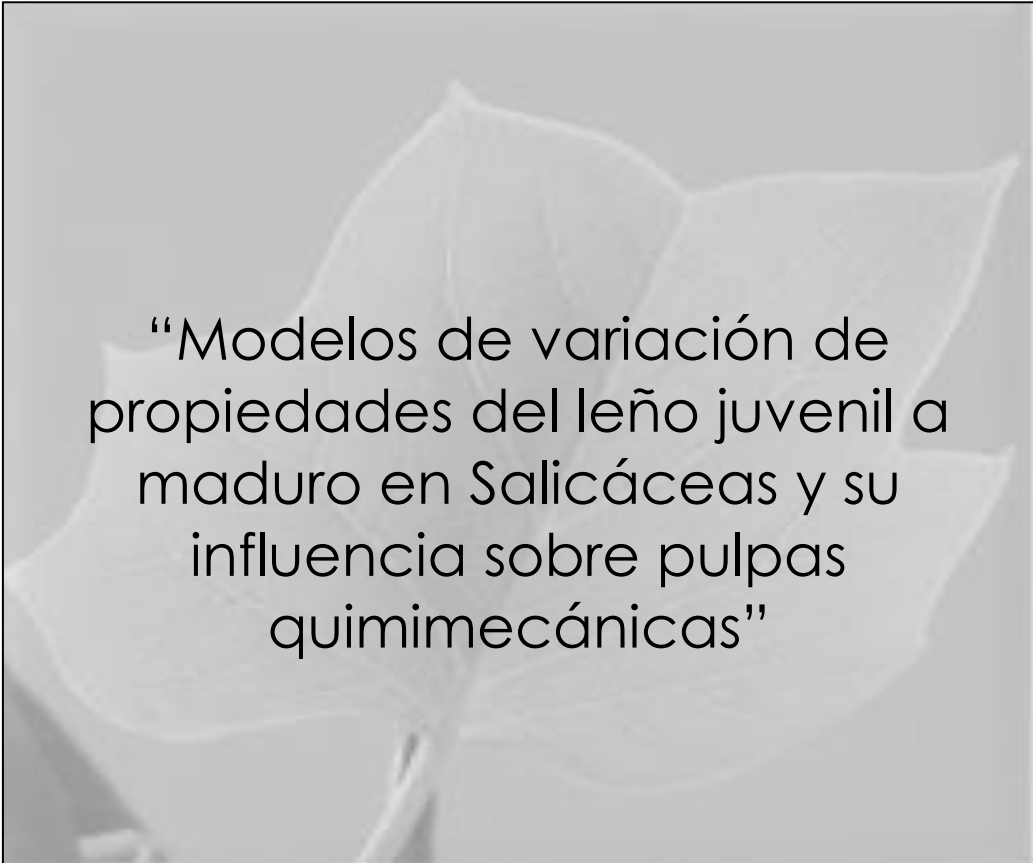




UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y
FORESTALES



“Modelos de variación de
propiedades del leño juvenil a
maduro en Salicáceas y su
influencia sobre pulpas
químico-mecánicas”

Ing. Ftal. Ana Clara Cobas

Directora: Dra. María Cristina Area

Co-Directora: Dra. Silvia Monteoliva

La Plata, Diciembre de 2012.

Agradecimientos

A Papel Prensa SA., por el apoyo económico y por facilitarme el muestreo de sus plantaciones.

Al PROCYP y su gente, Fernando y Julieta, por permitirme realizar la parte experimental en sus instalaciones y compartir sus conocimientos.

A mi Directora María Cristina Area y co-Directora Silvia Monteoliva, por su generosa paciencia y sabios consejos.

A mi mamá, Susana; mis hermanas María José y Mariana, mi marido Manuel y a mi pedacito de cielo, mi hijo Joaquín, por su amor y apoyo incondicional.

A los que estuvieron y hoy ya no están, pero siguen en mi corazón.

A mi familia del alma: Patricia Rivas, Marta Andrada y Jorge Marquina, por creer en mí.

A todos los que aportaron su granito de arena en este arduo camino, gracias.

“El experimentador que no sabe lo que está buscando no comprenderá lo que encuentra”.

Claude Bernard (1813-1878) Fisiólogo francés.

RESUMEN

En Argentina, la madera de salicáceas (álamos y sauces) es utilizada en diversos usos industriales como madera aserrada, envases y tableros, pero principalmente en la fabricación de pulpa para papel de diario. El rápido crecimiento de las salicáceas produce árboles que alcanzan un tamaño comercial a edades muy tempranas con turnos de aprovechamiento de 10 a 12 años. Esta disminución en la edad de rotación incrementa la proporción de leño juvenil, aunque esta proporción no está cuantificada en las plantaciones comerciales de álamo y sauce en Argentina. El leño juvenil fue definido para las coníferas como la zona más cercana al centro del árbol, que se extiende desde la base hasta el tope. Esta definición se aplica con algunas variaciones a las angiospermas. La literatura indica que la madera juvenil está asociada a una edad fisiológica temprana de las células cambiales y presenta menor densidad, elementos fibrosos más cortos y propiedades de resistencia menores, en comparación con la madera madura. El objetivo de esta tesis fue determinar los patrones de variación axial y radial de densidad básica, morfometría de fibras y vasos y composición química, de árboles provenientes de plantaciones comerciales de *Populus deltoides* `Australia 129-60` y *Salix babylonica* var *sacramenta*. Asimismo, y en base a lo anterior, definir la edad de formación de madera juvenil y madura y determinar la incidencia de la presencia de estos tipos de leño sobre la calidad de las pulpas quimimecánicas destinadas a la elaboración de papel de diario.

Se trabajó con 5 árboles de *Salix babylonica* var *sacramenta* "sauce americano" extraídos de una plantación de Papel Prensa S.A., Establecimiento "Las Animas", Villa Paranacito, Entre Ríos (33° 45' LS; 59° 05' W) y 5 árboles de *Populus deltoides* `Australia 129-60` "álamo australiano" correspondientes a plantaciones para debobinado en la Zona del Delta Bonaerense. La edad de los ejemplares de *Populus* muestreados fue de 17 años y en el caso de *Salix*, de 45 años. Se midió altura total, diámetro a la altura de pecho (DAP) con corteza y sin corteza en los árboles seleccionados. Se extrajo un disco completo de 5 cm de espesor en 5 alturas en el fuste y se midieron anualmente o cada 5 años las siguientes variables: ancho de anillos de crecimiento, densidad básica, morfometría de fibras y vasos (longitud, ancho, lumen y espesor de la pared de las fibras), composición

química (extractivos en agua caliente, extractivos en alcohol benceno, lignina insoluble, lignina soluble, lignina total, celulosa y hemicelulosas).

Los resultados se expresan como: modelos de variación de las propiedades de la madera, identificación y determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura y calidad de la pulpa quimimecánica.

Inicialmente se construyeron modelos de variación axial y radial de las propiedades anatómicas, químicas y de densidad de la madera para ambas especies. El sauce americano y el álamo australiano presentaron una tendencia de variación radial que consiste en un aumento de sus valores de médula a corteza en la mayoría de sus propiedades, con excepción del contenido de hemicelulosas en álamo y contenido de celulosa y espesor de pared en sauce, que presentan una disminución de sus valores con la edad. Las variaciones de las propiedades en sentido axial no son tan uniformes como las radiales. Las principales diferencias se producen entre la base y la primera troza comercial (altura del pecho) en ambas especies. Algunas propiedades presentan una disminución de sus valores dentro de la primera troza, mientras que otras aumentan. En el resto del fuste las propiedades no presentan variación significativa o se mantienen constantes.

Teniendo en cuenta los patrones de variación de las propiedades anatómicas y de la densidad, se realizó la determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura por medio del método de regresiones segmentadas. En el álamo australiano, la edad estimada de transición entre madera juvenil y madura no fue idéntica para todas las propiedades. Se obtuvieron edades de 4, 5, 7 y 9 años dependiendo de la variable (vasos, fibras o densidad). En sauce americano, dependiendo de la variable analizada (vasos, fibras o densidad) la edad de transición entre madera juvenil y madura presentó diferentes valores entre los rangos de 5 a 10 y 10 a 15 años.

Se evaluaron las propiedades de resistencia y ópticas de 5 pulpas CMP obtenidas como mezclas en diferente proporción de madera juvenil (MJ) y madera madura (MM) en álamo y sauce. El comportamiento de ambos clones fue similar. Las propiedades de resistencia aumentaron con una mayor proporción de MJ en la mezcla. Los mejores valores de tracción y rasgado se obtuvieron con 100% y 75% de MJ en la mezcla respectivamente. Las propiedades ópticas, en cambio,

presentaron el comportamiento inverso, obteniéndose los mejores valores de opacidad y blancura a medida que aumenta la proporción de MM.

Como conclusión, en esta tesis se identificaron patrones generales de variación de densidad y propiedades anatómicas y químicas, que permitieron determinar la edad de transición de madera juvenil a madera madura para un clon de álamo y uno de sauce de interés comercial. Para turnos de rotación cortos (10 años), usuales en la industria de pulpas celulósicas en Argentina, la proporción de madera juvenil sería del 82% del área basal. Para la industria de aserrado y debobinado, donde se utilizan rotaciones de 17 años o más, la proporción de madera madura sería de 74%. La densidad y algunos parámetros anatómicos y químicos de la madera juvenil mostraron magnitudes inferiores con respecto a la madera madura, sin embargo, las propiedades mecánicas de las pulpas quimimecánicas elaboradas con mayor proporción de madera juvenil fueron superiores en todos los casos.

ABSTRACT

In Argentina, the wood of Salicaceae (poplar and willow) is used in various industrial uses as lumber, container and boards, but primarily in the manufacture of pulp for newsprint. The rapid growth of the Salicaceae produces trees that reach marketable size at an early age, with harvesting intervals of 10 to 12 years. This decrease in the rotation age increases the proportion of juvenile wood, although this proportion is not quantified in commercial plantations of poplar and willow in Argentina. The juvenile wood was defined for conifers as the area closest to the center of the tree, which extends from the base to the top. This definition applies, with variations, to angiosperms.

The literature indicates that juvenile wood is associated with cambial cells of early physiological age, and has less density, short fibrous elements and lower strength properties, compared with mature wood. The aim of this thesis was to determine the patterns of axial and radial variation of basic density, fiber and vessel morphometry and chemical composition of trees from commercial plantations *Populus deltoides* `Australia 129-60` y *Salix babylonica* var *sacramenta*.

Moreover, and based on this, to define the training age juvenile and mature wood and to determine the incidence of the presence of these types of wood on the quality of chemimechanical pulps for newsprint production. We worked with 5 trees of *Salix babylonica* var *sacramenta*, "American willow", taken from a plantation of Papel Prensa SA, "Las Animas", Villa Paranacito, Entre Ríos (33° 45' LS; 59° 05' W) and 5 trees of *Populus deltoides* `Australia 129-60`, "Australian poplar", from plantations for rewinding in Buenos Aires Delta Zone.

The age of the sampled specimens of *Populus* was 17 years, and in the case of *Salix*, 45. Five heights were labeled on the stem of the specimens, from which a full disc of 5 cm thick was extracted. On the sampled material, annually or every five years, the following variables were measured: total height, diameter at breast height (DBH) with and without bark, growth rings width, basic density, fibers and vessel morphometry (length, lumen wide and wall thickness of the fibers), chemical composition (hot water extractives, alcohol-benzene extractives, insoluble and soluble lignin, total lignin, cellulose and hemicelluloses).

The results are expressed as: the patterns of variation of wood properties, the identification and determination of the age of transition between juvenile and mature wood, and chemimechanical pulp quality.

Initially, models of axial and radial variation of the anatomical properties, chemical and wood density for both species were built. The American willow and Australian poplar have a tendency of radial variation consisting of an increase of the values from the pith to the bark in most of its properties, except the content of hemicelluloses in poplar and cellulose content and wall thickness willow, which show a decrease of their values with age.

The variations of the properties in the axial direction are not as uniform as the radial ones. The main differences are between the base and the first commercial log (breast height) in both species. Some properties show a reduction of their values within the first log, while others increase. In the rest of the stem all other properties did not present significant variation or they remained constant.

Subsequently, taking into account the variation patterns of the anatomical properties and density, the age of transition between juvenile and mature wood was determined through the segmented regression method.

In Australian poplar, the estimated age of transition between juvenile and mature wood was not identical for all properties. The obtained ages were 4, 5, 7 and 9 years, depending on the variable (vessels, fibers or density).

In American willow, depending on the variable analyzed (vessels, fibers or density), the age of transition between juvenile and mature wood showed different values in the ranges 5-10 and 10-15 years.

Finally, the strength and optical properties of 5 CMP pulps, obtained as mixtures in different proportions of juvenile wood (MJ) and mature wood (MM) of poplar and willow were evaluated. The behavior of both clones was similar. The strength properties increased with a larger proportion of MJ in the mixture. Best tensile and tear values were obtained with 100% and 75% of MJ in the mixture respectively. The optical properties, however, had the opposite behavior, obtaining the best opacity and brightness values as the proportion of MM increases.

In conclusion, this thesis identified general patterns of variation in density and anatomical and chemical properties that helped to determine the age of transition from juvenile wood to mature wood for a clone of poplar and other of willow of commercial interests. For short rotation times (10 years), usual in the pulp industry

in Argentina, the proportion of juvenile wood would be 82% of the basal area. For the sawing and unwinding industry, where rotations of 17 years or more are used, the proportion of mature wood of higher quality would be of 74%. The density and anatomical parameters of juvenile wood showed a lower quality regarding mature wood, however, the mechanical properties of chemimechanical pulps produced with higher proportion of juvenile wood were superior in all cases.

Índice

Resumen	3
Abstract	6
Lista de tablas.....	11
Lista de figuras	16
1. Hipótesis y Objetivos	21
1.2. Objetivo general:.....	21
1.3. Definición del problema.....	23
2. Introducción	24
2.1. Madera juvenil	24
2.2. Patrones de variación axial y radial.....	26
2.2. a Patrones de variación conceptuales.....	26
2.2. b. Patrones generales de variación axial y radial en Coníferas	38
2.2. c.Patrones de variación de la madera juvenil en Latifoliadas	38
2.3. Antecedentes bibliográficos en Salicáceas	40
2.4. Determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura	44
2.5. Uso de la madera Juvenil	46
2.5. a.Pulpas Quimimecánicas	47
3. Materiales y metodos	49
3.1. Descripción de los sitios de muestreo	49
3.2. Selección de árboles y toma de muestras	50
3.3. Metodología y/o normas para la medición de las variables	54
3.4. Análisis estadísticos.....	60
3.5. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura.....	61
3.6. Pulpado quimimecánico	62
3.6. a. Metodología y/o normas para la medición de las propiedades de la pulpas	66
3.6. b. Análisis estadístico.....	68
4. Resultados y Discusión.....	70
4. I. Variación axial y radial de las propiedades de la madera.....	70
4. I.A. Álamos: Variables de la madera	70
4. I.A.1.Anillos de crecimiento y Densidad Básica.....	70
4. I.A.2.Morfometría de Fibras	75
4. I.A.3.Composición Química.....	84
4. I.B. Sauces: Variables de la madera	91
4. I.B.1. Anillos de crecimiento y Densidad básica	91
4. I.B.2. Morfometría de fibras	95

4. I.A.3. Composición Química.....	104
4. II. Determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura.	111
4. II.A. Ecuaciones en Álamos.....	111
4. II.B. Ecuaciones en Sauces	125
4. II.C. Modelos de distribución de madera juvenil y madura:	138
4. II.D. Discusión de los modelos de variación en base a los patrones de variación radial y axial.....	146
4. II.D.a. Variación radial (con la edad fisiológica del cambium).....	146
4. II.D.b. Variación axial.....	151
4. II.D.c Modelos de Madera Juvenil.....	154
4. II. E. Análisis de las propiedades de la madera juvenil y madura en sauce y álamo.....	155
4. III. Variación en las propiedades de las pulpas CMP.....	157
4. III.A. Álamos	158
4. III.A.1. Propiedades físicas	158
4. III.A.2. Propiedades mecánicas	159
4. III.A.3. Propiedades ópticas	159
4. III.A.4. Análisis de varianza en Álamos	160
4. III.B. Sauces.....	169
4. III.B.1. Propiedades Físicas	169
4. III.B.2. Propiedades mecánicas	169
4. III.B.3. Propiedades Ópticas	170
4. III.B.4. Análisis de varianza en Sauces	171
4. III.C. Análisis Estadísticos sobre mezclas de pulpas.....	181
4. III.C.a. Correlaciones y Regresión Múltiple.	181
4. III.C.b. Varianza Multifactorial.....	183
4. III.C.c. Diseño de mezclas: Optimización de las propiedades de las mezclas de pulpas.	184
5. Conclusiones	188
6. Bibliografía	193
7. Anexo.....	205
1.A. Calculo de los valores ponderados para las propiedades medidas.	205
1.B. Modelos de regresión para Álamos y Sauces	212

Lista de tablas

Tabla 2.1:	Características de la madera juvenil en los diferentes grupos de árboles.	25
Tabla 3.1:	Álamo: altura total y comercial.	55
Tabla 3.2:	Sauce: altura total y comercial.	55
Tabla 3.3:	Álamo: Diámetro a la altura del pecho con corteza y sin corteza.	55
Tabla 3.4:	Sauce: Diámetro a la altura del pecho con corteza y sin corteza.	55
Tabla 3.5:	Normas para la determinación de la composición química.	60
Tabla 3.6:	Mezclas de pulpas.	65
Tabla 4.1:	Valores de ancho de anillo promedio por altura en madera de álamo.	70
Tabla 4.2:	Resumen de las variables de la madera de álamo.	72
Tabla 4.3:	Resumen de los valores de la composición química de madera de álamo.	72
Tabla 4.4:	Valores de densidad promedio por altura en madera de álamo.	73
Tabla 4.5:	Valores de longitud de fibra promedio por altura en madera de álamo.	76
Tabla 4.6:	Valores de lumen promedio por altura en madera de álamo.	78
Tabla 4.7:	Valores de espesor de fibra promedio por altura en madera de álamo.	79
Tabla 4.8:	Valores de ancho de fibra promedio por altura en madera de álamo.	81
Tabla 4.9:	Valores de diámetro de vasos promedio por altura en madera de álamo.	82
Tabla 4.10:	Valores de frecuencia de vasos en madera de álamo.	83
Tabla 4.11:	Valores promedio de solubles en alcohol/benceno en madera de álamo.	85
Tabla 4.12:	Valores promedio de solubles en agua caliente en madera de álamo.	86
Tabla 4.13:	Valores promedio del contenido de lignina en madera de álamo.	87
Tabla 4.14:	Valores promedio de contenido de celulosa en madera de álamo.	88
Tabla 4.15:	Valores promedio del contenido de hemicelulosas en madera de álamo.	90

Tabla 4.16:	Valores de ancho de anillo promedio por altura en madera de sauce.	91
Tabla 4.17:	Resumen de los valores promedio de las variables de la madera de sauce.	93
Tabla 4.18:	Resumen de los valores promedio de la composición química en madera de sauce.	93
Tabla 4.19:	Valores de densidad promedio por altura en madera de sauce.	95
Tabla 4.20:	Valores de longitud de fibra promedio por altura en madera de sauce.	97
Tabla 4.21:	Valores de lumen de fibra promedio por alturas en madera de sauce.	99
Tabla 4.22:	Valores de espesor de pared promedio por alturas en madera de sauce.	100
Tabla 4.23:	Valores de ancho de fibra promedio por alturas en madera de sauce.	101
Tabla 4.24:	Valores de diámetro de vasos promedio por alturas en madera de sauce.	102
Tabla 4.25:	Valores de frecuencia de vasos promedio por alturas en madera de sauce.	103
Tabla 4.26:	Valores de solubles en alcohol/benceno en madera de sauce.	104
Tabla 4.27:	Valores de solubles en agua caliente en madera de sauce.	106
Tabla 4.28:	Valores de porcentaje de lignina en madera de sauce.	107
Tabla 4.29:	Valores del porcentaje de celulosa en madera de sauce.	108
Tabla 4.30:	Valores del porcentaje de hemicelulosas en madera de sauce.	110
Tabla 4.31:	Densidad: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	112
Tabla 4.32:	Longitud de fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	113
Tabla 4.33:	Lumen: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	114
Tabla 4.34:	Espesor: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	115

Tabla 4.35:	Ancho: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	116
Tabla 4.36:	Diámetro de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	117
Tabla 4.37:	Frecuencia de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	118
Tabla 4.38:	Alcohol/Benceno: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	119
Tabla 4.39:	Agua Caliente: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	120
Tabla 4.40:	Lignina: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	121
Tabla 4.41:	Celulosa: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	122
Tabla 4.42:	Hemicelulosas: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	123
Tabla 4.43:	Densidad: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	125
Tabla 4.44:	Longitud de fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	126
Tabla 4.45:	Lumen: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	127
Tabla 4.46:	Espesor: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	128

Tabla 4.47:	Ancho: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	129
Tabla 4.48:	Diámetro de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	130
Tabla 4.49:	Frecuencia de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	131
Tabla 4.50:	Alcohol/Benceno: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	132
Tabla 4.51:	Agua Caliente: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	133
Tabla 4.52:	Lignina: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	134
Tabla 4.53:	Celulosa: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	135
Tabla 4.54:	Hemicelulosas: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de sauce según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .	136
Tabla 4.55:	Características anatómicas y químicas de la madera juvenil y madura en sauce y álamo.	155
Tabla 4.56:	Valores de Drenabilidad.	158
Tabla 4.57:	Valores de ensayos de propiedades físicas en álamo.	158
Tabla 4.58:	Valores de ensayos de propiedades mecánicas en álamo.	159
Tabla 4.59:	Valores de ensayos de propiedades ópticas en álamo.	160
Tabla 4.60:	Valores de tracción en pulpas de álamo.	160
Tabla 4.61:	Valores de rasgado en pulpas de álamo.	162
Tabla 4.62:	Valores de elongación en pulpa de álamo.	163
Tabla 4.63:	Valores de TEA en mezclas de pulpa de álamo.	164
Tabla 4.64:	Valores de resistencia al aire en mezclas de pulpas en álamo.	165
Tabla 4.65:	Valores de opacidad en mezclas de pulpas en álamo.	166

Tabla 4.66:	Valores de espesor en mezclas de pulpas de álamo.	167
Tabla 4.67:	Valores de Z span para mezclas de pulpas en álamo.	168
Tabla 4.68:	Valores de ensayos de propiedades físicas en sauce.	169
Tabla 4.69 :	Valores de ensayos de propiedades mecánicas en sauce.	170
Tabla 4.70:	Valores de ensayos de propiedades ópticas en sauce.	170
Tabla 4.71:	Valores de tracción en mezcla de pulpas en sauce.	171
Tabla 4.72:	Valores de rasgado en mezclas de pulpas de sauce.	172
Tabla 4.73:	Valores de elongación en mezclas de pulpas de sauce.	173
Tabla 4.74:	Valores de TEA en mezclas de pulpas de sauce.	174
Tabla 4.75:	Valores de la resistencia al paso del aire en mezclas de pulpas de sauce.	175
Tabla 4.76:	Valores de opacidad en mezclas de pulpas de sauce.	177
Tabla 4.77:	Valores de espesor en mezclas de pulpas de sauce.	178
Tabla 4.78:	Valores de Z span en mezclas de pulpas de sauce.	179
Tabla 4.79:	Correlaciones de las propiedades físicas (densidad básica), anatómicas y químicas y ensayos físicos y mecánicos en pulpas entre madera juvenil y madura en álamo.	181
Tabla 4.80:	Correlaciones de las propiedades físicas (densidad básica), anatómicas y químicas y ensayos físicos y mecánicos en pulpas entre madera juvenil y madura en sauce.	182
Tabla 4.81:	Ecuaciones obtenidas para las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de pulpas de álamo.	184
Tabla 4.82:	Combinación de proporciones de madera juvenil/madura que optimizan las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de álamo.	185
Tabla 4.83:	Ecuaciones obtenidas para las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de pulpas de sauce.	186
Tabla 4.84:	Combinación de proporciones de madera juvenil/madura que optimizan las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de sauce.	187

Lista de figuras

Figura 2.1:	Modelos de variación conceptuales en las propiedades de la madera.	27
Figura 2.2:	Variación axial y radial de la longitud de las traqueidas y de la densidad del fuste.	28
Figura 2.3:	Variación de las propiedades en los diferentes anillos y conos de crecimiento.	29
Figura 2.4:	Esquema de las zonas con las diferentes clases de madera de acuerdo a los tipos de variación propuestos.	30
Figura 2.5	Variación del peso específico de <i>Quercus alba</i> a lo largo del fuste.	33
Figura 2.6	Modelo de variación de la longitud de fibras en el fuste de <i>Eucalyptus regnans</i> .	34
Figura 3.1:	Mapa de la Región del Delta del Paraná.	50
Figura 3.2:	Muestreo de álamo.	52
Figura 3.3:	Muestreo de sauce.	52
Figura 3.4:	Rodajas de álamo.	53
Figuras 3.5 y 3.6:	Álamo: probetas de densidad, tablas centrales por alturas.	53
Figura 3.7:	Sauce rodaja basal.	54
Figuras 3.8 y 3.9:	Sauce: tabla central y probetas de densidad.	54
Figura 3.10:	Preparado de fibras de álamo (40x).	56
Figura 3.11:	Preparado de fibras de sauce (10x).	57
Figura 3.12:	Corte transversal de álamo (400x).	57
Figura 3.13:	Corte transversal de sauce (400x).	58
Figura 3.14:	Corte transversal de álamo (40X).	58
Figura 3.15:	Corte transversal de sauce (40 X).	59
Figura 3.16:	Prevaporización de los chips.	63
Figura 3.17:	Digestor con recirculación de licor.	63
Figuras 3.18 y 3.19:	Refinador de discos, chips cocidos.	64
Figuras 3.20 y	Lavado de pulpa y pulpa.	

3.21:		64
Figuras 3.22 y 3.23:	Refinador PFI.	65
Figura 4.1:	Valores de ancho de anillo por alturas y sus valores promedio en madera de álamo.	71
Figura 4.2:	Variación de la densidad por alturas y sus valores promedios en madera de álamo.	74
Figura 4.3:	Variación axial y radial de la longitud de fibra en madera de álamo.	77
Figura 4.4:	Variación del lumen de fibras por alturas y su valor promedio en madera de álamo.	78
Figura 4.5:	Variación del espesor de pared de fibra por altura y sus valores promedios en madera de álamo.	80
Figura 4.6:	Variación del ancho de fibra por alturas y sus valores promedios en madera de álamo.	81
Figura 4. 7:	Variación del diámetro de vasos, valores por altura y promedio en madera de álamo.	82
Figura 4.8:	Variación axial y radial del número de vasos en madera de álamo.	84
Figura 4.9:	Variación axial y radial del contenido de solubles en alcohol/benceno en madera de álamo.	85
Figura 4.10:	Variación axial y radial del contenido de solubles en agua caliente en madera de álamo.	86
Figura 4.11:	Variación axial y radial del contenido de lignina total (soluble e insoluble) en madera de álamo.	87
Figura 4.12:	Variación radial y axial del contenido de celulosa en madera de álamo.	89
Figura 4.13:	Variación radial y axial del contenido de hemicelulosas en madera de álamo.	90
Figura 4.14:	Variación axial y radial del ancho de anillo en madera de sauce.	92
Figura 4.15:	Variación axial y radial de los valores de densidad básica en madera de sauce.	94
Figura 4.16:	Variación radial y axial de la longitud de fibras en madera de sauce.	96
Figura 4.17:	Variación del lumen de fibra por altura y su valor promedio en	

	madera de sauce.	98
Figura 4.18:	Variación del espesor de fibra por altura y su valor promedio en madera de sauce.	99
Figura 4.19:	Variación del ancho de fibra por altura y su valor promedio en madera de sauce.	101
Figura 4.20:	Variación del diámetro de vasos por altura y su valor promedio en madera de sauce.	102
Figura 4.21:	Variación axial y radial del número de vasos en madera de sauce.	103
Figura 4.22:	Variación axial y radial del contenido de solubles en alcohol/benceno en madera de sauce.	105
Figura 4.23:	Variación radial y axial del contenido de solubles en agua caliente en madera de sauce.	106
Figura 4.24:	Variación axial y radial del contenido de lignina total (soluble e insoluble) en madera de sauce.	107
Figura 4.25:	Variación axial y radial del contenido de celulosa en madera de sauce.	109
Figura 4.26:	Variación axial y radial del contenido de hemicelulosas en madera de sauce.	110
Figura 4.27:	Volumen por árbol de madera juvenil y madura en álamo.	124
Figura 4.28:	Volumen por árbol de madera juvenil y madura en sauce.	137
Figura 4.29:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Longitud de fibra y b) Densidad básica, en madera de álamo.	138
Figura 4.30:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Lumen de fibra; b) Espesor de fibra y c) Ancho de fibra en madera de álamo.	139
Figura 4.31:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Diámetro de vasos y b) Frecuencia de vasos en madera de álamo.	140
Figura 4.32:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Solubles en agua caliente y b) Solubles en alcohol/benceno en madera de álamo.	140
Figura 4.33:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Lignina b) Celulosa y c) Hemicelulosas en madera de álamo.	141

Figura 4.34:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Longitud de fibra y b) Densidad básica, en madera de sauce.	142
Figura 4.35:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Ancho de fibra; b) Espesor de fibra y c) Lumen de fibra en madera de sauce.	143
Figura 4.36:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Diámetro de vasos y b) Frecuencia de vasos en madera de sauce.	144
Figura 4.37:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Solubles en alcohol/benceno y b) Solubles en agua caliente en madera de sauce.	144
Figura 4.38:	Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Lignina b) Celulosa y c) Hemicelulosas en madera de sauce.	145
Figura 4.39:	Variación de los valores promedio de tracción por tipo de mezcla en álamo.	161
Figura 4.40:	Variación de la resistencia al rasgado por tipo de mezcla en álamo.	162
Figura 4.41:	Variación del porcentaje de elongación en relación a la mezcla usada en álamo.	163
Figura 4.42:	Variación del Índice TEA según tipo de pulpa utilizada en madera de álamo.	164
Figura 4.43:	Variación de la resistencia al aire según mezcla de pulpa en álamo.	165
Figura 4.44:	Variación de la opacidad según tipo de mezcla de pulpas en álamo.	166
Figura 4.45:	Variación del espesor según tipo de mezcla de pulpas en álamo.	167
Figura 4.46:	Variación del Z span según tipo de mezcla de pulpas en álamo.	168
Figura 4.47:	Variación de la resistencia a la tracción según mezcla de pulpa en sauce.	171
Figura 4.48:	Variación de la resistencia al rasgado según mezcla de pulpa en sauce.	172
Figura 4.49:	Variación del porcentaje de elongación de acuerdo al tipo de	

	mezcla de pulpa en sauce.	173
Figura 4. 50:	Variación del Índice TEA de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.	175
Figura 4.51:	Variación de la resistencia al aire de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.	176
Figura 4.52:	Variación de la opacidad de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.	177
Figura 4.53:	Variación del espesor de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.	178
Figura 4.54:	Variación del Z span de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.	179
Figura 4.55:	Representación de las propiedades físicas según la proporción de madera juvenil en la región de mezcla a) álamo y sauce b)	180

1. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.1. Hipótesis de trabajo

La variación de ciertas propiedades del leño permite formular modelos.

El análisis de modelos de variación de ciertas propiedades del leño permite identificar el leño juvenil y el leño maduro.

La proporción de leño juvenil y de leño maduro presentes en la materia prima fibrosa afecta la calidad de la pulpa quimimecánica con ella elaborada.

1.2. Objetivo general:

“Desarrollar modelos de variación de ciertas propiedades anatómicas, físicas y químicas de la madera de Salicáceas para identificar el leño juvenil y el leño maduro, y determinar la incidencia de la presencia de estos tipos de leño sobre la calidad de las pulpas quimimecánicas con las que se elabora papel de diario”

Objetivos particulares:

1- Construir un modelo general de variación de las propiedades dentro del árbol para un clon de *Salix* y un clon de *Populus*, determinando en cada anillo de crecimiento:

- ✓ propiedades anatómicas en términos de: ancho del anillo, morfología de fibras (longitud, ancho, y espesor de pared), número de vasos/mm² y diámetro de vasos,
- ✓ densidad de la madera,
- ✓ composición química en términos de extractivos, hemicelulosas, celulosa y lignina soluble e insoluble.

2- Analizar el modelo de variación formulado e identificar leño juvenil y leño maduro.

1. Hipótesis y Objetivos

3- Determinar la proporción de leño juvenil y de leño maduro que presentan los árboles estudiados a la edad de muestreo.

4- Analizar y evaluar la calidad de la pulpa quimimecánica elaborada con diferentes proporciones de leño juvenil y leño maduro.

1.3. Definición del problema

En Argentina, las forestaciones de Salicáceas (álamos y sauces) son utilizadas en diversas aplicaciones industriales como madera aserrada, envases y tableros, pero principalmente en la fabricación de pulpa para papel de diario. En el año 2010, se extrajeron en todo el país 3.808.571 toneladas de madera de distintas especies, de las cuales un 12% corresponde a sauces y álamos. El destino de estos rollizos se divide en 46 % pulpa, 27% aserraderos y 27% tableros de partículas.

El amplio del cultivo de Salicáceas en el país se debe a que son muy versátiles en cuanto a posibilidad de sitios ya que hay especies y clones adaptados a suelos anegados y otros a condiciones de sequía. Se destacan básicamente por su rápido crecimiento, la factibilidad de su propagación vegetativa, su capacidad de rebrotar a partir de sus cepas, madera blanca y de baja densidad.

El rápido crecimiento produce árboles que alcanzan un tamaño comercial a edades muy tempranas con turnos de aprovechamiento de entre los 10-12 años. Esta disminución en la edad de rotación incrementa la proporción de leño juvenil. El concepto más generalizado es que la madera juvenil resulta indeseable, sobre todo para aplicaciones sólidas de la madera, ya que el leño juvenil posee menores resistencias y es más inestable frente al secado. En la industria de la pulpa y el papel, afecta negativamente la calidad y uniformidad de la materia prima, pudiendo influir sobre las operaciones de proceso y la calidad del producto.

La calidad de la madera destinada a proveer de material fibroso a la industria de la pulpa y el papel está determinada por la variabilidad de sus características físicas y químicas y aunque ninguna propiedad de la madera explica por sí sola el comportamiento de las pulpas obtenidas, la utilización de las mismas permite predecir en forma razonable muchas de las propiedades de las pulpas quimimecánicas.

1. Hipótesis y Objetivos

El conocimiento de los patrones de variación axial y radial de las propiedades de las maderas y la zona de demarcación entre la madera juvenil y madura permitirá delimitar el turno de corta de acuerdo a la propiedad que se quiera potenciar y el destino final que tenga esa madera. Asimismo conocer las variaciones radiales y axiales de las distintas propiedades resultará útil a la hora de definir la estrategia de muestreo y aportará datos que podrán ser utilizados en los proyectos de mejoramiento genético.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Madera juvenil

El leño juvenil puede ser definido como la zona más cercana al centro del árbol, que se extiende desde la base hasta el ápice (Zobel y Talbert, 1988). Su extensión puede variar considerablemente aún entre árboles de una misma especie y edad (Zobel y Jett, 1995). La literatura indica que la madera juvenil está asociada a una edad fisiológica temprana de las células cambiales y presenta menor densidad, elementos fibrosos más cortos y propiedades de resistencia menores en comparación con la madera madura (Yanchuk et al, 1990; Zobel y Sprague, 1998).

Generalmente, las propiedades de la madera juvenil difieren de las del leño maduro, ya que presentan una gran variación, mientras que en la madera madura logran una estabilización de sus valores (Saranpää, 2003; Burdon et al, 2004).

La tendencia general indica menores valores para ciertos atributos en los primeros anillos, incrementándose relativamente rápido durante unos años, para luego estabilizarse o incrementar muy gradualmente hacia el leño maduro (Bendtsen y Senft, 1986).

Las propiedades de la madera juvenil en coníferas y latifoliadas se sintetizan en la tabla 2.1.

2. Introducción

Tabla 2.1: Características de la madera juvenil en los diferentes grupos de árboles.				
Propiedades		Coníferas	Latifoliadas	
Anatómicas	Longitud de fibras	cortas	cortas	
	Ancho	grande	menor	
	Lumen	grande	-	
	Espesor de pared	delgadas	menor	
	Angulo microfibrilar	alto	alto	
	Otros		alto % leño compresión	alto % leño tensión
			bajo % leño tardío	más fibras, menos vasos
		alto grano espiralado	alto grano espiralado	
Químicas	Celulosa	baja	alta (por leño tensión)	
	Lignina	alto	=	
	Hemicelulosas	alto	alto	
Físicas	Densidad	baja	baja o =	
	CH	alto	alto	
	Contracción	alta longitudinal	alta longitudinal	
Pulpas	Rendimiento Kraft	5-15 % menor	menor	
	Rasgado	menor	menor	
	Tracción	mayor	-	
	Opacidad	menor	menor	
	Blanco	menor	menor	
Productos sólidos	Acabado superficial	pobre	pobre	
	Cambios dimensionales	inestable	inestable	
	Resistencias	baja	baja	

La variación de las propiedades de la madera entre especies, árboles de una misma especie y dentro del mismo árbol, es una regla más que una excepción. Un mayor conocimiento de cómo y porque se producen estas variaciones serviría para optimizar la utilización y el procesamiento de la madera en sus diversos usos.

2.2. Patrones de variación axial y radial

2.2. a. Patrones de variación conceptuales

Algunas aproximaciones pueden usarse para definir y explicar los patrones de variación conceptuales alternativos para diferentes variables a lo largo del árbol. Los anillos de crecimiento como estructuras pueden estar demarcados o no, pero en general se toman como demarcados en los modelos. En sentido axial se puede usar la distancia, área, volumen o edad. En sentido radial podemos referirnos a distancias o edades.

Los patrones pueden definirse según Downes et al (1997) como:

- a- Modelo de simetría cilíndrica (Fig. 2.1 a): este patrón no incluye los anillos de crecimiento, pero conforma un patrón de simetría cilíndrica creado para describir la variación de la densidad en *Pinus radiata*. Para una posición radial dada, el valor de una propiedad es constante a todas las alturas a lo largo del fuste. En este tipo de simetría es común numerar los anillos desde la médula, ya que las propiedades varían en función de la distancia a la médula (secuencia fisiológica). Es el patrón clásico generado para coníferas.
- b- Modelo de simetría cónica (Fig. 2.1. b): las propiedades no varían con la altura en cada anillo de crecimiento, pero varían radialmente en la misma altura. La densidad por ejemplo es constante a diferentes alturas en el fuste dentro de un anillo de crecimiento dado. En este tipo de simetría es común numerar los anillos desde la corteza hacia la médula, ya que las propiedades varían en función del año calendario en que se formó el anillo (secuencia cronológica). Aplicable a Latifoliadas.
- c- Modelo lineal general (Fig. 2.1. c): las propiedades varían linealmente con la altura y la posición radial simultáneamente. Los anillos se numeran

2. Introducción

desde la corteza hacia la médula (secuencia cronológica). Aplicable a Latifoliadas.

- d- Modelo no lineal (Fig. 2.1. d): las propiedades varían en forma no lineal con la altura dentro de un anillo de crecimiento dado y varían también no linealmente con la posición radial. Los anillos se numeran desde la corteza hacia la médula (secuencia cronológica). Aplicable a Latifoliadas.

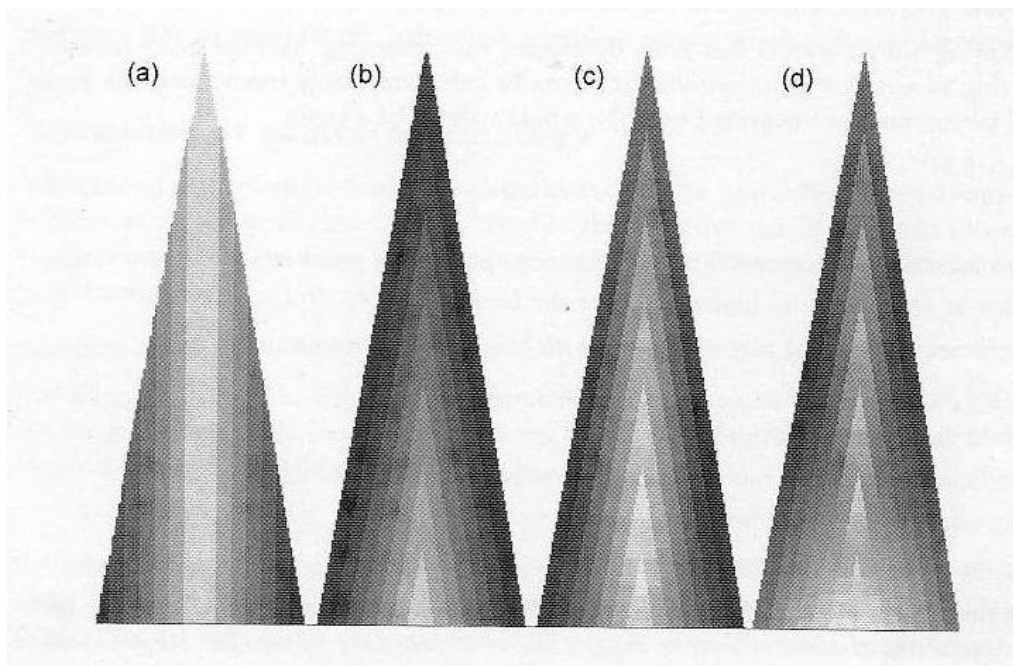


Figura 2.1: Modelos de variación conceptual en las propiedades de la madera. Los diferentes tipos de simetría exhibidos son: cilíndrico (a); cónico (b); lineal general (c) y no lineal (d) (extraída de Downes et al, 2007).

Los modelos matemáticos que sustentan estos patrones contienen términos que explican: la variación de la propiedad con la altura, la variación con la distancia a la médula y las distintas velocidades del cambio a través de los radios a diferentes alturas (interacción altura x posición radial).

En algunos casos las mediciones radiales y axiales deben ser ponderadas por las áreas o volúmenes que representan respectivamente en el fuste (variables ponderadas). Para las especies o géneros comerciales más comunes los patrones de variación de las propiedades más importantes se encuentran descritos en la bibliografía.

2. Introducción

La figura 2.2 esquematiza el modelo de variación conceptual de tipo cilíndrico-cónico para la longitud de traqueidas y densidad básica de la madera en *Picea abies* (Mäkinen et al, 2007).

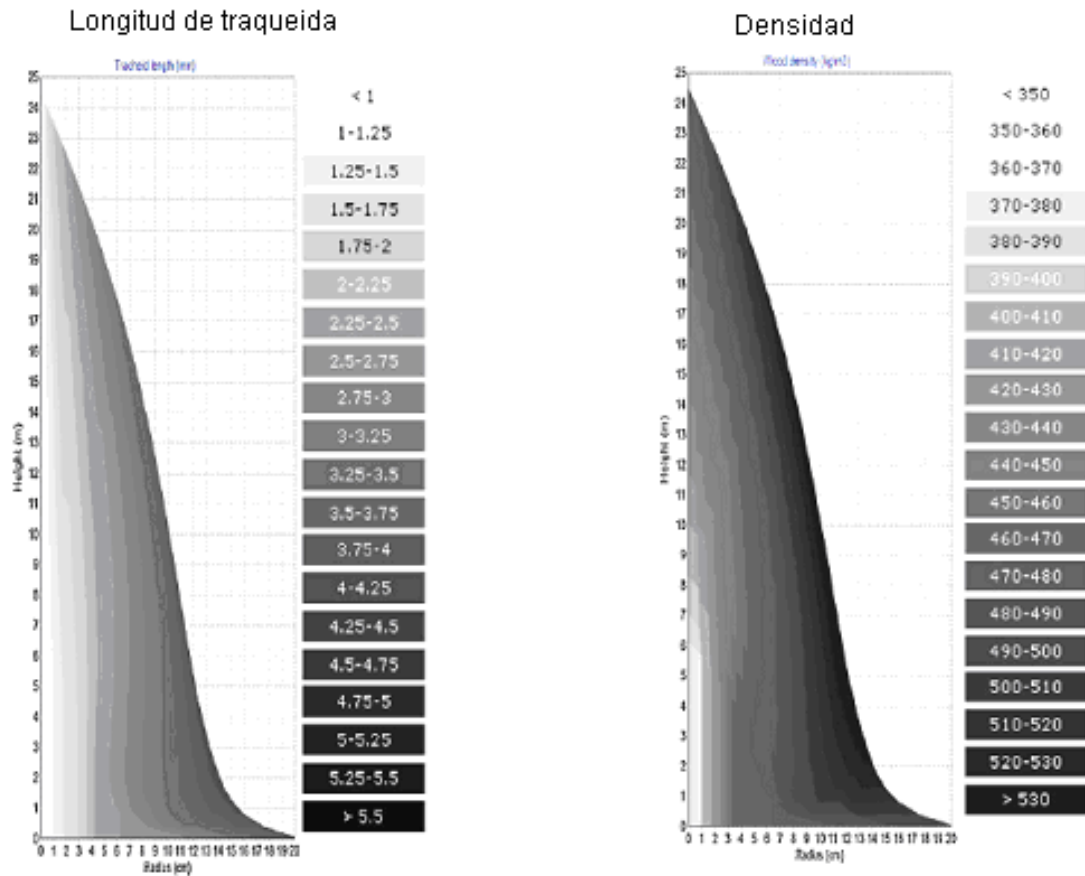


Figura 2.2: Variación axial y radial de la densidad y de la longitud de las traqueidas en *Picea abies* (extraído de Mäkinen et al, 2007).

La secuencia radial marcada en las líneas verticales del fuste es fisiológica según las edades de formación del cambium. Los valores de longitud de traqueidas muestran un cilindro central de menores longitudes que recorre todo el fuste axialmente. Las magnitudes aumentan a medida que nos acercamos a la corteza en todas las alturas muestreadas. La densidad básica sigue un comportamiento similar, pero el cilindro central no es tan marcado, ya que los valores aumentan levemente hacia el ápice dentro del mismo anillo central (patrón cónico).

