos contaminantes. En material inoculado el ataque de hongos se manifestó a través de las hifas que se desarrollaron en forma abundante en el lumen de los vasos.

4.1.9. Recomendaciones para los Ensayos Finales

Tomando en consideración que se deberá trabajar con el método más destructivo, con el fin de asegurarnos que el material de

ensayo sea sometido a las condiciones de mayor agresión, para probar su capacidad de resistir el uso al exterior con un alto grado de riesgo, que el análisis de la pérdida de peso no debe estar influenciado por las variaciones en el contenido de humedad de las probetas y que se deben bajar los valores de los coeficientes de variabilidad, para los ensayos finales se deberá trabajar con:

- * La metodología de biodegradación propuesta por López & Deschamps.
- * El tiempo de 150 días de exposición del material al hongo xilófago.
- * La cepa fúngica: *Pycnoporus sanguineus*.
- * La fórmula de Borlando para evaluar la Pérdida de Peso.
- * Una esterilización simple del material.
- * Número de repeticiones por tratamiento superior a 8.

4.2. Ensayos Finales

4.2.1. Biodegradación

4.2.1.1. Análisis General con Fórmula de Borlando. El análisis de biodegradación aplicando la fórmula de Borlando, basada en la sustancia leñosa inicial obtenida por fórmula (indirectamente) y la sustancia leñosa final obtenida por pesada directa del material biodegradado, fue realizado aplicando un diseño factorial.

En segundo lugar se realizó un análisis de la varianza para visualizar mejor las diferencias significativas entre los niveles de los dos factores y su interacción de segundo orden.

Análisis del diseño factorial

La tabla de efectos medios estimados para la variable dependiente, se muestra en la tabla 4.45.

Tabla 4.45. Ensayos Finales. Efectos estimados para pérdida de peso(%).

Causa	Efectos Estimados	+/-
Media General	20,22	0,69
A: Madera	24,06	1,39
B: Hongo	28,05	1,39
AB: Madera - Hongo	19,09	1,39

El error standard está basado sobre el error puro con 92 grados de libertad

De la tabla se puede deducir que el mayor efecto (28%) se logra con la madera inoculada, en relación con la madera sin inocular, demostrando la agresividad del hongo ensayado, coincidiendo con lo hallado por Wright & Deschamps en su trabajo sobre la susceptibilidad de salicáceas del Delta del río Paraná al ataque de *Pycnopus sanguineus* (28).

En segundo lugar se ubica el factor madera (24%), señalando la mayor susceptibilidad de la madera sin tratar a ser degradada por el hongo y la resistencia al ataque fúngico del CMP corroborando la hipótesis de trabajo.

La interacción madera - hongo tuvo el menor efecto (19%), siendo el mismo significativo.

La tabla anterior se completa con la tabla 4.46 que expresa el análisis de la varianza para detectar la significación o no de los efectos individuales y de la interacción.

Tabla 4.46. Análisis de la varianza del diseño factorial para pérdida de peso(%).

Causa	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Valor de F	Valor de "p"
A: Madera	18884,9	1	18884,9	412,83	0,0000*
B: Hongo	14226,2	1	14226,2	310,99	0,0000*
AB	8754,29	1	8754,29	191,37	0,0000*
Error puro	4208,57	92	45,74		
Total (corr.)	46074,0	95			

* Factores e interacciones significativos

R-cuadrado = 90,86 %

R-cuadrado (ajustado para los grados de libertad) = 90,56 %

Error Standard = 6,76

Error medio absoluto = 5,09

De esta tabla se desprende que los factores madera y hongo, además de la interacción entre ambos son significativas al 95% de confianza.

El R^2 indica que la recta propuesta por el análisis estadístico explica casi el 91% de los resultados, siendo aceptable para este tipo de experimentos (35), mejorando el valor de los ensayos preliminares (78%).

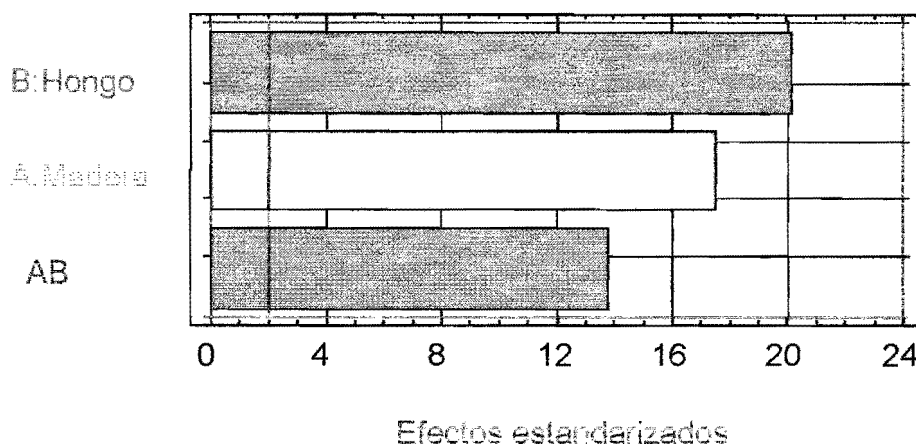


Figura 4.18. Ensayos finales. Gráfico de los efectos estandarizados para Pérdida de Peso.

El gráfico 4.18 muestra los efectos y la significación de los factores individuales y su interacción, ilustrando los valores de las tablas 4.45 y 4.46.

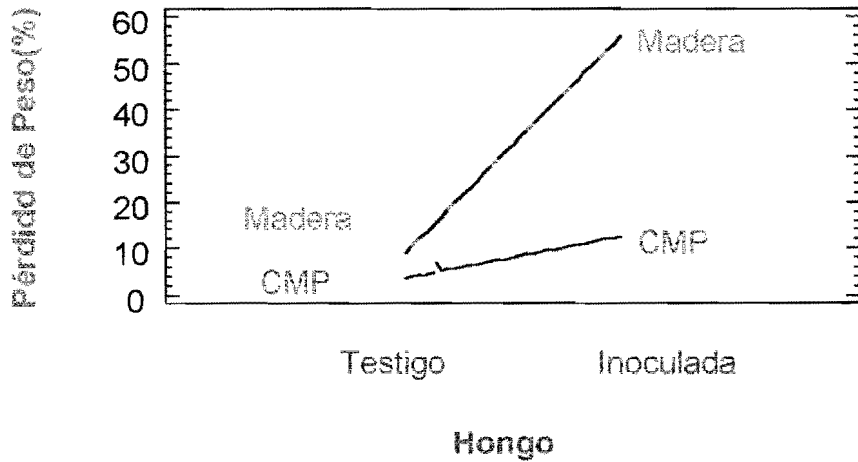


Figura 4.19. Ensayos finales. Gráfico de la interacción para Pérdida de Peso.

Este gráfico ilustra la interacción significativa, con líneas que se cortan, entre los dos factores de estudio.

En la tabla 4.47 se muestran los valores medios, el error standard y los límites de confianza al 95%, para los dos factores de estudio y su interacción.

Tabla 4.47. Ensayos finales. Valores medios de pérdida de peso(%).

Nivel	Cantidad	Media	Error Standard	Límite Inferior	Límite Superior
Media general	96	20,29			
Madera					
Madera	48	32,52	0,97	30,57	34,46
CMP	48	8,06	0,97	6,11	10,00
Hongo					
Inoculada	48	34,53	0,97	32,58	36,47
Testigo	48	6,05	0,97	4,10	7,99
Interacción Madera - Hongo					
Sin Tratar - Inoculada	24	56,53	1,38	53,78	59,28
Sin Tratar - Testigo	24	8,50	1,38	5,75	11,25
CMP - Inoculada	24	12,53	1,38	9,77	15,28
CMP - Testigo	24	3,59	1,38	0,84	6,34

La tabla 4.48 muestra las diferencias significativas entre los dos niveles de los dos factores de estudio, a través del test de rango múltiple para el 95% de confianza.

Tabla 4.48. Ensayos finales. Test de rango múltiple para pérdida de peso(%).