2. Introducción

Existen diferentes revisiones de las variaciones de la madera juvenil en Coníferas, ya que es el grupo de plantas más estudiado en este sentido. Burdon et al (2004) en su trabajo sobre madera juvenil y madura en pino taeda y radiata se basaron en la clasificación de Duff y Nolan (1953), con ciertas modificaciones, para explicar los patrones de variación encontrados en esas especies. La interpretación del esquema de variación de las propiedades en los diferentes anillos y conos de crecimiento utilizado por Burdon (2004) se presenta en la figura 2.3:

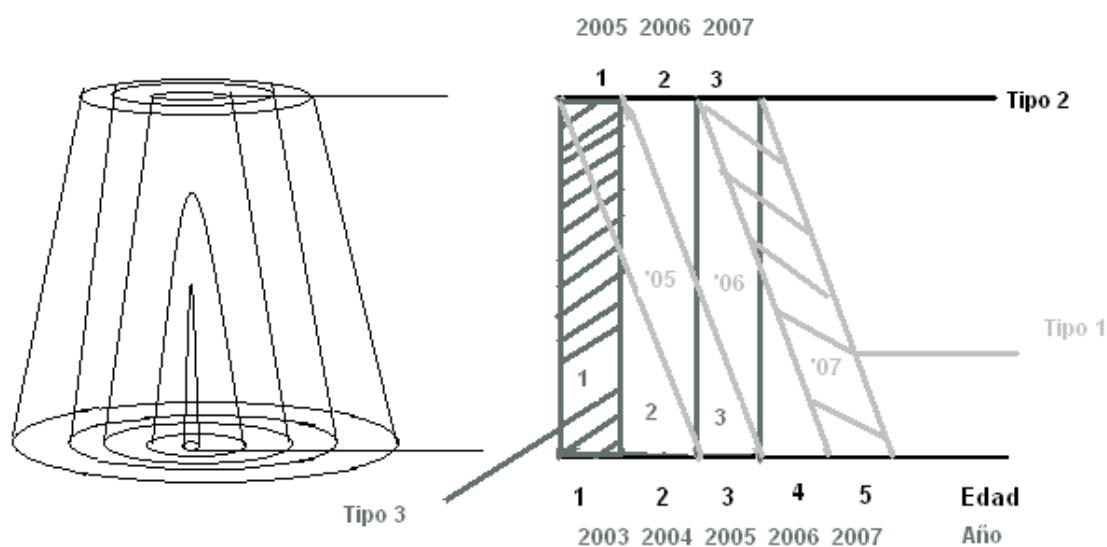


Figura 2.3: Variación de las propiedades en los diferentes anillos y conos de crecimiento utilizado por Burdon et al (2004). Los números 1, 2, 3, 4, 5 indican la edad del anillo de crecimiento y el año calendario se expresa separadamente para cada edad.

En la figura 2.3, las diferentes zonas se identifican de la siguiente manera:

Variación tipo 1 (gris claro): se corresponde con la madera formada en el mismo año calendario a lo largo del fuste (cono anual). Presenta igual edad cronológica, diferente edad fisiológica y diferentes propiedades.

Variación tipo 2 (negro): se corresponde con la madera formada en los sucesivos años o edades contadas a partir de la médula a una altura del fuste definida. Presenta diferente edad fisiológica, cronológica y propiedades.

2. Introducción

Variación tipo 3 (gris oscuro): se corresponde con la madera formada en la misma posición radial (desde la médula) a lo largo del fuste. Presenta igual edad fisiológica, diferente edad cronológica y diferentes propiedades.

La variación radial estaría representada por la variación tipo 2, mientras que la vertical sería la variación tipo 3.

Esta diferenciación entre los distintos tipos de variaciones encontradas dentro del fuste, pone en discusión el modelo clásico de “madera juvenil” propuesto por Zobel y Talbert (1988), el cual considera que el pasaje de madera juvenil a madura se realiza de forma abrupta y que la madera juvenil conforma un cilindro central. Estos autores proponen una nueva nomenclatura y categorización en coníferas que integra los conceptos clásicos con los nuevos aportes de variación. Como puede observarse en la figura 2.4, esta nueva clasificación no solo se tiene en cuenta la madera juvenil y madura sino que se considera las zonas de transición entre ambas y como varían en el fuste (axial y radialmente).

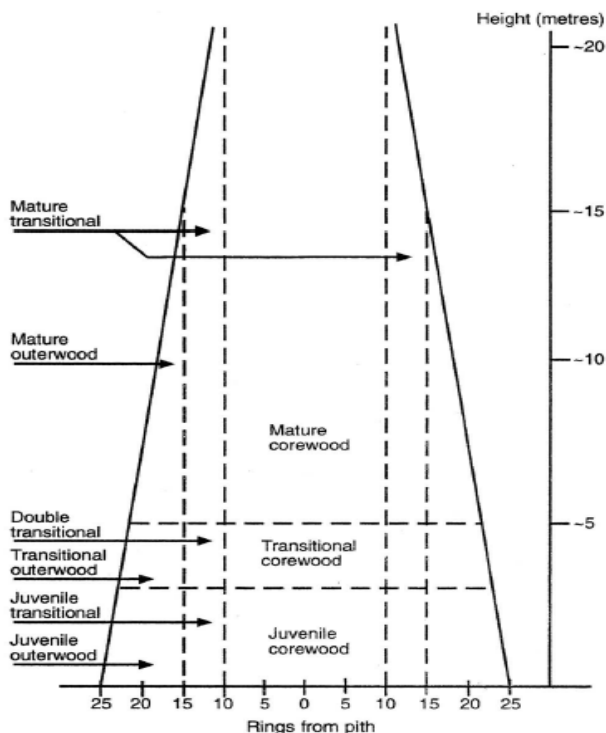


Figura 2.4: Esquema de las zonas con las diferentes clases de madera de acuerdo a los tipos de variación propuestos. (Grafico extraído de Burdon et al, 2004).

2. Introducción

La maduración de los meristemas apicales muestra un rol evidente en la formación de las propiedades finales, fuertemente asociado a las variaciones en sentido médula-corteza. Sin embargo, según estos autores hay argumentos sólidos para emplear dos conceptos separados: juvenil vs maduro (en sentido axial o vertical, “juvility versus maturity”) y madera interna vs madera externa (en sentido radial, “corewood versus outerwood”) (Figura 2.4).

Burdon et al (2004) sugieren la utilización de estos conceptos no como alternativas, sino aplicados en conjunto. Entonces, la progresión de madera juvenil a madura se interpreta a lo largo del fuste, y la madera interna se transforma en externa en el sentido radial, como se expresa en el gráfico de la figura 2.4. Con estos conceptos bases, se observa que la porción inferior del fuste contiene madera juvenil interior (“juvenile corewood”) que se integra hacia la corteza en la madera juvenil externa (“juvenile outerwood”). Hacia la parte superior del fuste la madera juvenil se integra en madera madura, y así la parte alta del tronco contiene madera madura interior (“mature corewood”) que se integra en madera madura externa (“mature outerwood”). Según estos conceptos aplicados en conjunto, la madera proveniente de raleos contendría gran cantidad de madera juvenil interior (“juvenile corewood”) y las trozas superiores del tronco madera madura interior (“mature corewood”) (figura 2.4).

Como se observa claramente en la figura 2.4, las zonas más bajas del tronco son las que presentan las mayores variaciones axiales. Es la troza más importante desde el punto de vista comercial por su volumen y su posición estratégica. Estas variaciones causan problemas de procesamiento y utilización del material fibroso (Burdon et al, 2004).

Para Latifoliadas no existe un trabajo de revisión de modelos de variación, sino que se han reportado trabajos parciales para determinados géneros comerciales donde se pone de manifiesto la complejidad del tejido de las angiospermas y la gran diversidad de especies que comprende (Panshin y de Zeeuw, 1980; Fukasawa, 1984; Downes et al, 1997; Barnett y Jeronimidis, 2003; Kojima et al, 2009). El modelo de cilindro central fue citado por Zobel y Sprague (1998) para

2. Introducción

caracterizar el modelo más difundido en latifoliadas, considerando un cilindro juvenil pero de menor diámetro en el ápice.

Los modelos presentados a continuación, para latifoliadas de porosidad circular y difusa, indican que los resultados son contradictorios y se han generados modelos parciales que no responden necesariamente al modelo clásico de cilindro central. Esto se debe en parte a la gran variabilidad de los patrones de variación (axiales y radiales) de las propiedades de la madera de latifoliadas (ver apartado 2.2.c y 2.3).

En la figura 2.5 se presenta el modelo de variación del peso específico para *Quercus alba* de 250 años, donde se observa un descenso del peso específico desde la médula hacia la corteza en todas las alturas, pero siendo más marcado en la base del árbol (Paul 1963, citado por Barnett y Jeronimidis, 2003). Las líneas verticales a lo largo del fuste representan un rango de años calendario (cada 50 años) marcados desde la corteza hacia el interior (secuencia cronológica). Nótese que dentro del mismo rango de años calendario el peso específico no se mantiene constante, sino que cambia hacia la parte superior del fuste, disminuyendo sus valores.

2. Introducción

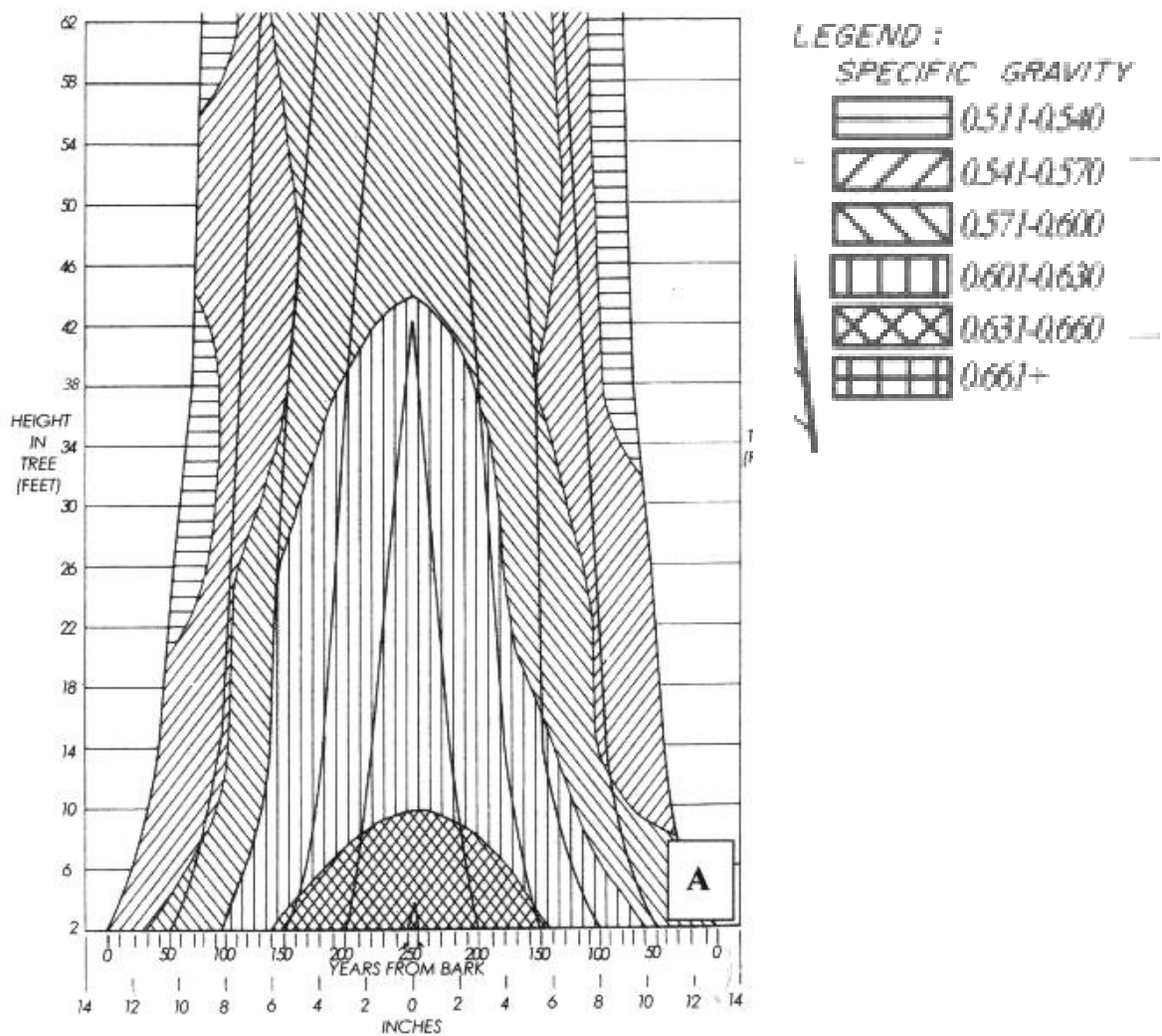


Figura. 2.5. Variación del peso específico de *Quercus alba* a lo largo del fuste (Extraído de Barnett y Jeronimidis, 2003).

El modelo de variación presentado por Bisset y Dadswell (1949, citado por Panshin y de Zeeuw, 1980) para *Eucalyptus regnans* de 50 años se presenta en la figura 2.6. Se observa un patrón general de ascenso de los valores de longitud de fibras desde la base hacia la mitad del fuste y luego un descenso hacia el ápice.

2. Introducción

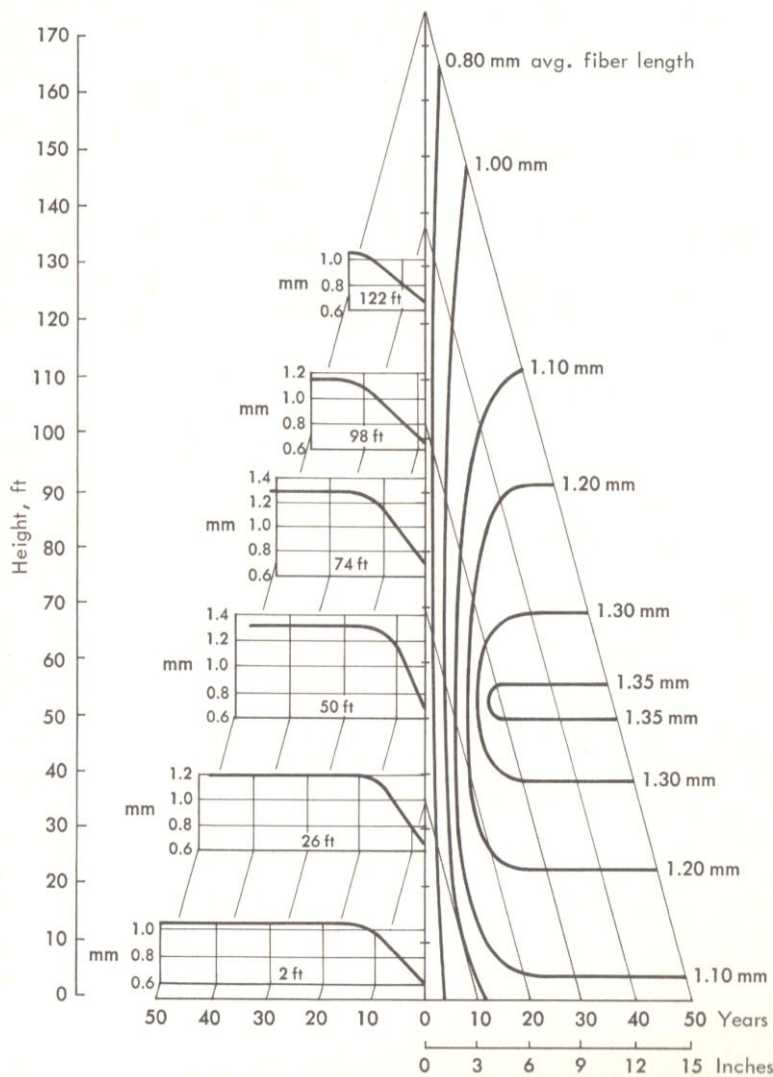


Figure 7-10 Variation of fiber length in the radial and vertical directions in the trunk of a tree of *Eucalyptus regnans* F.v.M. The two halves of the diagram represent the same data, drawn as a topographic map on the right and as a series of curves for specific heights on the left. (Adapted by permission from I. J. W. Bisset and H. E. Dadswell, *Australian Forestry*, 13(2):86-96(1949).)

Figura 2.6. Modelo de variación de la longitud de fibras en el fuste de *Eucalyptus regnans* presentado por Bisset y Dadswell (1949, citado por Panshin y de Zeeuw, 1980).

Las líneas verticales a lo largo del fuste representan una secuencia cronológica cada 10 años. Nótese que dentro del mismo rango de años calendario la longitud de fibras no se mantiene constante. Sobre la parte izquierda del gráfico se representan las series de curvas de variación radial para cada altura determinada en el fuste. Estas secuencias radiales muestran un ascenso de los valores de longitud de fibras de médula a corteza que se repite en todas las alturas, pero se diferencian en la tasa de aumento (pendiente).

2. Introducción

Dentro de la amplia bibliografía que incluye el análisis de los patrones de variación radial en latifoliadas (ver apartado 2.2.c y 2.3), dos trabajos proponen un nuevo enfoque que ponen de manifiesto la gran variedad de modelos hallados en este grupo y los distintos intentos de entender la formación del xilema con teorías alternativas de las propuestas para coníferas (Fukasawa, 1984; Kojima et al, 2009). Estos trabajos plantean que los cambios de las propiedades producidos en sentido médula corteza están influenciados por la edad cambial, el crecimiento en diámetro o por ambos factores.

Fukazawa (1984) trabajó sobre la variación de la densidad básica en tres especies de porosidad circular (*Quercus sp*; *Kalopanax sp* y *Fraxinus sp*) y cuatro de porosidad difusa (*Cercidiphyllum sp*, *Tilia sp* y *Betula sp*) con edades de entre 90 y 250 años. Realizaron un exhaustivo muestreo radial (probetas cada 1 cm a lo largo de los radios de los 4 puntos cardinales) y axial (8-12 alturas en el fuste). Midieron la influencia de la edad cambial y el crecimiento en diámetro (ancho del anillo) analizando la variación de la densidad por el número de anillos desde la médula a la corteza (edad cambial) y por el ancho de anillo clasificándolos en clases (ancho de anillo fijo). A través de un análisis gráfico hallaron dos comportamientos que agrupan a las especies de porosidad circular y a las difusas por separado. En las 3 especies circulares se describe un patrón de descenso de la densidad de medula a corteza coincidiendo con el patrón tipo 3 de Panshin y de Zeeuw (1980). Las curvas sin embargo, difieren entre sí cuando se las analiza en las clases de diámetro (ancho de anillo). Los anillos más anchos el descenso de la densidad se produce en forma suave (casi en línea recta), en cambio en los anillos más angostos el descenso es brusco y la forma de la curva es del tipo exponencial negativa con pendientes más o menos pronunciadas dependiendo de la clase de diámetro. La interpretación de estos gráficos según las clases de diámetro lleva a estos autores a diferenciar el comportamiento entre las zonas de MJ y MM. La madera juvenil definida en el trabajo como el cilindro central de 5-8 cm que rodea la médula con anillos de crecimiento anchos, presentó alta densidad y ésta no está influenciada por el crecimiento en diámetro. Sin embargo, la madera madura con anchos de anillos mas angostos y pertenecientes a diferentes clases, presentó menor densidad y la clara influencia del crecimiento sobre la misma.

2. Introducción

En este mismo trabajo, y para las especies de porosidad difusa, se describe un patrón de ascenso de la densidad de medula a corteza coincidiendo con el patrón tipo 1 de Panshin y de Zeeuw (1980). Las curvas, contrariamente a las de porosidad circular, no difieren entre sí cuando se las analiza en las clases de diámetro (ancho de anillo). La forma de las distintas curvas de clase de diámetro son del tipo exponencial positiva o sigmoides, con un rápido ascenso de la densidad en la zona juvenil (primeros cm desde la médula) y luego una estabilización de sus valores con densidades superiores hacia la corteza.

Los comportamientos encontrados por Fukazawa (1984) indicaron que la variación de la densidad en las latifoliadas de porosidad difusa está influenciada solamente por la edad cambial, mientras que en las latifoliadas de porosidad circular el ancho de anillo es el que presenta la mayor influencia sobre la densidad.

En otro trabajo, Kojima et al (2009), estudiaron la influencia de la edad cambial y el crecimiento del diámetro sobre la maduración del xilema, a través del análisis de la variación radial de la longitud de fibra en 6 especies de latifoliadas de porosidad difusa y de rápido crecimiento (*Acacia sp*, *Eucalyptus sp* y *Paraserianthes sp*) de entre 7 y 14 años de edad. Realizaron un muestreo radial solo a la altura de pecho (1,3m) con probetas cada 0,1 cm a lo largo de los radios norte y sur. El efecto del crecimiento en la variación de la longitud de fibra fue medido a través de la clasificación de los árboles muestreados en 3 clases diamétricas según su DAP. Para las especies de *Acacia sp* y *Paraserianthes sp* la variación de la longitud de fibra y su maduración dependen del crecimiento en diámetro, indicando que la formación de madera madura comienza después de que se alcanza un cierto tamaño arbóreo. Por el contrario, en las dos especies de *Eucalyptus* implantadas en zonas subtropicales y templadas (*E. grandis* y *E. globulus*) la maduración del xilema está controlada por la edad del cambium, por lo tanto la formación de madera madura comienza una vez que el cambium alcanza una determinada edad.

Sin embargo, en estudios posteriores Kojima et al (2009 b y 2009 c) ampliaron la evaluación y análisis de las variaciones radiales de varias propiedades de la madera en *Eucalyptus grandis*, implantados en diferentes latitudes y climas, con

2. Introducción

edades comprendidas entre 9-18 años. Determinaron que, dependiendo del sitio y la propiedad estudiada, la maduración del xilema se halla afectada por el crecimiento en diámetro o por la edad cambial. En plantaciones de Brasil cercanas al ecuador (tropicales) la extensión del leño juvenil depende de la distancia a la médula (crecimiento en diámetro) para la longitud de fibras y sin embargo, la densidad de la madera no se ve afectada. En cambio, en el leño de los árboles implantados en zonas subtropicales de Brasil y Argentina la maduración del xilema en lo referente a densidad y longitud de fibras no depende del crecimiento y se ve afectada por la edad cambial, en especial la longitud de fibras.

Los resultados contradictorios que nos reporta la bibliografía sobre modelos de variación de propiedades en latifoliadas reflejan la amplitud del tema para este grupo de plantas. Los análisis dan cuenta de las diversas estructuras del xilema de las angiospermas, no solo al considerar la subdivisión entre las especies de porosidad circular y difusa, sino también por la evaluación que puede realizarse en diferentes etapas de la vida del individuo (especies de rápido crecimiento y corta edad vs especies longevas).

2.2. b. Patrones generales de variación axial y radial en Coníferas

Se han encontrado distintos patrones generales de variación de las propiedades de la madera juvenil y madura que diferencian fundamentalmente a las coníferas de las latifoliadas. Las coníferas están ampliamente estudiadas y se generó un modelo denominado de “cilindro central” que explica los patrones de variación de las diferentes propiedades dentro del árbol.

En general, se puede asumir que la madera juvenil de coníferas, mayoritariamente pinos, presenta un aumento de la densidad con la edad (Ferreira, 1978; Cown, 1981; Talbert y Jett, 1981; Zobel y Talbert, 1988; Fucheng et al, 1997; Yang y Benson, 1997; Larson, et al, 2001; Saranpää, 2003; Gartner, 2005; Makinen et al, 2007). La longitud de las traqueidas aumenta rápidamente en los anillos cerca de la médula, luego continua creciendo a la misma velocidad, de forma más lenta o puede variar de manera impredecible. El diámetro de las traqueidas se mantiene esencialmente constante mientras que el espesor de la pared incrementa gradualmente (Bendtsen y Senft, 1984; Wang et al, 1997; Larson et al, 2001; Makinen et al, 2007).

El ancho del anillo de crecimiento aumenta radialmente con la edad y luego se estabiliza o empieza a decrecer (Larson et al, 2001).

Con respecto a la composición química, el leño juvenil difiere notablemente del maduro, sin un patrón regular, con un contenido de celulosa generalmente menor, mientras que el porcentaje de lignina puede ser mayor, menor o sin variaciones. El contenido de extractivos en agua caliente, alcohol-benceno, solubles en hidróxido de sodio y cenizas es mayor que en la madera adulta (Zobel y Sprague, 1998).

2.2. c. Patrones de variación axial y radial en Latifoliadas

La madera juvenil de latifoliadas se diferencia de la de coníferas principalmente porque la variación de sus propiedades se desarrolla de manera gradual.

En este grupo, la variación de la densidad básica y longitud de fibra no es tan uniforme como en el caso de las coníferas.

2. Introducción

Para las latifoliadas de porosidad difusa (*Eucalyptus*, *Alnus*, *Acer*, *Populus*, *Salix*) el patrón de variación radial de la longitud de fibra es similar al reportado para las coníferas, presentando un aumento sostenido de los valores en los primeros anillos (madera juvenil) y luego una estabilización de sus valores (madera madura) (Bonavía y Ragonese, 1980; Panshin y de Zeeuw 1980; Yanchuck y Micko, 1983; Fukazawa, 1984; Bendtsen y Senft, 1986; Bonavía y Piussan, 1987; Yanchuck y Micko, 1990; Peszlen, 1994; Balatinecz y Krestchmann, 2001; Monteoliva et al, 2002, 2006 ; Castro Silva et al, 2007; Alves Ramos et al, 2011; Kiaei et al 2012).

Sin embargo, con la variación de la densidad básica se han reportado patrones con distintas tendencias las cuales fueron clasificadas por Panshin y De Zeeuw (1980) en tres tipos generales:

Tipo1: aumento de los valores de medula a corteza

Tipo 2: disminución de los valores cerca de la medula y luego un aumento

Tipo 3: disminución constante de los valores de médula a corteza.

Algunos resultados publicados para latifoliadas pueden incluirse en el Tipo 1 (Tomazello Filho, 1985; Wilkes, 1988; Valente et al, 1992; Igartua et al, 2000; Muneri y Raymond, 2001; Monteoliva y Marlats, 2007; Sette, et al, 2012), en el tipo 2 (Raymond y Mac Donal, 1998; Raymond y Muneri, 2001; Igartua et al, 2002; Nuñez, 2011) o en el tipo 3 (Fukasawa 1984; Monteoliva et al, 2005). Sin embargo, algunos trabajos podrían considerarse intermedios (pertenecer a un tipo en determinaciones a corta edad) o incluso no coincidir con ninguno de estos 3 tipos ya que no presentan variación radial de la densidad (Fukazawa, 1948; Gartner et al, 1997; Evans et al, 2002; Monteoliva y Marlats, 2007).

Los estudios de modelos de variación radial sobre otras variables anatómicas y químicas de la madera no son tan extensos, por lo tanto es más difícil realizar una generalización de los patrones de variación.

Para el espesor de pared, ancho de fibra, diámetro de vasos y frecuencia de vasos de latifoliadas difusas, Alves Ramos et al (2011) y Castro Silva et al (2007) en sus trabajos sobre *Eucalyptus grandis* (10 a 23 años de edad) encontraron que el ancho de fibra aumenta, el lumen disminuye y el espesor de pared aumenta en

2. Introducción

sentido radial. Mientras que para el diámetro de vasos estos mismos autores encontraron un aumento de medula a corteza. Resultados similares reporta Panshin y de Zeeuw (1980) para el diámetro de vasos y espesor de pared de las fibras para varias especies (*Platanus occidentalis*, *Eucalyptus pilularis*, *Salix nigra*, *Shorea* spp.), y Pezlen (1994) en álamos de 10-14 años en 2 sitios en Hungría. Se han registrado anillos más anchos en el leño juvenil, sin cambios en el espesor de pared ni el lumen de las fibras (DeBell et al, 2002), y mayor ángulo fibrilar en el leño juvenil que en el maduro (Zobel y Sprague, 1998).

Con respecto a la composición química, en general, la celulosa y la lignina aumentan con la edad, aunque pueden mantenerse constante (Panshin y de Zeeuw, 1980; Sykes et al, 2008). El contenido de extractivos en agua caliente, alcohol-benceno, solubles en hidróxido de sodio y cenizas es mayor en los primeros anillos (madera juvenil) que en la madera adulta (Zobel y Sprague, 1998; Alteyrac et al, 2006; Ting Feng, 2006).

Asimismo, las latifoliadas presentan un comportamiento diferente de acuerdo con el tipo de porosidad (circular o difusa) y la propiedad analizada. Según Fukazawa (1984), las latifoliadas de porosidad circular presentan valores de densidad elevados cerca de la médula y luego disminuyen a medida que nos acercamos a la corteza, mientras que las latifoliadas de porosidad difusa presentan patrones muy diversos. Sin embargo, para el diámetro de vasos estos dos grupos de latifoliadas no presentaron diferencias en cuanto al patrón de variación radial hallado para 30 especies de latifoliadas circulares y difusas (Tsuchiya y Furukawa, 2009).

Esta gran variedad de posibilidades que nos brinda la bibliografía de latifoliadas no permite generar un patrón de variación único que represente por si solo a este grupo de plantas tan heterogéneo.

2.3. Antecedentes bibliográficos en Salicáceas

Diversos estudios realizados en salicáceas (porosidad difusa), demuestran la existencia de variaciones en longitud de fibra, densidad básica, ancho de fibra, y composición química, tanto en sentido radial (desde la médula a la corteza) como

2. Introducción

axial (desde la base hasta el ápice), encontrándose diferentes tendencias de acuerdo a la propiedad estudiada.

Una de las propiedades más importantes para la determinación de la calidad y uso final de la madera es la densidad (van Buijtenen, 1982; Barnett y Jeronimidis, 2003). En la fabricación de pulpas celulósicas, este atributo se asocia con los rendimientos del proceso industrial, el consumo de reactivos, la resistencia del papel y su opacidad (Valente et al, 1992; Villegas et al, 2005).

Diversos autores han estudiado la variación radial y axial que ocurre entre y dentro de los árboles de la misma especie y/o clones. Yanchuk y Micko (1990) en su trabajo sobre la variación radial de la densidad básica a la altura de pecho en *Populus tremuloides* de 36 años provenientes de Alberta, Canadá, observaron que los valores de densidad eran elevados cerca de la médula, disminuían hasta alrededor de los 12- 20 años y luego aumentaban. El mismo patrón de variación radial fue reportado en 3 clones de *Populus x euroamericana* de 10 y 15 años de edad a la altura de pecho, en plantaciones en Hungría (Matyas y Peszlen, 1997; Peszlen, 1998). Asimismo, De Bell et al (2002) estudiando clones de *Populus trichocarpa* de 9 años de edad provenientes de plantaciones en Washington, Estados Unidos, reportó que el patrón de variación radial de la densidad básica consistía en una disminución de sus valores hasta alrededor del año 5 y luego aumentaba. Con respecto a la longitud de fibra Koubaa et al (1998) publicaron un estudio en 10 clones de *Populus x euroamericana* provenientes de plantaciones de 9 años en Québec, Canadá, donde observaron que el patrón de variación radial de la longitud de fibras a la altura del pecho consistía en un aumento de sus valores de médula a corteza. Resultados similares fueron presentados por Yanchuck y Micko (1983), Bendtsen y Senft (1986), Yanchuck y Micko (1990) y Balatinecz y Krestchmann (2001) para diferentes clones de *Populus* (Canadá, Estados Unidos).

Dentro de las referencias para la variación axial en el fuste se pueden citar varias a nivel internacional. Estudios realizados sobre este tema por Koubaa et al (1998) reportan un patrón no uniforme de variación axial de la longitud de fibra, sin diferencias significativas entre las alturas muestreadas.

En nuestro país se han llevado a cabo algunos estudios desde el INTA Castelar y se han determinado algunos patrones de variación radial para determinados

2. Introducción

clones de *Populus* de interés comercial y otros clones en desarrollo desde los programas de mejoramiento forestal (Bonavía y Ragonese, 1980; Bonavía y Piussan, 1987; Bonavía de Guth, 1991). Así, Bonavía de Guth (1991) reportó para 10 clones de álamo de 10 años de edad a 1,3 m de altura, implantados en diferentes sitios del Delta del Paraná, que los valores de densidad eran elevados cerca de la médula, disminuían hasta alrededor de los 4 años y luego aumentaban hasta estabilizarse a los 6-7 años. Estos trabajos se realizaron sobre árboles en el turno de rotación (10 años), por lo tanto no han podido rescatar la variación de las propiedades en la madera madura.

En el género *Salix*, también a nivel nacional, se han publicado numerosos trabajos que involucran la calidad de madera para la producción de papel de diario, en los cuales se desarrollan diferentes patrones de variación a lo largo del fuste (Monteoliva et al, 2002 a y b; Monteoliva et al. 2005, 2006; Monteoliva et al, 2007, Monteoliva, 2011; Monteoliva y Marlats, 2007; Senisterra et al. 2005; Villegas y Marlats, 2003, 2005). Según estas referencias bibliográficas los patrones de variación no son iguales en todos los clones y sitios. Sin embargo, estos estudios se realizaron sobre árboles con edades inferiores a las analizadas en esta tesis por lo tanto las tendencias en la madera madura no han sido registradas. Particularmente para la especie en estudio, sauce americano, Monteoliva y Marlats (2007) publicaron un aumento de la densidad básica de médula a corteza analizado a la altura del pecho sobre árboles de 12 años provenientes del mismo sitio que los sauces de esta tesis. Mientras que para el resto de los clones estudiados (clones 13-44; 250-33 y 131-25), los autores hallaron que la densidad básica se mantuvo sin diferencias significativas en todas las posiciones radiales. La variación axial de la densidad básica en salicáceas no presenta un patrón general definido. Por ejemplo, Díaz et al (2010) en su trabajo sobre la especie en estudio de esta tesis *Populus deltoides* `Australia 129-60` de 10 años de edad (de plantaciones comerciales en el Delta del Río Paraná, Argentina) encontraron que la densidad aumentaba desde la base al ápice con un descenso de los valores en la altura de pecho. En el género *Salix*, Monteoliva et al (2002), no encontraron diferencias significativas de densidad a medida que se aumentaba la altura de muestreo en tres de los clones analizados de 13 años de edad, implantados en Villa Paranacito, Entre Ríos. Sin embargo, para *Sauce americano*, *Salix nigra* y

2. Introducción

Salix cv 13-14, estos mismos autores reportaron un aumento de densidad desde la base al medio y luego un descenso hacia el ápice.

La longitud de fibra es también una característica asociada con la resistencia, propiedades ópticas y características superficiales. Las Salicáceas presentan un patrón de variación radial uniforme de ascenso longitud de fibra con la edad, más notorio en los *Populus*, ya que para el género *Salix* se han encontrado, aunque en menor medida, otros patrones de variación (Monteoliva et al, 2005; Monteoliva et al, 2007).

En Argentina, Bonavía y Ragonese (1980) al estudiar Sauce americano y sauces híbridos 'A 131-25', 'A 131-27' y 'A 250-33' de 15 años cultivados en Castelar (Provincia de Buenos Aires) en 4 posiciones radiales y una sola altura (1,3 m) reportaron un aumento de la longitud de fibra de médula a corteza. Igual tendencia describen Bonavía y Piussan (1987) para *Salix nigra* del Delta del Paraná en árboles de 14 años analizados anualmente, para una altura de estudio de 1,3 m y Monteoliva et al (2002; 2006) para sauce americano de 13 años. Por el contrario, los clones *Salix cv. 250-33* y *cv. 131-25* no presentaron ningún patrón de variación radial.

La escasa información sobre la variación axial de la longitud de fibras conlleva a no poder definir un patrón de variación general. Estudios realizados sobre este tema (Novaresi, 1999; Monteoliva, 2005 y Monteoliva et al, 2006) reportan un patrón no uniforme de variación y generalmente sin diferencias significativas entre las alturas muestreadas. Sin embargo, para *Salix* de 13 años de edad implantados en Entre Ríos, Argentina, y considerando 3 alturas de fuste (1,3; 4,3 y 6,5 m), Monteoliva y Marlats (2002) reportaron una disminución de la longitud de fibras de la base al ápice. Resultados similares fueron presentados por Monteoliva et al (2006) en los clones 'A 13-44', 'A 250-33', 'A 131-27', y 'A 131-25' de 13 años de edad y Novaresi et al (1999) en los clones 'A 131-27' y 'A 13-44' de 10 años de edad.

Para el sauce americano se han reportados diferentes tendencias de variación axial de la longitud de fibra. En algunos trabajos no se observaron diferencias significativas entre las alturas estudiadas (Monteoliva et al, 2002; Monteoliva et al, 2006), mientras que en otros se observó un aumento desde la base hacia la altura media y luego una disminución hacia el ápice (Novaresi et al, 1999).

2. Introducción

La revisión bibliográfica de los patrones de variación de sauces y álamos en Argentina nos muestra una clara diferencia según el clon, el sitio y la edad de muestreo considerada. También se rescata que las propiedades más estudiadas son la densidad básica y la longitud de fibras no existiendo prácticamente estudios sobre la variación de la composición química. Los sauces, y principalmente el sauce americano, han sido mas exhaustivamente estudiados que los álamos. Claramente no hay estudios de la determinación del pasaje de madera juvenil a madera madura.

2.4. Determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura

La formación de madera juvenil puede oscilar entre 5 y 20 años y la terminación del período puede ser abrupta o gradual a medida que nos desplazamos desde la médula hacia la corteza (Panshin y de Zeeuw, 1980; Yang et al, 1994). Harris (1981) publica que la madera juvenil no puede ser definida en forma precisa ya que sus propiedades dependen de muchas variables y que la variación radial de las mismas difiere mucho entre sí.

La determinación de la zona en la cual la madera juvenil comienza a convertirse en madura (zona de transición) difiere entre especies, árboles de una misma especie, dentro del mismo árbol, propiedades y métodos seleccionado para determinarla (Bendtsen y Senft, 1986; Fucheng et al, 1997; Yang y Benson, 1997; Tasissa y Burkhart, 1998; Alteyrac et al, 2006). Asimismo, es importante tener en cuenta que cualquier factor que afecte la fisiología y crecimiento del árbol puede influir sobre las propiedades de la madera, por lo que el sitio y los tratamientos silvícolas también aportan variabilidad a la determinación de la zona de transición. Debido a lo anteriormente citado es que se encuentran amplias diferencias en la bibliografía sobre el método (regresión segmentada, determinación visual subjetiva) y/ o propiedad (densidad, largo de fibra, ancho de anillo, composición química) que más se adecua para determinar la edad de demarcación entre madera juvenil y madura.

Como se mencionó anteriormente la propiedad y el método seleccionado para determinar la edad de transición también generan diferencias al momento de la delimitación. Algunos autores como Bendten y Senft (1986) en álamo y Clark et al

2. Introducción

(2005) en pino, utilizaron el método gráfico para determinar la edad de transición. Este método se basa en el análisis visual del patrón de la propiedad elegida tomando como punto de inflexión entre los dos tipos de maderas el momento en donde los valores se vuelven constantes, sin embargo esta metodología es subjetiva y depende mucho de la propiedad seleccionada (patrón radial de variación). Por tal motivo, se han introducido diferentes técnicas estadísticas que permiten determinar la edad de transición de manera más precisa que la anterior. Algunas de estas técnicas son: regresión lineal simple, regresión segmentada lineal y polinomial y solución iterativa, dentro de las cuales la regresión segmentada es la que presenta los mejores ajustes para la mayoría de las propiedades y especies seleccionadas (coníferas: Tasissa y Burkhart, 1998; Sauter et al, 1999; Meza Juarez et al, 2005; Alteyrac et al, 2006, Clark et al, 2005; latifoliadas: Peszlen, 1994; Matyas y Peszlen, 1996; Evans et al, 2000; Bhat et al, 2001; Tsuchiya y Furukawa, 2009)

La importancia de cuál será la propiedad elegida para determinar la edad de transición entre la madera juvenil y madura radica en que de acuerdo al patrón de variación radial que presente la misma será más fácil o difícil observar el punto de inflexión entre la madera juvenil y madura. Aquellas propiedades que presenten un patrón de aumento o disminución de sus valores de manera constante hasta cierto anillo de crecimiento a partir del cual sus valores se estabilicen, facilitará la determinación de la edad de transición y serán las propiedades que presenten el mejor ajuste al aplicar el método estadístico de regresión segmentada. La densidad básica y la longitud de fibra son las propiedades que mayormente se eligen para determinar la edad de transición debido a su directa relación con la calidad de la madera. Sin embargo, la edad de transición puede variar al ser determinada utilizando la densidad básica o la longitud de fibra como propiedad. Bendtsen y Senft (1986) trabajando con pino encontraron que la edad de transición era de 12 años usando la densidad y 18 años utilizando la longitud de traqueida. Mientras que Meza Juarez et al (2005) en su trabajo sobre pino pátula publicaron una edad de transición de 10 años tanto para la densidad como para la longitud de fibra. Matyas y Peszlen (1996) en su estudio sobre 3 clones de álamo determinaron que la edad de transición fue de 4 a 5 años para el lumen de fibra, 9 a 12 años para la longitud de fibra y 14 a 16 años para la densidad básica.

2. Introducción

Resultados similares fueron presentados por Peszlen (1994) en su estudio sobre *Populus x euramericana*.

La altura de muestreo a lo largo del fuste es otro factor que influye sobre la edad de transición entre madera juvenil y madura. En general se considera que la misma disminuye con la altura por varios motivos (Alteyrac et al 2006):

- reducción del volumen de la copa con la edad de árbol,
- atenuación en el rango de crecimiento por la edad del cambium,
- menor rango del crecimiento y actividad de las ramas mientras se cierra el canopeo.

2.5. Uso de la madera Juvenil

La madera juvenil en las pulpas químicas, afecta negativamente la calidad y uniformidad de la materia prima, pudiendo influir sobre las operaciones de proceso, el rendimiento (Tasissa y Burkhart, 1997; DeBell et al, 2002; Barnett y Jeronimidis, 2003).

Las propiedades de las pulpas realizadas con madera juvenil se han estudiado más extensamente en coníferas, verificando que el rendimiento en celulosa y la resistencia al rasgado suelen ser inferiores cuando se pulpa madera juvenil (Jett y Zobel, 1975; Hillis, 1980; Zobel y Talbert, 1988; Da Silva Perez y Fauchon, 2003). Existen algunos reportes para pulpas de latifoliadas pero se trata de pulpas químicas (Kraft) muy diferentes en el comportamiento a las pulpas mecánicas. Dentro de estos trabajos se destacan los realizados para álamos y sauces donde se verifica la baja de rendimiento y mayor contenido de lignina en las pulpas realizadas con madera juvenil (turnos de aprovechamiento de 1-6 años) (Phelps et al, 1985; Ganesh et al, 1992; Deka et al, 1999; Francis et al, 2005, Ai y Tschirner, 2010).

Sin embargo, las tecnologías de pulpas mecánicas (TMP y CTM), que han sido especialmente adaptadas para maderas de baja densidad específica, permiten la utilización de la madera juvenil. Muchas características de este leño lo hacen muy adecuado para la fabricación de papel periódico, tissue e impresión y escritura, debido al bajo coarseness de sus fibras con respecto a la madera madura. Además a partir de pulpas de alto rendimiento se obtienen mayores resistencias a la tracción, reventamiento y plegado, mejor suavidad de la hoja, mayor densidad

2. Introducción

aparente, la imprimabilidad y blancura son más altas y requiere menos energía para el refinado (Zobel y Jett, 1995; Zobel y Sprague, 1998; Da Silva Perez y Fauchon, 2003).

2.5. a. Pulpas Quimimecánicas

Las pulpas quimimecánicas son consideradas pulpas de alto rendimiento porque contienen prácticamente toda la lignina presente en la madera y requieren un tratamiento mecánico para separar y preparar las fibras (Smook, 1990; Tyrväinen, 1995; McDonald et al, 2004). Para su obtención se combinan una acción química previa (en bajas concentraciones y por corto tiempo) y una acción mecánica (refinación), logrando así el desfibrado casi sin degradar la lignina. Los pulpados quimimecánico (CMP) son procesos adecuados para las latifoliadas de baja densidad, tales como las salicáceas, como materia prima fibrosa (Zanuttini, 2006). Además producen pulpas con buena formación, mayor opacidad y otras propiedades específicas que las convierten en irremplazables para determinados usos como el caso del papel periódico (Monteoliva et al, 2006).

Los papeles se clasifican en “grados” con patrones de calidad bien definidos (Wood y Karnis, 1991). Las características que debe tener el papel de grado periódico (Ainomaija, 2000) son:

Gramaje: 40-48 g/m²

Grado de refino: 48-52 (°SR)

Índice de Tracción: 20-25 N m/g

Índice de rasgado: 3,5-4 mN m²/g

Densidad: 0,350-0,400 g/cm³

Blancura: 58-60 %ISO

Opacidad: 98 %

En el papel de diario la opacidad es la propiedad fundamental, ya que es imprescindible que lo impreso no se vea a través de la hoja. En cuanto a las propiedades mecánicas, las resistencias a la tracción y al rasgado son las más importantes, debido a que la impresión se realiza en máquinas rotativas de alta velocidad y al tipo de uso. Para obtener las características deseadas, en general, se utilizan mezclas de pulpas (empastes). El uso de pulpas de alto rendimiento

2. Introducción

para papel de diario es del orden de 80-100%, aportando opacidad, volumen específico y buena imprimabilidad, con la desventaja de su tendencia al amarillamiento con la exposición a la radiación UV (Sundholm, 1999).

Las salicáceas son utilizadas para la elaboración de pulpas CMP para papel periódico en Argentina. Sin embargo, dada su baja representación en el mercado mundial, son escasos los antecedentes del efecto de la madera juvenil sobre la calidad de estas pulpas para papel periódico.

3. MATERIALES Y METODOS

Se trabajó sobre 5 árboles de *Salix babylonica var sacramenta* “sauce americano” y 5 árboles de *Populus deltoides* `Australia 129-60` “álamo australiano”. Para la elección del número de ejemplares a analizar se tuvieron en cuenta trabajos realizados sobre variación radial y axial en confieras y latifoliadas (Igartúa et al, 2002; Ting-Feng et al, 2006; Alves Ramos et al, 2011) y los trabajos presentados por Hazman (1994) y Raymond (2006) sobre determinación del número de muestras en eucalipto y pino (respectivamente). Los árboles fueron seleccionados de manera aleatoria, con fuste sin defectos aparentes.

3.1. Descripción de los sitios de muestreo

- A) Sauces: Delta medio del Río Paraná correspondientes a plantaciones de Papel Prensa SA., Establecimiento “Las Animas”, Villa Paranacito, Entre Ríos (33° 45' LS; 59° 05' W). Suelos sistematizados del sur de la Provincia de Entre Ríos, endicados. Las inundaciones son recurrentes con largos períodos de anegamiento. La temperatura media máxima es de 24,5°C, la mínima media de 9,2°C, la temperatura máxima absoluta de 40°C (diciembre) y la mínima absoluta de -5°C (junio). Los valores de precipitación media anual son de 978 mm con régimen isohídrico. La parcela que se utilizó para la recolección de los sauces, se encontraba junto a un canal y estaba conformada por ejemplares que no habían sido aprovechados en el turno de corta correspondiente por lo cual no tuvo ningún raleo o tratamiento posterior de poda y sanidad viéndose afectados por podredumbre en la zona alta del fuste.
- B) Álamos: Zona del Delta Bonaerense, correspondientes a plantaciones para debobinado, protegidas por un dique perimetral. Esta área se ubica dentro de la Unidad IV “Pajonales y bosques de las islas deltaicas” del Bajo Delta Bonaerense (34° 08' S, 58° 43' O). El clima es templado y subhúmedo, con temperaturas medias anuales de 16,7°C a 18°C, y la humedad relativa es del 79%. Los valores de precipitación

3. Materiales y Métodos

media anual son de 1100 mm con régimen isohídrico. La parcela de la cual fueron extraídos los ejemplares provenía de una plantación con destino a debobinado, a la cual se le aplicaron los tratamientos silvícolas correspondientes (raleo a los 5 años y poda).

Los sitios se muestran en la Figura 3.1.

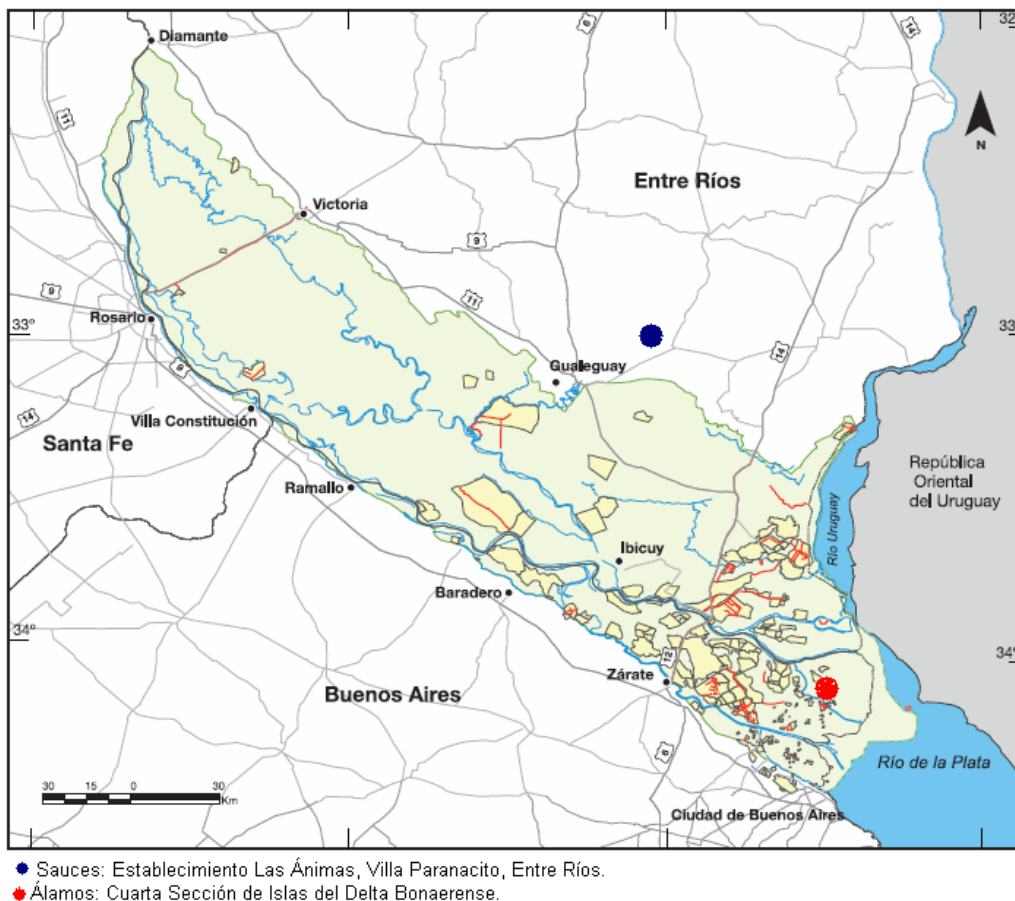


Figura 3.1: Mapa de la Región del Delta del Paraná. (Gráfico extraído de Kandus et al, 2010).

3.2. Selección de árboles y toma de muestras

El muestreo de álamos fue realizado en junio de 2007, mientras que el de saucos se llevo a cabo en abril del 2008.

Debido a que los turnos de corta de los álamos y saucos para papel se producen alrededor de los 11 años y la literatura indica que hasta esa edad solo se encuentra madera juvenil (Cown et al, 1991), se seleccionaron plantaciones cuyos

3. Materiales y Métodos

árboles superaran esa edad. La edad de los ejemplares muestreados de *Populus* fue de 17 años y de *Salix*, 45 años.

Se midió la altura total y comercial de cada uno de los ejemplares con cinta métrica luego de su apeo.

Las muestras fueron tomadas a varias alturas dentro del fuste representando el 65-70% de la altura comercial y se distribuyeron de la siguiente manera:

- *Populus* se muestreó el fuste a 5 alturas medidas desde el suelo: 0,30 m (base), 1,30 m (altura de pecho: AP), 4,2 m, 8,1 m y 15,9 m.
- *Salix* se muestreó el fuste a 4 alturas: 0,3 m (base), 1,3 m (AP), 2,6 m y 3,9 m.

Las diferencias en las alturas seleccionadas para ambas especies se debieron a la forma forestal del árbol en sí: altura comercial, altura de la primera ramificación y rectitud del tronco. Los álamos presentan ejemplares que llegan a alturas comerciales de 20 m (Diaz et al, 2010; Riu et al, 2008) con fuste cilíndrico, mientras que el fuste de los sauces americanos presenta defectos de forma y alcanzan alturas comerciales de 7 m (Villegas y Marlats, 2005; Villegas et al, 2009), además en el caso de los sauces se encontró pudrición en las alturas superiores.

Una vez marcados los niveles en el fuste, se procedió a sacar 1 disco completo de 5 cm de espesor. Las rodajas fueron etiquetadas y colocadas en bolsas para su traslado al laboratorio.

3. Materiales y Métodos



Figura 3.2: Muestreo de álamo.



Figura 3.3: Muestreo de sauce.

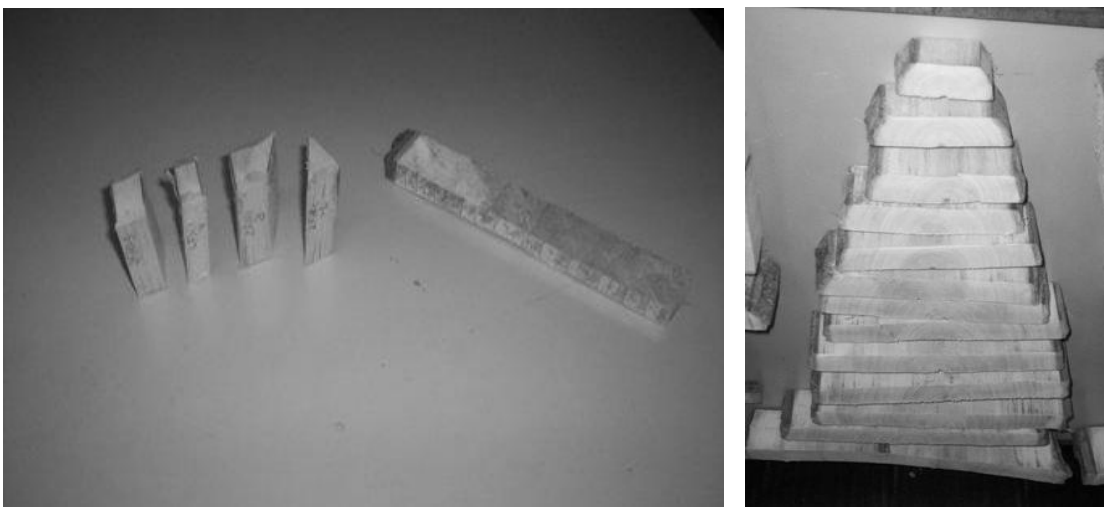
De cada disco se sacó una tabla central en la cual se marcaron los anillos de crecimiento, previa preparación de la superficie transversal con sucesivas lijas de diferentes granulometrías (de 80 a 120) hasta la perfecta visualización de los elementos celulares. Para la delimitación de los anillos se utilizó una lupa

3. Materiales y Métodos

binocular (10x). Sobre la tabla central se marcaron las posiciones radiales de muestreo, que en el caso de *Populus* coincidió con los anillos de crecimiento (17 anillos en la altura inferior de muestreo y 11 anillos en la superior), mientras que en *Salix* cada posición de muestreo se conformó uniendo 5 anillos de crecimiento debido al pequeño espesor o ancho de los anillos, quedando un total de 9 posiciones radiales por altura en el fuste. Según este criterio se tomaron las probetas para la determinación de la densidad básica y para la elaboración de los distintos macerados y preparados histológicos.



Figura 3.4: Rodajas de álamo.



Figuras 3.5 y 3.6: Álamo: probetas de densidad, tablas centrales por alturas.



Figura 3.7: Sauce rodaja basal.



Figuras 3.8 y 3.9: Sauce: tabla central y probetas de densidad.

Sobre el material muestreado se midieron: altura total, diámetro a la altura de pecho (DAP) con corteza y sin corteza, ancho de anillos de crecimiento, densidad básica, morfología de fibras (longitud, ancho, lumen y espesor de pared de las fibras), composición química (extractivos en agua caliente, extractivos en alcohol/benceno, lignina insoluble, lignina soluble, celulosa y hemicelulosas).

3.3. Metodología y/o normas para la medición de las variables

- Altura total (m): se midió con cinta métrica una vez apeado el árbol, según se muestra en las tablas 3.1 y 3.2.

3. Materiales y Métodos

Árbol	Altura total (m)	Altura comercial (m)
1	30,4	25,2
2	29,0	24,0
3	31,3	25,7
4	29,0	24,0
5	28,1	24,4

Árbol	Altura total (m)	Altura comercial (m)
1	10,5	4,7
2	10,3	5,3
3	12,2	7,2
4	11,0	6,5
5	10,8	5,6

- Diámetro a la altura de pecho (DAP) con corteza y sin corteza (cm): se midió en campo, con cinta dendrométrica y luego en laboratorio sobre las rodajas en 2 diámetros opuestos con corteza (DcC) y sin corteza (DsC), según se muestra en la tabla 3.3.

Árbol	Dap cc (cm)	Dap sc (cm)
1	50,0	46,7
2	37,6	34,7
3	42,7	40,0
4	41,5	38,0
5	30,5	27,7

Árbol	Dap cc (cm)	Dap sc (cm)
1	39,0	36,0
2	25,3	24,2
3	28,0	25,5
4	36,0	33,5
5	42,0	39,0

3. Materiales y Métodos

Para la medición de las variables anatómicas se siguieron las recomendaciones de IAWA Committee (1989).

- Ancho de los anillos de crecimiento (mm): se midieron sobre las tablas centrales pulidas, en 2 radios opuestos bajo lupa binocular 15X, con reglilla micrométrica. (álamo, n=600; sauce, n=360)

- Densidad básica [g/cm^3] (volumen verde / peso seco): Para su determinación se tomaron probetas de $8cm^3$ (IRAM 9544) en cada una de las posiciones de muestreo sobre el radio (álamo, n= 600; sauce, n= 270). El volumen verde se calculó por desplazamiento de fluidos (inmersión en agua) sobre las probetas saturadas en agua (humedad mayor al 30%). El peso seco se determinó luego del secado en estufa a una temperatura de $105 \pm 3 ^\circ C$ hasta peso constante.

- Longitud de fibra (μm): se midió en disociados, según la técnica de Franklin (1945) (agua oxigenada y ácido acético en partes iguales) montados en agua sobre portaobjetos, sin teñir. Se midieron 50 fibras por posición radial de muestreo en las rodajas de todas las alturas (álamo, n=18500; sauce, n=9000). Las mediciones se realizaron sobre imágenes digitales tomadas con un microscopio óptico Olympus y se midieron con software específico (Image Tool, versión libre).



Figura 3.10: Preparado de fibras de álamo (4x).

3. Materiales y Métodos

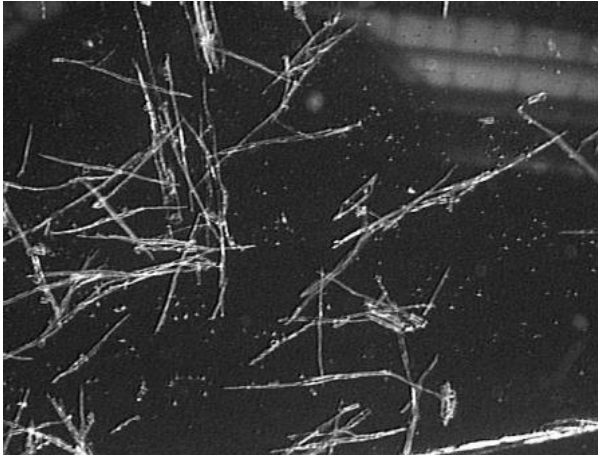


Figura 3.11: Preparado de fibras de sauce (2x).

- Ancho, Lumen y Espesor de la pared de las fibras (μm): se midieron con microscopio óptico, sobre cortes transversales teñidos con safranina y montados en forma permanente. Las cortes se realizaron con micrótomo de deslizamiento de 20 μm de espesor sobre las siguientes posiciones radiales anillo 4, 8, 11 y 15, y a todas las alturas muestreadas. Las medidas se tomaron sobre 50 fibras en cada posición radial, midiendo el ancho total de la fibra y el ancho del lumen en sentido tangencial y el espesor de la doble pared. El espesor de pared se calculó dividiendo por 2 la medida (álamo, $n= 5000$; sauce, $n= 3750$).

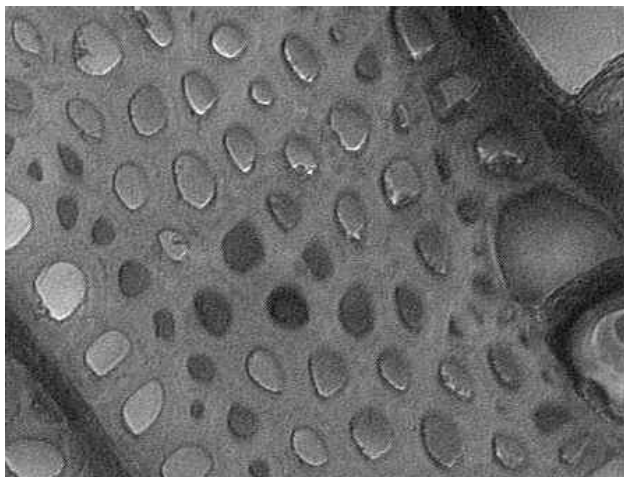


Figura 3.12: Corte transversal de álamo (40x).

3. Materiales y Métodos

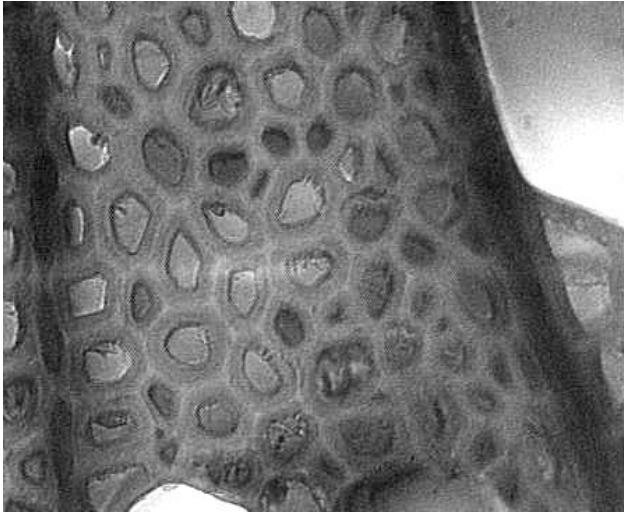


Figura 3.13: Corte transversal de sauce (40x).

-Diámetro de vasos: las medidas se tomaron sobre los mismos cortes y posiciones de muestreo que los mencionados para ancho, lumen y espesor de pared. Se midió el diámetro de 100 vasos en cada posición radial (álamo, n=10000; sauce, n= 7500).

-Frecuencia de vasos: Se tomaron 5 imágenes digitales en cada posición radial, sobre las cuales se determinó el número de vasos en 1 mm^2 (40 x). Se contaron todos los vasos presentes en el área total de la imagen y se lo llevó a 1 mm^2 .

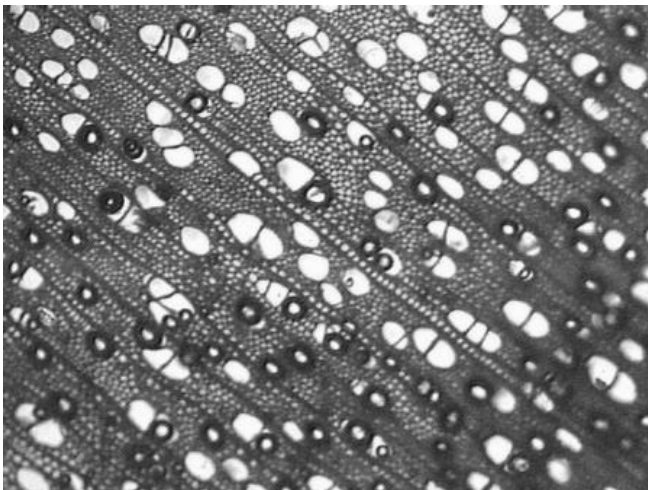


Figura 3.14: Corte transversal de álamo (4X).

3. Materiales y Métodos

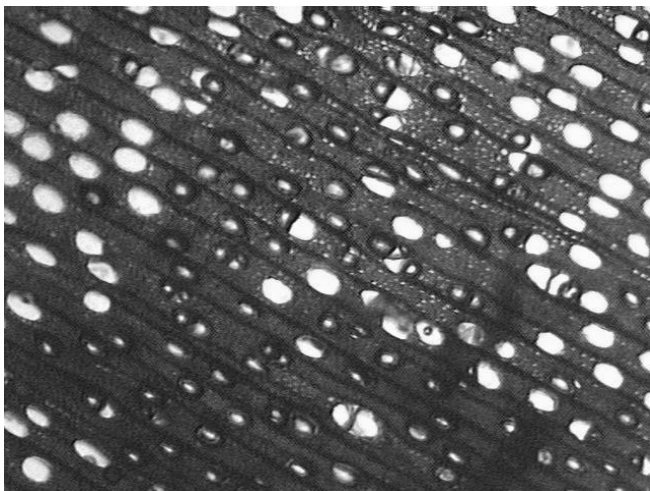


Figura 3.15: Corte transversal de sauce (4 X).

- Composición química: las posiciones radiales de muestreo se realizaron en este caso por rangos de edad. Las selecciones para llevar a cabo el análisis químico están relacionados con el ancho de anillo de cada una de las especies (cantidad de muestra a tomar) y la edad de transición estimada a partir de la longitud de fibra y la densidad básica (9 años para álamos y 15 años para sauce). Los álamos presentaron anillos de crecimiento de mayor ancho que los sauces permitiendo que con rangos de edad de 5 años se logre reunir los gramos necesarios para llevar a cabo los análisis químicos (100 g). Mientras que para los sauces debieron generarse rangos de 10 y 20 años para lograr los gramos de material a analizar, sin agotar el material original. Las posiciones radiales de muestreo se obtuvieron dividiendo las rodajas en cada altura de muestreo de la siguiente manera:

Populus: de 0-5 años, de 5 a 10 años y de 10 a 17 años.

Salix: de 0 a 10 años, de 10 a 20 años y de 20 a 40 años.

Las muestras se molieron en molino Willey hasta que el 85% de la misma pasó por malla de 40 mesh, obteniéndose 100 gramos de muestra.

Se utilizaron las normas TAPPI para las determinaciones de extractivos.

La determinación de lignina y celulosa se realiza sobre la madera previamente extraída con alcohol-benceno y agua caliente.

3. Materiales y Métodos

La determinación de carbohidratos estructurales (glucanos, xilanos, arabinanos y grupos acetilos) y de lignina (soluble e insoluble en ácido) se realizó por HPLC según la norma NREL/TP-510-42618 (normas estándares NREL-LAP, National Renewable Energy Laboratory-Laboratory Analytical Procedure).

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

Determinación de azúcares y acetilos: Condiciones Cromatográficas

La determinación de azúcares reductores y ácidos volátiles se realizó mediante cromatografía líquida HPLC (equipamiento Waters), utilizando una columna AMINEX-HPX87H (BIO-RAD) y las siguientes condiciones cromatográficas:

- Eluyente: H₂SO₄ 4 mM
- Flujo: 0,6 mL/min
- Temperatura: 35°C
- Detector: Índice de refracción y Arreglo de diodos

En la madera de latifoliadas, los xilanos, arabinanos y acetilos constituyen la mayor parte de las hemicelulosas, mientras que los glucanos involucran casi totalmente a la celulosa.

Extractivos alcohol/benceno	T204 cm-97
Extractivos agua caliente	T207 cm-99
Lignina (insoluble y soluble)	NREL/TP-510-42618
Celulosa (glucanos)	NREL/TP-510-42618
Hemicelulosas (xilanos, arabinanos y acetilos)	NREL/TP-510-42618

3.4. Análisis estadísticos

Se calcularon las medidas de tendencia central y de dispersión. Se eliminaron puntos atípicos (outliers) y se recurrió a herramientas gráficas y analíticas para determinar la normalidad de la distribución de las variables.

3. Materiales y Métodos

No se realizaron comparaciones entre las especies debido a las diferentes edades entre los álamos (17 años) y los sauces (45 años) y al diseño de submuestreo dentro de la rodaja. Se analizaron los resultados de las propiedades anatómicas, químicas y físicas de la madera dentro del fuste para los 5 árboles de la misma especie. Los datos se analizaron mediante Análisis de la Varianza con un 95% de probabilidad, con posición radial (número de anillo se médula a corteza) y altura de muestreo como fuentes de variación. El contraste de medias se realizó con el test de Tukey.

3.5. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura

Para determinar la edad de transición de madera juvenil a madura, se utilizó el método de regresión segmentada Piecewise Linear Regression (Breakpoint Regresión) del patrón radial de las distintas variables. Este método supone que en el patrón radial de la misma (asociado con la edad del anillo de crecimiento) existe un cambio notorio en la pendiente de la línea de regresión, y que la edad en que ocurre este cambio de pendiente representa la edad de transición. El modelo de regresión por segmentos general se presenta en la ecuación 1 y los modelos para las porciones de madera juvenil y madura en las ecuaciones 2 y 3 respectivamente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - T) x_2 + e_i \quad (1)$$

Donde:

Y_i = característica de interés en el i -ésimo anillo de crecimiento

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = coeficientes de regresión

x_i = edad de formación del i -ésimo anillo de crecimiento

T = edad de transición de madera juvenil a madura

x_2 = variable indicadora : $x_2 = 0$ si $x_i < T$ (madera juvenil) o $x_2 = 1$ si $x_i > T$ (madera madura)

y e_i = error aleatorio asociado al i -ésimo anillo de crecimiento.

De esta manera cuando $x_2 = 0$ (madera juvenil):

3. Materiales y Métodos

$$E (Y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2)$$

y cuando $x_2 = 1$ (madera madura)

$$E (Y_i) = \beta_0 - (\beta_2 T) + (\beta_1 + \beta_2) x_i \quad (3)$$

Se aplicó el método de regresión segmentada a todas las variables anatómicas medidas utilizando el programa Statistica v7.

Una vez obtenida la edad de transición se procedió a la preparación de las muestras para realizar el pulpado.

3.6. Pulpado quimimecánico

La madera se chipeó con formón a una medida similar a la retenida por las zarandas 5/8 y 1/2, de aproximadamente 2,5 cm de largo x 1,5 cm de ancho x 0,3 cm de espesor. Se evitaron las partes con podredumbres y nudos. Para las dos especies se chipeó una muestra representativa de todos los árboles y todas las alturas separando la madera juvenil y la madera madura.

Procedimiento de pulpado

Los pulpados de alto rendimiento de tipo quimimecánico al sulfito alcalino (o soda-sulfito) se realizaron bajo las siguientes condiciones:

Los chips fueron prevaporizados a 105°C durante 40 minutos, dado su bajo contenido de humedad inicial (figura 3.16).

3. Materiales y Métodos



Figura 3.16: Prevaporización de los chips.

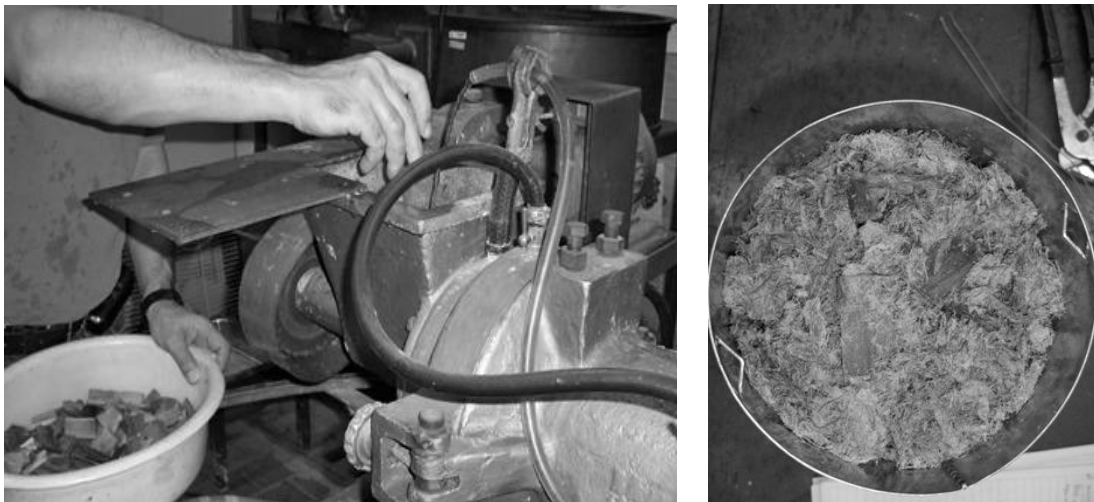
La impregnación se realizó en un Digestor M/K de 7 litros de capacidad, con recirculación, durante 20 min a 80°C (figura 3.17). La relación licor/madera fue de 5,5/1, y los reactivos de impregnación fueron hidróxido de sodio y sulfito de sodio al 2,6% sobre madera seca.



Figura 3.17: Digestor con recirculación de licor.

La desfibración-refinación se realizó en un molino refinador Bauer de 8 pulgadas de diámetro de discos (figuras 3.18 y 3.19).

3. Materiales y Métodos

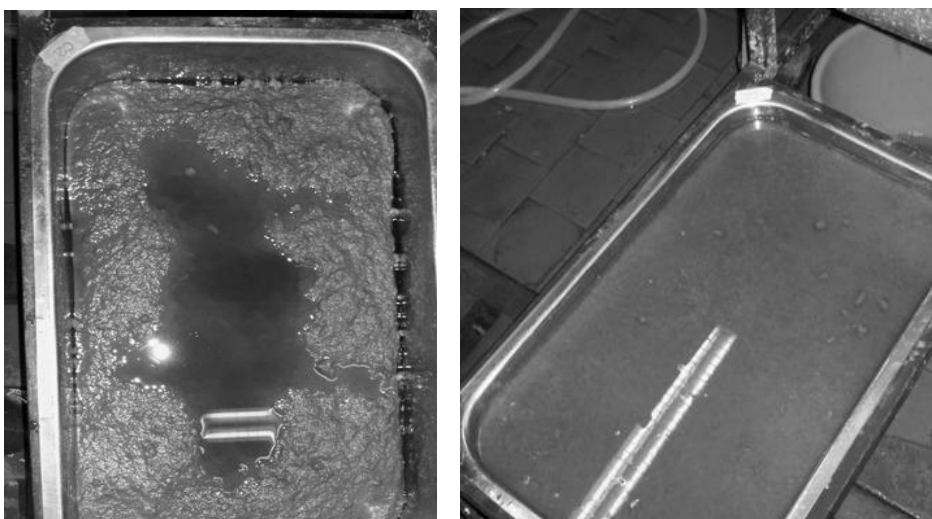


Figuras 3.18 y 3.19: Refinador de discos y chips cocidos.

Todas las etapas se realizaron con circuito cerrado de agua con recirculación de finos.

Se trabajo al 1% de consistencia y se realizo una etapa mecánica previa a la etapa química con una apertura entre discos de 100 milipulgadas para simular la desestructuración inicial del material.

La pulpa obtenida se lavó con 20 L de agua destilada sobre una batea de malla 270 mesh (figuras 3.20 y 3.21).

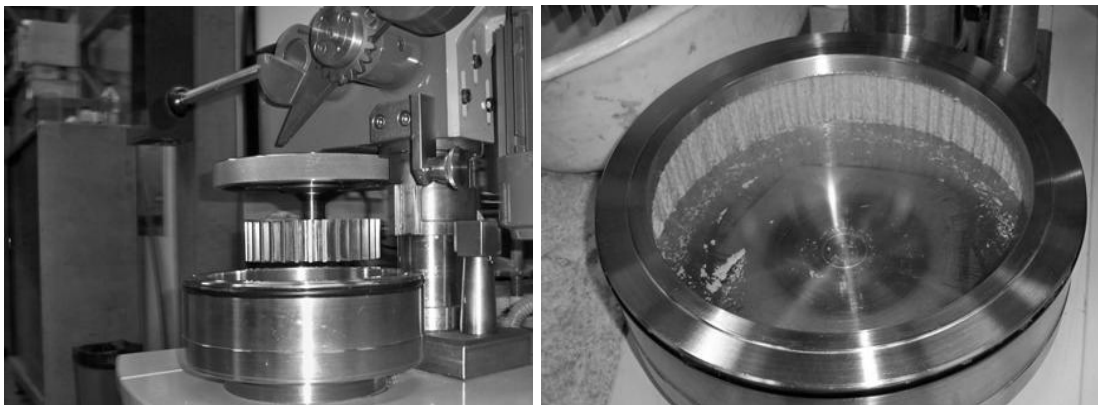


Figuras 3.20 y 3.21: Lavado de pulpa y pulpa.

3. Materiales y Métodos

La depuración se realizó en aparato Somerville (ranuras de 0,15 mm) por 20 minutos con recirculación de finos. Los rechazos de depuración se secaron en estufa y se pesaron como rechazos (TAPPI T 275 sp-98).

Luego se refinaron las pulpas en un refinador PFI, al 10 % de consistencia y entre 120 a 1000 revoluciones (figuras 3.22 y 3.23). Se determinó el °SR para conocer el grado de refinado alcanzado. El °SR objetivo fue de 45 °SR, valor utilizados por la industria de fabricación de papel periódico.



Figuras 3.22 y 3.23: Refinador PFI.

Una vez obtenidas las pulpas de madera juvenil (MJ) y madera madura (MM) de *Populus* y *Salix* se procedió a formar las mezclas de la siguiente manera:

Tabla 3.6: Mezclas de pulpas.
Madera madura (MM) 100%
Mezcla (MJ/ MM) 25-75%
Mezcla (MJ / MM) 50-50%
Mezcla (MJ / MM) 75-25 %
Madera Juvenil (MJ) 100%

3.6. a. Metodología y/o normas para la medición de las propiedades de las pulpas

La formación de hojas para ensayos físico-mecánicos se realizó según norma TAPPI T 205 sp-95, en una formadora de hojas standard TAPPI.

Sobre las hojas de laboratorio se midieron: grado de refino ($^{\circ}$ SR), gramaje, espesor, bulk, explosión, densidad, rasgado, tracción, elongación, TEA, Índice TEA, porosidad, Opacidad, k (coeficiente de absorción), s (coeficiente de dispersión) y zero span.

Grado de refino ($^{\circ}$ SR): las determinaciones del grado de refino (inversa de la drenabilidad) de las pulpas se realizaron mediante el Método Schopper-Riegler (ISO 5267-1: 1979).

Espesor [mm]: se determina con un calibre, sobre 5 hojas juntas, con 10 lecturas distribuidas en toda su superficie. El resultado promedio se divide por 5. T 220 sp-96.

Gramaje [g/m²]: se calcula con el peso de las hojas y el área de las mismas. El gramaje que establece la norma T 220 sp-96 es de 60 g/m², lo que equivale a hojitas estándar de 1,2 g.

Densidad aparente de la hoja [g/cm³]: se calcula dividiendo el gramaje por el espesor promedio de las hojas. T 220 sp-96.

Propiedades ópticas: Se determinaron en un equipo Techyndine Color Touch modelo ISO de geometría esférica, que mide la reflectancia difusa. Se utilizó como fuente el iluminante C /10°. Las hojas para blancura se confeccionaron según norma ISO 3688-1977. Se midieron: Blancura (%ISO), Opacidad (%), Dispersión de la luz (s), (m²/kg) y Absorción de la luz (k), (m²/kg). Se efectuaron 3 lecturas de cada propiedad sobre cada hoja.

3. Materiales y Métodos

Propiedades mecánicas, según Tappi T 220 sp-96:

- Resistencia a la tracción [N m/g]: se mide la fuerza de tensión necesaria para romper una tira de papel de dimensiones estandarizadas.
- Elongación (%): es el máximo estiramiento que puede realizar la fibra antes de romperse por tracción. Se mide en el mismo ensayo de tracción.
- Energía absorbida a la tracción (TEA): se mide como el área bajo la curva del gráfico tracción - elongación.
- Resistencia a la explosión [kPa m²/g]: es la presión hidrostática necesaria para la ruptura de una probeta de dimensiones normalizadas cuando se deforma por la acción de una membrana de látex de aproximadamente 1,2 pulgadas de diámetro, que se fuerza contra el mismo a una velocidad controlada de carga.
- Resistencia al rasgado [mN m²/g]: es la cantidad de trabajo realizado al rasgar el papel a través de una distancia fija, luego de realizado un corte inicial.

Resistencia al aire [s]: es la capacidad del papel de ser atravesado por un fluido (líquido o gas). Es la inversa de la permeabilidad, y una medida aproximada de la porosidad de la hoja. Suelen utilizarse ambos términos como sinónimos, pero existe la medida de porosidad del papel, que es la relación entre la fracción de espacios vacíos y el volumen total del material. Ambas propiedades están relacionadas, ya que al aumentar la porosidad disminuye la resistencia al paso de aire. T 251 wd-96.

Resistencia Individual de las fibras (N /cm): se midió mediante el ensayo de tracción con mordazas juntas (*zero span tensile strength*). Se realiza en las condiciones del ensayo de tracción pero sin espacio entre las mordazas. T231 cm-96.

3.6. b. Análisis estadístico

Los valores obtenidos en las mezclas de pulpas fueron analizados y contrastados mediante análisis de la varianza y test de comparaciones múltiples (Tukey).

Se buscaron ecuaciones de regresión, simples, múltiples, lineales y no lineales, para definir modelos de variación que expliquen las relaciones entre las propiedades de la madera estudiadas y las propiedades de las pulpas.

Para los análisis de regresión múltiple, se debieron ponderar los datos de las propiedades de la madera de manera de quedaran con las mismas características (porcentaje de madera juvenil y madura) que las mezclas de pulpas. Para ello se tomo la edad de transición entre madera juvenil y madura de cada una de las especies (regresiones segmentadas) y se aplicaron las fórmulas que se presentan a continuación:

Mezcla (MJ/MM)	Formula*
0-100	V MM
25-75	$(0,25*V_{mj} + 0,75* V_{mm})*100$
50-50	$(0,50*V_{mj} + 0,50* V_{mm})*100$
75-25	$(0,75*V_{mj} + 0,25* V_{mm})*100$
100-0	V MJ

Donde:

VMJ: valor de la propiedad en la madera juvenil

VMM: Valor de la propiedad en la madera madura.

*La metodología aplicada para la ponderación de las propiedades de la madera y los valores obtenidos se detallan en el Anexo.

Se analizaron las mezclas de pulpas con diferentes proporciones de madera juvenil y madura usando un Diseño de mezclas para determinar qué mezcla de pulpa optimiza cada propiedad estudiada. Se trata de un procedimiento numérico

3. *Materiales y Métodos*

que consiste en buscar matemáticamente una combinación de componentes con la que se obtiene una respuesta óptima de la propiedad.

El diseño se basa en que las propiedades de una mezcla son determinadas por las proporciones de sus ingredientes y no por su cantidad total. Las proporciones de los diversos componentes, no son independientes, ya que la suma, debe dar siempre 1 o 100%. Para optimizar las propiedades de una mezcla, siempre debe cumplirse la ecuación:

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1$$

Con este diseño pueden encontrarse tres modelos de respuesta: lineal, cuadrático y cúbico. La ecuación de primer orden (modelo lineal) permite caracterizar cómo cada factor influye de manera independiente en la respuesta. El modelo cuadrático (segundo orden) permite identificar las posibles interacciones en mezclas binarias entre dos de los componentes de la mezcla total. Si el modelo de segundo orden no es adecuado, o no presenta un buen ajuste, es necesario un modelo de orden mayor, generalmente de tercer grado (modelo cúbico).

Para definir y analizar el diseño de mezclas se utilizó el paquete estadístico Statgraphic.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. I. Variación axial y radial de las propiedades de la madera

4. I.A. Álamos: Variables de la madera

4. I.A.1. Anillos de crecimiento y Densidad Básica

Anillos de crecimiento

Se midió el incremento corriente anual en el fuste de los cinco árboles a todas las alturas de muestreo. La tabla 4.1 presenta los valores de ancho de anillo promedio en las cinco alturas de muestreo. El incremento corriente anual presenta sus valores máximos en los primeros años de crecimiento, correspondiendo a una curva natural de crecimiento (tabla 4.1, figura 4.1).

Tabla 4.1: Valores de ancho de anillo promedio por altura en madera de álamo.						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
1	0,47 a*	0,30 a	0,94 ab	0,35 a	0,37 a	0,52 a
2	0,72 ab	0,95 bcd	1,48 de	1,43 f	0,98 d	1,13 bcde
3	1,27 bcde	1,29 cdef	1,49 de	1,66 f	1,06 d	1,37 def
4	1,87 ef	1,62 f	1,63 e	1,47 ef	0,94 cd	1,51 f
5	2,02 f	1,69 f	1,43 cde	1,44 ef	1,06 d	1,52 f
6	2,06 f	1,69 f	1,49 de	1,07 de	1,03 d	1,49 ef
7	1,78 def	1,55 ef	1,17 bcd	0,95 cd	0,97 cd	1,29 def
8	1,93 ef	1,41 def	1,01 abc	0,97 cd	0,84 bcd	1,23 cdef
9	1,63 cdef	1,06 bcde	0,95 abc	0,92 bcd	0,79 bcd	1,07 bcd
10	1,12 abcd	1,01bcde	0,93 abc	0,79 bc	0,60 ab	0,89 bc
11	1,16 abcd	0,93 bcd	0,83 ab	1,42 bc	0,67 bc	0,88 bc
12	0,98 abc	0,71 ab	0,82 ab	1,00 bcd		0,85 abc
13	0,82 ab	0,83 abc	0,77 ab	0,63 ab		0,75 ab
14	0,95 abc	0,85 abc	0,73 a	0,68 ab		0,78 ab
15	1,03 abc	0,68 ab	0,68 a			0,80 ab
16	0,80 ab	0,72 ab				0,76 abc
17	0,77 ab					0,77 abcd
Promedio	1,26 B	1,08 AB	1,10 AB	1,01 AC	0,84 C	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey p<0,05).

4. Resultados y Discusión

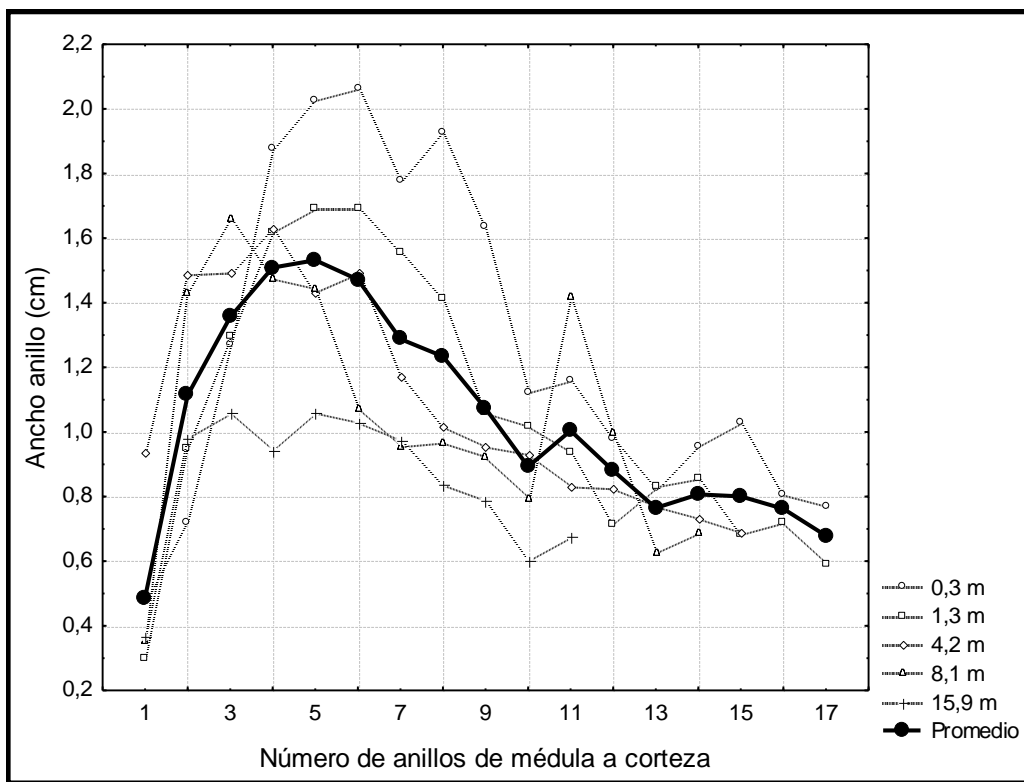


Figura 4.1: Valores de ancho de anillo por alturas y sus valores promedio en madera de álamo.

Como puede observarse en la figura 4.1, el ancho de anillo aumenta en los primeros años (del 1 al 5) y luego disminuye. Si analizamos las variaciones con respecto a la altura, encontramos que los mayores valores se corresponden con la altura de 0,3 m y luego disminuyen.

Las Tablas 4.2 y 4.3 presentan los valores promedio de las variables: densidad básica de la madera, anatomía y composición química, discriminadas por año o rango de edad. El patrón general es de un aumento de los valores con la edad para la mayoría de las variables.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.2: Resumen de las variables de la madera de álamo.

Edad (años)	Densidad (g/cm ³)	Fibras				Vasos	
		Longitud de fibra (μm)	Espesor (μm)	Lumen (μm)	Ancho (μm)	Diámetro de vasos (μm)	Frecuencia de vasos (n° mm ⁻¹)
1	0,35	1040,06					
2	0,35	1040,06					
3	0,36	1123,44					
4	0,36	1197,67	3,13	13,54	20,01	71,35	53,94
5	0,36	1243,95					
6	0,37	1309,16					
7	0,37	1375,42					
8	0,38	1395,38	3,22	13,8	21,03	78,23	55,33
9	0,39	1420,33					
10	0,39	1459,85					
11	0,39	1475,97	3,46	13,71	21	77,44	56,65
12	0,39	1491,79					
13	0,40	1498,18					
14	0,39	1519,79					
15	0,39	1526,21	3,57	14	21,52	79,26	54,04
16	0,38	1564,17					
17	0,39	1552,25					

Tabla 4.3: Resumen de los valores de la composición química de madera de álamo.