Para Madera			
Madera	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
CMP	48	8,06	X
Sin Tratar	48	32,52	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Sin Tratar - CMP		24,45*	2,75
Para Hongo			
Hongo	Cantidad	Media	Grupos homogéneos
Testigo	48	6,05	X
Inoculada	48	34,53	X
Contraste		Diferencia	Límites +/-
Inoculada - Testigo		28,47*	2,75

* denota diferencias estadísticamente significativas.

En la tabla se observa que el material sin tratar tuvo una pérdida de peso del 32,5%, sólo un punto menos que el encontrado en los ensayos preliminares para el mismo método y forma de cálculo. En contraste el CMP experimentó una pérdida de sólo el 8%.

El material inoculado en conjunto tuvo una pérdida de peso del 34,5%, contra un 6% del material empleado como testigo.

Las figuras 4.20 y 4.21 ilustran los puntos medios, los intervalos de confianza y en consecuencia, las diferencias significativas entre el nivel superior y el inferior de los dos factores de estudio.

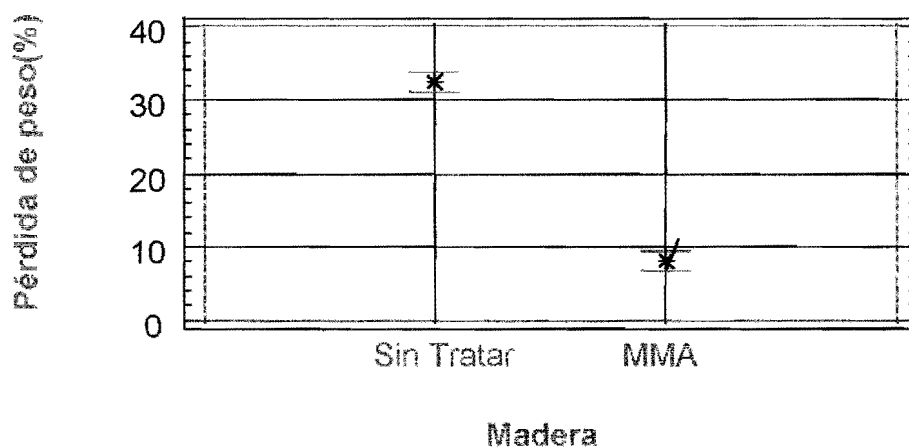


Figura 4.20. Ensayos finales. Medias e Intervalos de confianza para el factor madera.

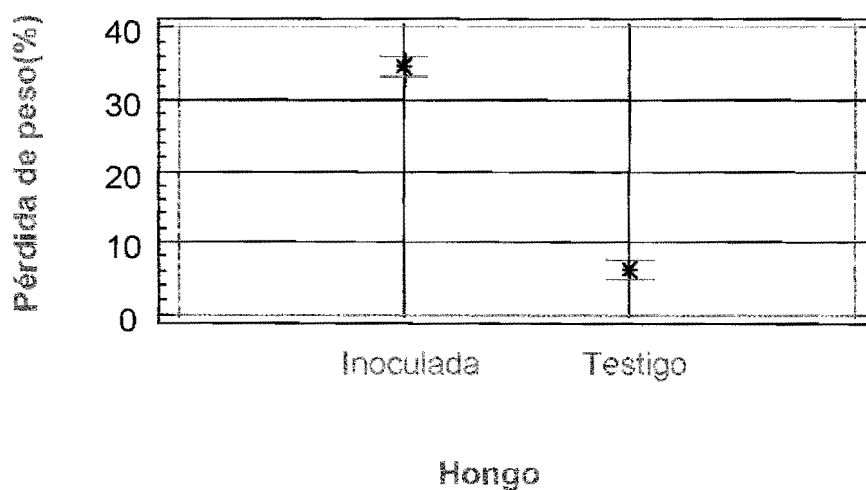


Figura 4.21. Ensayos finales. Medias e intervalos de confianza para el factor Hongo.