Edad (años)	Alcohol/benceno (%)	Agua Caliente (%)	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosas		
					Xilanos (%)	Arabinanos (%)	Acetilos (%)
0 a 5	2,59	2,46	25,97	47,20	17,47	0,27	1,95
5 a 10	2,12	1,92	25,62	48,56	15,92	0,23	2,25
10 a 15	2,07	2,75	25,84	48,63	16,11	0,22	2,47

Densidad Básica

La densidad básica de la madera muestra un patrón general de incremento de sus valores con la edad y con la altura de muestreo (tabla 4.4, figura 4.2).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.4: Valores de densidad promedio por altura en madera de álamo.						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
1	0,33 a *	0,34 a	0,33 a	0,35 a	0,38 a	0,35 a
2	0,33 a	0,33 a	0,34 a	0,35 a	0,38 a	0,35 a
3	0,35 abc	0,34 ab	0,34 a	0,37 ab	0,40 ab	0,36 ab
4	0,34 a	0,35 abc	0,35 abc	0,36 ab	0,41 bc	0,36 abd
5	0,35 ab	0,35 abc	0,35 ab	0,37 ab	0,40 b	0,36 abcd
6	0,34 ab	0,35 abc	0,35 abc	0,38 ab	0,41 bc	0,37 abcd
7	0,35 abc	0,35 abc	0,37 bcd	0,38 bc	0,41 bc	0,37 abcde
8	0,35 abc	0,35 abcd	0,39 bcd	0,38 bc	0,42 cd	0,38 bcde
9	0,36 abcd	0,36 acbd	0,38 bcd	0,40 bcd	0,43 cd	0,38 ce
10	0,38 cd	0,36 abcd	0,38 cd	0,40 bcd	0,43 d	0,39 e
11	0,37 bcd	0,36 abcd	0,38 cd	0,41 d	0,44 d	0,39 e
12	0,38 cd	0,37 bcd	0,39 d	0,41 cd		0,39 cde
13	0,38 d	0,38 d	0,40 d	0,41 d		0,40 e
14	0,39 d	0,38 cd	0,40 d	0,41 d		0,39 e
15	0,39 d	0,39 d	0,39 d			0,39 ce
16	0,39 d	0,37 bcd				0,38 bcde
17	0,39 d					0,39 abcde
Promedio	0,36 AB	0,36 A	0,37 B	0,38 C	0,41 D	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

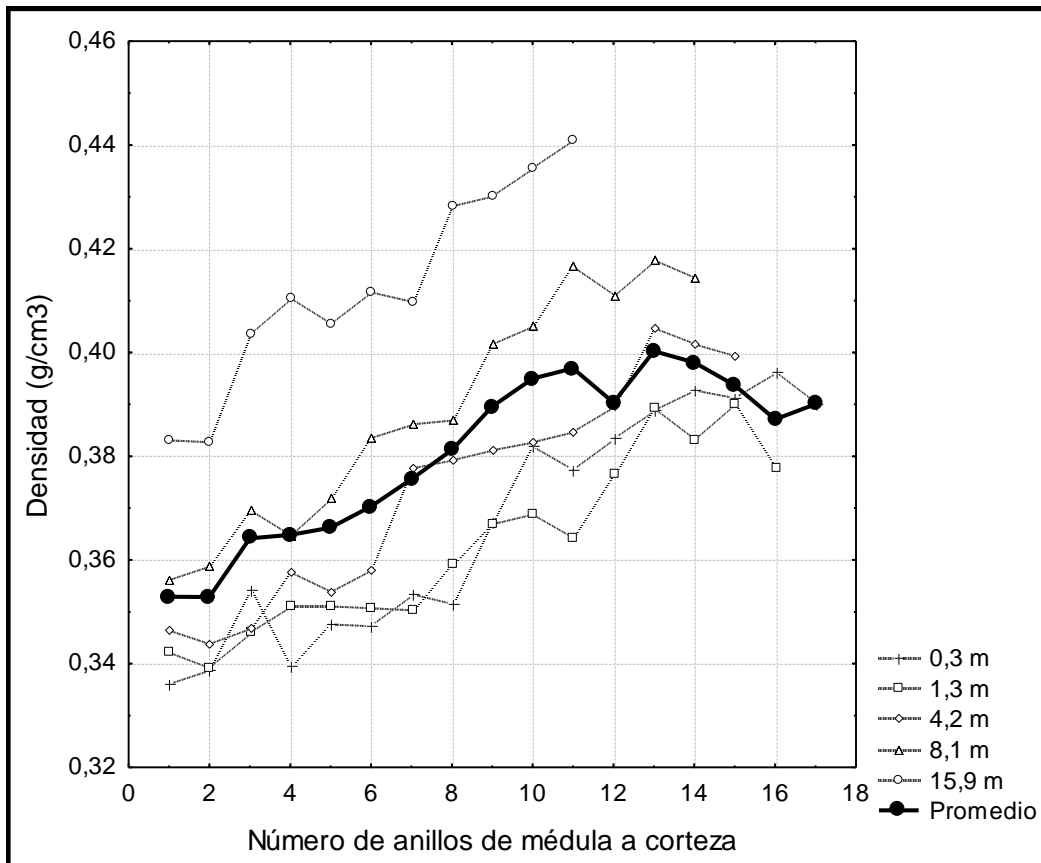


Figura 4.2: Variación de la densidad por alturas y sus valores promedios en madera de álamo.

La figura 4.2, sumada al análisis de grupos homogéneos (Tabla 4.4), permitieron determinar un patrón general que consistió en la diferenciación de dos grupos de valores: el primer grupo constituido por los años 1 al 7, en el cual la densidad básica no presenta diferencias con valores entre $0,35-0,37 \text{ g/cm}^3$ y el segundo grupo, que abarca desde el año 8 al 17, conforma un grupo homogéneo que fluctúa entre $0,38$ a $0,40 \text{ g/cm}^3$.

Analizando el patrón axial, se observó que a medida que aumenta la altura de muestreo se incrementan los valores de densidad. Los menores valores ($0,36 \text{ g/cm}^3$) corresponden a la base, y a 1,3 m, mientras que las otras 3 alturas presentaron diferencias significativas entre sí, aumentando sus valores de $0,37 \text{ g/cm}^3$ a 4,2 m de altura, a $0,41 \text{ g/cm}^3$ a 15,9 m de altura (Tabla 4.4, Figura 4.2).

Algunos autores encontraron el mismo patrón de variación radial de la densidad en *Populus*. Por ejemplo, Bendtsen y Senft (1984) en plantaciones de 30 años de

4. Resultados y Discusión

edad, Balatinecz y Krestschmann (2001) para 15 años de edad y De Bell et al (2002) para 9 años de edad. Por el contrario, Yanchuk et al (1983); Yanchuk y Micko (1990); Bonavía de Guth (1991); Matyas y Peszlen (1997) y Peszlen (1998) encontraron que el patrón de variación radial de la densidad en álamos de diferentes edades comenzaba con una disminución de los valores en los primeros anillos y luego aumentaba.

En un trabajo realizado en Argentina por Diaz et al (2010), sobre el mismo clon implantado en el Delta (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60'), la variación axial de la densidad presentó un patrón de aumento con la altura. Los autores, sin embargo, no encontraron diferencias significativas entre las primeras alturas muestreadas en forma exhaustiva hasta los 2,2 m sobre el nivel del suelo, y concluyeron que la primera troza comercial (2,2 m) puede considerarse de densidad homogénea en su longitud. Estos resultados coinciden con los hallados en la tesis.

4. I.A.2.Morfometría de Fibras

Longitud de fibra

La longitud de fibra presenta un patrón de variación radial que aumenta de médula a corteza (tabla 4.5 y figura 4.3).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.5: Valores de longitud de fibra promedio por altura en madera de álamo.

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
1	988,76 a*	1032,27 a	1058,37 a	1047,16 a	1073,72 a	1029,41 a
2	980,76 a	1042,17 a	1068,45 a	1057,10 a	1076,34 a	1034,13 a
3	1126,13 b	1100,98 b	1156,14 b	1112,45 b	1121,49 b	1128,98 b
4	1154,23 b	1182,34 b	1233,61 c	1201,54 c	1216,64 c	1199,24 c
5	1178,82 b	1231,58 c	1320,27 d	1263,96 d	1225,13 c	1247,14 d
6	1245,87 c	1289,49 c	1362,22de	1342,16 e	1306,04 d	1308,45 e
7	1323,24 c	1368,09 d	1398,71 ef	1389,10 ef	1397,94 e	1375,36 f
8	1305,54 c	1396,94 d	1469,42ghi	1388,56 ef	1416,45 ef	1393,32 fg
9	1370,63 c	1419,92 de	1443,60 fg	1430,14 fg	1437,37 ef	1417,73 g
10	1441,60 d	1474,39 ef	1463,21 gh	1471,43gh	1448,62 f	1454,19 h
11	1440,35 d	1449,97 efg	1475,50 ghi	1502,29hij	1511,77 g	1482,64 i
12	1437,94 d	1527,69 gh	1518,70 i	1482,84 hi		1488,64 i
13	1481,40 d	1472,06 gh	1512,90 hi	1526,36 ij		1506,60 ij
14	1473,44 d	1550,86 fg	1515,04 i	1539,82 j		1507,91 ij
15	1535,84 e	1534,42 hi	1508,36 hi			1532,09 jk
16	1547,99 e	1580,35 i				1565,92 k
17	1552,25 e					1552,25 k
Promedio	1332,60 A	1379,81 BC	1384,99 C	1361,29 B	1315,04 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

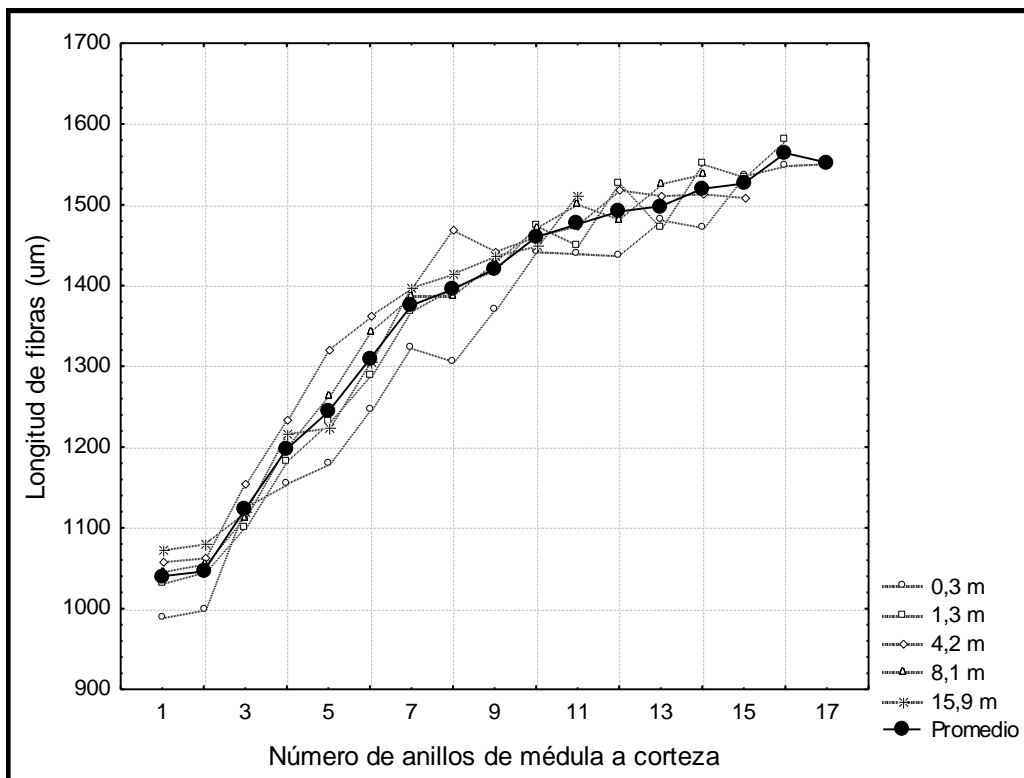


Figura 4.3: Variación axial y radial de la longitud de fibra en madera de álamo.

En el patrón de variación radial observado, podemos distinguir que hasta el año 7 hay un incremento sostenido con diferencias significativas entre años. A partir del año 8 la tasa de aumento se hace más baja, constituyendo grupos homogéneos los valores de los años 11 a 14 y 15 a 17.

Yanchuk et al (1983); Yanchuk y Micko (1990); Bonavía de Guth (1991); Koubaa et al (1998); Bao et al (2001) y De Bell et al (2002) encontraron el mismo patrón de variación radial de longitud de fibra en sus trabajos de investigación sobre diferentes clones de *Populus*.

La variación axial presenta un patrón menos definido que el anterior, presentando un aumento de sus magnitudes hasta los 4,2 m de altura en el fuste y luego un descenso hacia el ápice (tabla 4.5, figura 4.3)

4. Resultados y Discusión

Lumen de fibra

La tabla 4.6 presenta los valores promedio de lumen para las diferentes alturas y posiciones radiales analizadas.

Tabla 4.6: Valores de lumen promedio por altura en madera de álamo.						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
4	13,60 a*	13,40 a	13,52 a	14,63 a	12,56 a	13, 51 ab
8	13,96 a	13,92 ab	14,32 a	14,68 a	12,08 a	13, 50 a
11	13,19 a	14,67 b	14,24 a	13,48 a	12,95 a	13,43 a
15	14,39 a	13,35 a	14,11 a	14,16 a		13,82 b
Promedio	13,41 B	13,60 BC	14,01 C	14,02 C	12,40 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

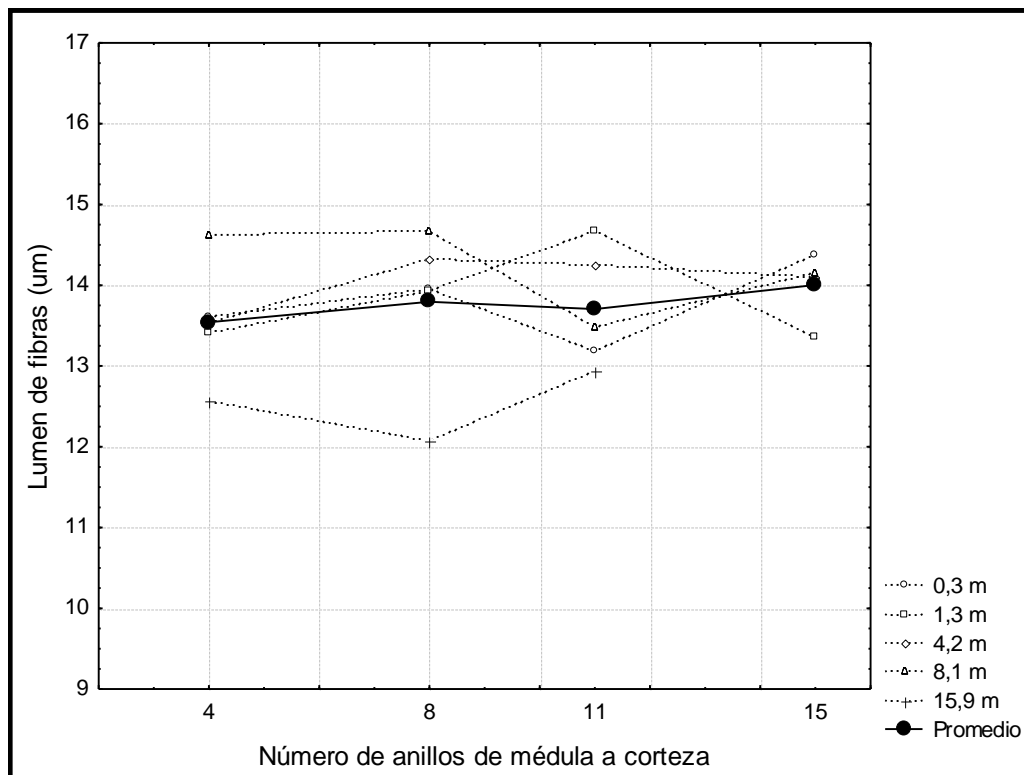


Figura 4.4: Variación del lumen de fibras por alturas y su valor promedio en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

La variación radial con la edad indica una leve disminución de los valores hasta la edad de 11 años (pero sin diferencias significativas entre anillos), mientras que a la última edad analizada (15 años) el valor promedio es significativamente superior. Esta tendencia no es idéntica en todas las alturas analizadas. A 1,3 m esta variable presenta diferencias significativas dependiendo de la edad analizada, con un ascenso de sus valores entre los 4 y 11 años y luego una disminución significativa a la edad de 15 años.

La variación axial registra un aumento significativo de los valores en la porción media del tronco (alturas 4,2 m y 8,1 m) y luego una disminución en la zona muestreada más cercana al ápice (15,9 m).

Espesor de pared

La figura 4.5, sumada al análisis de grupos homogéneos (Tabla 4.7), permitieron determinar un patrón general que consistió en el aumento del espesor de pared de médula a corteza. Este patrón se repite en todas las alturas muestreadas con excepción de los 0,3 m.

Tabla 4.7: Valores de espesor de fibra promedio por altura en madera de álamo.						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
4	2,95 a*	3,07 b	3,37 ab	2,99 a	3,27 a	3,16 a
8	3,27 a	2,83 a	3,20 a	3,41 b	3,39 b	3,26 b
11	3,15 a	3,56 c	3,49 ab	3,47 c	3,64 c	3,41 c
15	3,08 a	4,04 d	3,44 b	3,74 d		3,59 d
Promedio	3,19 A	3,32 B	3,39 B	3,42 B	3,40 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

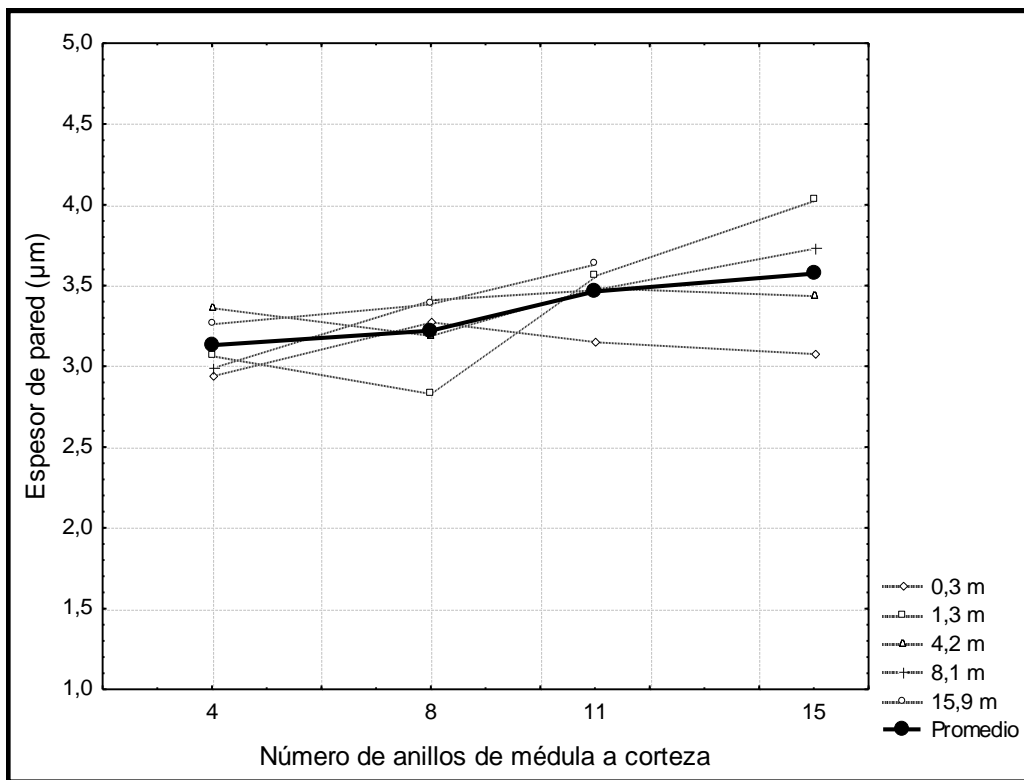


Figura 4.5: Variación del espesor de pared de fibra por altura y sus valores promedios en madera de álamo.

Se observó que a medida que aumenta la altura de muestro de 0,3 m a 1,3 m, los valores de espesor de pared en los primeros anillos se incrementan y luego se mantienen constantes (sin diferencias significativas entre las alturas 1,3 m; 4,2 m; 8,1 m y 15,9 m).

Ancho de Fibra

De acuerdo a la tabla 4.8 y la figura 4.6, el ancho de fibra presenta un patrón de variación radial que aumenta de médula a corteza.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.8: Valores de ancho de fibra promedio por altura en madera de álamo.

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
4	20,14 b*	20,92 a	19,05 a	20,71 a	19,24 a	20,21 a
8	20,50 b	21,18 a	21,91 b	22,43 c	19,11 a	20,81 ab
11	19,91 a	22,05 a	21,07 b	20,84 ab	21,13 b	20,60 b
15	20,84 ab	21,06 a	22,41 b	21,76 b		20,96 b
Promedio	20,44 A	20,83 B	21,20 BC	21,05 C	19,40 C	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

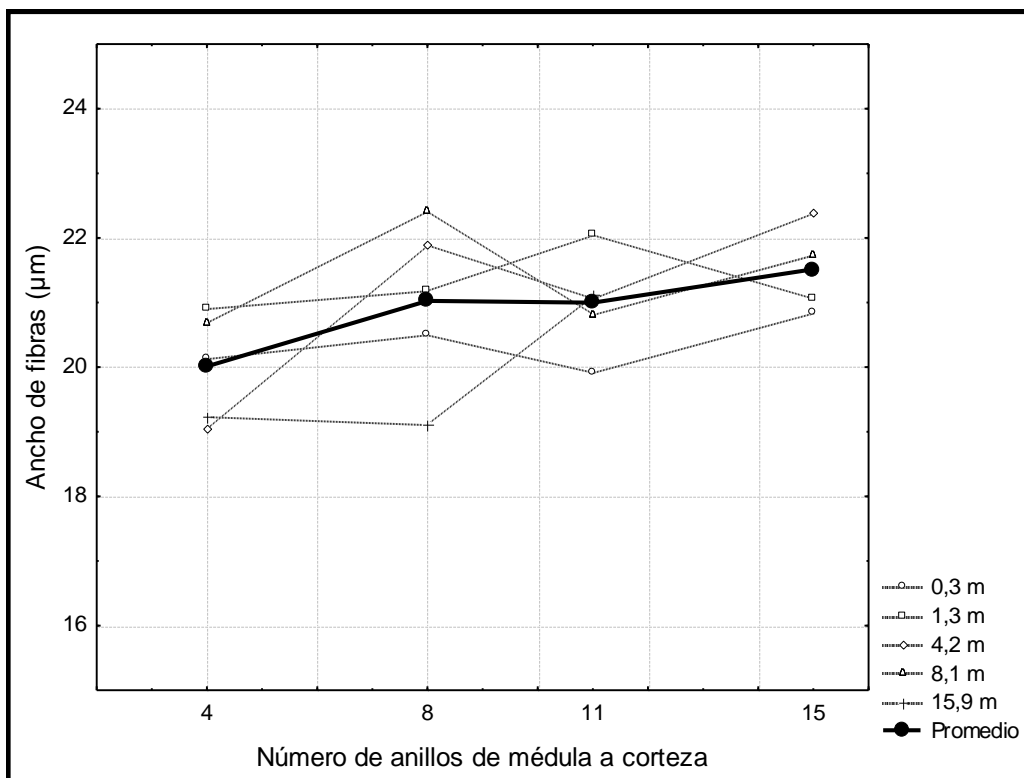


Figura 4.6: Variación del ancho de fibras por alturas y sus valores promedios en madera de álamo.

El ancho de fibra presenta un aumento significativo de médula a corteza, con valores de 20,21 μm para el año 4 y de 20,96 μm para el año 15.

También se registra un aumento axial significativo del ancho de fibra en la porción media del tronco (alturas 4,2 m y 8,1 m).

4. Resultados y Discusión

Diámetro de vasos

La tabla 4.9 presenta los valores promedio del diámetro de vasos en las distintas posiciones radiales y alturas analizadas.

Tabla 4.9: Valores de diámetro de vasos por altura en madera de álamo.						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3 m	4,2 m	8,1m	15,9 m	Promedio 5 alturas
4	73,38 a*	71,74 a	72,65 a	78,30 a	60,68 a	71,11 a
8	81,44 b	80,17 b	74,88 a	80,46 a	74,20 b	76,52 b
11	81,28 c	78,70 b	73,98 a	75,91 a	77,34 b	77,35 bc
15	73,42 ab	78,29 b	85,31 b	80,02 a		78,39 c
Promedio	76,88 A	76,67 A	76,82 A	78,04 A	68,27 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

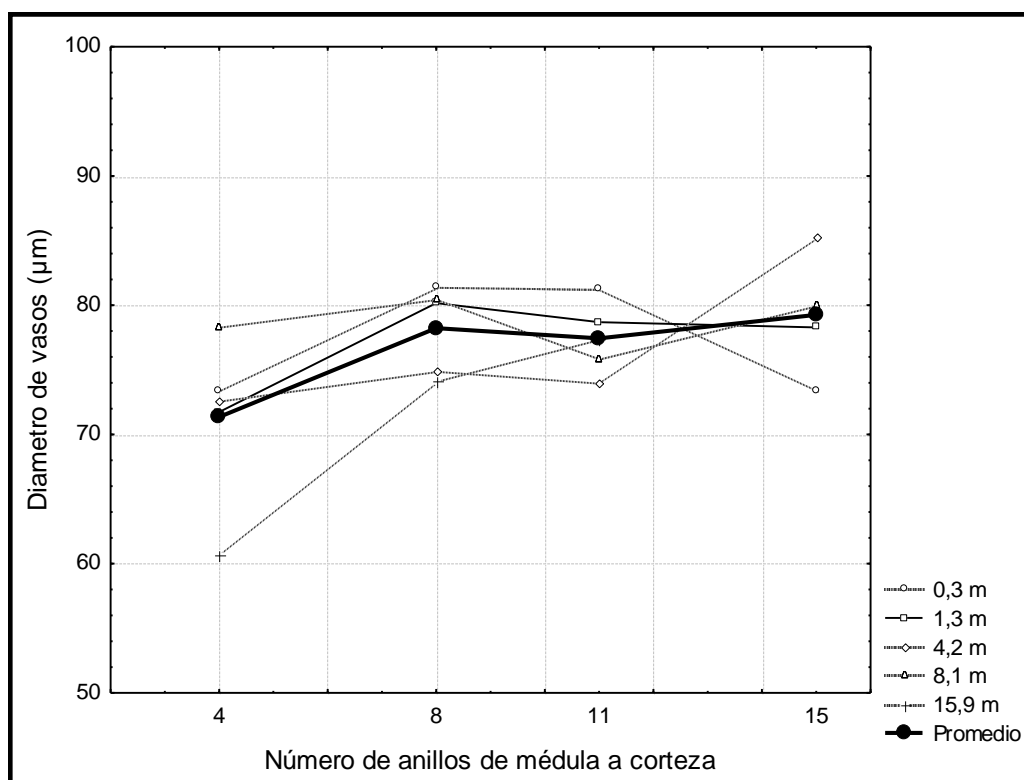


Figura 4. 7: Variación del diámetro de vasos, valores por altura y promedio en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

De acuerdo a la figura 4.7 y a la tabla 4.9 se observa que hay un aumento significativo del diámetro de vasos entre los años 4 y 8 (71,11 y 76,52 μm) y luego se mantiene constante hasta llegar a un valor de 78,39 μm en el año 15, que difiere significativamente del resto.

Axialmente, el diámetro de vasos no presenta diferencias significativas entre 0,3 m y 8,1 m, pero si entre estas y la altura de 15,9 m.

Frecuencia de vasos

La variación radial que presentaron los valores promedio de la frecuencia de vasos fue un aumento en los primeros años 4, 8 y 11 años y una disminución en el último año, como puede observarse en la figura 4.8. Sin embargo el análisis de grupos homogéneos no presento diferencias significativas entre los valores promedios (tabla 4.10).

Tabla 4.10: Valores de frecuencia de vasos en madera de álamo.						
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo					
	0,3 m	1,3m	4,2 m	8,1 m	15,9 m	Promedio
4	46,90 a*	48,42 a	52,81 a	49,06 a	72,61 b	53,93 a
8	46,10 a	50,81 ab	59,52 b	52,45 a	67,82 a	55,32 a
11	47,50 a	53,20 ab	53,33 ab	62,44 b	66,94 a	56,71 a
15	42,88 a	56,00 b	52,20 a	65,11 b		54,00 a
Promedio	45,85 A	52,1 B	53,85 BC	56,95 C	69,10 D	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

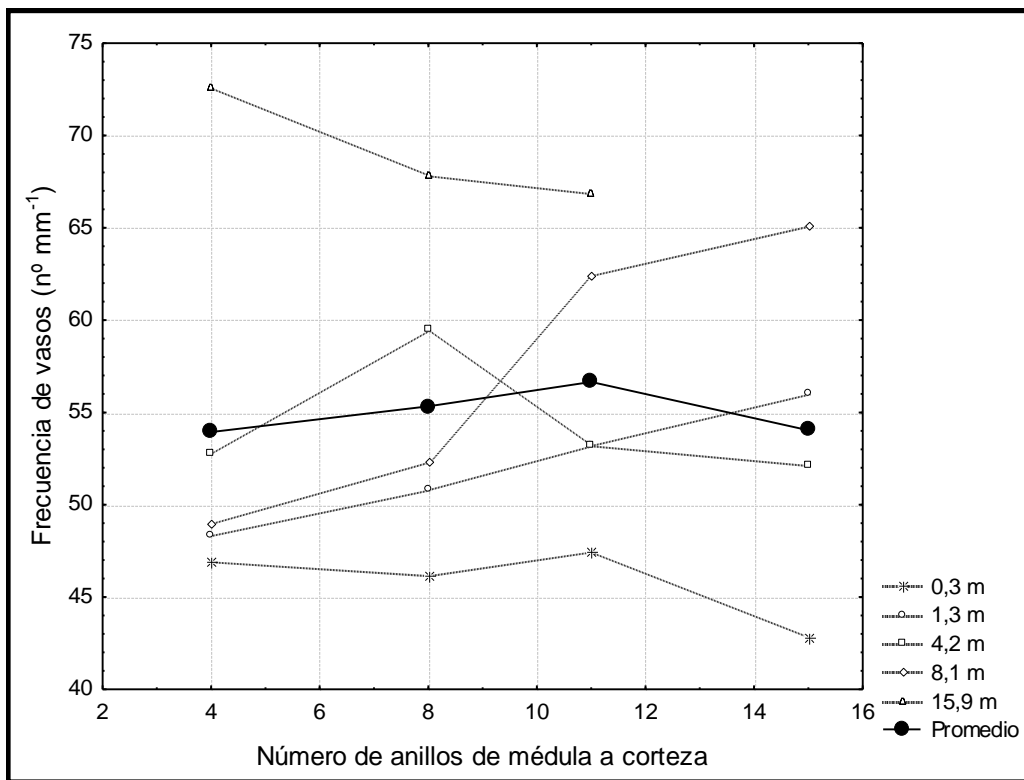


Figura 4.8: Variación axial y radial del número de vasos en madera de álamo.

La variación axial muestra un aumento de los valores con la altura de $45,85 \text{ n}^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ vasos/ mm^2 para el año 4 a $69,10 \text{ n}^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ para el año 15.

4. I.A.3. Composición Química

Los valores obtenidos de los componentes químicos en álamo para las diferentes alturas y posiciones radiales analizadas se presentan en las tablas 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15.

Alcohol / Benceno

El contenido de solubles en alcohol/benceno disminuyó radialmente, sin embargo, esta disminución no resultó significativa para el promedio de las 5 alturas (tabla 4.11 y figura 4.9) Entre las alturas de 1,3 m y 15,9 m la tendencia indica un aumento de los valores con la edad.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.11: Valores promedio de solubles en alcohol/benceno en madera de álamo.

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	15,9 m	Promedio de 3 alturas
0 - 5	2,16 a*	2,06 ab	3,54 b	2,59 a
5 - 10	1,75 a	1,71 a	2,89 a	2,12 a
10 - 15	1,76 a	2,37 b		2,07 a
Promedio	1,89 A	2,05 A	3,22 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

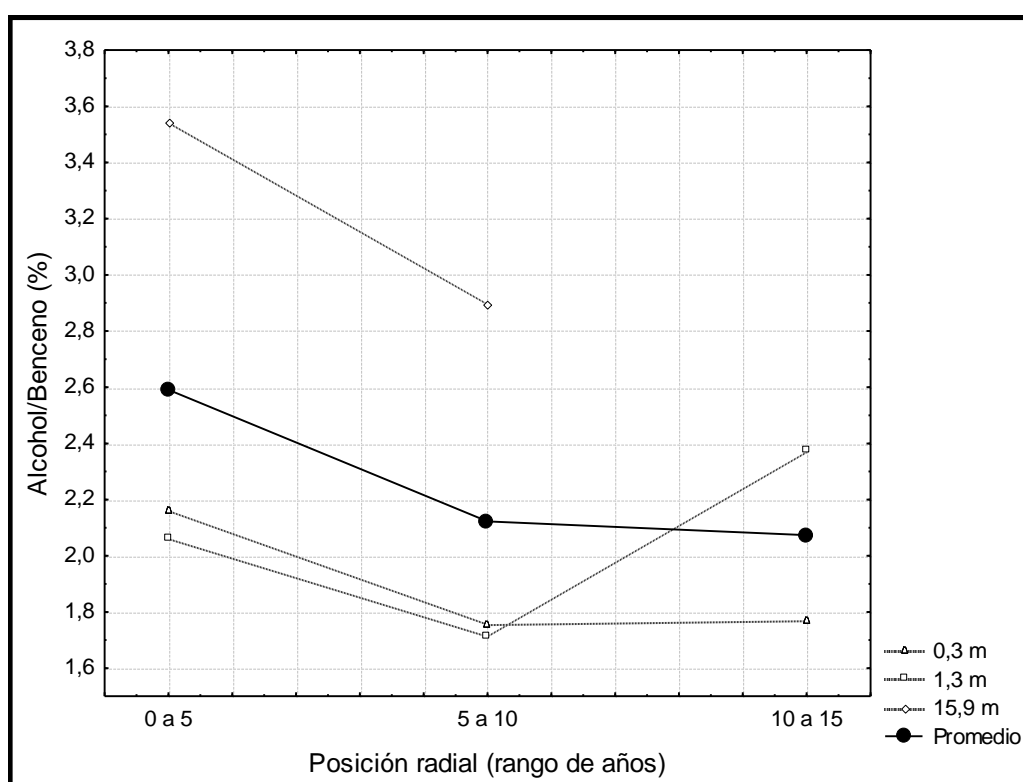


Figura 4.9: Variación axial y radial del contenido de solubles en alcohol/benceno en madera de álamo.

El porcentaje de solubles en alcohol/benceno aumenta con la altura. La principal diferencia se da entre los 1,3 m y 15,9 m (2,05 % y 3,22% respectivamente).

Agua Caliente

El contenido de solubles en agua caliente no presenta diferencias significativas para ninguna de las posiciones radiales analizadas (tabla 4.12). Esta tendencia se

4. Resultados y Discusión

repite en la mayoría de las alturas muestreadas con excepción de la altura de 15,9 m en la cual hay una disminución significativa entre los rangos de edad de 0 a 5 años y 5 a 10 años.

Tabla 4.12: Valores promedio de solubles en agua caliente en madera de álamo.				
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	15,9 m	Promedio de 3 alturas
0 - 5	1,78 a*	2,06 a	2,39 b	2,08 a
5 - 10	1,79 a	1,71 a	1,85 a	1,78 a
10 - 15	2,10 a	2,37 a		2,24 a
Promedio	2,91 B	1,89 A	2,12 AB	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

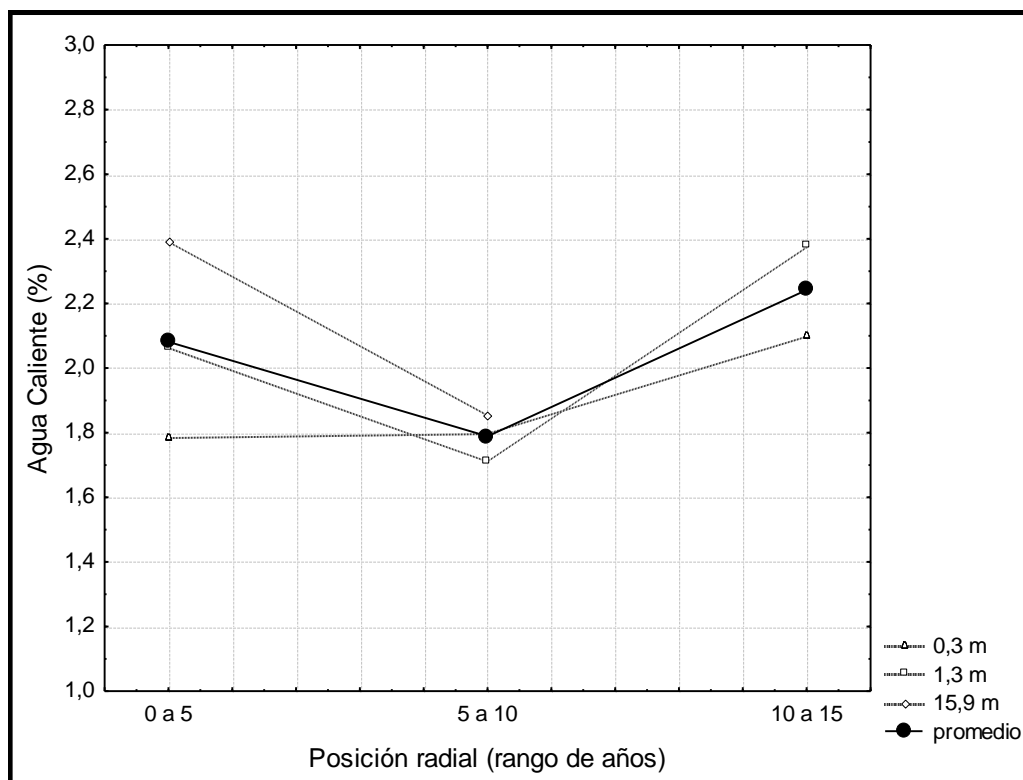


Figura 4.10: Variación axial y radial del contenido de solubles en agua caliente en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

El porcentaje de solubles en agua caliente disminuye entre las alturas de 0,3 m y 1,3 m (con diferencias significativas entre si) y luego aumenta entre las alturas de 1,3 m y 15,9 m (1,89 % 2,12%), aunque sin diferencias significativas.

Lignina

El análisis de grupos homogéneos (tabla 4.13) no presenta diferencia significativa entre las posiciones radiales muestreadas para las alturas seleccionadas.

Tabla 4.13: Valores promedio del contenido de lignina en madera de álamo.

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	15,9 m	Promedio de 3 alturas
0 - 5	25,66 a*	26,02 a	26,23 a	25,97 a
5 - 10	26,08 a	25,35 a	25,43 a	25,62 a
10 - 15	25,89 a	25,80 a		25,84 a
Promedio	25,88 A	25,72 A	25,83 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

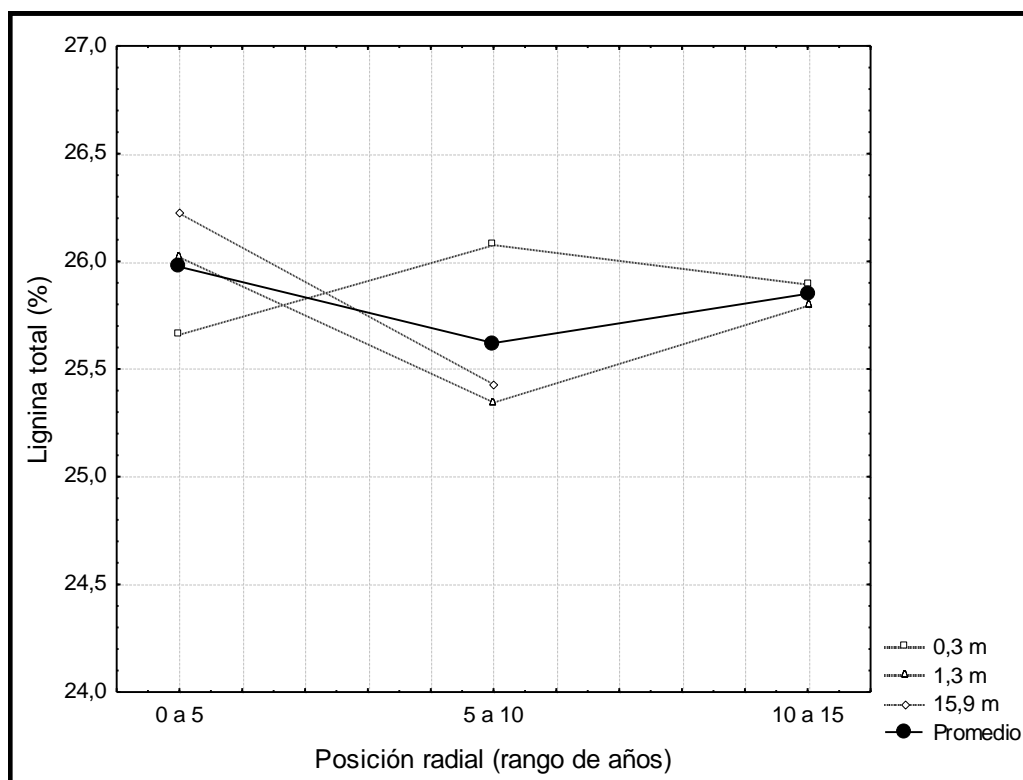


Figura 4.11: Variación axial y radial del contenido de lignina en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

La figura 4.11 presenta una disminución del contenido de lignina entre los rangos de 0 a 5 años y 5 a 10 años (25,97 % y 25, 62 %, respectivamente) y un aumento en el rango de 10 a 15 años (25, 84 %).

El contenido de lignina aumenta con la altura: 0,3 m: 25,66 %; 1,3 m: 26,02%; 15,9 m: 26,23%), aunque sin diferencias significativas.

Celulosa

El contenido de celulosa presenta un aumento de sus valores de médula a corteza. (Tabla 4.14 y Fig.4.12).

Tabla 4.14: Valores promedio de contenido de celulosa en madera de álamo.				
Posición radial (edad)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	15, 9 m	Promedio de 3 alturas
0 - 5	45,81 a *	48,55 a	47,23 a	47,20 a
5 - 10	48,09 b	48,73 a	48,86 b	48,56 b
10 - 15	48,85 b	48,41 a		48,63 b
Promedio	47,58 A	48,56 A	48,05 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

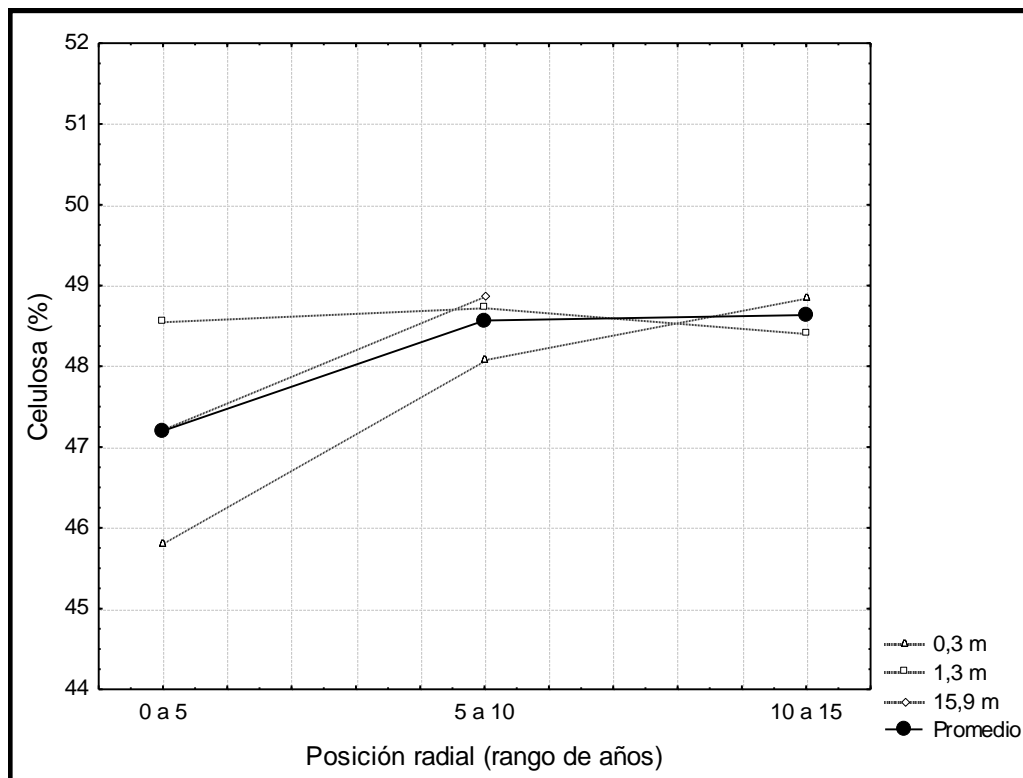


Figura 4.12: Variación radial y axial del contenido de celulosa en madera de álamo.

La figura 4.12, sumada al análisis de grupos homogéneos (Tabla 4.14), permitieron determinar un patrón general que consistió en la diferenciación de dos grupos. El primero conformado por el rango de edad de 0 a 5 años, con valores de 47,20 % y el segundo conformado por los rangos de edades de 5 a 10 años y 10 a 15 años, con valores de 48,56 % y 48,63%. Esta tendencia se reiteró en todas las alturas muestreadas a excepción de la altura de 1,3 m que no presentó diferencias significativas

A medida que aumenta la altura de muestro los valores del contenido de celulosa se incrementan para los primeros años entre las alturas 0,3 m a 4,2 m y luego disminuyen (Figura 4.12).

Hemicelulosas

Los valores promedio del contenido de hemicelulosas disminuyen entre los primeros años (17,47 % a 15,92) y aumentan en los últimos (16,11 %). Sin embargo entre los rango de edad de 5 a 10 años y 10 a 15 años, no hay diferencia significativa (tabla 4.15).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.15: Valores promedio del contenido de hemicelulosas en madera de álamo.

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	15,9 m	Promedio de 3 alturas
0 - 5	18,58 b *	17,58 b	16,25 b	17,47 b
5 - 10	16,52 a	16,19 ab	15,04 a	15,92 a
10 - 15	16,73 a	15,49 a		16,11 a
Promedio	17,28 B	16,42 AB	15,65 AB	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

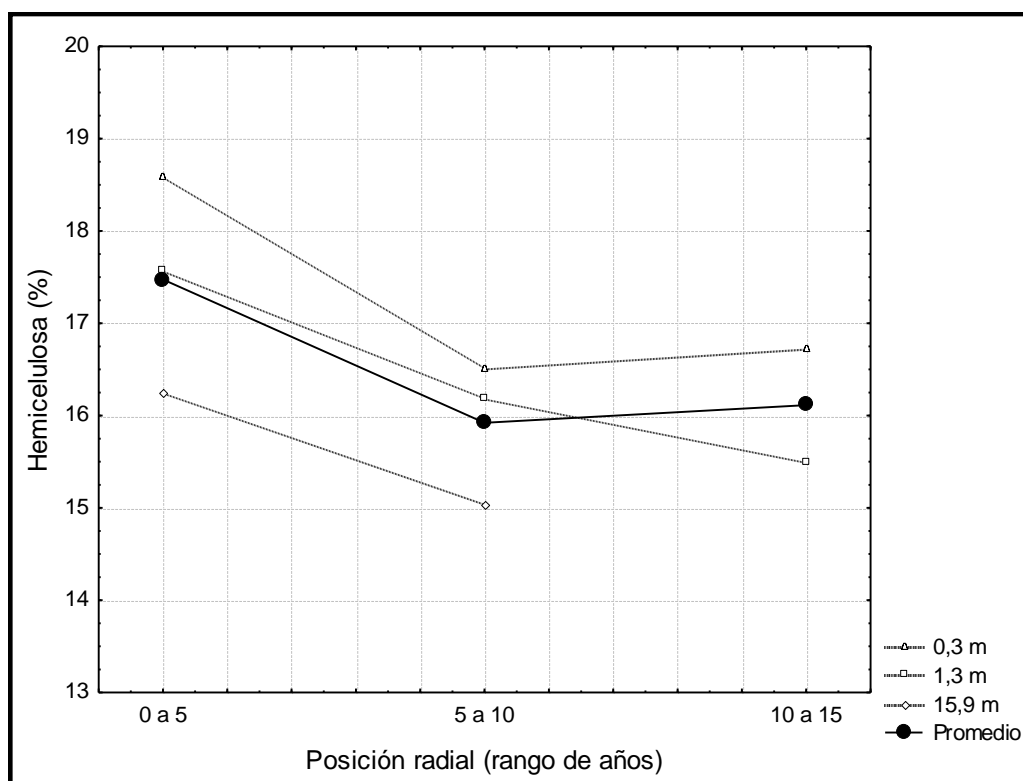


Figura 4.13: Variación radial y axial del contenido de hemicelulosas en madera de álamo.