4.2.2. Valores Medios y Coeficientes de Variabilidad

La tabla 4.49 muestra los valores medios y los coeficientes de variabilidad para los dos materiales de estudio y en las dos condiciones de ensayo.

Tabla 4.49. Ensayos finales. Medias y coeficientes de variabilidad.

Ensayos Finales		CMP	Madera Sin Tratar
		Pp(%) 150 días	Pp(%) 150 días
Inoculada	Media	12,53	56,53
	CV(%)	69	39
Testigo	Media	3,6	8,51
	CV(%)	12,8	86

Las probetas testigos manifestaron una pérdida de peso baja, 3,6% para el CMP y 8,5% para la madera sin tratar, lo que indicó que el material no se contaminó con cepas de hongos xilófagos extraños al ensayo y no tuvo influencia la hidratación o deshidratación de las probetas.

En las probetas endurecidas la pérdida de peso llegó al 12,53% a los 150 días de exposición, mientras que en las probetas de madera sin tratar la pérdida de peso fue de 56,5% para el mismo tiempo de exposición.

Los coeficientes de variabilidad fueron medios, altos y muy altos, a pesar de haberse triplicado el número de repeticiones por tratamiento con respecto a los ensayos preliminares.

4.2.3. Categorías de Riesgo

Si bien los resultados obtenidos no permiten establecer la durabilidad real de la madera en servicio, sí permiten comparar el desempeño particular entre distintas maderas, hongos o productos de madera.

Por otra parte a partir de tablas de durabilidad, como la propuesta por la norma ASTM D-2017, se puede establecer comparativamente la susceptibilidad al decaimiento o la resistencia a la degradación de una madera o un compuesto en servicio.

Es importante tener presente que este tipo de comparación es relativo y si bien una madera o compuesto puede ser catalogada finalmente en una categoría según los resultados de laboratorio, las condiciones particulares edafoclimáticas de servicio pueden condicionar resultados diferenciales.

Tabla 4.50. Resistencia de la madera sin tratar y del CMP según la norma ASTM D-2017.

Material	Pérdida de peso (%)	Rango de Pérdida de peso (%)	Peso residual (%)	Tipo de resistencia
		0 - 10	90 - 100	Altamente resistente
CMP	12.53	11 - 24	76 - 89	Resistente
		25 - 44	56 - 75	Moderadamente resistente
Madera sin tratar	56.53	45 - mas	55 - menos	No resistente

En la tabla 4.50 se observa que mientras la madera de álamo sin tratar es considerada como un material "no resistente", el compuesto formado por la madera de álamo y el producto endurecedor es considerado un material "resistente", subiendo dos categorías en la tabla de durabilidad y corroborando la hipótesis de trabajo.

Según la norma IRAM 9600, esta resistencia permitiría su empleo en usos al exterior sin contacto con el suelo, correspondiendo a una clase de riesgo R3, para madera que no está en contacto directo con el suelo pero que está expuesta a la intemperie o lixiviación. Siendo recomendada en estructuras para juegos, cercas,

estructuras para construcciones, vigas, columnas, pérgolas, muebles para jardín, vigas aéreas, revestimientos, juego para niños y balaustradas (36).

4.2.4. Análisis Anatómico

En observaciones en MEB y con microscopio óptico sobre material biodegradado se encontró pudrición blanca, dentro de este tipo de pudrición predominó la degradación selectiva coincidiendo con lo hallado por Buswel, siendo el patrón de degradación, la destrucción de la laminilla media y produciendo la separación de los elementos del leño (17).

Degradación blanca simultánea se observó en menor medida, con una disminución de los componentes de lignina y hemicelulosa de la pared celular, donde se formaron agujeros y canales de erosión en la región próxima a la hifa sobre la pared de los vasos (foto 4.8, del MEB con 750x). Esto es producido por las hemicelulasas que degradan las hemicelulosas en la pared celular adyacente al lumen, se introducen progresivamente en la pared secundaria abriendo canales y permitiendo el acceso de las enzimas degradadoras de la lignina, según López (14).

El proceso de descomposición, según Buswell, comienza en el estrato de la pared, próximo al lumen celular y se extiende progresivamente hacia la laminilla media, originando un gradual adelgazamiento y posterior destrucción de la pared celular (fotos: 4.9 en MEB con 350x y 4.10 en MO) (17). Este tipo de degradación produjo la delignificación de la pared secundaria y de la laminilla media, no se observó un ataque sustancial sobre la celulosa de los estratos S1 y S2, coincidiendo también con lo hallado por Reid (16).

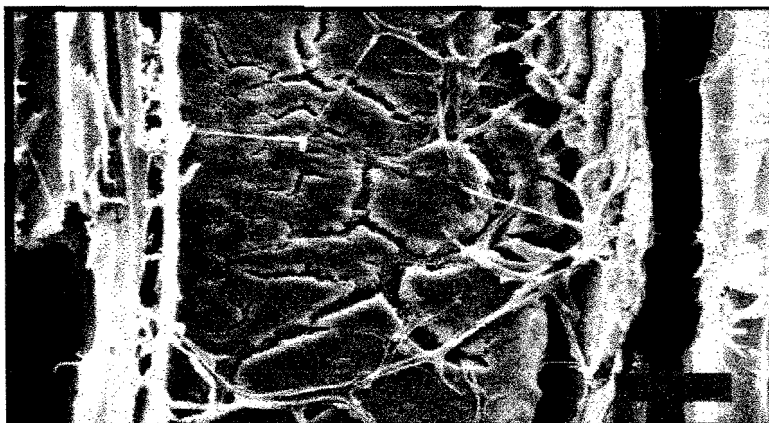


Foto 4.8. Ensayos Finales. Canales de erosión.

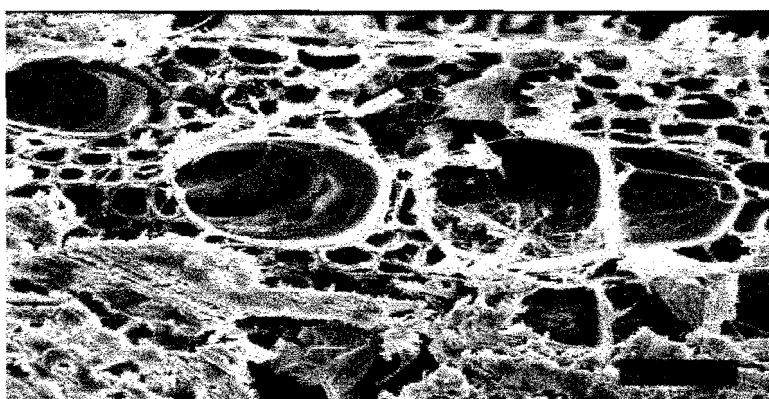


Foto 4.9. Ensayos Finales. Destrucción de la pared.

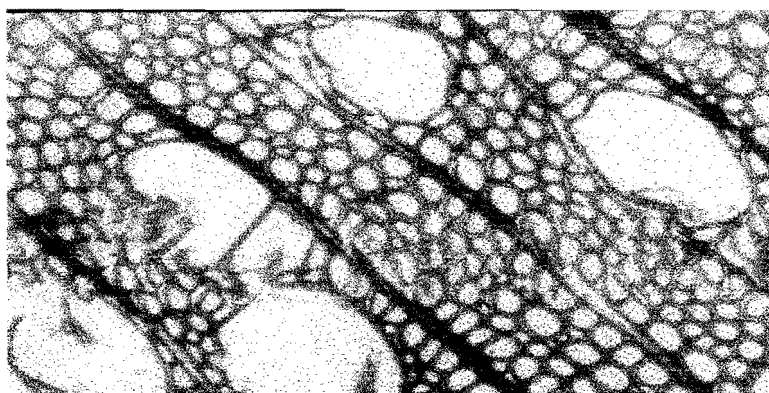


Foto 4.10. Ensayos Finales. Corte transversal en MO.