El contenido de hemicelulosas disminuye a medida que aumenta la altura de muestreo (0,3m: 18,58 %; 1,3 m: 17,58 %; 15,9 m 16,25%) (Fig.4.13).

4. Resultados y Discusión

4. I.B. Sauces: Variables de la madera

4. I.B.1. Anillos de crecimiento y Densidad básica

Anillos de crecimiento

El incremento corriente anual se midió en los cinco árboles y en todas las alturas de muestreo en el fuste. La tabla 4.16 presenta los valores de ancho de anillo promedio en las cinco alturas de muestreo. El incremento corriente anual presenta sus valores máximos en los primeros años de crecimiento (0 a 10 años) y en los últimos años (35 a 45 años) (tabla 4.16, figura 4.14).

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo				Promedio 3 alturas
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	3,9 m	
0 - 5 años	4,34 b*	3,36 c	3,18 b	3,28 b	4,24 b
5 - 10 años	2,35 b	2,29 bc	1,77 a	1,59 a	2,28 a
10 - 15 años	2,19 a	1,66 ab	1,36 a	1,20 a	1,87 a
15 - 20 años	1,90 a	1,09 a	1,03 a	0,73 a	1,30 a
20 - 25 años	2,36 a	1,20 ab	0,90 a	0,64 a	1,70 a
25 - 30 años	3,55 ab	1,32 ab	1,11 a	0,86 a	2,47 a
30 - 35 años	3,80 ab	1,21 ab	1,42 a	1,15 a	2,39 a
35 - 40 años	3,43 ab	2,26 abc	1,40 a	1,53 a	2,36 a
40 - 45 años	4,14 ab	1,30	1,24 a	0,82 a	2,36 a
Promedio	2,74 B	1,74 A	1,48 A	1,31 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

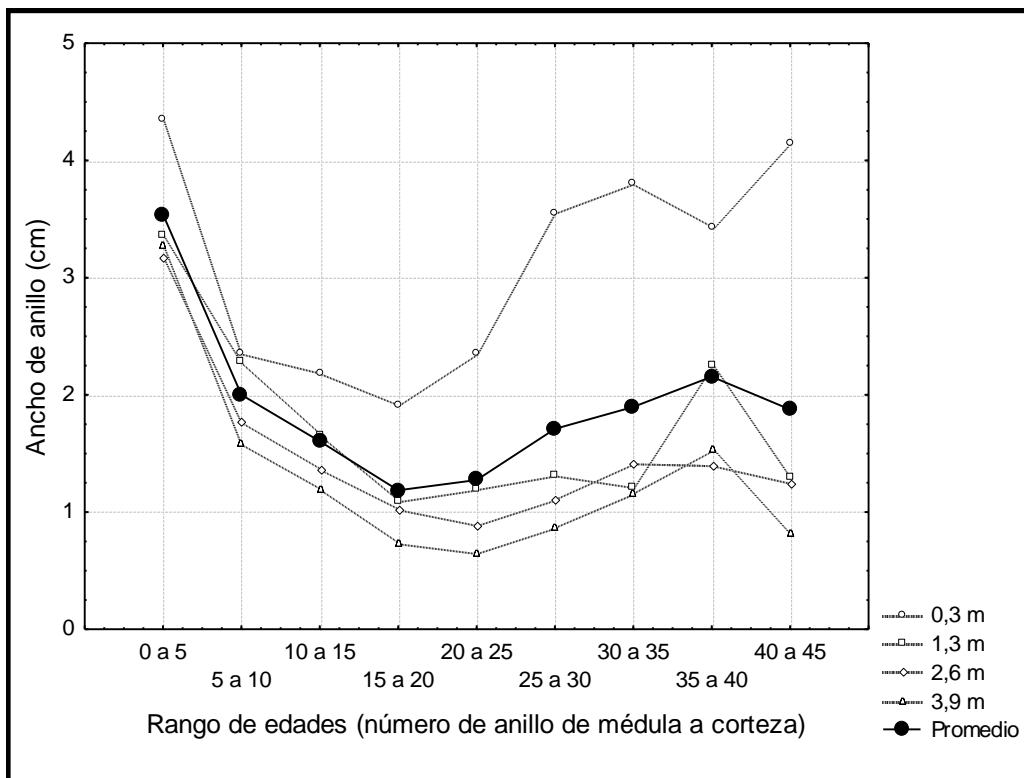


Figura 4.14: Variación axial y radial del ancho de anillo en madera de sauce.

El ancho de anillo disminuye desde el rango de edad de 0 a 5 años (3,7 cm) hasta el rango de edad de 15 a 20 años (1,08 cm) y luego aumenta hasta el rango de edad de 40 a 45 años (4,57 cm). Sin embargo, de acuerdo al análisis de grupos homogéneos entre los rangos de edad de 15 a 20 años y 40 a 45 años, no hay diferencias significativas.

El ancho de anillo disminuye con la altura (3,54 cm, altura 0,3m; 1,75 cm, altura 3,9 m). Los rangos de edad de 15 a 20 años y 40 a 45 años se pueden considerar un grupo homogéneo que se diferencian significativamente con el rango de edad de 0 a 5 años.

Las Tablas 4.17 y 4.18 presentan los valores promedio de las variables de densidad básica de la madera, anatomía y composición química discriminadas por año o rango de edad. El patrón general es de un aumento de los valores con la edad para la mayoría de las variables.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.17: Resumen de los valores promedio de las variables de la madera de sauce.

Edad (años)	Densidad (g/cm ³)	Fibras				Vasos	
		Long de fibra (μm)	Ancho (μm)	Espesor (μm)	Lumen (μm)	Diámetro de vasos (μm)	Frecuencia de vasos (n ^o mm ⁻¹)
0 - 5 años	0,41	1593,61	18,21	4,31	12,37	61,85	58
5 - 10 años	0,43	1630,28	18,83	4,29	12,58	64,62	59
10 - 15 años	0,43	1660,90	17,23	4,19	13,69	69,39	58
15 - 20 años	0,41	1629,90					
20 - 25 años	0,40	1619,10	19,26	4,41	13,99	63,08	56
25 - 30 años	0,42	1608,40					
30 - 35 años	0,43	1629,78	19,85	4,49	13,33	65,95	51
35 - 40 años	0,40	1604,51					
40 - 45 años	0,43	1631,60					

Tabla 4.18: Resumen de los valores promedio de la composición química en madera de sauce.

Edad (años)	Alcohol/benceno (%)	Agua Caliente (%)	Lignina total (%)	Celulosa (%) (Glucanos)	Hemicelulosas (%)		
					Xilanos (%)	Arabinanos (%)	Acetilos (%)
0 - 10	2,98	2,06	25,41	46,89	14,05	0,21	1,68
10 - 20	3,67	2,35	25,53	44,03	15,11	0,23	2,25
20 - 30	3,31	2,34	25,28	43,43	16,41	0,27	2,99

Densidad básica

En la tabla 4.19 y figura 4.15 se presenta la variación de los valores promedio de densidad básica de sauce para las diferentes alturas y posiciones radiales estudiadas.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.19: Valores de densidad promedio por altura en madera de sauce.

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	0,40 a*	0,43 ab	0,41 abc	0,41 a
5 - 10 años	0,40 a	0,45 b	0,44 bc	0,43 ab
10 - 15 años	0,42 ab	0,44 ab	0,44 c	0,43 a
15 - 20 años	0,41 a	0,40 a	0,46 abc	0,41 a
20 - 25 años	0,42 ab	0,422 ab	0,41 abc	0,41 a
25 - 30 años	0,43 ab	0,42 ab	0,42 abc	0,42 a
30 - 35 años	0,44 ab	0,44 b	0,42 abc	0,41 a
35 - 40 años	0,39 ab	0,41 ab	0,39 a	0,43 ab
40 - 45 años	0,44 ab	0,43 ab	0,41 ab	0,45 b
Promedio	0,42 A	0,43 A	0,42 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

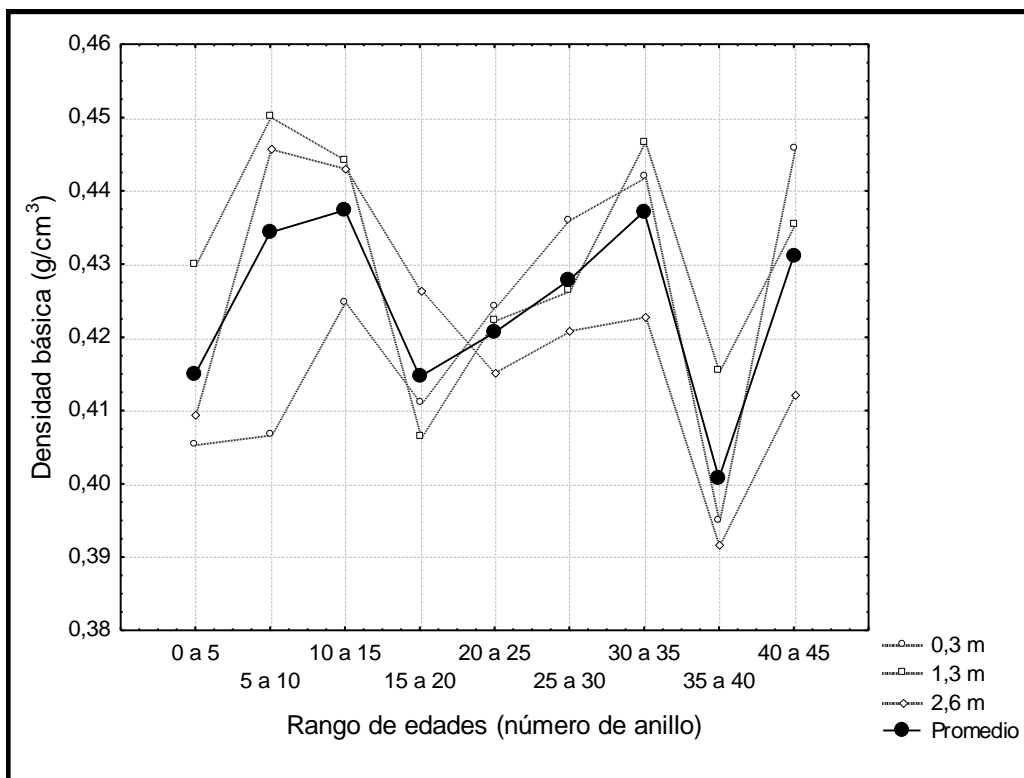


Figura 4.15: Variación axial y radial de los valores de densidad básica en madera de sauce.

4. Resultados y Discusión

Los valores de densidad básica se mantienen constantes, sin diferencias significativas entre sí, entre los rangos de edad 0 a 5 años y 30 a 35 años y luego aumentan en el rango de edad de 40 a 45 años.

La densidad básica presenta un aumento de sus valores promedio entre las alturas de 0,3 m ($0,42\text{g/cm}^3$) y 1,3 m ($0,43\text{g/cm}^3$) y luego disminuye en la altura de 2,6 m ($0,42\text{g/cm}^3$), sin embargo el análisis de grupos homogéneos (tabla 19) no presentó diferencias significativas entre estos valores. Resultados similares fueron presentados por Monteoliva et al (2002), en sauce americano de 13 años de edad. Por el contrario, Novaresi et al (1997); Villegas y Marlats (2005), para el mismo clon de sauce, observaron un patrón de variación axial que consistía en el aumento de la densidad entre las primeras alturas y luego una disminución.

4. I.B.2. Morfometría de fibras

Longitud de fibra

La longitud de fibra presenta un aumento de sus valores de medula a corteza (Tabla 4.20 y Fig. 4.16).

Posición radial (edad)	Alturas de muestreo				
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	3,9 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	1560,00 a*	1605,94 c	1319,12 a	1799,40 a	1544,38 a
5 - 10 años	1763,97cde	1628,54 cd	1322,98 c	1805,65 ab	1617,25bcd
10 - 15 años	1828,46 de	1668,81 d	1342,78 bc	1803,53 ab	1623,74 cd
15 - 20 años	1851,64 e	1557,98 abc	1300,65 c	1809,31 b	1634,91 d
20 - 25 años	1850,11 cd	1520,57 abc	1264,63 ab	1841,38 bc	1594,97 bc
25 - 30 años	1851,45cde	1451,71 ab	1264,64 a	1865,82 c	1586,49 b
30 - 35 años	1896,12 bc	1506,68 abc	1237,87 bc	1878,47 bc	1601,07 bc
35 - 40 años	1817,42 ab	1446,24 a	1314,89 c	1839,49 bc	1591,33 b
40 - 45 años	1853,02 bc	1497,35 ab	1349,10 c	1826,96 bc	1610,12bcd
Promedio	1622,71 B	1532,85 A	1629,75 B	1616,14 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

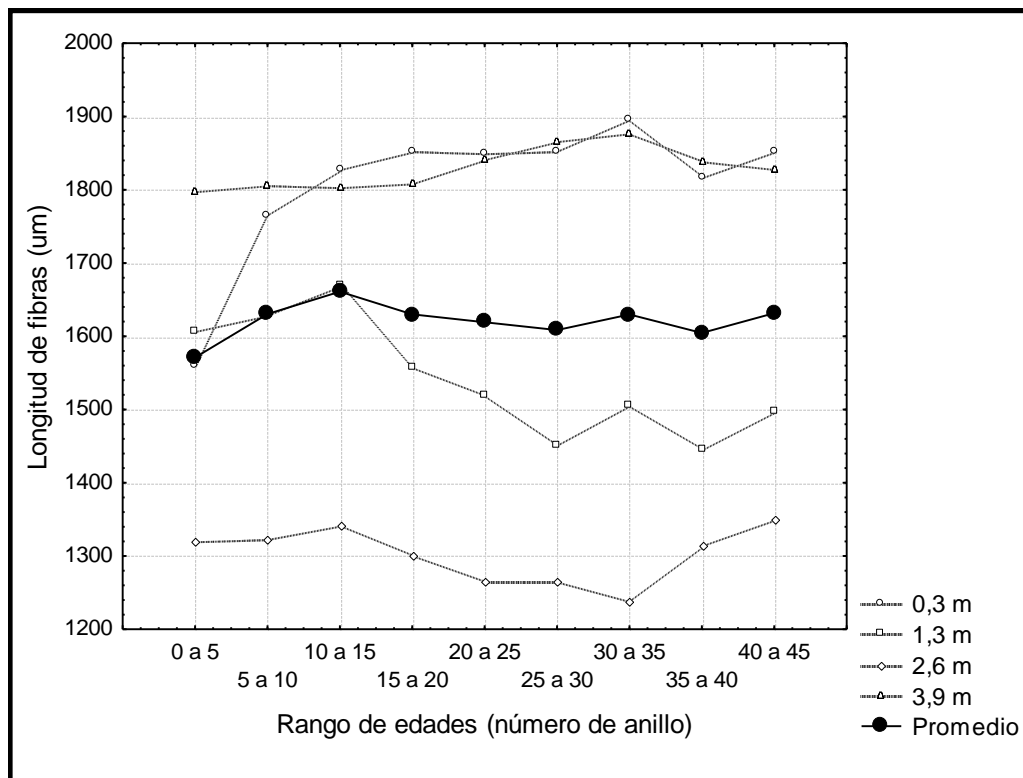


Figura 4.16: Variación radial y axial de la longitud de fibras en madera de sauce.

La longitud de fibra aumenta en los tres primeros rangos de edad (0 a 15 años; 1544,38 µm y 15 a 20 años, 1634,91 µm y luego se mantiene constante (Fig.4.16). Resultados similares fueron presentados por Deka et al (1992) para sauces híbridos de 14 años en Canadá y por Bonavía y Ragonese (1980) y Monteoliva et al (2005) para sauce americano (de 15 años de edad, cultivados en Castelar, Provincia de Buenos Aires y de 13 años de edad, implantados en la Provincia de Entre Ríos respectivamente).

La longitud de fibra disminuye entre la altura de 0,3 m y 1,3 m (1622,71 µm; 1532,85 µm) y luego aumenta en las alturas de 2,6 m y 3,9 m.

Para sauce americano de 11 años de edad, Monteoliva et al (2005) no encontraron diferencias significativas en las tres alturas de muestreo estudiadas. Sin embargo, esta misma autora (en un estudio previo), observó para diferentes clones de sauce de 11 años de edad que la tendencia de variación axial difería entre las alturas muestreadas al considerar las posiciones radiales seleccionadas. La longitud de fibras presentó aumento o disminuciones de sus valores, según se

4. Resultados y Discusión

tuviera en cuenta la posición intermedia, interna o exterior. Por el contrario, Novaresi et al (1997) analizando el sauce americano observó que la longitud de fibra aumentaba entre las primeras alturas de muestreo (0,6 m y 2,9 m) y luego disminuía en la altura de 5,2 m.

Lúmen de fibra

De acuerdo a la figura 4.17 y la tabla 4.21, el lumen de fibra presenta un patrón de variación radial de aumento de médula a corteza. Sus valores promedios se pueden separar en dos grupos homogéneos, 0 a 10 años y de 20 a 35 años.

Tabla 4.21: Valores de lumen de fibra promedio por alturas en madera de sauce.				
Posición radial	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	12,83 a*	12,51 a	11,75 a	12,36 a
5 -10 años	12,98 a	13,23 a	11,53 a	12,57 a
10 -15 años	13,57 a	15,55 c	11,96 a	13,69 bc
20 -25 años	14,90 b	14,24 b	12,83 b	13,99 c
30 -35 años	14,68 b	12,36 a	12,94 b	13,32 b
Promedio	13,79 B	13,57 B	12,20 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

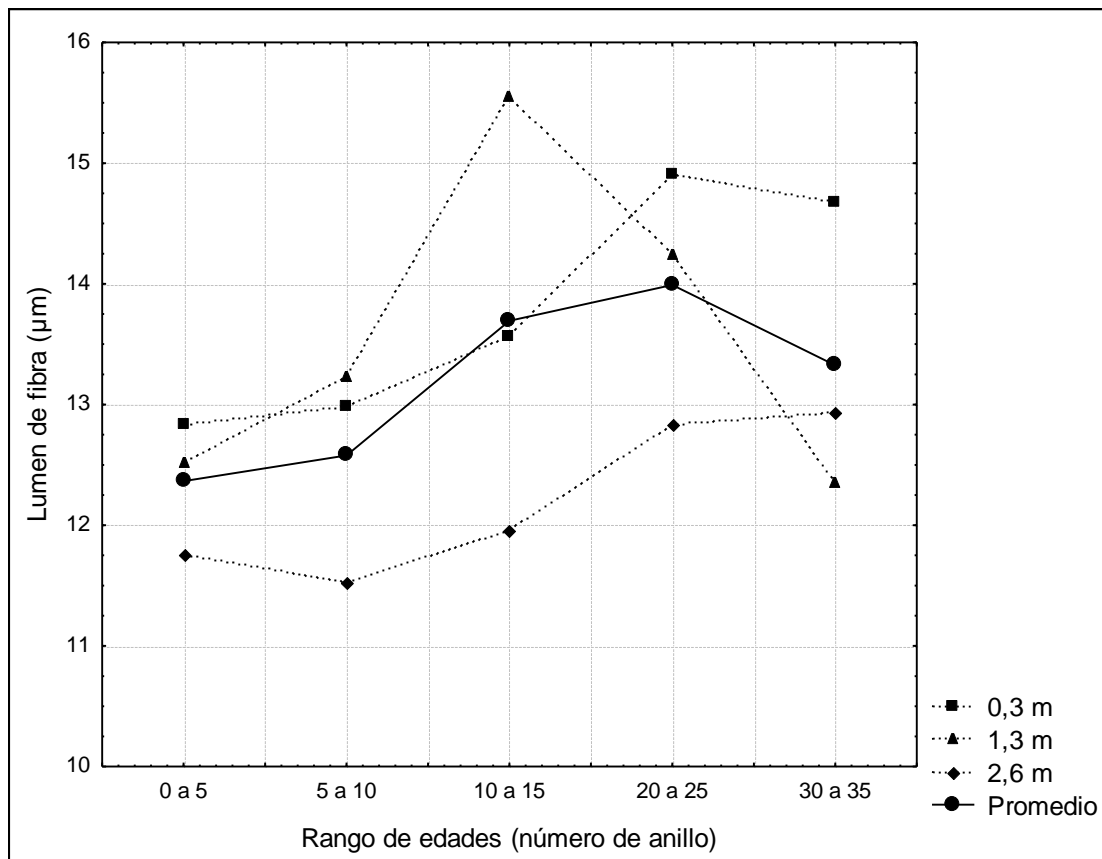


Figura 4.17: Variación del lumen de fibra por altura y su valor promedio en madera de sauce.

El patrón de variación encontrado se repite en las alturas de 0,3 m y 2,6 m, mientras que la altura de 1,3 m presenta tres grupos homogéneos; de 0 a 10 años y de 30 a 35 años con un valor máximo de 13,23 μm como primer grupo, de 20 a 25 años con un valor de 14,24 μm como segundo grupo y de 10 a 15 años con un valor de 15,55 μm como el tercer grupo.

El lumen de fibras disminuye con la altura, siendo significativa esta disminución entre las alturas 1,3 m (13,57 μm) y 2,6 m (12,20 μm).

Espesor de pared

Los valores promedios de espesor de pared disminuyen de médula a corteza hasta el rango de 10 a 15 años y luego aumentan en los rangos de 20 a 35 años (Tabla 4.22 y Fig.4.18).

4. Resultados y Discusión

Posición radial	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	4,35 b*	4,33 b	4,25 a	4,30 ab
5 -10 años	3,55 a	4,67 c	4,65 b	4,29 ab
10 -15 años	4,28 b	4,16 ab	4,15 a	4,19 a
20 -25 años	4,27 b	4,07 a	4,86 b	4,40 bc
30 -35 años	4,28 b	4,89 c	4,30 a	4,49 c
Promedio	4,14 A	4,42 B	4,44 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

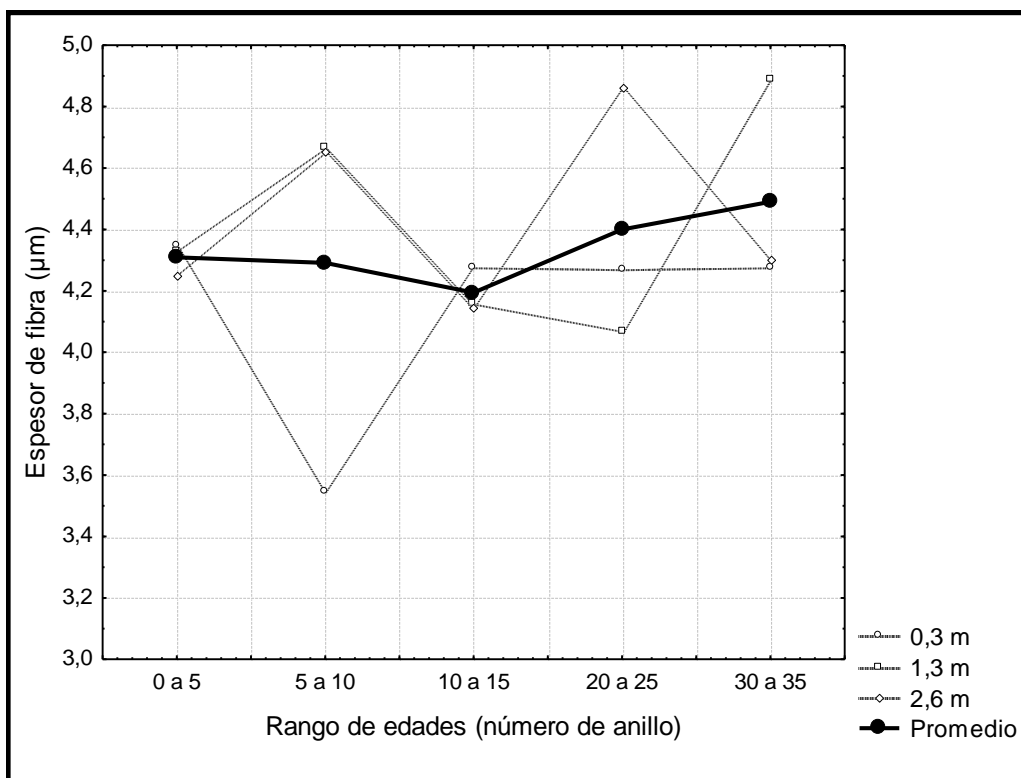


Figura 4.18: Variación del espesor de fibra por altura y su valor promedio en madera de sauce.

La tendencia de variación radial observada no se repite en las diferentes alturas de muestreo. A 0,3 m de altura se observa una disminución entre los rangos de 0 a 5 y 5 a 10 años (4,35 µm a 3,55 µm), luego aumenta y se mantiene constante en los años 10 a 35. Mientras que a 1,3 m de altura hay un aumento del espesor

4. Resultados y Discusión

de pared entre los 0 a 10 años (4,33 μm a 4,67 μm), luego disminuye en los años de 10 a 25 (4,16 μm y 4,07 μm) y aumenta en los años de 30 a 35 (4,87 μm). La altura de 2,6 m presenta una variación de aumento y disminución de los valores de espesor de pared entre cada uno de los rangos analizados.

El espesor de pared aumenta con la altura, con principal diferencia entre las alturas de 0,3 m (4,14 μm) y 1,3 m (4,42 μm).

Ancho de fibra

La tabla 4.23 y la figura 4.19 presentan los valores de ancho de fibra para las diferentes alturas y posiciones radiales analizadas.

Tabla 4.23: Valores de ancho de fibra promedio por alturas en madera de sauce.				
Posición radial	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	20,14 b*	18,79 b	15,70 a	18,21 b
5 -10 años	17,33 a	20,97 c	18,18 b	18,82 bc
10 -15 años	17,83 a	18,46 a	15,40 a	14,90 a
20 -25 años	19,70 b	18,78 b	19,29 c	19,25 bc
30 -35 años	21,96 c	19,32 b	18,26 bc	19,84 c
Promedio	19,39 B	17,87 A	17,36 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

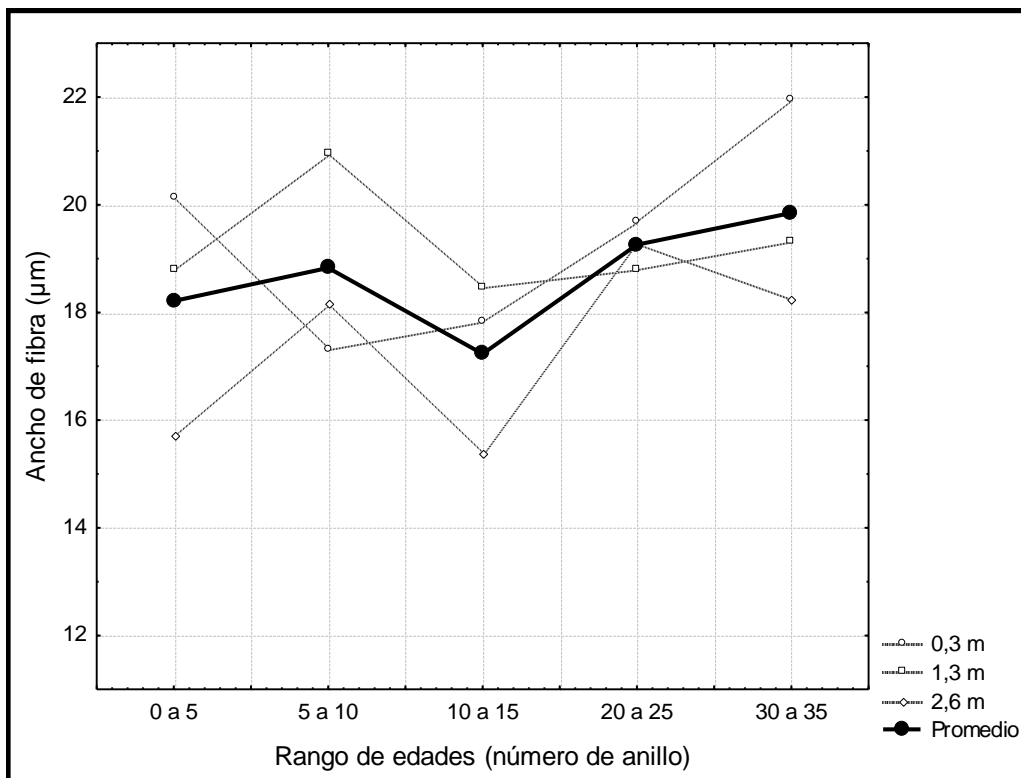


Figura 4.19: Variación del ancho de fibra por altura y su valor promedio en madera de sauce.

El ancho de fibra aumenta entre las primeras posiciones (0 a 10 años) aunque sin diferencias significativas. Luego disminuye a 14,90 µm en el rango de edad de 10 a 15 años (17,23 µm) y aumenta en las edades de 20 a 35 años (19,85 µm).

Cuando se tiene en cuenta la variación axial, el ancho de fibra disminuye con la altura, principalmente entre los 0,3m (19,39 µm) y 1,3 m (17,87). La disminución de los valores entre la altura de 1,3 m y 2,6 m no presentó diferencias significativas.

Diámetro de vasos

De acuerdo a la figura 4.20 y a la tabla 4.24 el número de vasos aumenta de medula a corteza hasta la edad de 10 a 15 años (69,39 µm), luego disminuye en el rango de 20 a 25 años (63,08 µm), y finalmente aumenta en el rango de 30 a 35 años (65,95 µm).

4. Resultados y Discusión

Posición radial	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	63,57 ab*	58,68 a	63,30 a	61,85 a
5 -10 años	62,90 a	64,45 b	66,49ab	64,61 bc
10 -15 años	75,01 c	64,71b	68,46 b	69,39 d
20 -25 años	67,07 b	55,76 a	66,40ab	63,07 ab
30 -35 años	66,13 ab	63,28 b	68,44 b	65,94 c
Promedio	66,93 B	61,37 A	66,61 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

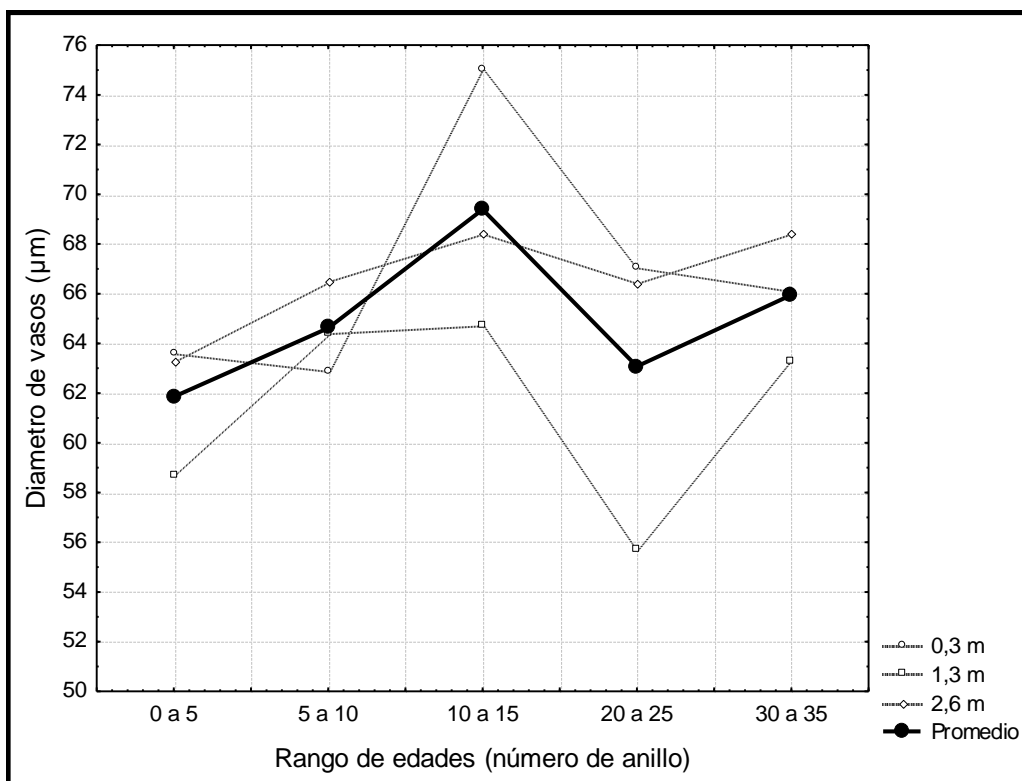


Figura 4.20: Variación del diámetro de vasos por altura y su valor promedio en madera de sauce.

El diámetro de vasos a los 1,3 m presenta el menor valor (61,37 μm), mostrando diferencias significativas con las alturas de 0,3 m y 2,6 m.

4. Resultados y Discusión

Frecuencia de vasos

La frecuencia de vasos presenta una disminución de sus valores de médula a corteza (tabla 4.25 y figura 4.21).

Posición radial	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 5 años	55,00 a*	66,31 b	53,12ab	57,98 b
5 -10 años	58,46 a	55,74 a	65,00 d	59,45 b
10 -15 años	58,11 a	57,89 a	58,46bc	57,63 b
20 -25 años	55,67 a	64,56 b	49,00 a	56,08 ab
30 -35 años	43,45 a	51,12 a	60,01cd	51,22 a
Promedio	53,92 A	58,38 B	57,12AB	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

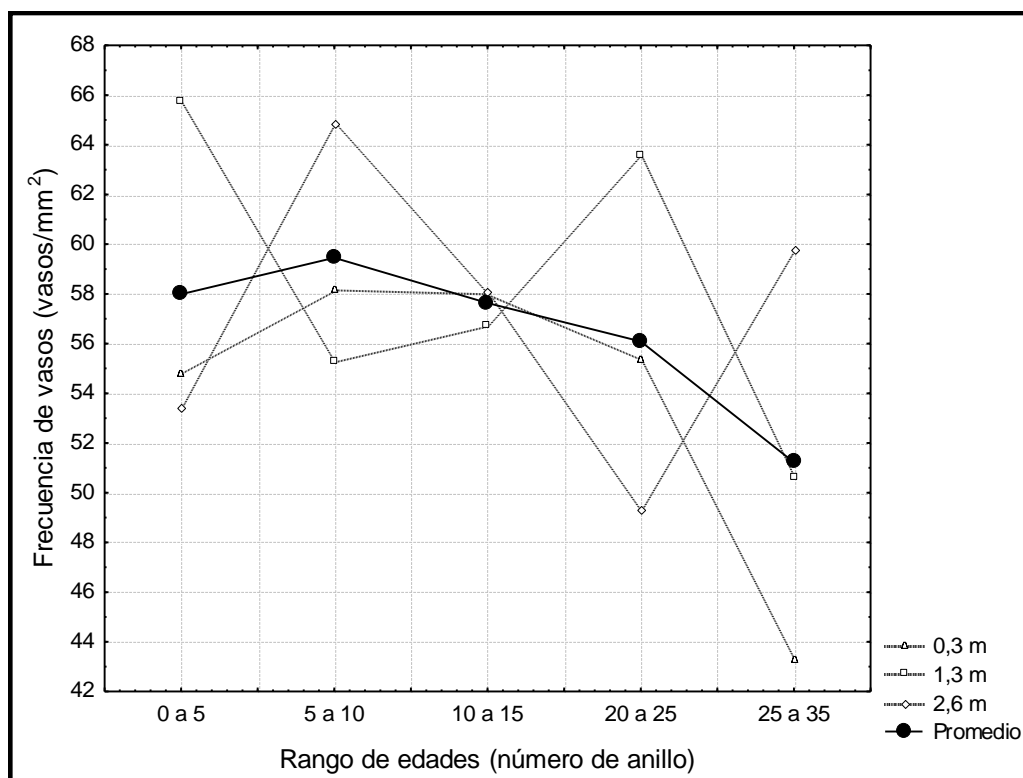


Figura 4.21: Variación axial y radial del número de vasos en madera de sauce.

4. Resultados y Discusión

La tendencia general que se puede observar en la figura 4.21 indica que la frecuencia de vasos disminuye de médula a corteza ($58 \text{ n}^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ en el rango de 0 a 5 años y $51 \text{ n}^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ en el rango de 25 a 35 años). Sin embargo los valores obtenidos entre los 0 a 25 años, no presentan diferencias significativas entre si.

La frecuencia de vasos aumenta significativamente entre las alturas de 0,3 m y 1,3 m ($53,92 \text{ n}^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ y $58,38 \text{ n}^{\circ} \text{ mm}^{-1}$).

4. I.B.3. Composición Química

Los valores obtenidos de los componentes químicos en sauce para las diferentes alturas y posiciones radiales analizadas se presentan en las tablas 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30.

Alcohol/Benceno

El contenido de solubles en alcohol/benceno, aumenta entre los rangos de 0 a 10 años y 10 a 20 años (2,99%; 3,67%) y disminuye en el rango de 20 a 30 años (3,32 %). Sin embargo las diferencias significativas se producen entre los rango de edad de 0 a 10 años y 20 a 30 años. Este comportamiento se repite para la altura de 0,3 m mientras que el resto de las alturas no presentaron diferencias significativas (tabla 4.26).

Tabla 4.26: Valores de solubles en alcohol/benceno en madera de sauce.				
Posición radial (años)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 10	2,80 a*	3,29 a	2,88 a	2,98 a
10 - 20	3,67 b	3,88 a	3,46 a	3,67 ab
20 - 30	3,78 b	3,39 a	2,78 a	3,31 b
Promedio	3,42 A	3,52 A	3,04 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

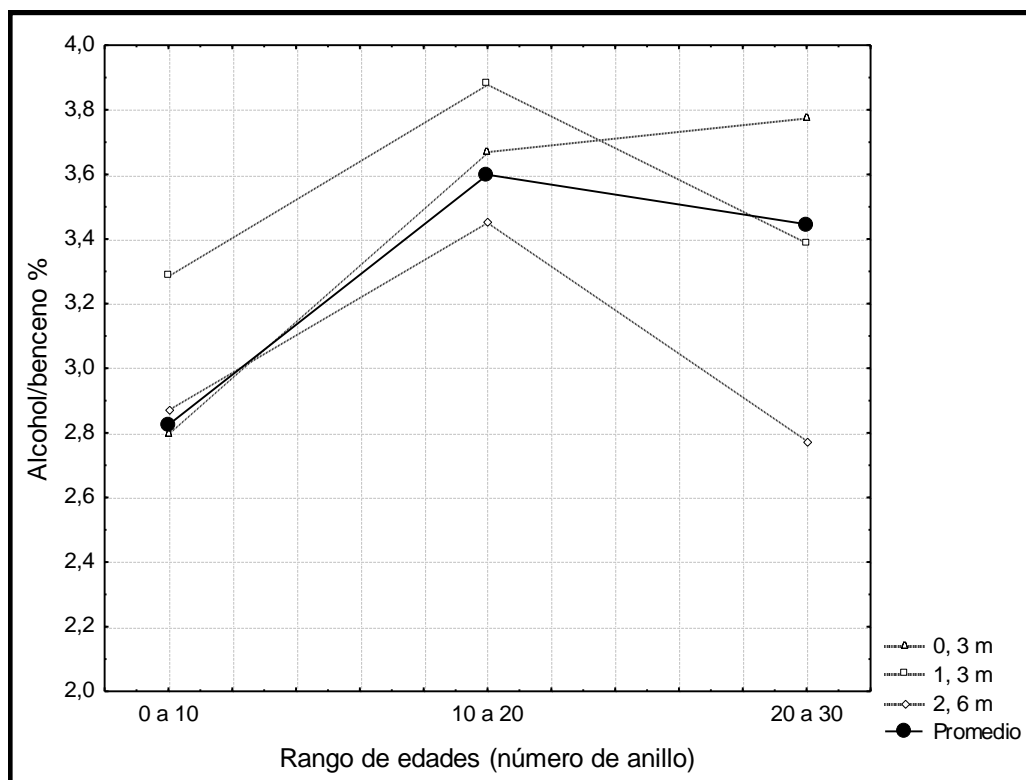


Figura 4.22: Variación axial y radial del contenido de solubles en alcohol/benceno en madera de sauce.

El contenido de solubles en alcohol/benceno no presentó diferencia significativa entre las alturas muestreadas.

Agua Caliente

En la tabla 4.27 y figura 4.23 se presentan la variación axial y radial de los solubles en agua caliente.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.27: Valores de solubles en agua caliente en madera de sauce.

Posición radial (años)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 10	1,68 a	1,73 a	2,79 b	2,07 a
10 - 20	2,19 a	2,34 b	2,52 b	2,35 a
20 - 30	3,20 b	2,16 ab	1,68 a	2,34 a
Promedio	2,36 A	2,08 A	2,33 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

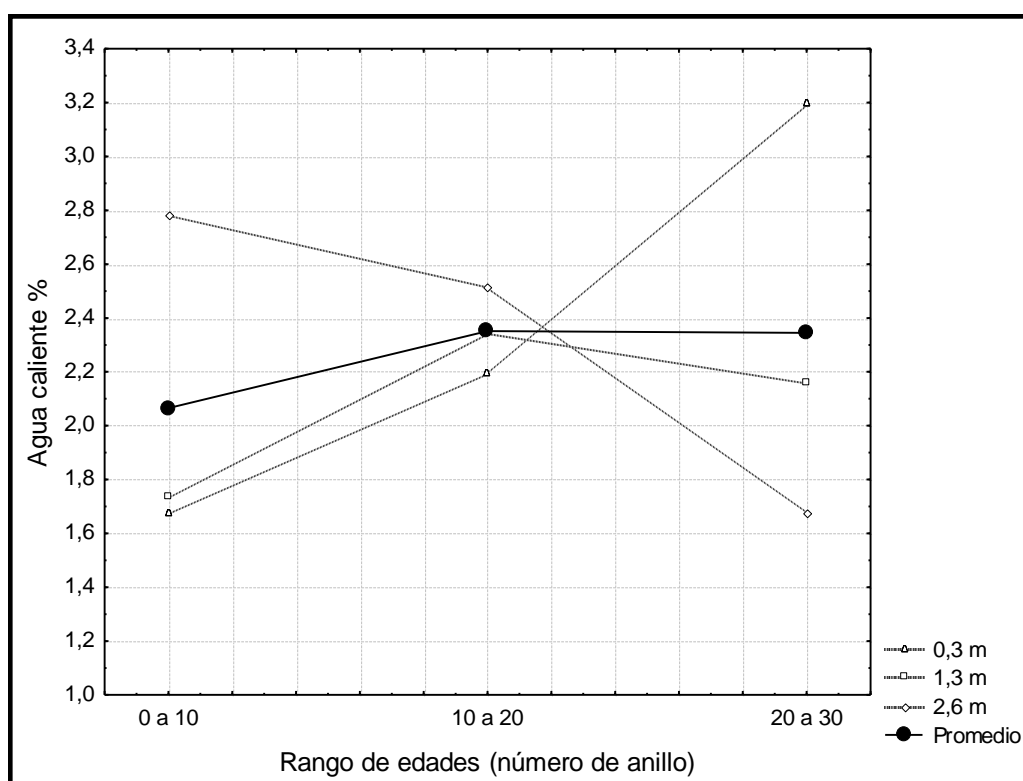


Figura 4.23: Variación radial y axial del contenido de solubles en agua caliente en madera de sauce.

El contenido de solubles en agua caliente presenta un aumento de sus valores (2,07% a 2,35%) en los primeros años (0 a 20 años) para luego mantenerse constante (2,35 %- 2,34%), aunque sin que las diferencias sean significativas.

La variación axial del contenido en solubles en agua caliente presentó una disminución de sus valores promedios entre las alturas de 0,3 m y 1,3 m y un aumento entre las alturas de 1,3 m y 2,6 m, aunque sin diferencias significativas entre las tres alturas.

4. Resultados y Discusión

Lignina

La tendencia general para los valores promedio del contenido de lignina total (figura 4.24) indica que no hay variación de sus valores en el sentido médula corteza.

Posición radial (años)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 10	26,48 a	24,51 a	25,24 a	25,41 a
10 - 20	27,05 b	24,70 a	24,87 a	25,54 a
20 - 30	26,09 a	25,08 a	24,69 a	25,29 a
Promedio	26,53 B	24,76 A	24,93 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

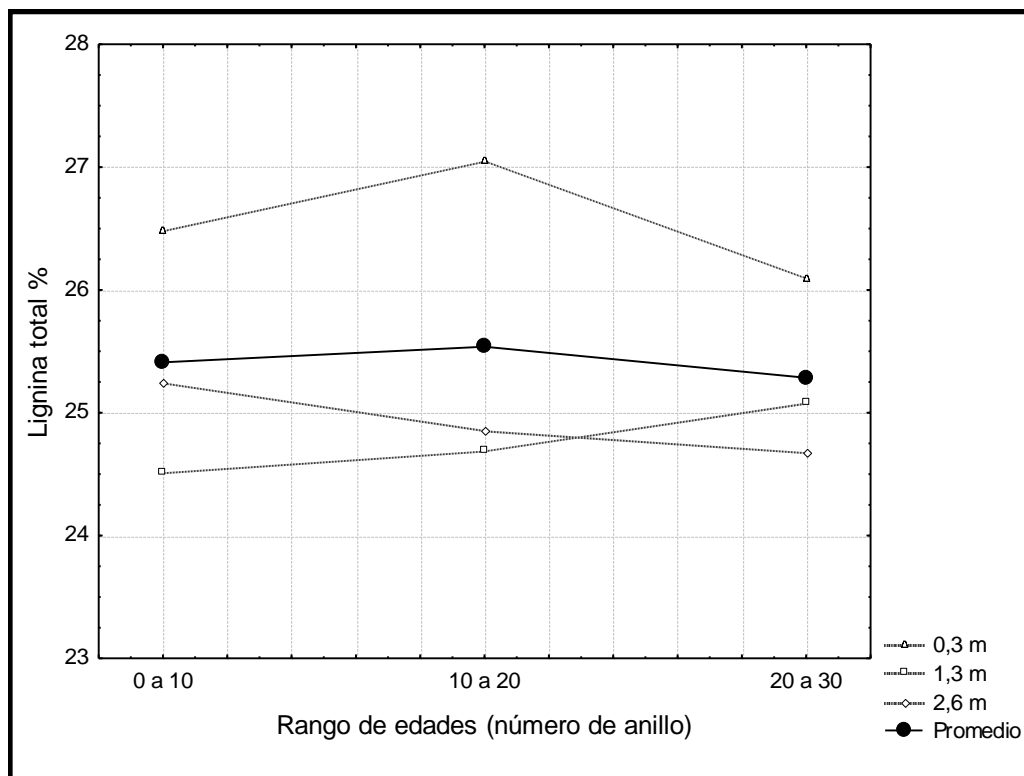


Figura 4.24: Variación axial y radial del contenido de lignina total (soluble e insoluble) en madera de sauce.