CAPITULO 5.
CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Los estudios realizados en la presente tesis permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- La durabilidad adquirida de la madera de álamo, *Populus deltoides* L. cv *Stoneville 66* (USA), impregnada con el monómero metacrilato de metilo y polimerizado *in situ* mediante una fuente de calor, aumenta considerablemente, transformándose en un material “resistente” según la norma ASTM D-2017, equivalente a la clase de riesgo R3 de la norma IRAM 9600.
- El hongo *Pycnoporus sanguineus* presenta una alta agresividad en madera de álamo y su acción fúngica ocasiona principalmente degradación blanca selectiva sobre la laminilla media, generando en estados avanzados, la separación de los elementos del leño. En menor medida genera pudrición blanca simultánea, comenzando en la pared interna de los vasos con canales de erosión, adelgazamiento de las paredes y produciendo finalmente la destrucción de las paredes de los vasos y las fibras.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Asora; "Publicación de la Asociación de Fabricantes y Representantes de Maquinarias. Equipos y Herramientas para la Industria Maderera". Buenos Aires. 3 (10): 8 (1997).
2. Rodrigo, E.H. "La industria maderera en cifras". Anuario'00. Eduardo H. Rodrigo Editor. 109pp. (2000).
3. Junta del Acuerdo de Cartagena; "Manual del Grupo Andino para la Preservación de Maderas". 1ra. Ed., Lima. Perú. 400 pp. (1988).
4. Keil, G.D.; Otaño, M.E.; Marlats, R.M. & Luna, M.L.; "Madera de álamo endurecida como material de construcción de alta resistencia mecánica y biológica". V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y VII Congreso de Control de Calidad. Montevideo. Uruguay. pp. 369 – 377 (1999).
5. SAGPyA; Publicación de la Secretaría de Agricultura. Ganadería. Pesca y Alimentación. "Argentina: oportunidades de inversión en bosques cultivados". Buenos Aires. 208 pp. (1999).
6. Otaño, M.E.; G.D. Keil; R.M. Marlats & M.L. Luna. "Comportamiento de la madera de distintos clones del género *Populus* L. sometida al tratamiento de vacío-presión con sales hidrosolubles". *Proceedings of 20^a International Poplar Commission. Budapest. Hungary*: 42-44. (1996).
7. Coronel, E.O. "Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones". 1 Parte: "Fundamentos de las propiedades físicas de la madera". Publicación ITM - UNSE. 187pp. (1994).
8. Zobel, B. & J. Talbert. "*Applied forest tree improvement*". Edit. John Wiley and Son. New York. USA: 421-424. (1998).
9. Keil, G.D.; M.E. Otaño; R.M. Marlats & M.L. Luna. "Penetración y Absorción de un Preservante Hidrosoluble en Maderas de Clones de Alamo (*Populus* L.)". Revista de la Facultad de Agronomía. UNLP. 102 (2), pp. 147-153. (1998).

10. Riyanto, D.S. & Gupta, R. "Effect of ring angle on shear strength parallel to the grain of wood. *Forest Product Journal*". 46(7/8): 87-92. (1996).
11. Coronel, E.O. "Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones". 2 Parte: "Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas". Publicación ITM - UNSE. 335pp. (1995).
12. Okkonen, E.A. & River, B. "Factors affecting the strength of block-shear specimens". *For. Prod. J.* 30(1): 43-50. (1995).
13. Markham, P. & M. Bazin. "Decomposition of cellulose by fungi. In *Handbook of Applied Mycology*". Vol 1: Soil and Plant. 379 – 424. Marcel dekker Inc. (1991).
14. López, S. E. Apuntes del Curso sobre "Biodeterioro y Protección de la Madera". Inédito. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA. 50 pp. (2000).
15. Deschamps, J. & J. Wright. "Patología Forestal del Cono Sur de América". Editorial Orientación Geográfica. Editora S.R.L. 237 pp. (1997).
16. Reid, I. D. "Biodegradation of lignin". *Cn. J. Bot.* Vol: 73 (suppl. 1): S 1011 – S 1018. (1995).
17. Buswell, J. A. "Fungal Degradation of Lignin". In *Handbook of Applied Mycology*. Vol 1: Soil and Plants. 425 – 480. Marcel Dekker Inc. (1990).
18. Andía, I.R.; Otaño, M.E. & Keil, G.D.; "Endurecimiento de Madera de Alamo mediante la impregnación en autoclave con una mezcla monómero - catalizador". Desarrollo experimental. Análisis e informe. Industrias Forestales I. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. Exte N° 200-205/94 UNLP. La Plata. Buenos Aires. 50 pp. (1996).
19. Junta de Energía Nuclear de España; "Estudio de las propiedades físicas de combinaciones madera plástico utilizando la radiación gamma como fuente de polimerización". Dirección de Química e Isótopos. Madrid. España. 70 pp. (1971).

20. Silva Lepage, E.; "*Compostos madeira-plástico. Estudo de algumas propriedades mecânicas de madeira de Pinus eliottii impregnada com monômero de metacrilato de metila*". Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. San Pablo. Brasil. 21 pp. (1982).
21. Witt, A. E.; "*Applications in Wood Plastics. Radiaton Phys*". Chem. 9: pp. 271 – 288. (1977).
22. Lagos, T., Ernesto; "Neowood. Un producto obtenido del pino radiata". *Vetas* 152: 44 – 45. (1995).
23. Bull Simpfendorfer, Carlos G.; "Propiedades de combinados madera plástico empleando la radiación gamma como agente de polimerización". Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 163 pp. (1981).
24. Pahissa Campa, J.; Gabarain, R.U.A.; Tramontini, C. & Melia, E.; "Obtención de Materiales Madera Polímero por irradiación". Actas del VII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires. Argentina. Tomo V. pp. 6415 – 6418. (1972).
25. Lopez, S. & Deschamps, J.; "Estudio comparativo de la patología de maderas de árboles cultivados en la Provincia de Buenos Aires". Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. La Plata. Informe Técnico. 26: 33 pp. (1978).
26. ASTM D 2017; "*Standard Method of Acelerated Laboratory Test of natural decay resistance of woods*". pp. 639 – 645. (1978).
27. Díaz, B.; Peri, P.; Murace, M.; Otaño, M.; Keil, G.; Luna, L. & Andía, I.; "Preservación y durabilidad de la madera de *Populus nigra* cv. *Itálica* para uso de poste en la provincia de Santa Cruz". Informe técnico de avance del proyecto. INTA (EEA Santa Cruz) – UNLP– UNPA . 53 pp. (1998).
28. Wright, J.E. & Deschamps, J.; "Deterioro fúngico de salicáceas en el Delta". IDIA. Enero - junio: pp. 52 - 55 (1976).

29. Blumendfeld, Silvia; "Estudio ecológico de Basidimycetes xilófilos en plantaciones de *Pinus elliotti* y *P. taeda* de la Argentina". Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica. 24 (3-4): 261 – 281 (1986).
30. García, Solá E.; "Acción de hongos xilófagos sobre ocho maderas del bosque chaqueño. Resistencia Natural después de lavadas". Departamento de Física-Química y Geociencias. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia. Chaco. 16 pp. (1974).
31. Borlando, Luis A.; "Determinación de la durabilidad natural de algunas maderas argentinas". Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas. Ministerio de Obras Públicas. Provincia de Buenos Aires. Serie II (51) pp. 23 (1953).
32. Pimentel Gómez, F. "Curso de Estadística Experimental". Ed. Hemisferio Sur S. A. Buenos Aires. Argentina. pp- 1-7 (1978).
33. IRAM 9544; "Método para la determinación de la densidad aparente". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 10 pp. (1985).
34. IRAM 9532; "Método de determinación de humedad". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 14 pp. (1963).
35. Area, María C.; "Estadística Básica". Orientado a Ingenieros Químicos e Investigadores del Area. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Facultad de Ciencias Exactas. Químicas y Naturales. UNAM. 3° Ed., 72 pp. (1996).
36. IRAM 9600; "Preservación de maderas. Maderas preservadas mediante procesos con presión en autoclave". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 22 pp. (1992).