4. Resultados y Discusión

El patrón observado se repite en las alturas de 1,3 m y 2,6 m, mientras que para la altura de 0,3 m el análisis de grupos homogéneos (tabla 4.28) presenta la diferenciación de dos grupos, el primero conformado por los rango de edad de 0 a 10 años y 20 a 30 años y el segundo por el rango de edad de 10 a 20 años.

El contenido de lignina disminuye entre los 0,3 m y 1,3 m (26,54 % y 24,76%) y aumenta levemente a los 1,3 m y 2,6 m (24,76% y 24,93%). Sin embargo entre las alturas de 1,3 m y 2,6m no se encontraron diferencias significativas.

Celulosa

El contenido de celulosa presenta una disminución de sus valores en el sentido medula/corteza. (Tabla 4.29 y Figura 4.25).

Tabla 4.29: Valores del porcentaje de celulosa en madera de sauce.				
Posición radial (años)	Alturas de muestreo			Promedio 3 alturas
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	
0 - 10	44,00 b	48,98 c	47,69 b	46,89 b
10 - 20	40,23 a	46,86 b	45,01 a	44,03 a
20 - 30	40,89 a	44,76 a	44,66 a	43,43 a
Promedio	41,70 A	46,86 B	45,78 B	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

4. Resultados y Discusión

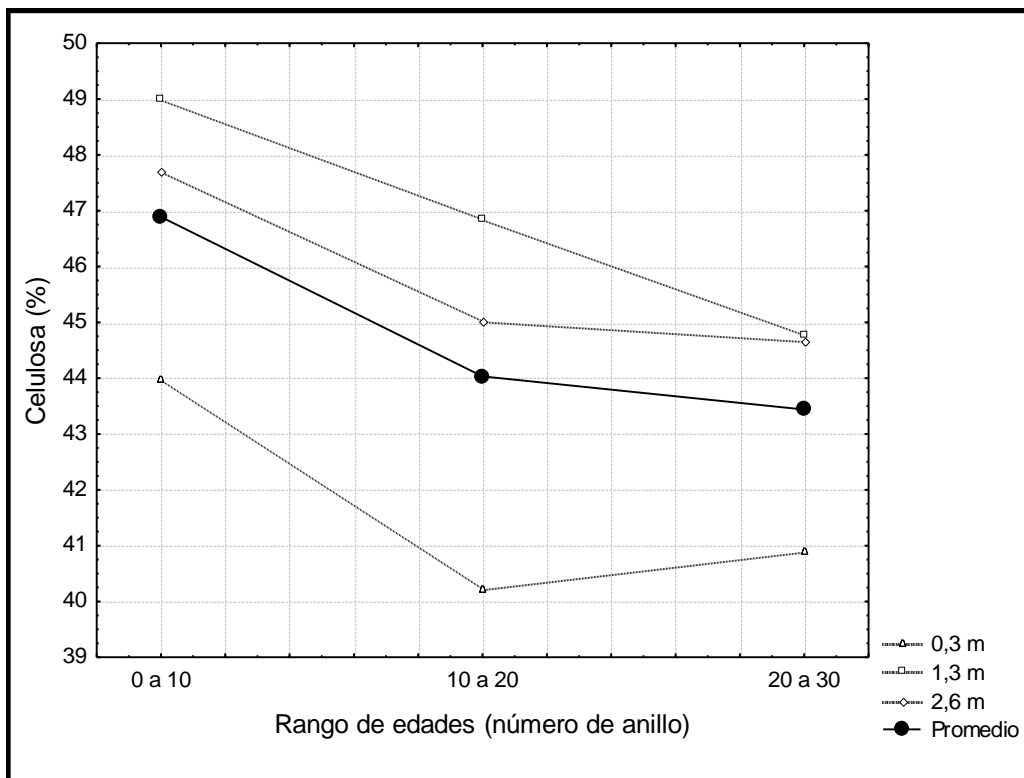


Figura 4.25: Variación axial y radial del contenido de celulosa en madera de sauce.

El contenido de celulosa disminuye de 0 a 10 años y 10 a 20 años y luego se mantiene constante (tabla 4.29). Esta tendencia se repite en todas las alturas muestreadas.

El contenido de celulosa aumenta entre las alturas de 0,3m y 1,3m (41,71%; 46,87%) y disminuye entre las alturas de 1,3 m y 2,6 m (46,87%; 45,79%). Sin embargo esta disminución no es significativa cuando se realiza el análisis de grupos homogéneos.

Hemicelulosas

La tendencia general del contenido de hemicelulosas indica un aumento de médula a corteza (14,05% a 16,41%) (Figura 4.26 y tabla 4.30).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.30: Valores del porcentaje de hemicelulosas en madera de sauce.

Posición radial (años)	Alturas de muestreo			
	0,3 m	1,3 m	2,6 m	Promedio 3 alturas
0 - 10	15,31 a*	13,16 a	13,68 a	14,05 a
10 - 20	16,55 b	14,00 b	14,80 b	15,11 b
20 - 30	16,80 b	16,08 c	16,36 c	16,41 c
Promedio	16,22 B	14,41 A	14,94 A	

*Las letras minúsculas se leen verticalmente, las mayúsculas horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $p < 0,05$).

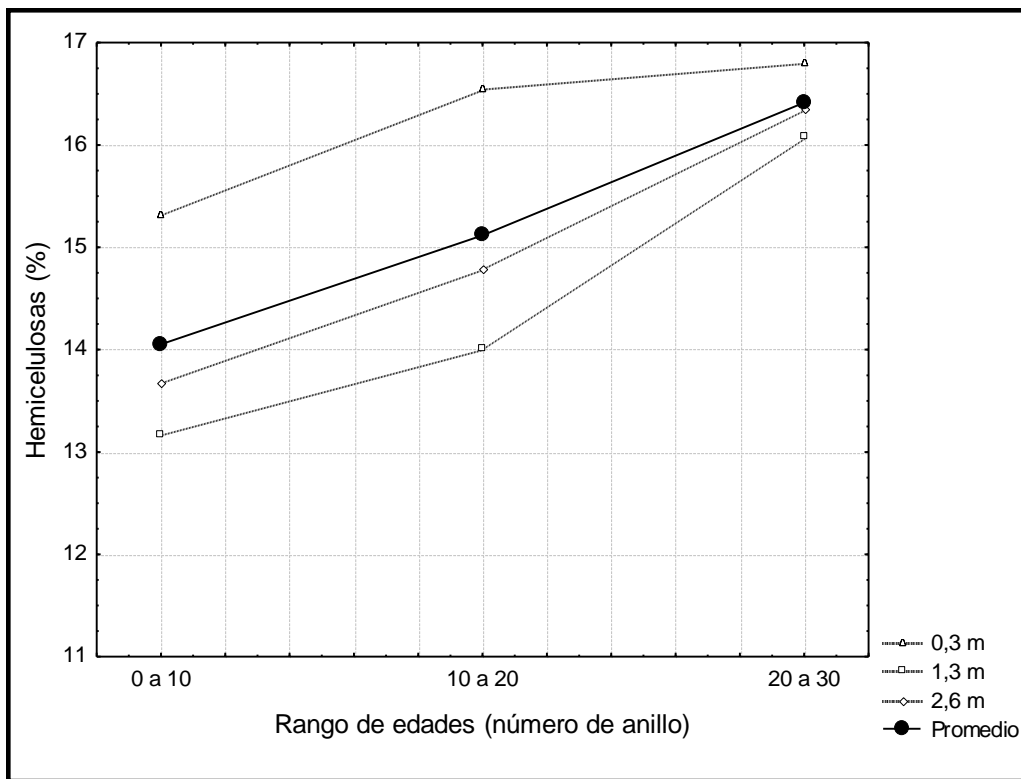


Figura 4.26: Variación axial y radial del contenido de hemicelulosas en madera de sauce.

La tendencia encontrada se repite a 1,3 m y 2,6 m, mientras que a 0,3 m el contenido de hemicelulosas aumenta de 0 a 10 años y de 10 a 20 años y luego se mantiene constante (tabla 4.30).

4. Resultados y Discusión

El contenido de hemicelulosas disminuye entre las alturas de 0,3 m y 1,3 m (16,22 % y 14,41%) y posteriormente aumenta levemente (sin diferencia significativa) entre las alturas de 1,3m y 2,6 m (14,41% y 14,95%).

4. II. Determinación de la edad de transición entre madera juvenil y madura

Para determinar la edad de transición entre madera juvenil y madera madura se aplicaron modelos de segmentación lineal para todas las variables anatómicas, químicas y físicas medidas. De esta forma se ajustaron ecuaciones de regresión sobre los valores anuales de cada propiedad y en cada altura de muestreo en el fuste por separado.

Se presentan los modelos obtenidos para álamos en las tablas 4.31 a 4.42 y para sauces en las tablas 4.43 a 4.54.

Regresiones:

Se obtuvieron las siguientes ecuaciones al aplicar el modelo de segmentación lineal para todas las variables medidas:

4. II.A. Ecuaciones en Álamos

Densidad

La densidad básica presentó el peor ajuste (R^2 : 0,84) a los 1,3 m (tabla 4.31).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.31: Densidad: edad de transición entre madera juvenil y madura, en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	9	*	$y=0,3315+0,0027x$	0,88
		**	$y= 0,3634+0,0018x$	
1,3 m	9	*	$y=0,3414+0,0005x$	0,84
		**	$y=0,3570+0,0019x$	
4,2 m	8	*	$y=0,3394+0,0030x$	0,92
		**	$y=0,3689+0,0022x$	
8,1 m	8	*	$y=0,3528+0,0039x$	0,90
		**	$y=0,3787+0,0028x$	
15,9 m	7	*	$y=0,3802+0,0040x$	0,88
		**	$y=0,4054+0,0030x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

La edad de transición entre madera juvenil y madura, dependiendo de la altura en el fuste analizada, se ubica entre los 7 y 9 años.

Longitud de fibra

La altura de 4,2 m fue la que presentó el menor R² (0,85) (tabla 4.32).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.32: Longitud de fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	9	*	$y = 1020,0120 + 17,6017x$	0,86
		**	$y = 1334,9430 + 13,8435x$	
1,3 m	7	*	$y = 1082,5770 + 17,7882x$	0,86
		**	$y = 1339,9750 + 16,6361x$	
4,2 m	7	*	$y = 1082,9720 + 20,3411x$	0,85
		**	$y = 1450,2610 + 7,7701x$	
8,1 m	7	*	$y = 1071,3580 + 19,6936x$	0,86
		**	$y = 1365,6510 + 14,7690x$	
15,9 m	6	*	$y = 1053,5980 + 24,2331x$	0,86
		**	$y = 1277,0470 + 21,7822x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Para la longitud de fibra, la edad de transición entre madera juvenil y madura varía en el rango de 6 a 9 años.

Lumen

Se obtuvieron ecuaciones significativas para el lumen de fibra en todas las alturas de muestreo, con valores de R² elevados (tabla 4.33).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.33: Lumen de fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	9	*	$y = 11,2343 - 0,0090x$	0,80
		**	$y = 16,3723 - 0,0139x$	
1,3 m	8	*	$y = 10,9098 + 0,0216x$	0,80
		**	$y = 16,8449 - 0,0229x$	
4,2 m	9	*	$y = 11,6667 - 0,0160x$	0,80
		**	$y = 16,6609 + 0,0288x$	
8,1 m	9	*	$y = 11,8089 - 0,0248x$	0,80
		**	$y = 16,3474 + 0,0505x$	
15,9 m	9	*	$y = 10,6848 - 0,0555x$	0,80
		**	$y = 14,7392 + 0,0253x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

La edad de transición entre madera juvenil y madura para las alturas de fuste estudiadas fue de 9 años, a excepción de la altura 1,3 m cuyo valor fue de 8 años.

Espesor

De acuerdo a la tabla 4.34 los valores más bajos de R² se presentaron en las alturas de 0,3 m y 4,2 m (0,79).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.34: Espesor de pared: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	9	*	$y = 2,7219 - 0,0051x$	0,79
		**	$y = 3,8475 - 0,0045x$	
1,3 m	10	*	$y = 2,3732 + 0,0272x$	0,80
		**	$y = 3,7378 + 0,0403x$	
4,2 m	10	*	$y = 2,7069 + 0,0036x$	0,79
		**	$y = 3,9990 + 0,01634x$	
8,1 m	10	*	$y = 2,5620 + 0,0216x$	0,80
		**	$y = 3,8839 + 0,0355x$	
15,9 m	8	*	$y = 2,6599 + 0,0147x$	0,80
		**	$y = 3,8975 + 0,0286x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Para el espesor de pared, la zona de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 8 y 10.

Ancho de fibra

La altura de 1,3 m fue la que presento el mejor R² (0,81) (tabla 4.35).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.35: Ancho de fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	9	*	$y = 17,7630 - 0,0294x$	0,80
		**	$y = 24,3875 - 0,0562x$	
1,3 m	9	*	$y = 17,2249 + 0,0121x$	0,81
		**	$y = 25,3968 - 0,0641x$	
4,2 m	7	*	$y = 17,4080 + 0,0635x$	0,80
		**	$y = 24,6982 + 0,0095x$	
8,1 m	10	*	$y = 17,5995 + 0,0370x$	0,80
		**	$y = 24,0947 + 0,0324x$	
15,9 m	9	*	$y = 16,7106 + 0,0096x$	0,80
		**	$y = 21,0952 + 0,1808x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

En el caso del ancho de fibra, la edad de transición entre madera juvenil y madura varía en el rango de 7 a 10 años.

Diámetro de vasos

El diámetro de vasos presentó ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R² elevados (tabla 4.36)

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.36: Diámetro de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	7	*	$y = 67,3323 - 0,2320x$	0,80
		**	$y = 84,7991 + 0,3475x$	
1,3 m	7	*	$y = 63,2865 + 0,1490x$	0,80
		**	$y = 88,4185 + 0,1075x$	
4,2 m	11	*	$y = 62,3884 + 0,1772x$	0,80
		**	$y = 88,0579 + 0,2043x$	
8,1 m	11	*	$y = 65,2843 + 0,1447x$	0,80
		**	$y = 89,8534 + 0,0818x$	
15,9 m	7	*	$y = 50,3551 + 1,0183x$	0,80
		**	$y = 74,4853 + 0,7490x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

La edad de transición entre madera juvenil y madura para las alturas de fuste estudiadas se ubica entre 7 y 11 años.

Frecuencia de vasos

De acuerdo a la tabla 4.37 el valor más bajo de R² se presentó en la altura 8,1 m.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.37: Frecuencia de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R².

Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	8	*	$y = 45,0242 - 0,8615 x$	0,87
		**	$y = 51,6821 + 0,2870 x$	
1,3 m	8	*	$y = 43,0191 + 0,4765 x$	0,83
		**	$y = 60,3734 - 0,0991 x$	
4,2 m	11	*	$y = 57,3333 - 1,4732 x$	0,90
		**	$y = 59,0405 + 0,0277 x$	
8,1 m	11	*	$y = 46,5261 + 0,4030 x$	0,78
		**	$y = 49,2550 + 1,5547 x$	
15,9 m	8	*	$y = 67,1297 - 0,2507 x$	0,89
		**	$y = 77,4738 - 0,3435 x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Para la frecuencia de vasos la zona de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 8 y 11 años.

4. Resultados y Discusión

Composición química

Solubles en Alcohol/Benceno

Se obtuvieron ecuaciones significativas para los solubles en alcohol/benceno en todas las alturas de muestreo, con valores de R^2 elevados (4.38).

Tabla 4.38: Solubles en alcohol/benceno: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .

Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R^2
0,3m	5 a 10	*	$y = -54,6625 + 0,5225x$	0,98
		**	$y = -9,2325 + 0,1075x$	
1,3 m	5 a 10	*	$y = -37,2371 + 0,3632 x$	0,95
		**	$y = 10,4960 - 0,0781 x$	
15,9 m	10 a 15	*	$y = 15,3175 - 0,1160x$	0,94
		**	$y = 4,6332 - 0,0052x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

La edad de transición entre madera juvenil y madura para las alturas de fuste estudiadas fue de 5 a 15 años.

4. Resultados y Discusión

Solubles en agua caliente.

La altura de 0,3 m presentó el mejor R^2 (0,99) (tabla 4.39).

Tabla 4.39: Solubles en agua caliente: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R^2
0,3m	10 a 15	*	$y = 39,7837+0,3900 x$	0,99
		**	$y= 27,3200-0,2100 x$	
1,3 m	5 a 10	*	$y= 63,3397-0,5795x$	0,92
		**	$y= -8,5805+0,1011x$	
15,9 m	5 a 10	*	$y= 0,1406+0,0160x$	0,94
		**	$y= 0,1402+0,0212x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Para el contenido de solubles en agua caliente la edad de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 5 y 15 años.

4. Resultados y Discusión

Lignina Total

De acuerdo a la tabla 4.40 el valor más bajo de R^2 , se presentó en la altura de 1,3 m (0,81).

Tabla 4.40: Lignina: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R^2
0,3m	5 a 10	*	$y = 24,1022+0,0129x$	0,87
		**	$y= 18,7464+0,0692x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y= 46,0045-0,1972x$	0,81
		**	$y= 29,5983-0,0284x$	
15,9 m	5 a 10	*	$y= 108,8616-0,7864x$	0,98
		**	$y= 113,7937-0,8191x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

La edad de transición entre madera juvenil y madura para el contenido de lignina se encuentra entre los 5 a 15 años.

Celulosa

Tomando el contenido de celulosa como propiedad a analizar la edad de transición entre madera juvenil y madura se encontró entre los 5 a 15 años.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.41: Celulosa: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	5 a 10	*	$y = -4,5528+0,4752x$	0,84
		**	$y = 31,7107+0,1587x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y = 43,6170+0,04167x$	0,77
		**	$y = 23,2621+0,2461x$	
15,9 m	10 a 15	*	$y = 5,4727+0,3939x$	0,86
		**	$y = 5,5239+0,4050x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

El R² más bajo (0,77) se obtuvo en la altura de 1,3 m, como puede observarse en la tabla 4.41.

Hemicelulosas

Como puede apreciarse en la tabla 4.42, se obtuvieron ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R² elevados.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.42: Edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de álamo. según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3m	0 a 5	*	$y = -46,5319+0,5857x$	0,94
		**	$y = 118,3690-0,9413x$	
1,3 m	5 a 10	*	$y = -5,6047+0,1953x$	0,93
		**	$y = 68,9347-0,4844x$	
15,9 m	5 a 10	*	$y = 1,1314+0,1300x$	0,91
		**	$y = 1,1218+0,1427x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Considerando el contenido de hemicelulosas, la edad de transición entre madera juvenil y madura fue de 0 a 10 años.

Para los álamos de 17 años de edad estudiados, la zona estimada de transición entre madera juvenil y madura no fue idéntica para todas las propiedades, definiéndose edades de 4, 5, 7 y 9 años dependiendo de la variable (vasos, fibras o densidad). La secuencia de maduración de los parámetros fue: diámetro de vasos, área de pared, frecuencia de vasos, ancho de fibras, longitud de fibras, densidad y espesor de pared de las fibras. Estos resultados indican que el control fisiológico del proceso de maduración de las variables anatómicas está determinado por el desarrollo del tronco y de la copa durante el crecimiento del árbol.

La edad de 9 años mostró la mayor frecuencia en la mayoría de las variables y alturas analizadas. Si tenemos en cuenta la edad de 9 años como la edad de transición entre madera juvenil y madura, el volumen por árbol que representarían cada una de estas partes sería:

4. Resultados y Discusión

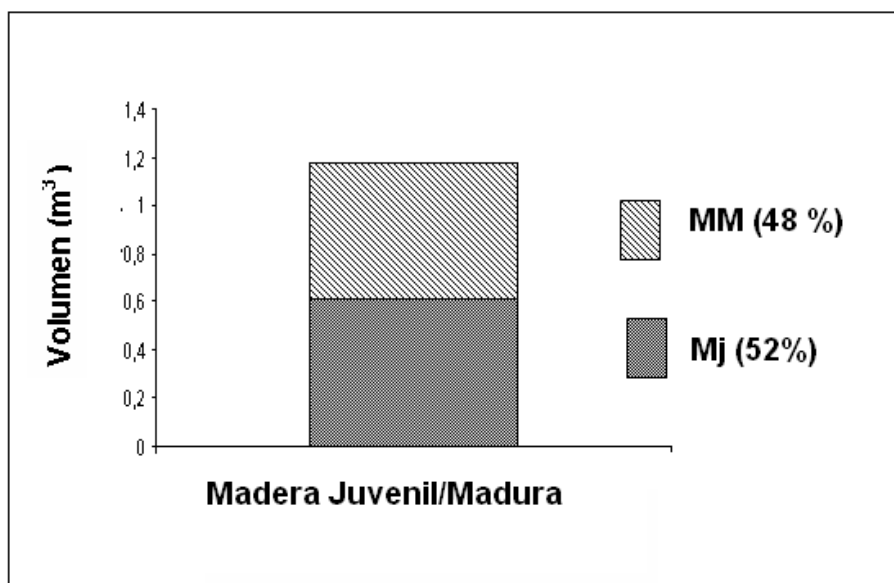


Figura 4.27: Volumen por árbol de madera juvenil y madura en álamo.

Para los árboles de 17 años muestreados, el cilindro central juvenil representó el 52% del volumen total cosechado.

Para turnos de rotación cortos (10 años), como son los usados en la industria papelera en Argentina, la proporción de madera juvenil podría considerarse del 87% del volumen comercial del árbol según las tendencias que marcan este estudio.

4. Resultados y Discusión

4. II.B. Ecuaciones en Sauces

Densidad

Como puede apreciarse en la tabla 4.43, se obtuvieron ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R^2 elevados.

La edad de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 10 a 15 años tomando en cuenta la densidad como propiedad.

Tabla 4.43. Densidad: Edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R^2
0,3 m	10 a 15	*	$y = 0,3990 + 0,0026x$	0,91
		**	$y = 0,3976 + 0,0068x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y = 0,3968 + 0,0032x$	0,85
		**	$y = 0,4403 - 0,0004x$	
2,6 m	15 a 20	*	$y = 0,4106 - 0,0004x$	0,85
		**	$y = 0,4423 - 0,0029x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Longitud de fibra

La altura de 0,3 m fue la que presento el mejor R^2 (0,82) (tabla 4.44).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.44: Longitud de fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	10 a 15	*	$y = 1480,1660 + 0,9088x$	0,82
		**	$y = 1771,2550 + 0,1484x$	
1,3 m	5 a 10	*	$y = 1415,8330 + 6,2248x$	0,80
		**	$y = 1624,8020 - 0,5367x$	
2,6 m	10 a 15	*	$y = 1416,3780 - 3,2490x$	0,79
		**	$y = 1633,9650 + 3,9532x$	
4,2 m	10 a 15	*	$y = 1455,5440 + 3,30 x$	0,80
		**	$y = 1739,5300 + 3,7996 x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

Lumen de fibra

De acuerdo a la tabla 4.45 el valor más bajo de R² se presentó a los 1,3 m.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.45. Lumen fibra: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	15 a 20	*	$y = 10,8346 + 0,1326x$	0,82
		**	$y = 15,8193 + 0,1777x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y = 11,1261 - 0,0424x$	0,79
		**	$y = 16,7749 - 0,0315x$	
2,6 m	15 a 20	*	$y = 9,5185 + 0,0207x$	0,80
		**	$y = 14,1753 + 0,2068x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

La zona de transición entre madera juvenil y madura para el lumen de fibra se encuentra entre los 15 a 20 años.

Espesor

La altura de 2,6 m presentó el valor más bajo de R² (tabla 4.46).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.46. Espesor de pared: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	10 a 15	*	$y = 3,3852 + 0,0163x$	0,79
		**	$y = 4,9164 + 0,0062x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y = 3,7138 - 0,0175x$	0,80
		**	$y = 4,9504 + 0,0801x$	
2,6 m	10 a 15	*	$y = 3,6050 - 0,0022x$	0,78
		**	$y = 5,3025 + 0,0158x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

Para el espesor de pared, la edad de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 10 a 15 años.

Ancho

Teniendo en cuenta el ancho de fibras como propiedad a analizar, la edad de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 10 a 15 años.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.47. Ancho de fibras: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	5 a 10	*	$y = 15,6862 + 0,1305x$	0,82
		**	$y = 22,1220 + 0,2611x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y = 11,6019 + 0,2626x$	0,75
		**	$y = 22,1791 - 0,0041x$	
2,6 m	10 a 15	*	$y = 13,5270 + 0,1555x$	0,81
		**	$y = 20,4812 + 0,1625x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

El valor de R² más bajo se presentó en la altura de 1,3 m (Tabla 4.47).

Diámetro de vasos

El valor de R² más alto (0,80) se presentó a los 1,3 m (tabla 4.48)

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.48. Diámetro de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R^2 .

Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R^2
0,3 m	10 a 15	*	$y = 54,5280 + 0,2526x$	0,79
		**	$y = 81,2871 - 0,3747x$	
1,3 m	5 a 10	*	$y = 49,5019 + 0,0059x$	0,80
		**	$y = 73,7613 + 0,1133x$	
2,6 m	10 a 15	*	$y = 52,4298 + 0,2123x$	0,79
		**	$y = 78,8486 + 0,3135x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Para el diámetro de vasos, la edad de transición entre madera juvenil y madura varía en el rango de 10 a 15 años.

Frecuencia de vasos

De acuerdo a la tabla 4.49 el valor más bajo de R^2 se presentó en la altura 1,3 m. Para la frecuencia de vasos la zona de transición entre madera juvenil y madura se encuentra entre los 10 a 15 años.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.49. Frecuencia de vasos: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	10 a 15	*	$y = 104,5443 - 0,5400 x$	0,83
		**	$y = 116,9248 - 0,5282 x$	
1,3 m	10 a 15	*	$y = 75,2968 - 0,1977 x$	0,80
		**	$y = 114,4804 - 0,4506 x$	
2,6 m	10 a 15	*	$y = 69,3671 - 0,1627 x$	0,85
		**	$y = 82,7650 - 0,1826 x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Composición química

Alcohol/benceno

De acuerdo a la tabla 4.50, la edad de transición entre madera juvenil y madura para el contenido de solubles en alcohol/benceno se presenta en el rango de 10 a 20 años.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.50: Solubles en alcohol/benceno: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	10 a 20	*	$y = -56,7430 + 0,5780x$	0,91
		**	$y = 2,4196 + 0,0129x$	
1,3 m	10 a 20	*	$y = 34,5956 - 0,3065x$	0,99
		**	$y = -38,0436 + 0,4035x$	
2,6 m	0 a 10	*	$y = 25,6445 - 0,2216x$	0,88
		**	$y = 8,339675 - 0,0470x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

La altura de 2,6 m fue la que presentó el valor más bajo de R².

Agua Caliente

Para el contenido de solubles en agua caliente, se obtuvieron ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R² elevados (tabla 4.51).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.51: Solubles en agua caliente: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	10 a 20	*	$y = -51,4645+0,5159x$	0,93
		**	$y = 27,3200-0,2100 x$	
1,3 m	0 a 10	*	$y = -1,6250+0,0326x$	0,94
		**	$y = -15,6487+0,1730x$	
2,6 m	10 a 20	*	$y = 64,5436-0,5987x$	0,88
		**	$y = 5,1726-0,0231x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

La edad de transición entre madera juvenil y madura para las alturas de fuste estudiadas fue de 10 a 20 años.

Lignina total

Teniendo en cuenta a el contenido de lignina como propiedad, la edad de transición entre madera juvenil y madura se encontró entre el rango de 20 a 30 años.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.52: Lignina total: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	10 a 20	*	$y = 29,2076 - 0,0296x$	0,95
		**	$y = 2,1179 + 0,2397x$	
1,3 m	20 a 30	*	$y = 16,715 + 0,0740 x$	0,94
		**	$y = -14,5471 + 0,3819x$	
2,6 m	20 a 30	*	$y = -3,4893 + 0,2674x$	0,87
		**	$y = 32,1084 - 0,0662x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

La altura 2,6 m fue la que presentó el valor más bajo de R² (tabla 4.52).

Celulosa

De acuerdo a la tabla 4.53, se obtuvieron ecuaciones significativas para todas las alturas de muestreo, con valores de R² elevados.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.53: Celulosa: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R².

Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	20 a 30	*	$y = 2,8084+0,3598x$	0,96
		**	$y = 156,6245-1,0934x$	
1,3 m	10 a 20	*	$y = 207,5280-1,5501x$	0,93
		**	$y = 212,3403-1,5859x$	
2,6 m	10 a 20	*	$y = 81,9881-0,3555x$	0,96
		**	$y = 23,5234+0,2346x$	

*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura
 ** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura

Para el contenido de celulosa, la edad de transición entre madera juvenil y madura se encontró en el rango de 10 a 20 años.

Hemicelulosas

La edad de transición entre madera juvenil y madura para las alturas de fuste estudiadas fue de 10 a 20 años.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.54: Hemicelulosas: edad de transición entre madera juvenil y madura en madera de sauce, según alturas de muestreo, ecuación de ajuste y valor de R ² .				
Alturas de muestreo	Edad de Transición (años)		Modelo	R ²
0,3 m	20 a 30	*	$y = -75,0229+0,8770x$	0,93
		**	$y = 3,5428+0,1262x$	
1,3 m	10 a 20	*	$y = -18,4813+0,3072x$	0,99
		**	$y = -146,521+1,5486x$	
2,6 m	10 a 20	*	$y = -46,5416+0,5847x$	0,99
		**	$y = -91,7151+1,0292x$	
*Ecuación de ajuste del segmento anterior a la edad de transición juvenil-madura				
** Ecuación de ajuste del segmento posterior a la edad de transición juvenil-madura				

El valor de R² más bajo se presentó en la altura de 0,3 m (tabla 4.54).

Dependiendo de la variable analizada (vasos, fibras o densidad) en los sauces de 45 años de edad estudiados, la edad de transición entre madera juvenil y madura presentó diferentes valores entre los rangos de 5 a 10 y de 10 a 15 años. La longitud de fibras y el diámetro de vasos fueron los primeros parámetros en madurar (5 a 10 años) mientras que el resto tuvo como edad de transición el rango de 10 a 15 años.

El rango de edad de 10 a 15 años fue el más frecuente en todas las variables y alturas analizadas, por lo cual se lo considerara como la zona de transición entre madera juvenil y madura. El volumen por árbol que representaría a cada una de estas partes se muestra en la figura 4.28.

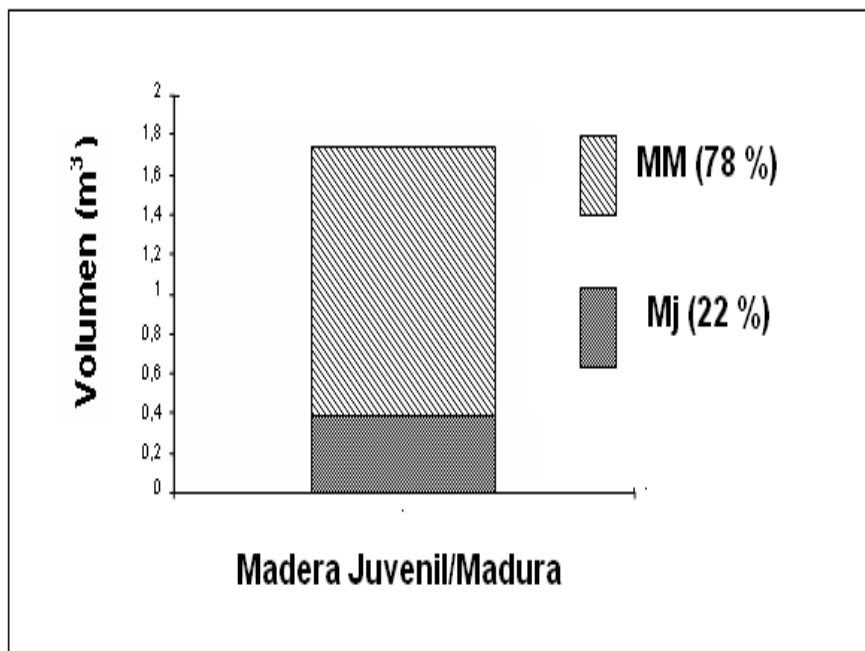


Figura 4.28: Volumen por árbol de madera juvenil y madura en sauce.

El volumen por árbol correspondiente a cada tipo de madera sería de 22% MJ y 78% MM en árboles de 45 años. En el caso de turnos de rotación cortos (10-12 años, utilizados en la industria papelera en el país), el 82 % del volumen sería madera juvenil.

4. II.C. Modelos de distribución de madera juvenil y madura

Los patrones de variación axial y radial encontrados para ambas especies, junto con las diferentes edades de transición entre madera juvenil y madura permitieron realizar los gráficos de modelos de madera juvenil que se presentan en las figuras 4.29 a 4.33 para álamo y 4.34 a 4.38 para sauce.

Álamos

La densidad básica y longitud de fibra presentaron rangos de valores más definidos que en resto de las propiedades, permitiendo generar un modelo de distribución más detallado. Sin embargo el modelo general para todas las propiedades fue el de cilindro central.

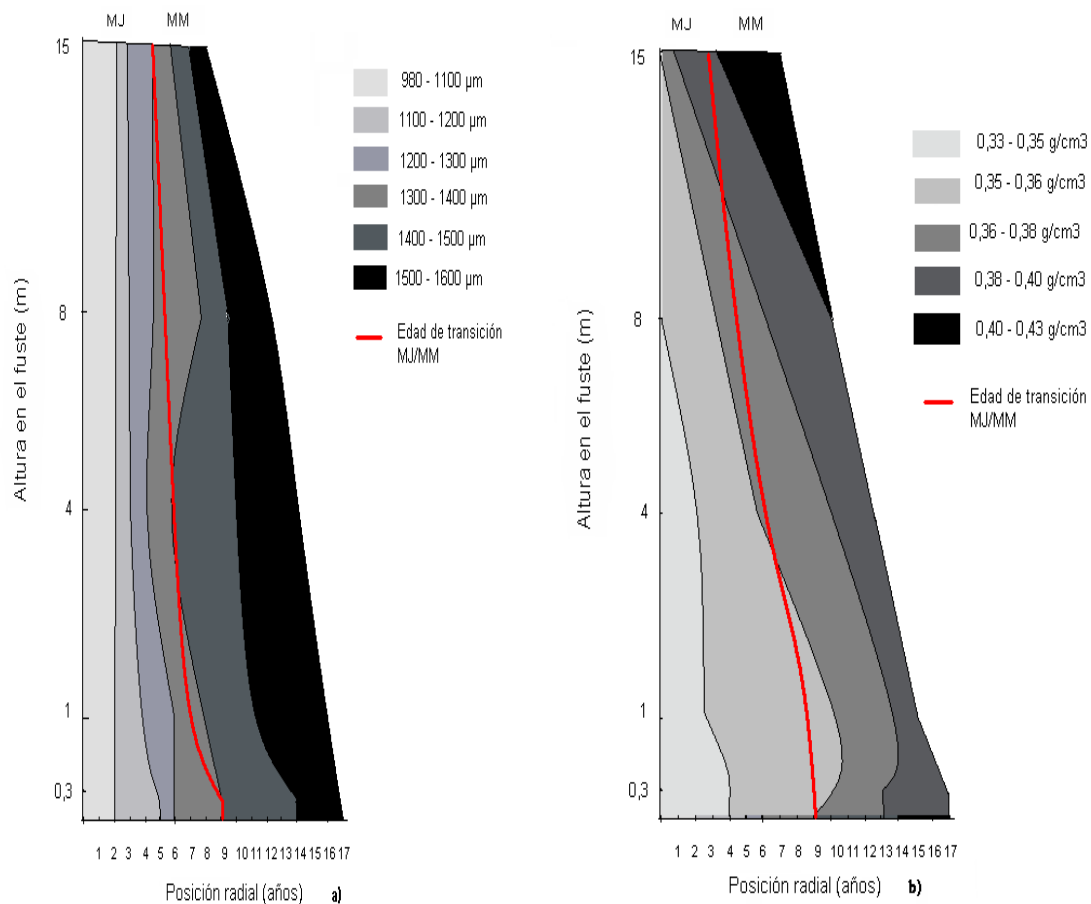


Figura 4.29. Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Longitud de fibra y b) Densidad básica, en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

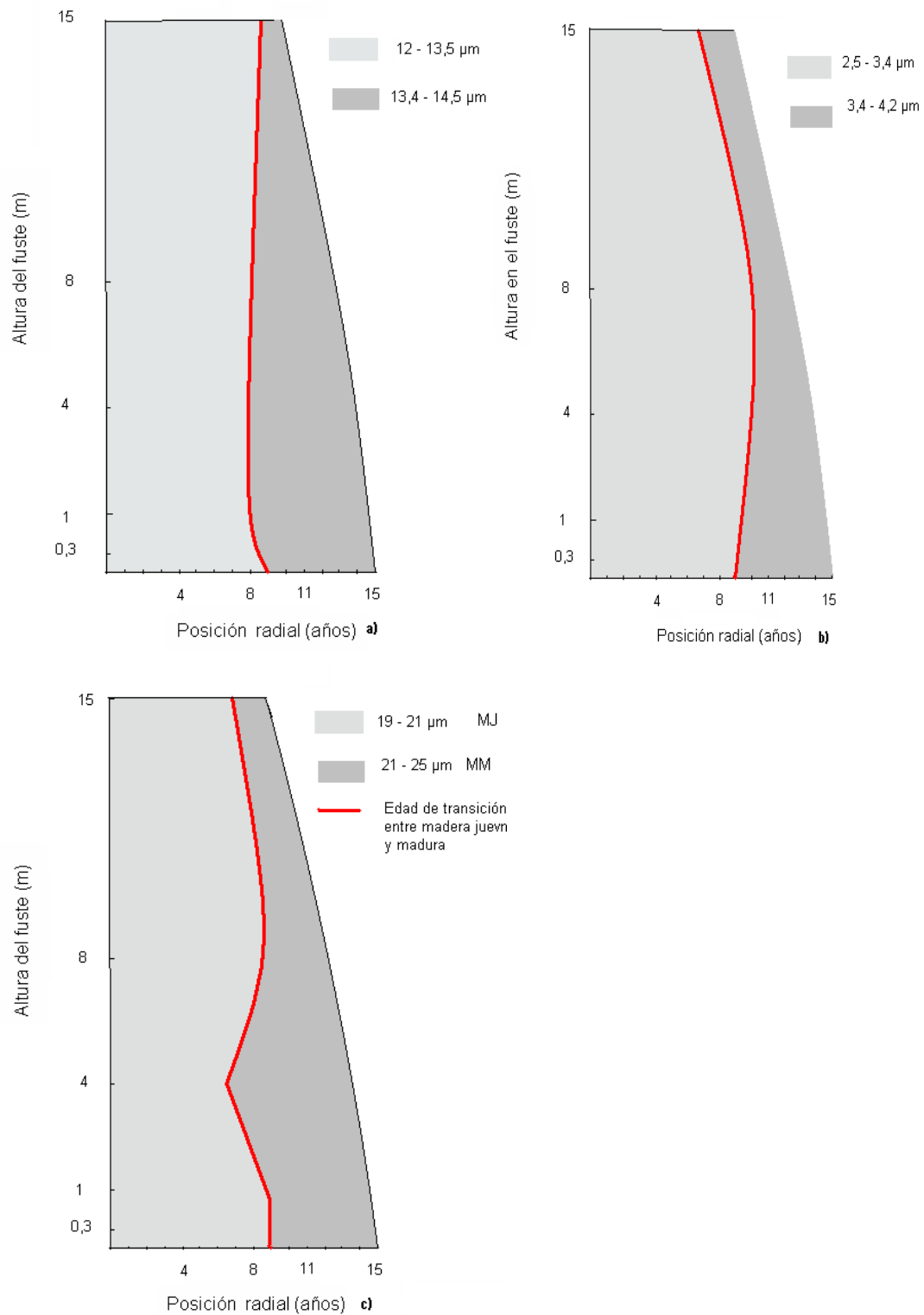


Figura 4.30. Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para; a) Lumen de fibra; b) Espesor de fibra y c) Ancho de fibra en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

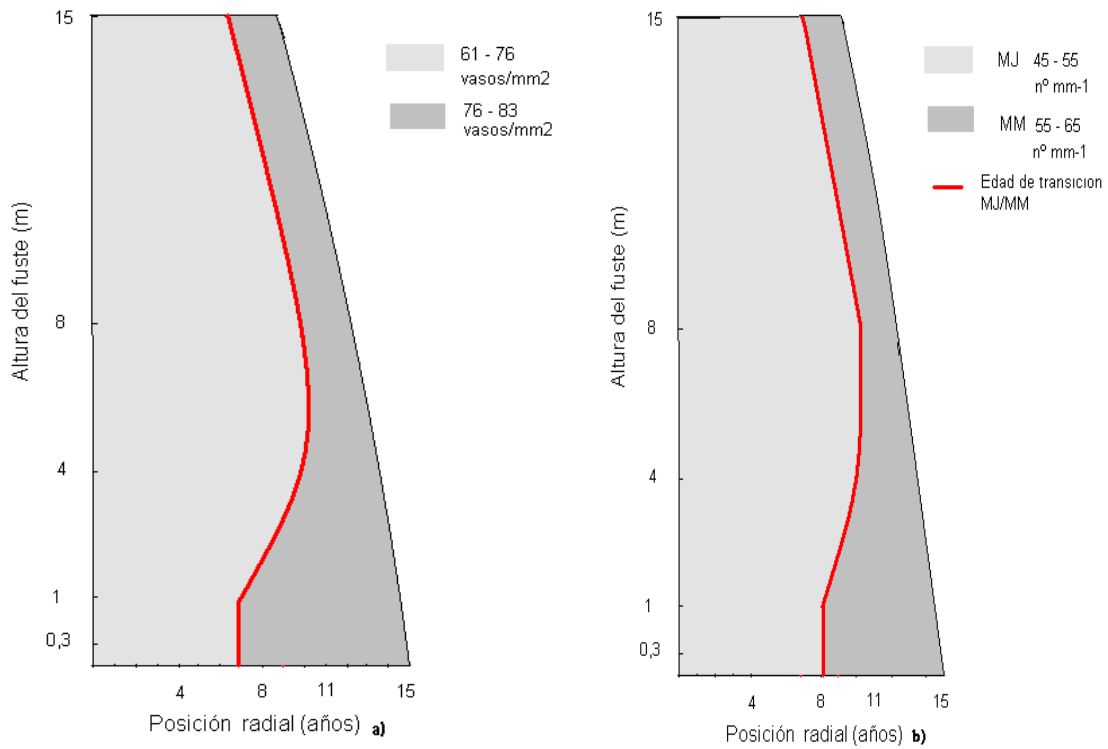


Figura 4.31: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Diámetro de vasos y b) Frecuencia de vasos en madera de álamo.

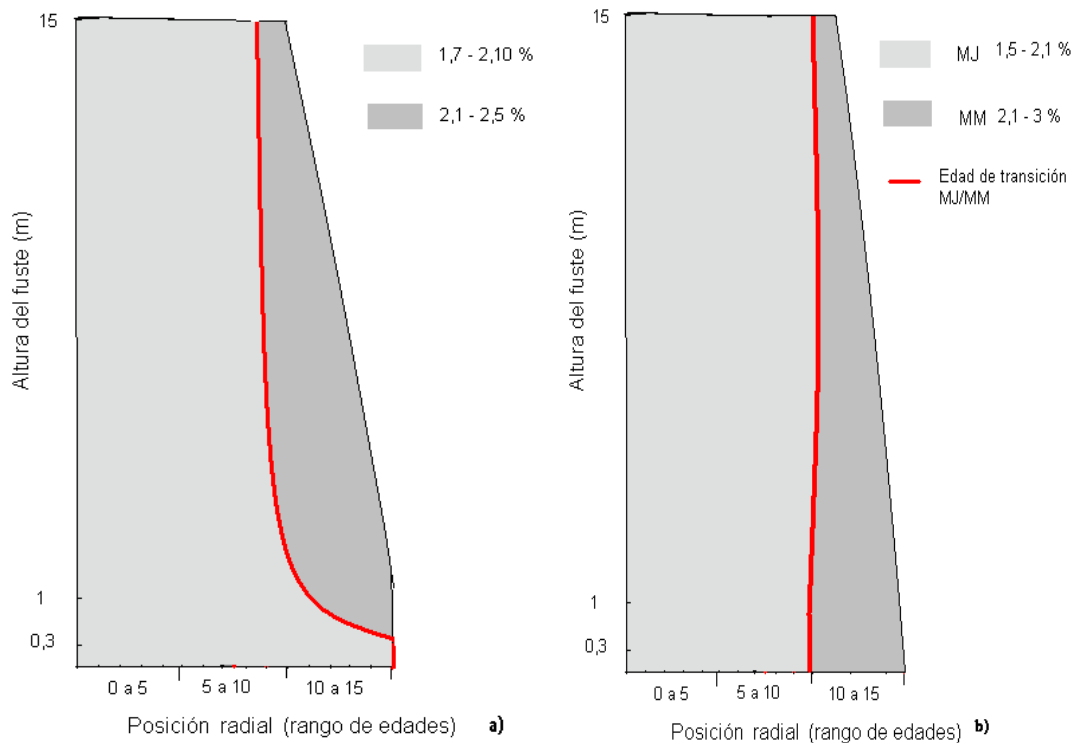


Figura 4.32: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Solubles en agua caliente y b) Solubles en alcohol/benceno en madera de álamo.

4. Resultados y Discusión

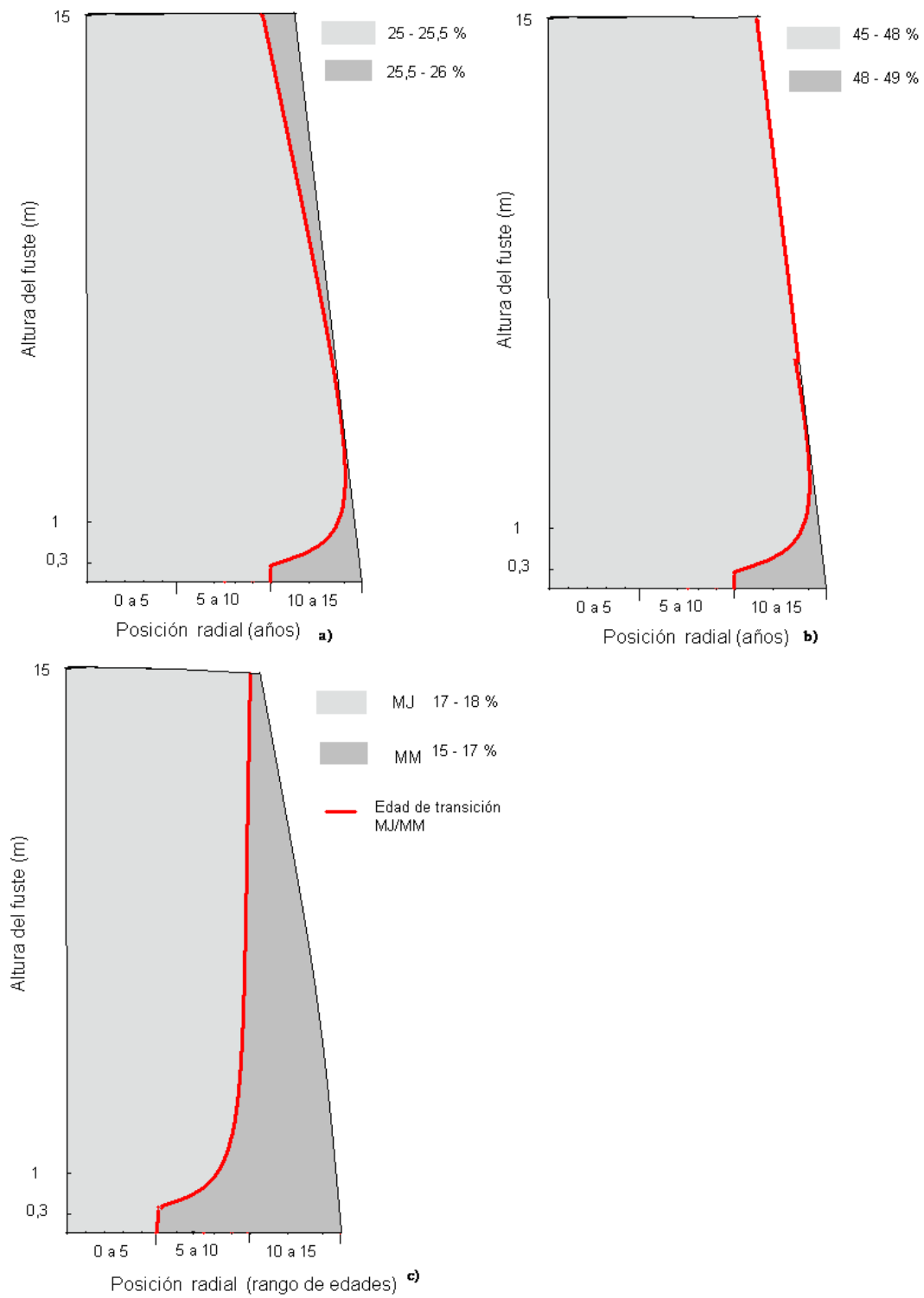


Figura 4.33: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Lignina b) Celulosa y c) Hemicelulosas en madera de álamo.

Sauces

Los sauces se comportan de forma similar a los álamos, la densidad básica y la longitud de fibra pudieron generar figuras más detalladas (rangos de valores) que el resto de las propiedades estudiadas. El modelo de distribución de madera juvenil y madura presentado por el sauce es el de un cilindro central.

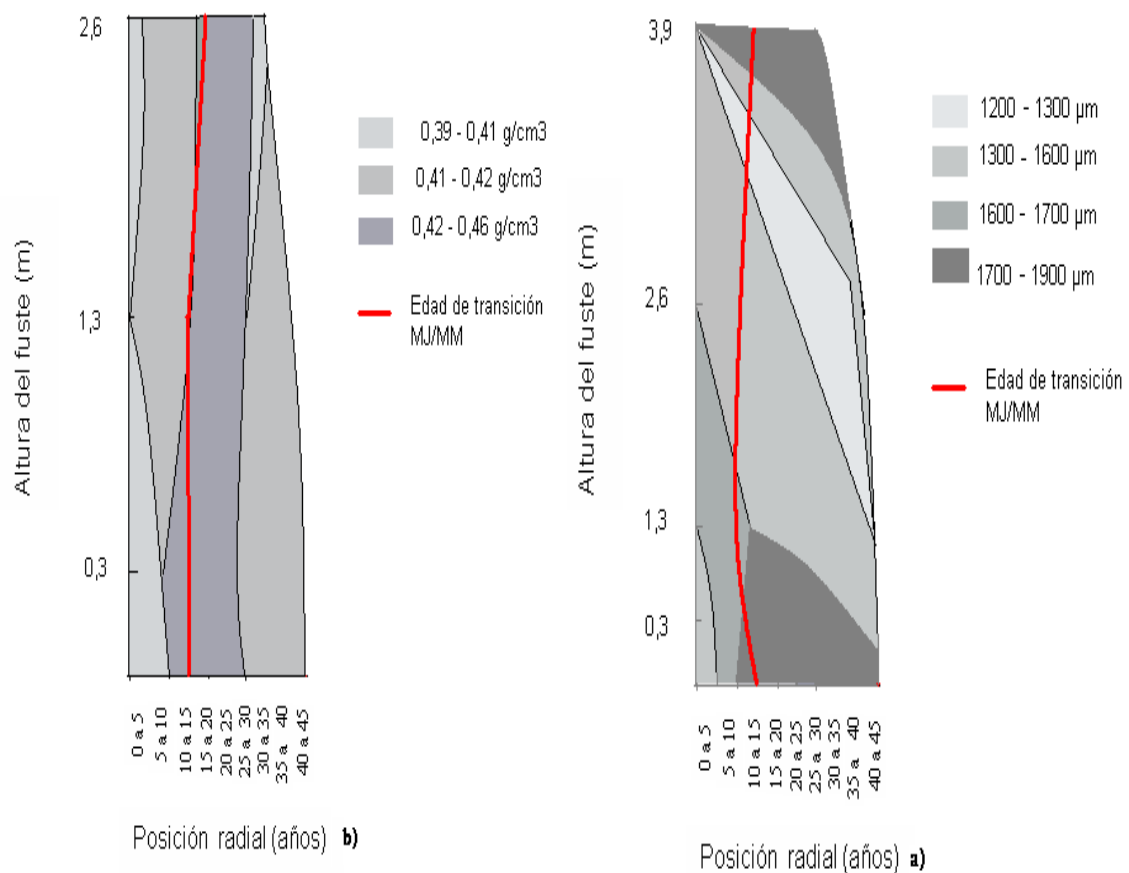


Figura 4.34: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Longitud de fibra y b) Densidad básica, en madera de sauce.

4. Resultados y Discusión

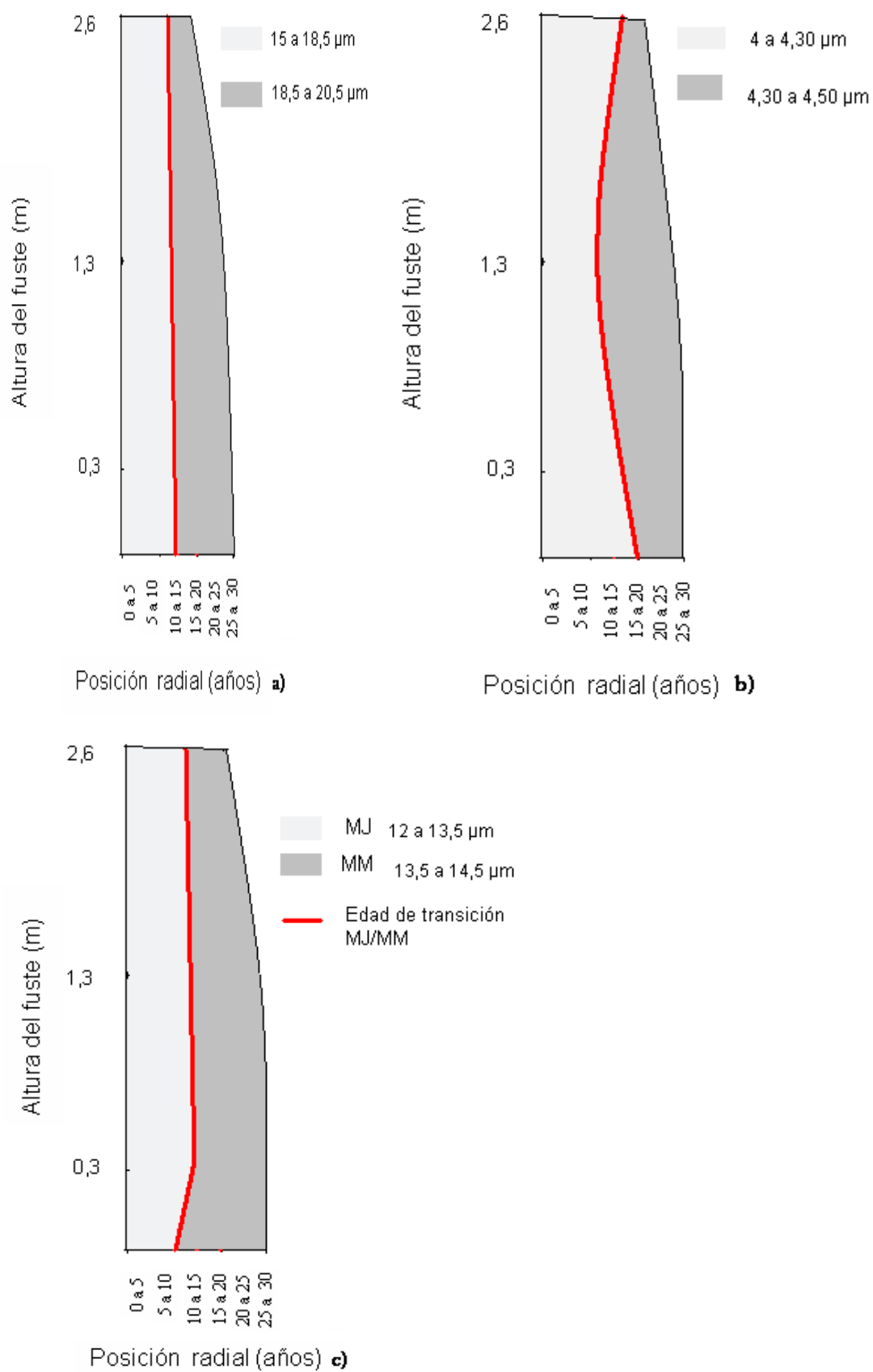


Figura 4.35: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Ancho de fibra; b) Espesor de fibra y c) Lumen de fibra en madera de sauce.

4. Resultados y Discusión

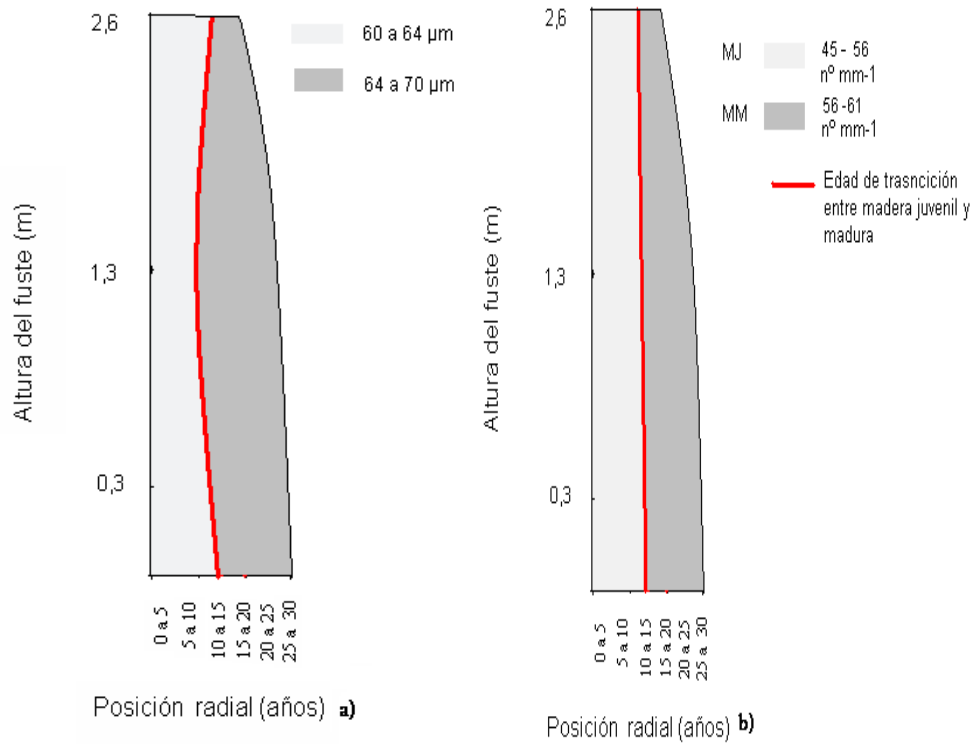


Figura 4.36: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Diámetro de vasos y b) Frecuencia de vasos en madera de sauce.

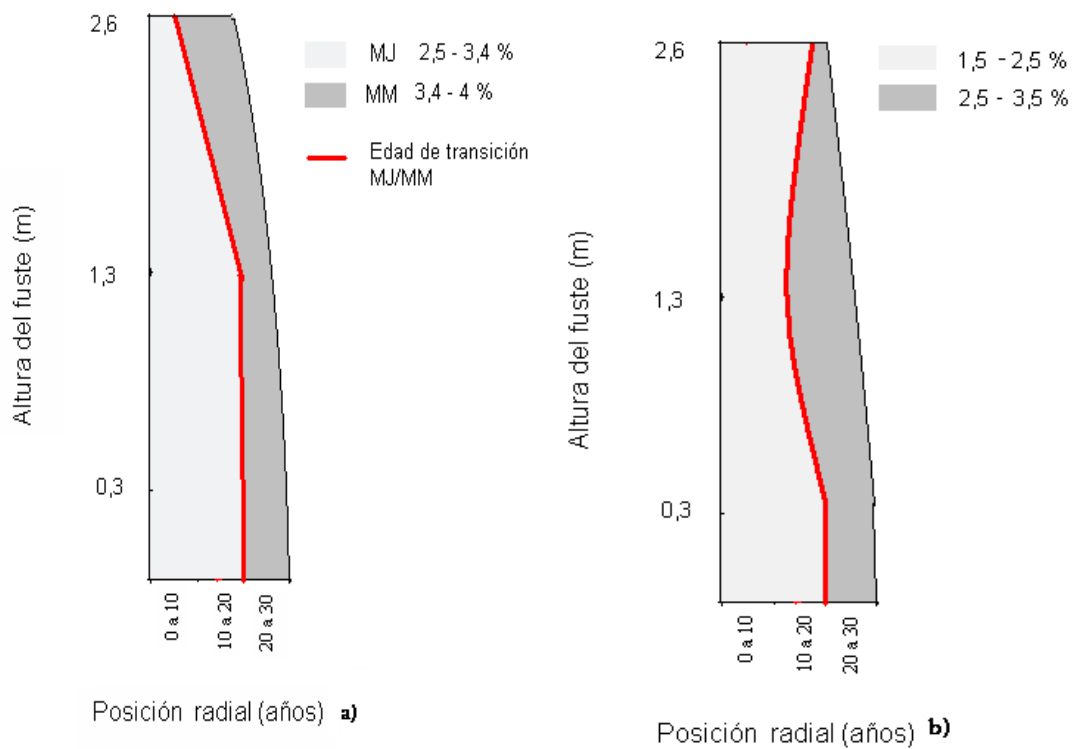


Figura 4.37: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Solubles en alcohol/benceno y b) Solubles en agua caliente en madera de sauce.

4. Resultados y Discusión

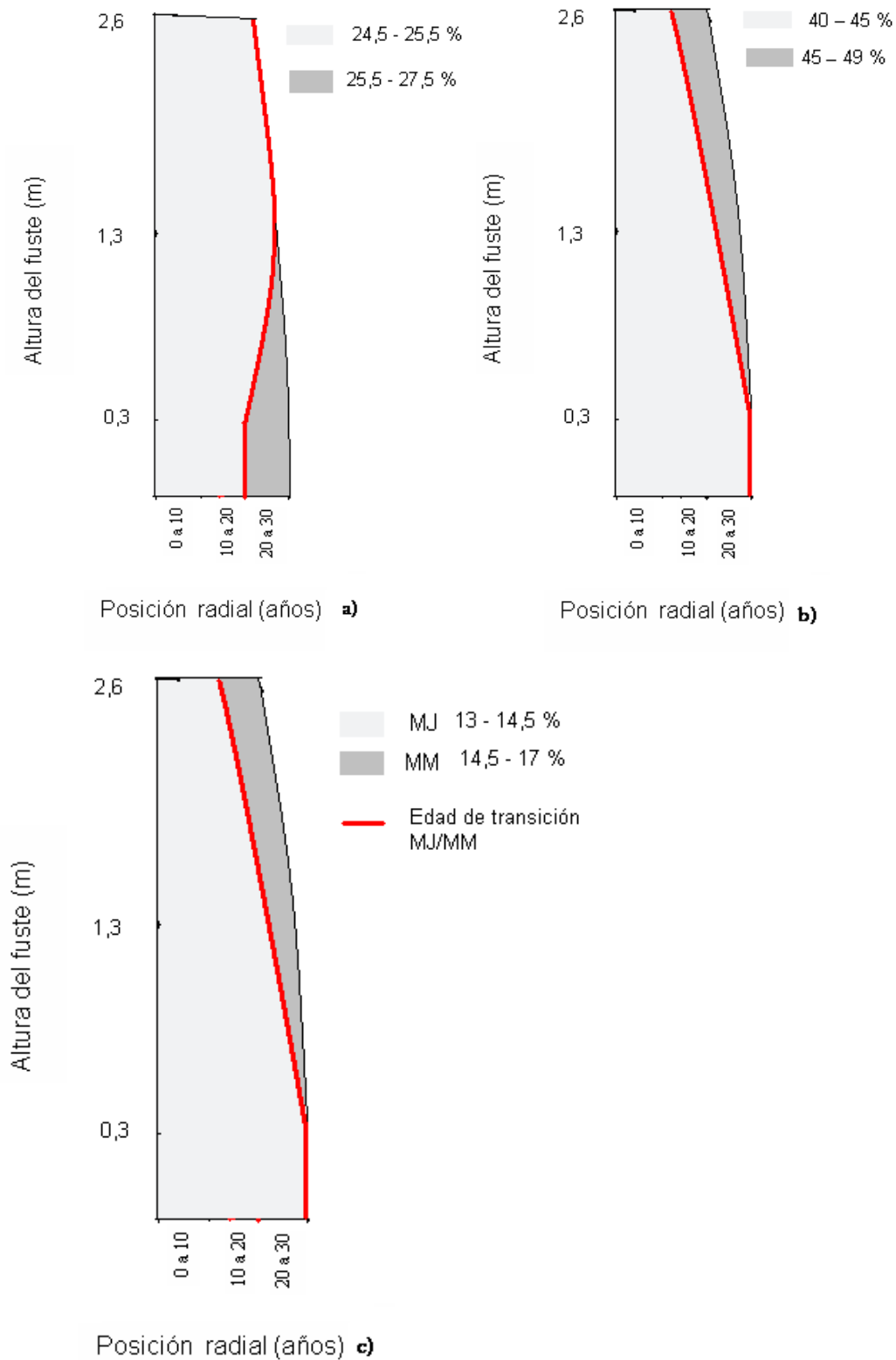


Figura 4.38: Modelo de distribución de madera juvenil y madura obtenido para a) Lignina b) Celulosa y c) Hemicelulosas en madera de sauce.

4. II.D. Discusión de los modelos de variación en base a los patrones de variación radial y axial.

Las coníferas, tal como se expresó en la introducción, presentan mayor grado de desarrollo en la descripción de los patrones de variación de las propiedades de la madera que las latifoliadas. Los diferentes patrones de variación radial y axial encontrados están relacionados con la especie, edad fisiológica, sitio, tratamientos silvícolas aplicados, elección de métodos de medición y diseño de muestreo en el fuste. Sin embargo hay patrones que se pueden generalizar pese a lo anteriormente dicho.

Los principales trabajos sobre variación de las propiedades se basan sobre la variación radial. La bibliografía indica que la variación axial parece ser menos consistente que la radial sobre todo en latifoliadas (Wilkes, 1988; Downes et al, 1997; Castro Silva et al, 2007).

4. II.D.a. Variación radial (con la edad fisiológica del cambium)

La variación sistemática de los caracteres de la madera a través de las series de anillos de crecimiento de la médula a la corteza, es el resultado de la influencia de varios factores (Panshin y de Zeeuw, 1980):

- 1- Cambios en las iniciales cambiales como una función natural del envejecimiento del árbol (maduración fisiológica del cambium)
- 2- Cambios en el desarrollo de la células derivadas del cambium luego de la división celular (elongación en sentido axial)

Los cambios propiciados por estos factores se evidencian luego en los patrones de variación de las dimensiones celulares, la organización de la pared, la proporción de los distintos tipos celulares y en la composición química de la pared.

Las propiedades que han sido más estudiadas en cuanto a los patrones de variación radial son la densidad básica y la longitud de fibras debido a que son las principales propiedades que definen la calidad de la madera y están relacionadas íntimamente con el uso final de la misma.

4. Resultados y Discusión

En las latifoliadas, la variación de la densidad básica y longitud de fibra no es tan uniforme como en el caso de las coníferas.

Para las latifoliadas de porosidad difusa el patrón de variación radial de la longitud de fibra es similar al reportado para las coníferas, presentando un aumento sostenido de los valores en los primeros anillos (madera juvenil) y luego una estabilización de sus valores (madera madura) (Bonavía y Ragonese, 1980; Panshin y de Zeeuw 1980; Yanchuck y Micko, 1983; Fukazawa, 1984; Bendtsen y Senft, 1986; Bonavía y Piussan, 1987; Yanchuck y Micko, 1990; Peszlen, 1994; Balatinecz y Krestchmann, 2001; Monteoliva et al, 2002, 2006 ; Castro Silva et al, 2007; Alves Ramos et al, 2011; Kiaei et al 2012). Mientras que, para la densidad básica se han reportado patrones que pueden clasificarse dentro de los tres tipos generales citados por Panshin y De Zeeuw (1980):

Tipo1: aumento de los valores de medula a corteza (Tomazello Filho, 1985; Wilkes, 1988; Valente et al, 1992; Igartua et al, 2000; Muneri y Raymond, 2001; Monteoliva y Marlats, 2007; Sette et al, 2012)

Tipo 2: disminución de los valores cerca de la medula y luego un aumento (Raymond y Mac Donal, 1998; Raymond y Muneri, 2001; Igartua et al, 2002; Nuñez, 2011)

Tipo 3: disminución constante de los valores de médula a corteza (Fukasawa 1984; Monteoliva et al, 2005).

Para las especies estudiadas en esta tesis *Populus deltoides* `Australia 129-60` y *Salix babylonica var sacramenta*, las variaciones radiales de las propiedades de la madera presentan, en general, un aumento de sus valores de médula a corteza. El comportamiento radial de la densidad básica en ambas especies coincide con el tipo 1 de variación presentado por Panshin y De Zeeuw (1980) de leve aumento de médula a corteza. La longitud de fibra presenta un aumento sostenido de los valores en los primeros anillos y luego una estabilización de los mismos (madera madura) coincidiendo con lo reportado para la mayoría de las latifoliadas de porosidad difusa.

La variación de las dimensiones celulares de médula a corteza es evidente en los parámetros que cambian sus dimensiones luego de la división cambial y se alargan axialmente como la longitud de traqueidas en coníferas y la longitud de las fibras y vasos en latifoliadas. Existe menos evidencia e investigación sobre la

4. Resultados y Discusión

variación de las dimensiones celulares en el sentido transversal (ancho de fibras, lumen y espesor de pared, diámetro de vasos) (Panshin y de Zeeuw, 1980). Se han publicado trabajos que demuestran que la longitud final de las fibras de latifoliadas está determinada en un 50% por la longitud de las iniciales cambiales y el otro 50% se debe a la elongación posterior que sufren durante la maduración (Ridoutt y Sands, 1993). En este sentido, las variaciones de las dimensiones celulares halladas en la tesis ponen en evidencia la marcada influencia de la edad cambial y la elongación posterior, sobre todo en la longitud de fibras.

La densidad es una propiedad compleja de la madera, dado que es la resultante de una combinación de características estructurales, cada una de la cuales tiene un sólido patrón hereditario propio. Está determinada principalmente por el tamaño y grosor de las paredes de las células de las fibras leñosas y también influyen la presencia de vasos y radios así como el volumen relativo de los diferentes tipos celulares (Zobel y Talbert, 1988; Panshin y de Zeeuw, 1980). Se asume que la densidad de la pared celular es constante en las especies y se calculó un valor promedio de 1500 kg/m^3 para latifoliadas (Barnett y Jeronimidis, 2003). Por lo tanto, las variaciones en la densidad de la madera con las especies se deben a la cantidad de pared celular presente en una unidad de volumen. En especies de porosidad difusa como los álamos y sauces de esta tesis, se presentan vasos de diámetro similares en todo el anillo de crecimiento y la cantidad de pared celular presente (y por lo tanto la densidad), estará afectada por los otros componentes anatómicos mayoritarios que son las fibras y el espesor de su pared celular (Barnett y Jeronimidis, 2003). Teniendo en cuenta, la variación menos marcada de las dimensiones celulares transversales medidas en estas especies (fibras y vasos), se observa que el comportamiento de la densidad refleja esa tendencia, siendo su variación radial de ascenso pero menos marcado que en la longitud de fibras.

Los resultados hallados en esta tesis para el resto de las propiedades anatómicas y composición química, muestran que los patrones de variación radial se diferencian entre ambas especies debido fundamentalmente al diseño de muestreo y sus muy diferentes edades (álamo 17 años analizados cada 4-5 años, sauce 45 años analizados cada 5-10 años). En álamo el lumen disminuye de médula a corteza mientras que en el sauce se comporta de manera inversa. Para

4. Resultados y Discusión

el espesor y ancho de fibra los álamos presentan un aumento de sus valores en sentido radial mientras que en los sauces ocurre lo contrario. Con respecto al diámetro de vasos y frecuencia de vasos, en ambas especies el diámetro de vasos aumenta de médula a corteza mientras que la frecuencia de vasos disminuye con la edad en los sauces y no presenta diferencia significativa en los álamos. En cuanto a la composición química, la principal diferencia entre ambas especies se da con el contenido de celulosa que presenta un aumento de médula a corteza en los álamos y una disminución en ese sentido en los sauces.

Nuevo enfoque sobre la variación radial en latifoliadas

Dentro de la amplia bibliografía que incluye el análisis de los patrones de variación radial en latifoliadas, dos trabajos proponen un nuevo enfoque que ponen de manifiesto la gran variedad de modelos hallados en este grupo y los distintos intentos de entender la formación del xilema con teorías alternativas de las propuestas para coníferas (Fukasawa, 1984; Kojima et al, 2009). La influencia neta de la maduración fisiológica del cambium sobre las propiedades de la madera no es la única forma de explicar las variaciones halladas.

Como se planteó en la introducción (apartado 2.2 a), estos autores analizaron las variaciones radiales del leño de varias especies de latifoliadas de porosidad circular y difusa a partir de dos importantes propiedades como son la densidad de la madera (Fukazawa, 1984) y la longitud de fibras (Kojima et al, 2009). Estos trabajos plantean que los cambios de las propiedades producidos en sentido médula corteza están influenciados por la edad cambial, el crecimiento en diámetro o por ambos factores.

Los comportamientos encontrados por Fukazawa (1984) indicaron que la variación de la densidad en las latifoliadas de porosidad difusa está influenciada solamente por la edad cambial, mientras que en las latifoliadas de porosidad circular el ancho de anillo es el que presenta la mayor influencia sobre la densidad.

4. Resultados y Discusión

Los resultados hallados en esta tesis coinciden con lo expresado por este autor para las latifoliadas de porosidad difusa. La densidad de la madera del álamo australiano y el sauce americano muestra un aumento de médula a corteza, que es menos pronunciado en sauce debido a la mayor edad. Aunque no puede aplicarse la distinción entre clases de crecimiento en diámetro por el número de probetas y árboles analizados, los resultados parecen corroborar la influencia de la edad cambial en esta importante propiedad.

En otro trabajo, Kojima et al (2009), estudiaron la influencia de la edad cambial y el crecimiento del diámetro sobre la maduración del xilema, a través del análisis de la variación radial de la longitud de fibra en 6 especies de latifoliadas de porosidad difusa y de rápido crecimiento (*Acacia sp*, *Eucalyptus sp* y *Paraserianthes sp*) de entre 7 y 14 años de edad. Para las especies de *Acacia sp* y *Paraserianthes sp* la variación de la longitud de fibra y su maduración dependen del crecimiento en diámetro, indicando que la formación de madera madura comienza después de que se alcanza un cierto tamaño arbóreo. Por el contrario, en las dos especies de *Eucalyptus* implantadas en zonas subtropicales y templadas (*E. grandis* y *E. globulus*) la maduración del xilema está controlada por la edad del cambium, por lo tanto la formación de madera madura comienza una vez que el cambium alcanza una determinada edad. Sin embargo, en estudios posteriores Kojima et al (2009 b y 2009 c) ampliaron la evaluación y análisis de las variaciones radiales de varias propiedades de la madera en *Eucalyptus grandis*, implantados en diferentes latitudes y climas. Determinaron que, dependiendo del sitio y la propiedad estudiada, la maduración del xilema se halla afectada por el crecimiento en diámetro o por la edad cambial.

Los resultados hallados en esta tesis permiten inferir que la longitud de fibras de ambas especies se ve afectada por la edad cambial y que en los primeros años de crecimiento (10-15 años) la magnitud del cambio es muy pronunciada. La mayor edad analizada en el caso de sauce americano (45 años) permite observar que el patrón de aumento se estabiliza en valores algo inferiores a los alcanzados a los 15 años, por ese motivo el patrón general de médula a corteza no es tan marcado para sauce.

4. Resultados y Discusión

No es posible analizar, para esta tesis, la influencia de la tasa de crecimiento sobre la longitud de fibras debido al diseño de muestreo sobre 5 árboles que no permite clasificarlos en clases diamétricas distintas.

Las referencias aportadas en esta sección sobre variación radial de las propiedades del leño, permiten remarcar la falta de uniformidad en los estudios realizados en latifoliadas y la ausencia de patrones generales. Se puede arribar a la conclusión, desde esta extensa revisión bibliográfica, que los modelos de variación de las propiedades son dependientes de la especie, ya que dentro del mismo género se han reportado distintos comportamientos. Incluso, podemos afirmar por las referencias en el género *Eucalyptus*, que se presentan variaciones dentro de la misma especie si consideramos el sitio de implantación. Esta misma tendencia de influencia del sitio en la maduración fue informada para *Populus* (Peszlen 1994; Matyas y Peszlen, 1997).

4. II.D.b. Variación axial

Los principales trabajos sobre variación de las propiedades de la madera se basan sobre la variación radial. La bibliografía indica que la variación axial parece ser menos consistente que la radial (Wilkes, 1988; Downes et al, 1997; Castro Silva et al, 2007). A esto se suma la inconveniencia metodológica que supone un muestreo a lo largo del fuste con muestreos no destructivos. Por estos motivos se han desarrollado modelos predictivos para ciertas variables como la densidad básica y longitud de fibras que utilizan una única determinación a la altura del pecho como representativa del árbol completo. (Muneri y Raymond, 2001 ; Hudson et al, 2001 ; Igartua et al, 2003 ; Diaz et al, 2010). Sin embargo, los trabajos publicados sobre la variación con la altura demuestran que depende de la propiedad analizada y que muchas veces la altura del pecho no es tan representativa como se supone (Jorge et al, 2000; Igartua et al, 2003).

En estudios realizados sobre latifoliadas de porosidad difusa la densidad básica presentó un comportamiento inverso al de las coníferas, de aumento con la altura de muestreo en el fuste. Sette et al (2012) estudiando *Eucalyptus grandis* de 36

4. Resultados y Discusión

años de edad encontraron que la densidad básica aumenta con la altura de muestreo. Iguales resultados fueron presentados para el género *Eucalyptus* por Valente et al (1992), Igartúa et al (2002), Castro Silva et al (2007), para *Populus* por Diaz et al (2010), para *Salix* por Monteoliva et al (2002), para *Alnus* por Evans (2000). Sin embargo, algunos autores han descrito un descenso inicial de la densidad básica hasta el 20-25 % de la altura comercial y su aumento posterior (Bhat et al, 1990; Raymond y Mc Donald, 1998; Raymond y Muneri, 2001).

La longitud de fibras para las latifoliadas de porosidad difusa se comporta de igual manera que la densidad, es decir que aumenta sus valores de la base hacia el ápice al considerar la altura de muestreo en el fuste (Novaresi et al, 1997; Igartúa et al, 2002; Monteoliva, 2006). Sin embargo, para el género *Eucalyptus* y otras especies de latifoliadas (*Platanus*, *Carya*, *Liriodendron*, *Salix*) se han descrito leves aumentos de la longitud de fibras hasta el 15-35 % de la altura total y luego una disminución hacia el ápice (Panshin y de Zeeuw 1980; Ridoutt y Sands, 1994; Jorge et al, 2000).

Este comportamiento presentado para la densidad y longitud de fibras, estaría relacionado con el concepto de madera “juvenil más madura” presentado por Burdon et al (2004) para coníferas, en el cual se tiene en cuenta la edad fisiológica del cambium. Por lo tanto, se observa que las propiedades en el ápice tienen un grado de maduración superior a las de la base, pero sin dejar de presentar las características de la madera juvenil (menores valores que la madera madura).

En los resultados de esta tesis, las principales diferencias, se producen en la primera troza comercial (entre la base y la altura del pecho). Dentro de las limitaciones que impuso la sanidad del sauce americano sobre el muestreo axial, se considera que para ambas especies el patrón de variación axial de la densidad básica es similar al presentado para las latifoliadas de porosidad difusa de leve aumento hacia el ápice, más marcado en álamo. Para la longitud de fibras, se encuentra un aumento de los valores entre las primeras trozas y luego una disminución hacia el ápice en el caso del álamo y valores constantes para el sauce.

4. Resultados y Discusión

Para el resto de las propiedades anatómicas y composición química en latifoliadas no se encontraron tantas referencias. En el trabajo presentado por Castro Silva et al (2007) sobre *Eucalyptus*, el espesor de pared y el diámetro de vasos aumentan con la altura, mientras que el diámetro de fibras y el lumen disminuyen en ese sentido. Igual tendencia se reportó para *Platanus occidentalis* y *Liriodendron tulipifera* (Panshin y de Zeeuw, 1980). Para *Populus* híbridos y *Quercus* sp se halló un descenso del espesor de pared de las fibras desde la base hacia el ápice (Panshin y de Zeeuw, 1980).

Sykes et al (2008) trabajando sobre *Populus* sp. encontraron que el contenido de lignina no presenta diferencias significativas con la altura de muestreo. Ona et al (1995 a, b) estudiando *Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis* encontraron que el contenido de holocelulosa aumentaba y el contenido de extractivos disminuía con la altura de muestreo mientras que la lignina no presentaba variación significativa. Asimismo, Pereira y Sardirha (1984) en *Eucalyptus globulus* reportaron una disminución de la celulosa con la altura y un aumento del contenido de lignina y pentosanos en ese sentido.

Los resultados de esta tesis indican que, en general, el tamaño de las fibras aumenta hacia el ápice (espesor y ancho de fibras), al igual que la frecuencia de vasos, mientras que el diámetro de los mismos se mantiene constante o aumenta levemente muy cerca del ápice. El comportamiento de las dimensiones transversales de las fibras y vasos se encuentra asociado al comportamiento de la densidad en sentido axial.

Dentro de la composición química la troza basal de álamo presentó los menores valores de celulosa, hemicelulosas, lignina y extractivos en alcohol-benceno, siendo estos extractivos los únicos que aumentaron con la altura de muestreo en el fuste. En sauces, en cambio, ambos tipos de extractivos fueron estables con la altura, mientras que la celulosa aumentó y la lignina y hemicelulosas disminuyeron hacia el ápice.

Los cambios hallados en el sentido axial dentro del fuste son de menor magnitud que los hallados en sentido radial, tal como lo mencionaron otros autores para las latifoliadas de porosidad difusa (Wilkes, 1988; Downes et al, 1997).

4. II.D.c Modelos de Madera Juvenil

Para la mayoría de las coníferas se postula y acepta que la madera juvenil tiene forma cónica o cilíndrica, con un mayor porcentaje de madera juvenil en la base y menor en el ápice (Panshin y de Zeeuw, 1980; Zobel y Talbert, 1988; Yang et al, 1994). Esta generalización está asociada a la uniformidad de los patrones de variación radial y axial de las propiedades de la madera que presentan estas especies (ver apartado 2.2 a y b).

Sin embargo existen diferentes revisiones de las variaciones de la madera juvenil en Coníferas. Como se mencionó en la introducción, Burdon et al (2004) en su trabajo sobre madera juvenil y madura en pino taeda y radiata concluyeron que en cilindro central no está conformado solo por madera juvenil, sino que hay zonas de transición entre un tipo de madera y el otro en sentido radial y axial (ver apartado 2.2 a).

Para las latifoliadas los resultados son contradictorios y se han generados modelos parciales para los géneros comerciales más difundidos (*Eucalyptus*, *Quercus*) que no responden necesariamente al modelo de cilindro central. Se ha reportado el modelo cónico semejante a las coníferas en *Tilia japonica* de 150 años (Fukazawa y Othani 1982, citado por Zobel y Sprague, 1998). Los resultados dispares hallados se debe en parte a la gran variabilidad de los patrones de variación (axiales y radiales) de las propiedades de la madera como se ha podido corroborar a través de la bibliografía citada en este manuscrito (ver apartado 2.2 c).

Los resultados de esta tesis indican que el modelo de madera juvenil y madura hallado para álamo australiano y sauce americano y con el diseño de muestreo aplicado, se asemeja al modelo de cilindro central reportado para coníferas. Este modelo fue citado por Zobel y Sprague (1998) para caracterizar el modelo más difundido en latifoliadas, considerando un cilindro juvenil pero de menor diámetro en el ápice. Sin embargo, y retomando el concepto de madera “juvenil más madura” presentado por Burdon et al (2004), este esquema podría aplicarse a la variación axial hallada en la tesis para la variable densidad de la madera, donde los valores en el ápice tienen un grado de maduración superior a los de la base en

4. Resultados y Discusión

ambas especies. Sin embargo, la longitud de fibras no presenta este comportamiento.

Considerando estas dos propiedades, el álamo australiano presenta un modelo con una forma más cónica que el hallado para el sauce americano. Esto puede deberse a que la edad de transición en el álamo presentó una disminución de su valor con la altura en el fuste, mientras que el sauce americano presentó un comportamiento inverso.

4. II.E. Análisis de las propiedades de la madera juvenil y madura

Los valores promedio (+/-DS) de la madera juvenil (MJ) y madera madura (MM) para todas las características anatómicas y químicas se presentan en la tabla 4.55:

Especies	Álamo				Sauce			
	MJ (media)	MJ (DS)	MM (media)	MM (DS)	MJ (media)	MJ (DS)	MM (media)	MM (DS)
Densidad (g cm ⁻³)	0.362 a*	0.01	0.388 b	0.00	0.414 a	0.01	0.424 a	0.01
Longitud de fibra (µm)	1262 a	68.61	1495 b	64.24	1623 a	32.51	1618 a	12.22
Ancho de fibra (µm)	20.5 a	0.90	21.2 a	0.53	17.8 a	1.68	19.1 a	0.56
Lumen (µm)	13.7 a	0.85	13.7 a	0.47	12.8 a	1.08	13.8 a	1.12
Espesor de pared (µm)	3.2 a	0.15	3.5 b	0.26	3.25 a	0.20	4.48 a	0.37
Diámetro de vasos (µm)	75.0 a	4.59	78.1 a	0.96	65.6 a	2.05	64.1 a	5.05
Frecuencia de vasos (nº mm ⁻¹)	54.5 a	9.44	56.4 a	8.90	59.9 b	1.61	53.5 a	5.11
Lignina (%o.d.)**	25.7 a	0.17	25.7 a	0.16	25.4 a	0.83	25.3 a	0.76
Hemicelulosas (%o.d.)	19.3 b	0.61	18.6 a	0.28	16.6 a	1.33	18.6 b	0.90
Celulosa (%o.d.)	47.8 a	0.93	48.6 a	0.15	44.8 a	2.60	43.1 a	2.43
Extractivos (%o.d.)	4.94 a	0.33	4.53 a	0.34	5.48 a	0.27	5.79 a	0.44

*Las letras minúsculas se leen horizontalmente. Letras distintas indican diferencias significativas (p<0.05) entre la madera juvenil y madura de cada especie usando el Test de Tukey.

**La composición química se expresa como madera seca en estufa. (% o.d.).

En álamo australiano, la madera juvenil presentó valores de densidad básica, longitud de fibra y espesor de pared significativamente inferiores al compararla

4. Resultados y Discusión

con la madera madura ($p < 0.05$). Mientras que el contenido de hemicelulosas mostró un comportamiento inverso al anterior.

En sauce americano, la madera juvenil presentó mayor frecuencia de vasos y menor contenido de hemicelulosas que la madera madura.

En ambas especies, las demás propiedades (anatómicas y químicas) no mostraron diferencias significativas, por lo que podrían considerarse como homogéneos con respecto a estas variables.

Para ambas especies, las propiedades de la madera juvenil fueron inferiores en algunos de los parámetros anatómicos y químicos con respecto a la madera madura. La densidad de la madera resultó menor solo en la madera juvenil de álamo. Los cambios producidos en el pasaje de madera juvenil a madura no resultaron tan abruptos como los citados por la bibliografía para coníferas, coincidiendo con el cambio gradual esperado para latifoliadas.

Desde el punto de vista tecnológico, estos resultados se aplican solamente a productos sólidos de la madera (madera aserrada, debobinado) debido a la edad de cosecha de la madera analizada (17 años álamo y 45 años sauce).

Independientemente de la edad de transición y la propiedad elegida para su análisis, la madera juvenil presentó calidad inferior. Esto podría suponer que, dependiendo de la industria consumidora (triturado, aserrado o laminado), la edad de cosecha del rodal (turno) podría manejarse para influir en las propiedades del árbol completo considerando la proporción final de madera juvenil y madura.

4. III: Variación en las propiedades de las pulpas CMP

Se realizaron ensayos mecánicos y ópticos sobre las siguientes mezclas de pulpas de ambas especies:

0% madera juvenil / 100 % madera madura (0/100 % MJ/MM)

25% madera juvenil / 75 % madera madura (25/75 % MJ/MM)

50 % madera juvenil / 50 % madera madura (50/50 % MJ/MM)

75 % madera juvenil / 25 % madera madura (75/25 % MJ/MM)

100 % madera juvenil / 0 % madera madura (100/0 % MJ/MM)

Para preparar las mezclas de pulpas con los diferentes contenidos de madera juvenil y madura primero se utilizó la edad de transición resultante de la aplicación del método de regresión segmentada indicado en el apartado Capítulo II de resultados.

En “álamo australiano”, la edad de transición obtenida fue de 9 años, mientras que en “sauce americano” la zona de transición encontrada fue el rango de edad de 10 a 15 años. Las edades seleccionadas son las que se presentan en mayor frecuencia en todas las variables y alturas analizadas.

Una vez determinada la edad de transición entre madera juvenil y madura, se prepararon las pulpas. Para la pulpa de madera juvenil se chipearon las rodajas de todas las alturas desde el centro (médula) hasta los 9 años de edad en álamo y hasta los 15 años en sauce. Con esos chips se elaboró la pulpa CMP de madera juvenil (100 % madera juvenil/0% madera madura). Para la pulpa de madera madura se chipeó el resto de las rodajas (a partir de los 9 años en álamo y 15 años en sauce hasta la corteza). Con este material se realizó la pulpa de madera madura (0 % madera juvenil/100% madera madura). Las pulpas elaboradas con madera juvenil y madura de álamo y madera madura de sauce fueron refinadas con molino PFI para poder alcanzar el °SR adecuado. Las revoluciones aplicadas se detallan en la tabla 4. 56 (*)

Las mezclas se formaron con el porcentaje correspondiente de pulpas de madera juvenil y de madera madura: 25:75 % MJ/MM; 50:50 % MJ/MM y 75:25 % MJ/MM. Los valores de drenabilidad obtenidos para cada una de las mezclas se presentan en la tabla 4.56:

4. Resultados y Discusión

	PULPAS	°SR	Rev.
ALAMO	MJ-MM(75-25)	46	0
	MJ-MM(25-75)	47	0
	MJ-MM(50-50)	47	0
	MJ	45	600*
	MM	43	1100*
SAUCE	MM-MJ(75-25)	47	0
	MM-MJ(25-75)	45	0
	MM-MJ(50-50)	45	0
	MM	46	120*
	MJ	44	0

4. III.A. Álamos

4. III.A.1. Propiedades físicas

La tabla 4.57 presenta los valores promedios de los ensayos físicos realizados sobre las pulpas de álamo.

MEZCLAS (% MJ/MM)	ESPESOR [mm]	VOLUMEN ESPECIFICO [cm ³ /g]	DENSIDAD [g/cm ³]
0-100	0,15	2,37	0,42
25-75	0,16	2,47	0,40
50-50	0,15	2,37	0,42
75-25	0,14	2,28	0,43
100-0	0,12	1,98	0,50

4. III.A.2. Propiedades mecánicas

Los valores promedio obtenidos en los ensayos mecánicos de las pulpas de álamo se presentan en la tabla 4.58.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.58: Valores de ensayos de propiedades mecánicas en álamo.						
MEZCLAS (% MJ/MM)	RASGADO [mN m ² /g]	TRACCIÓN [N m/gr]	ELONGACIÓN %	TEA [J/m ²]	ÍNDICE TEA [J/g]	RES. AL AIRE [s]
0-100	3,23	22,61	1,09	9,90	0,15	9,11
25-75	3,28	25,40	1,19	12,4	0,19	10,13
50-50	4,16	26,74	1,23	13,3	0,20	13,12
75-25	3,96	31,58	1,31	16,0	0,27	21,53
100-0	4,40	35,61	1,40	20,7	0,32	61,96

4. III.A.3. Propiedades ópticas

Los resultados de los ensayos ópticos (valores promedios) realizados sobre las pulpas de álamo se presentan en la tabla 4.59.

4. Resultados y Discusión

MEZCLAS (%MJ/MM)	OPACIDAD %	k (Coef. Abs.) [m ² /kg]	s (Coef. Disp.) [m ² /kg]	BLANCURA ISO [%]
0-100	94,40	4,21	41,01	44,97
25-75	94,50	3,72	43,37	49,06
50-50	94,80	4,16	42,45	46,53
75-25	93,50	4,33	35,03	41,02
100-0	93,30	3,30	42,31	50,80

4. III.A.4. Análisis de varianza en Álamos

Tracción

De acuerdo al análisis de grupos homogéneos (tabla 4.60), la mezcla 25% de MJ no presenta diferencia significativa con la de 0 % MJ y la de 50 % MJ, mientras que el resto de las mezclas difieren significativamente entre si.

Mezclas (%MJ/MM)	Tracción [N m/gr]
0 - 100	22,56 a *
25 - 75	25,30 ab
50 - 50	26,89 b
75 - 25	31,48 c
100 - 0	35,63 d

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

4. Resultados y Discusión

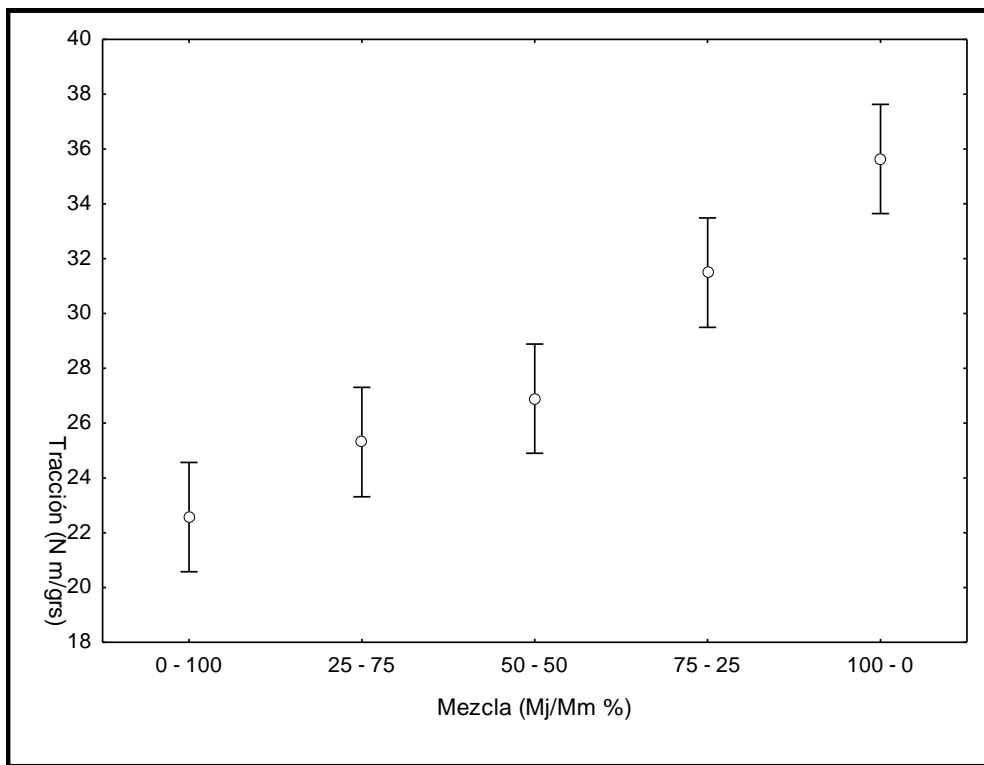


Figura 4.39: Variación de los valores promedio de tracción por tipo de mezcla en álamo.

La resistencia a la tracción aumenta a medida que el porcentaje de madera juvenil se incrementa en las mezclas (figura 4.39; 4.55).

Rasgado

De acuerdo a la tabla 4.61 y la figura 4.40, se distinguen 3 grupos homogéneos, el primero conformado por las mezcla de 0 y 25 % de madera juvenil, el segundo se corresponde con las mezclas de 50 y 100 % de madera juvenil y el tercer grupo constituido por la mezcla de 75 % de madera juvenil. Asimismo los valores de resistencia al rasgado aumentan al aumentar el porcentaje de madera juvenil en las mezclas estudiadas (Figura 4.55).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.61: Valores de rasgado en pulpas de álamo.

Mezclas (MJ/MM)	Rasgado [mN m ² /g]
0 - 100	3,26 a *
25 - 75	3,28 a
50 - 50	4,16 b
75 - 25	3,95 ab
100 - 0	4,44 b

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

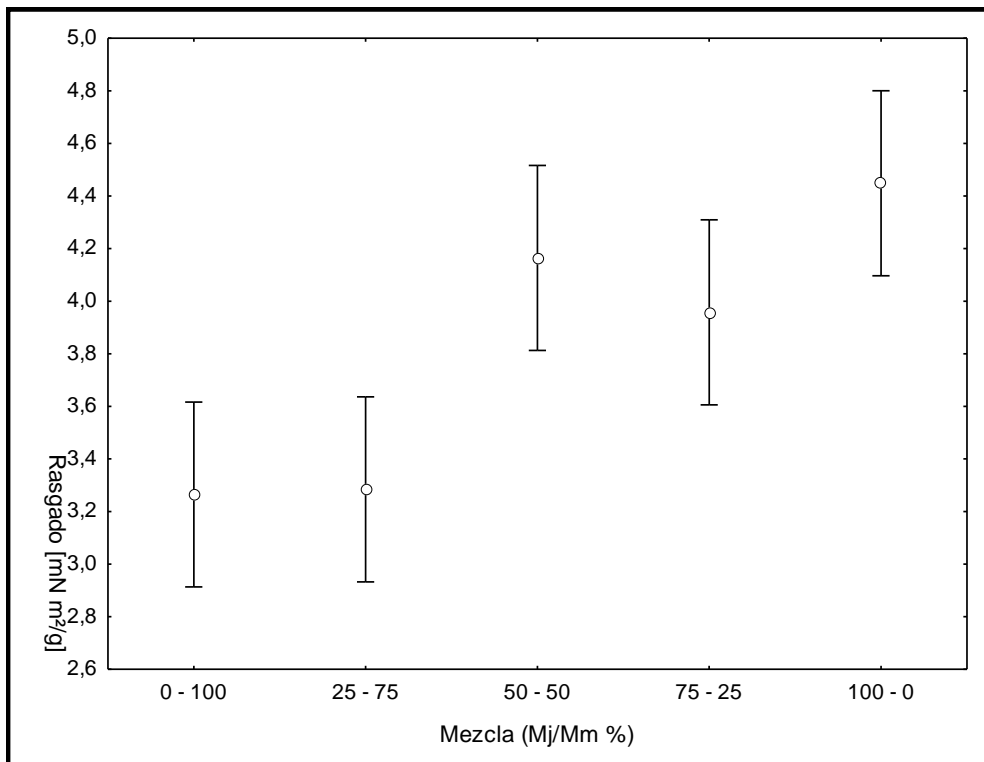


Figura 4.40: Variación de la resistencia al rasgado por tipo de mezcla en álamo.

Elongación

Las principales diferencias significativas (tabla 4.62) se encuentran entre las mezclas de 0 % y 100 % de madera juvenil, el resto de los valores de elongación (mezclas 25%, 50 % y 75% de madera juvenil) conforman un grupo homogéneo que se relaciona tanto con el primero como con el segundo.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.62: Valores de elongación en pulpa de álamo.

Mezclas % (MJ/MM)	Elongación (%)
0 - 100	1,09 a *
25 - 75	1,19 ab
50 - 50	1,24 abc
75 - 25	1,30 bc
100 - 0	1,39 c

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

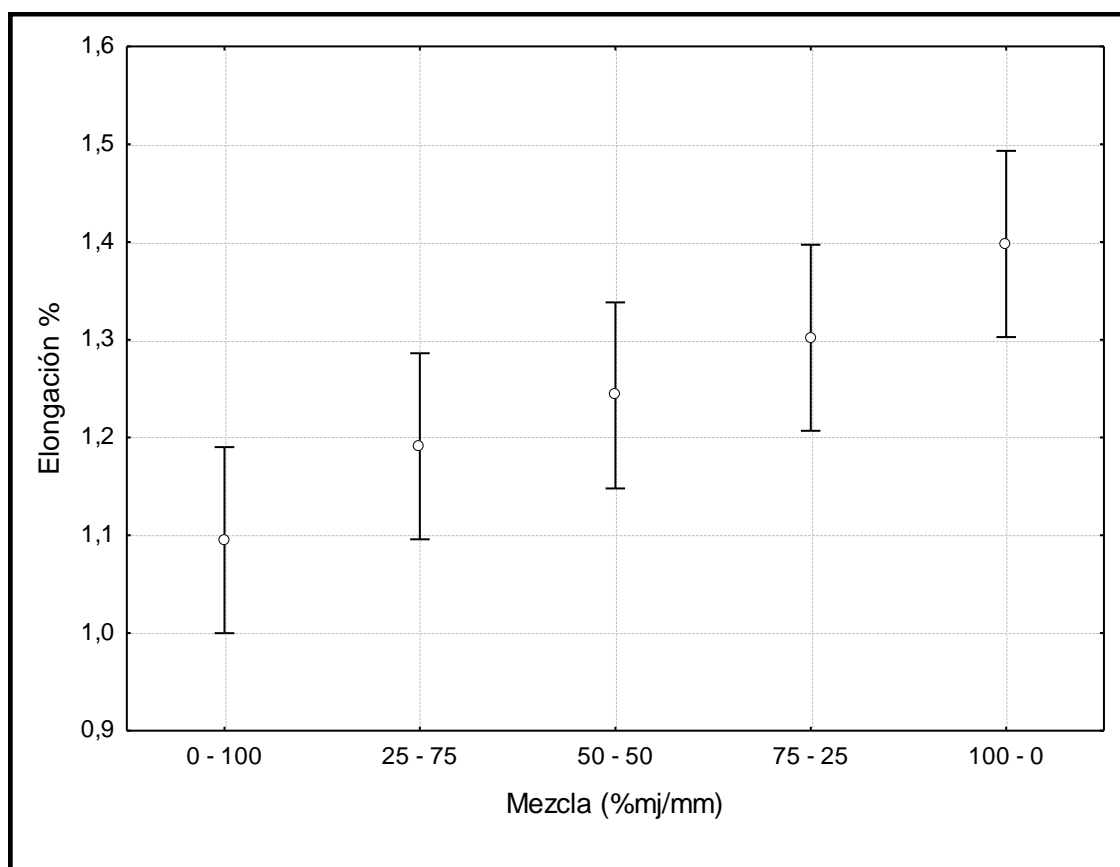


Figura 4.41: Variación del porcentaje de elongación en relación a la mezcla usada en álamo.

El porcentaje de elongación se incrementa a medida que aumenta el contenido de madera juvenil en las mezclas analizadas (figura 4.41)

4. Resultados y Discusión

TEA

De acuerdo a la tabla 4.63, hay dos grupos de valores que presentan diferencias entre si. El primer grupo estaría representado por las mezclas 0 % 25 % y 50 % de madera juvenil y el segundo por las mezclas de 75 % y 100 % de madera juvenil.

Tabla 4.63: Valores de TEA en mezclas de pulpa de álamo.	
Mezclas % (MJ/MM)	TEA [J/m ²]
0 - 100	0,14 a *
25 - 75	0,19 ab
50 - 50	0,21 ab
75 - 25	0,26 bc
100 - 0	0,32 c

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

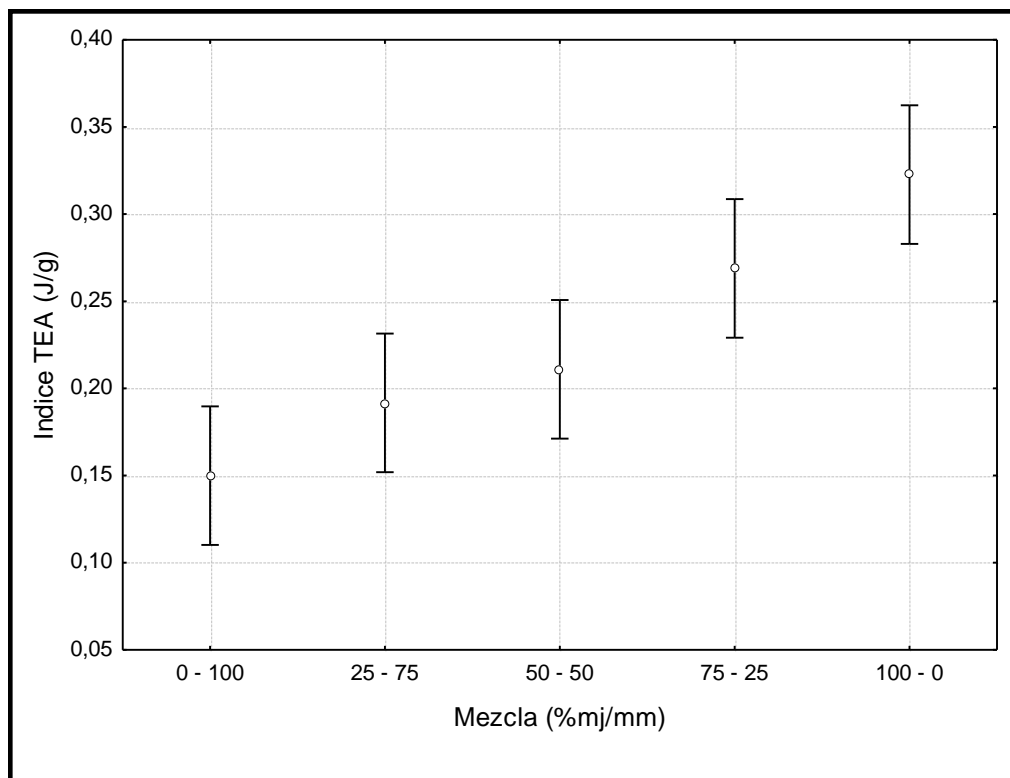


Figura 4.42: Variación del Índice TEA según tipo de pulpa utilizada en madera de álamo.

A medida que aumenta el porcentaje de madera juvenil en las mezclas, el valor del índice TEA se incrementa.

4. Resultados y Discusión

Resistencia al aire

Los valores de la resistencia al aire medidos en las diferentes mezclas presentan diferencias significativas entre sí (tabla 4.64).

Mezclas % (MJ/MM)	Resistencia al aire [s]
0 - 100	14,58 d*
25 - 75	12,61 cd
50 - 50	10,10 c
75 - 25	6,06 b
100 - 0	2,05 a

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

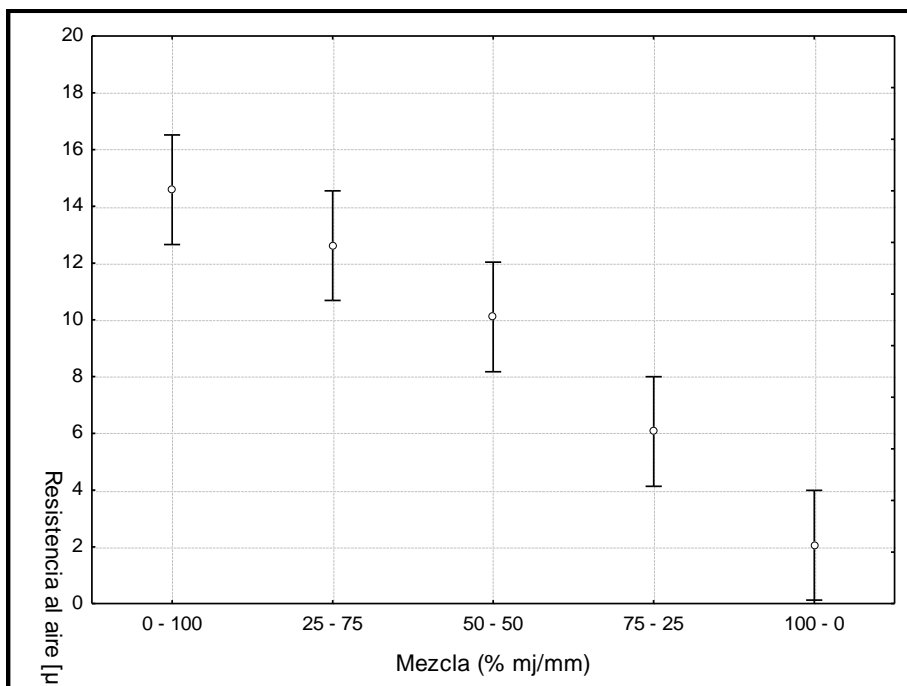


Figura 4.43: Variación de la Resistencia al aire según mezcla de pulpa en álamo.

La resistencia al aire, disminuye a medida que aumenta el contenido de madera juvenil en las mezclas estudiadas (figura 4.43).

4. Resultados y Discusión

Opacidad

El análisis de grupos homogéneos (tabla 4.65) permite separar los valores de opacidad en dos grupos, el primero constituido por las mezclas de 0 % y 100 % de madera juvenil y el segundo por las mezclas de 25%, 50 % y 75 % de madera juvenil.

Mezclas % (MJ/MM)	Opacidad (%)
0 - 100	93,30 a *
25 - 75	94,54 b
50 - 50	94,81 b
75 - 25	94,40 b
100 - 0	93,51 a

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

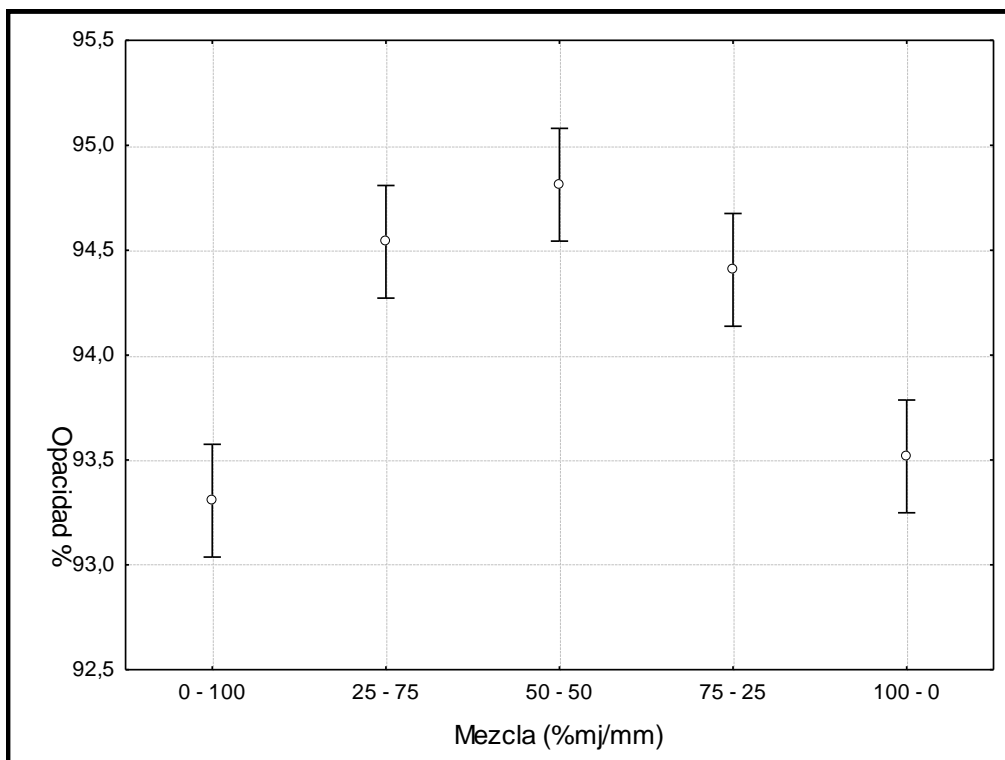


Figura 4.44: Variación de la opacidad según tipo de mezcla de pulpas en álamo.

4. Resultados y Discusión

De acuerdo a la figura 4.44 la opacidad aumenta de la mezcla de 0 % de madera juvenil (93,30 %) a la de 50 % de madera juvenil (94,81 %) y luego disminuye a medida que incrementa el porcentaje de madera juvenil en las mezclas (93,51 %).

Volumen específico (Bulk)

Las mezclas analizadas presentan diferencias significativas entre si, a excepción de las mezclas de 0% y 75 % que conforman un grupo homogéneo (tabla 4.66).

Tabla 4.66: Valores de Bulk en mezclas de pulpas de álamo.	
Mezclas % (MJ/MM)	Bulk (cm ³ /g)
0 - 100	2,38 b*
25 - 75	2,47 c
50 - 50	2,38 b
75 - 25	2,55 d
100 - 0	1,98 a

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

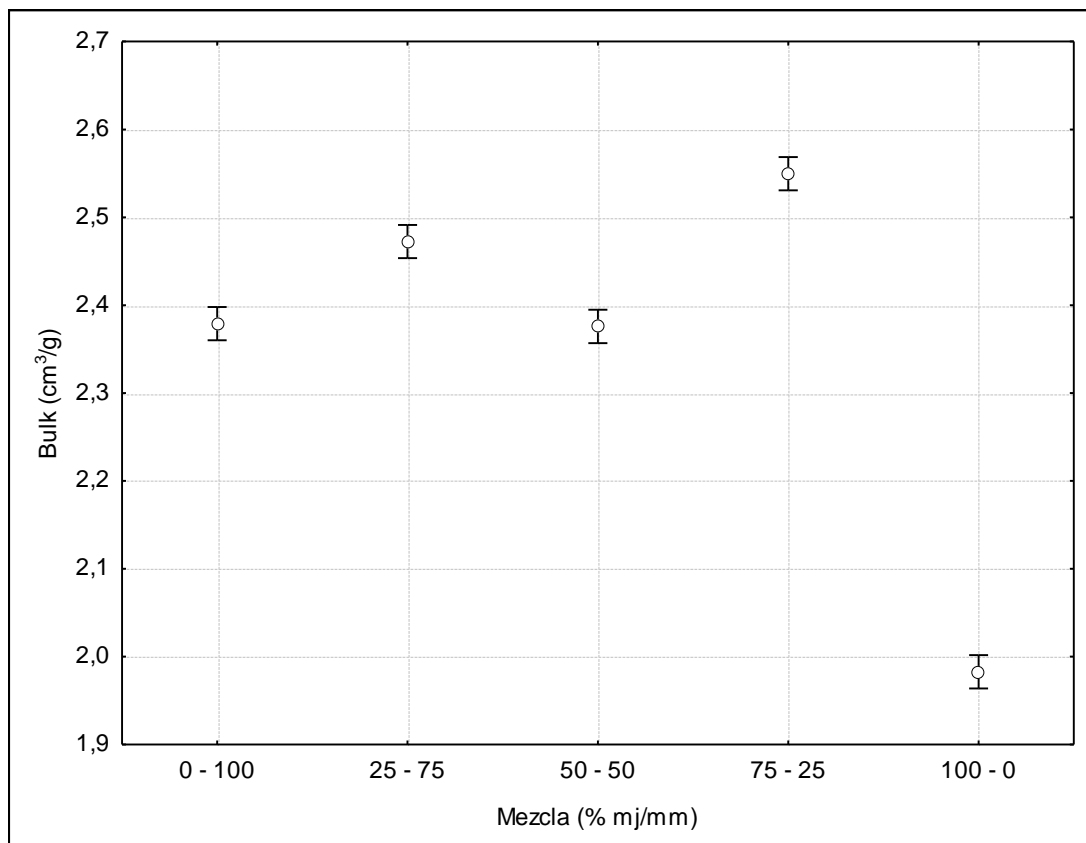


Figura 4.45. Variación del bulk según tipo de mezcla de pulpas en álamo.

4. Resultados y Discusión

Los valores de bulk varían en el rango 2,35-2,55 cm³/g, salvo el de 100% de MJ que es menor de 2,00 cm³/g.

Z span

Las principales diferencias significativas se producen entre las mezclas de 25 % y 75 % de madera juvenil (Tabla 4.67).

Tabla 4.67: Valores de Zspan para mezclas de pulpas en álamo.	
Mezclas % (MJ/MM)	Z span (N)
0 - 100	49,39 ab*
25 - 75	48,99 a
50 - 50	56,75 bc
75 - 25	59,66 c
100 - 0	49,51 ab

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey.

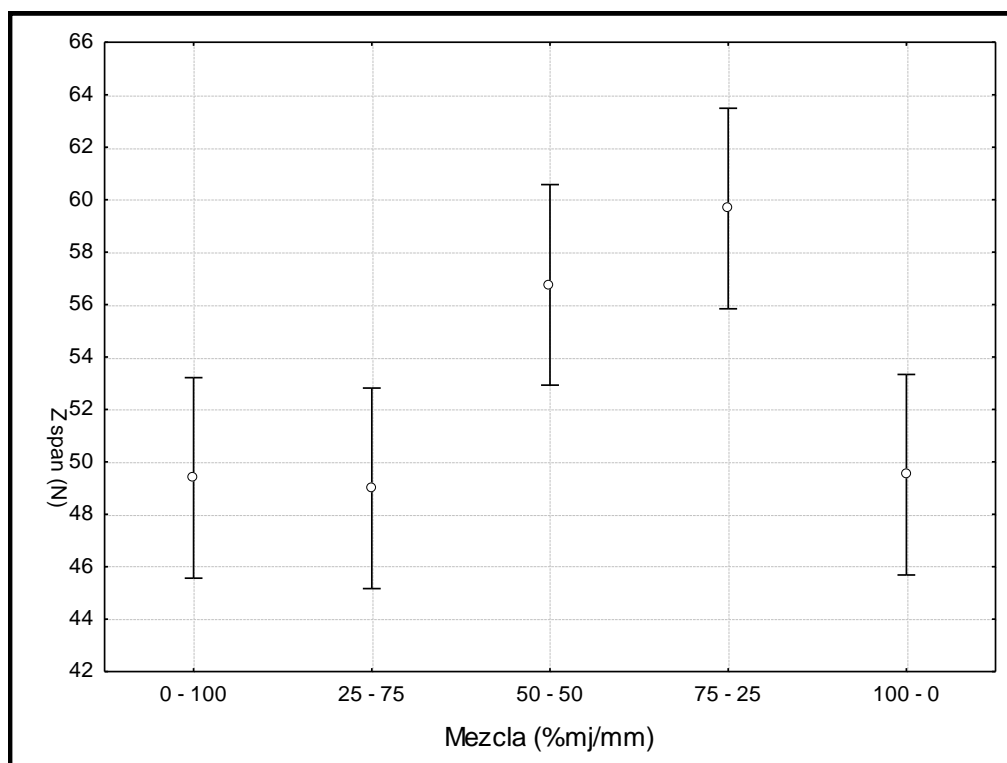


Figura 4.46. Variación del Z span según tipo de mezcla de pulpas en álamo.

4. Resultados y Discusión

Los valores de Z span aumentan a medida que se incrementa el porcentaje de madera juvenil en las muestras hasta que el mismo es de 75 % (59,66 N, valor máximo) y luego disminuye en la mezcla de 100 % de madera juvenil (49,51 N) (Figura 4.55).

4. III.B.Sauces

4. III.B.1.Propiedades Físicas

La tabla 4.68 presenta los valores promedios de los ensayos físicos realizados sobre las pulpas de sauce.

Tabla 4.68: Valores de ensayos de propiedades físicas en sauce.			
MEZCLAS (% MJ/MM)	ESPEJOR [mm]	VOLUMEN ESPECIFICO [cm ³ /g]	DENSIDAD [g/cm ³]
0-100	0,17	2,45	0,40
25-75	0,17	2,48	0,40
50-50	0,16	2,41	0,41
75-25	0,15	2,30	0,43
100-0	0,15	2,33	0,42

4. III.B.2.Propiedades mecánicas

Los resultados de los ensayos mecánicos (valores promedio) realizados sobre las pulpas de sauce se presentan en la tabla 4.69.

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.69: Valores de ensayos de propiedades mecánicas en sauce.

MEZCLAS (% MJ/MM)	RASGADO [mN m²/g]	TRACCIÓN [N m/gr]	ELONGACIÓN %	TEA [J/m²]	ÍNDICE TEA [J/g]	RES. AL AIRE [s]
0-100	3,47	17,80	1,12	8,42	0,12	7,82
25-75	3,36	17,36	1,03	7,70	0,11	5,69
50-50	3,97	18,68	1,03	8,38	0,11	6,68
75-25	4,53	20,21	1,08	9,35	0,13	9,83
100-0	4,37	20,22	1,26	10,91	0,16	9,58

4. III.B.3. Propiedades Ópticas

Los valores promedio obtenidos en los ensayos ópticos de las pulpas de sauce se presentan en la tabla 4.70.

Tabla 4.70: Valores de ensayos de propiedades ópticas en sauce.

MEZCLAS (% MJ/MM)	OPACIDAD %	k (Coef. Abs.) [m²/kg]	s (Coef. Disp.) [m²/kg]	Blancura ISO [%]
0-100	99,30	13,71	36,75	31,58
25-75	99,60	18,00	33,54	26,66
50-50	99,42	15,72	34,03	28,74
75-25	99,75	18,13	31,30	25,26
100-0	99,53	18,38	26,98	23,53

4. Resultados y Discusión

4. III.B.4. Análisis de varianza en Sauces

Tracción

De acuerdo a la tabla 4.71 no hay diferencias significativas entre las mezclas de 0%MJ, 25 %MJ y 50 %MJ, mientras que si hay diferencias entre estas mezclas y las de 75% MJ y 100 %MJ.

Tabla 4.71: Valores de tracción en mezcla de pulpas en sauce.	
Mezclas (%MJ/MM)	Tracción [N m/gr]
0-100	17,81 a *
25-75	17,27 a
50-50	18,64 ab
75-25	20,20 b
100-0	20,22 b

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey.

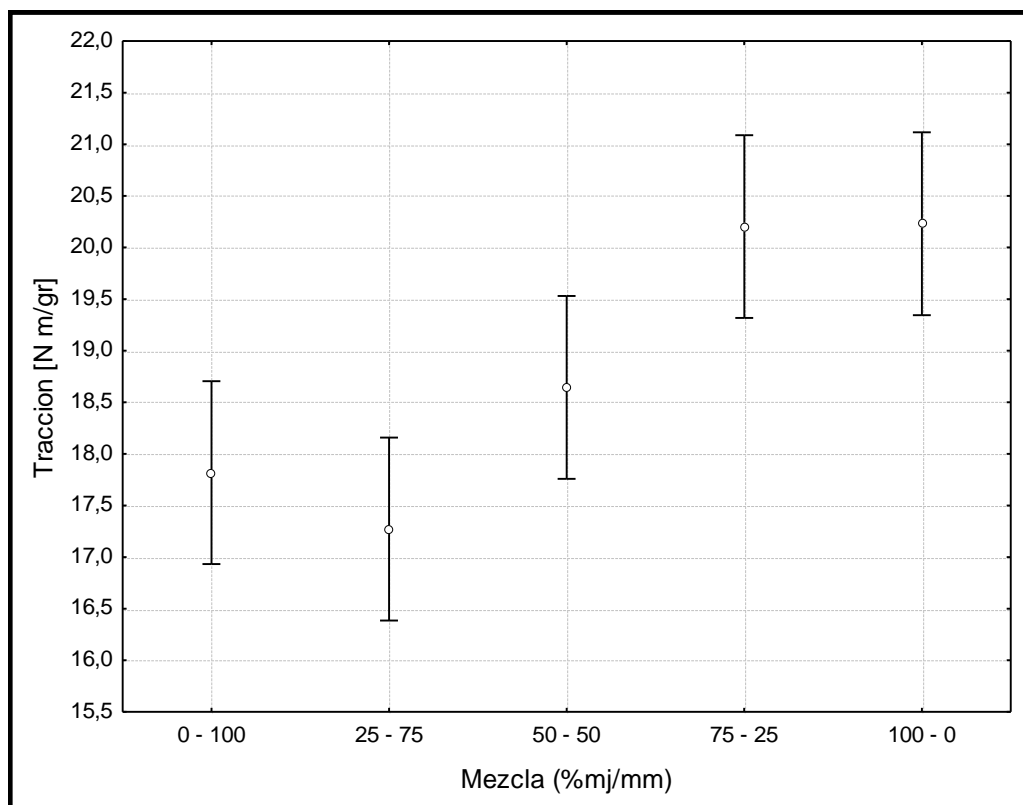


Figura 4.47: Variación de la resistencia a la tracción según mezcla de pulpa en sauce.

4. Resultados y Discusión

La resistencia a la tracción aumenta a medida que el porcentaje de madera juvenil se incrementa en las mezclas (figura 4.47y 4.55).

Rasgado

Los valores de rasgado de las mezclas de 0 a 50 % de madera juvenil no presentan diferencias significativas entre si, pero si se diferencian con los valores obtenidos en las mezclas de 75 a 100 % de madera juvenil (tabla 4.72).

Tabla 4.72: Valores de rasgado en mezclas de pulpas de sauce.	
Mezclas (% MJ/MM)	Rasgado [mN m ² /g]
0-100	3,44 a *
25-75	3,39 a
50-50	3,94 ab
75-25	4,50 b
100-0	4,52 b

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey.

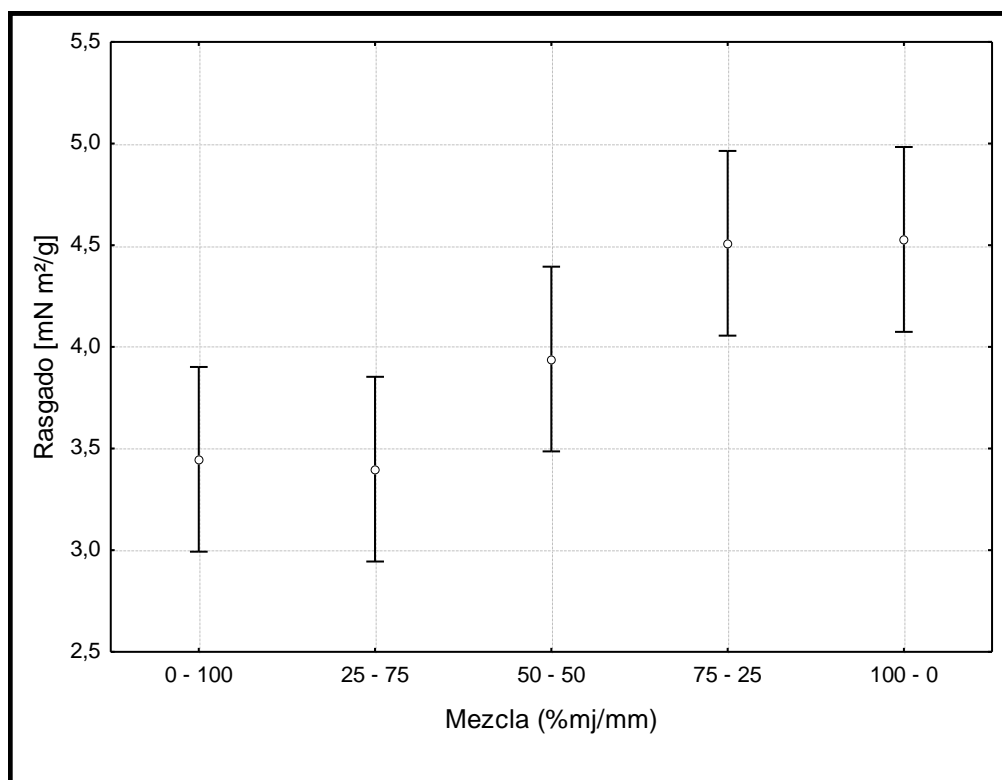


Figura 4.48: Variación de la resistencia al rasgado según mezcla de pulpa en sauce.

4. Resultados y Discusión

La resistencia al rasgado aumenta a medida que el porcentaje de madera juvenil es mayor en las mezclas de pulpas (figura 4.48 y 4.55).

Elongación

La tabla 4.73 presenta la variación de la elongación de acuerdo al porcentaje de madera juvenil y madura que conforman las mezclas de pulpas.

Mezclas (%MJ/MM)	Elongación (%)
0-100	1,11 a*
25-75	1,02 a
50-50	1,03 a
75-25	1,08 a
100-0	1,26 b

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

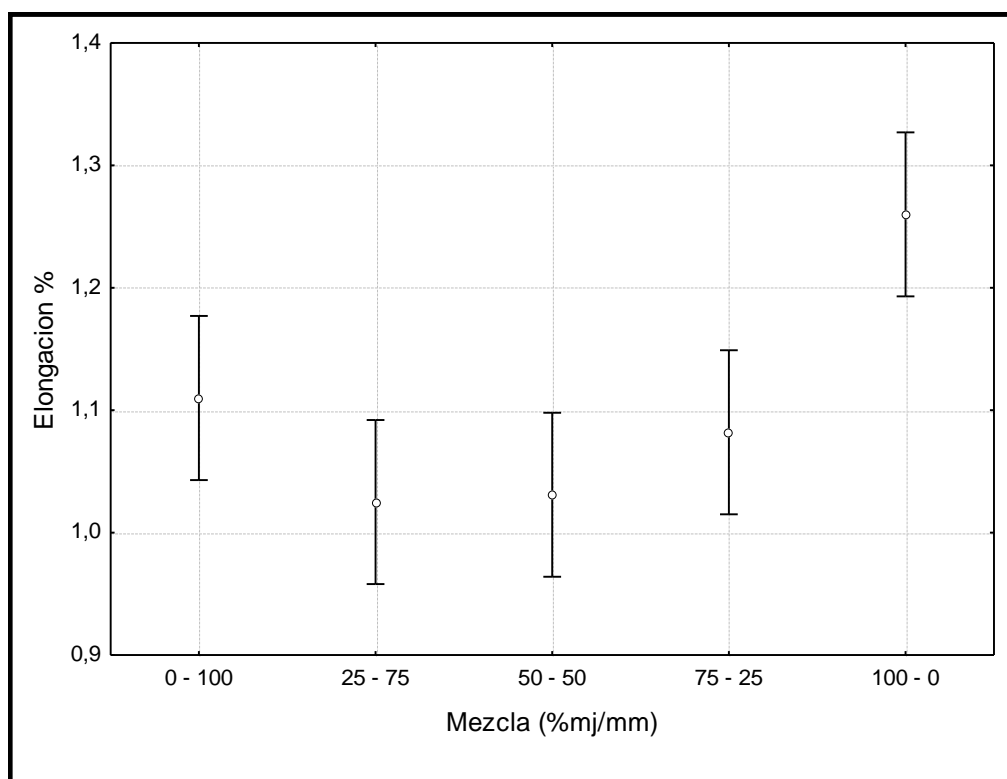


Figura 4.49: Variación del porcentaje de elongación de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.

4. Resultados y Discusión

De acuerdo a la tabla 4.73 los valores de las mezclas de 0 a 75 % de madera juvenil no presentan diferencias significativas entre sí, pero si se diferencian de la mezcla de 100 % de madera juvenil.

La figura 4.49 presenta una disminución de los valores de elongación entre las mezclas de 0 a 25 % de madera juvenil y luego un aumento hasta alcanzar el valor máximo en la mezcla de 100 % de madera juvenil (1,26%)

TEA

Los valores de TEA presentan dos grupos homogéneos de acuerdo al Test de Tukey (tabla 4.74), el primero conformado por las mezclas de 0 a 50 % de madera juvenil y el segundo por las mezclas de 75 y 100 % de madera juvenil.

Mezclas (% MJ/MM)	TEA [J/m ²]
0-100	0,12 a *
25-75	0,10 a
50-50	0,11 a
75-25	0,13 ab
100-0	0,16 b

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

4. Resultados y Discusión

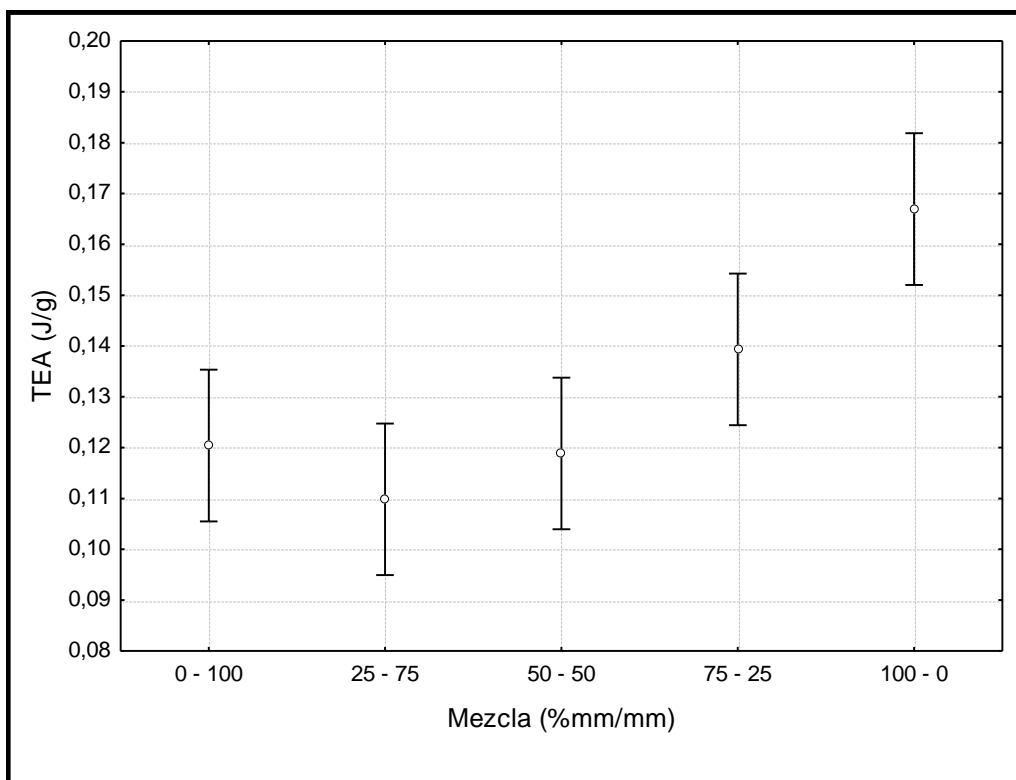


Figura 4. 50: Variación del Índice TEA de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.

El índice TEA (J/g) presenta un aumento de sus valores a medida que se incrementa el porcentaje de madera juvenil en las mezclas de pulpas

Resistencia al aire

Los valores la Resistencia al aire de las mezclas de 0%, 75 % y 100 % no presentan diferencias significativas entre si (tabla 4.75). Las mezclas de 25 y 50 % de madera juvenil se diferencian significativamente con las anteriores.

Tabla 4.75: Valores de la Resistencia al aire en mezclas de pulpas de sauce.	
Mezclas (% MJ/MM)	Resistencia al aire (s)
0-100	15,51 a*
25-75	23,47 b
50-50	19,36 ab
75-25	13,29 a
100-0	13,87 a

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

4. Resultados y Discusión

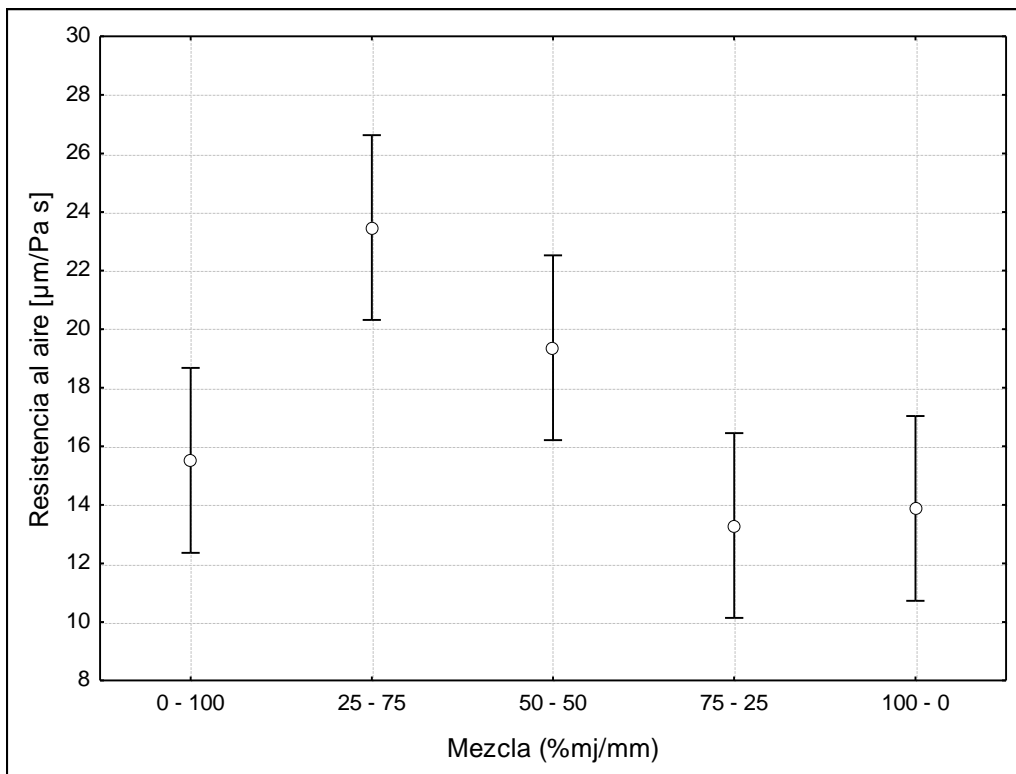


Figura 4.51: Variación de la resistencia al aire de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.

La Resistencia al aire aumenta entre las mezclas de 0 y 25 % de madera juvenil (valor máximo 23,47 $\mu\text{m}/\text{Pa s}$) y luego disminuye a medida que aumentamos el porcentaje de madera juvenil en las mezclas de pulpas.

Opacidad

Las principales diferencias significativas (tabla 4.76) se encuentran entre las mezclas de 0 % y 100 % de madera juvenil, el resto de los valores de opacidad (mezclas 25%, 50 % y 75% de madera juvenil) conforman un grupo homogéneo que se relaciona tanto con el primero como con el segundo.

4. Resultados y Discusión

Mezclas (MJ/MM)	Opacidad (%)
0-100	99,27 a *
25-75	99,36 ab
50-50	99,63 ab
75-25	99,69 b
100-0	99,52 ab

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

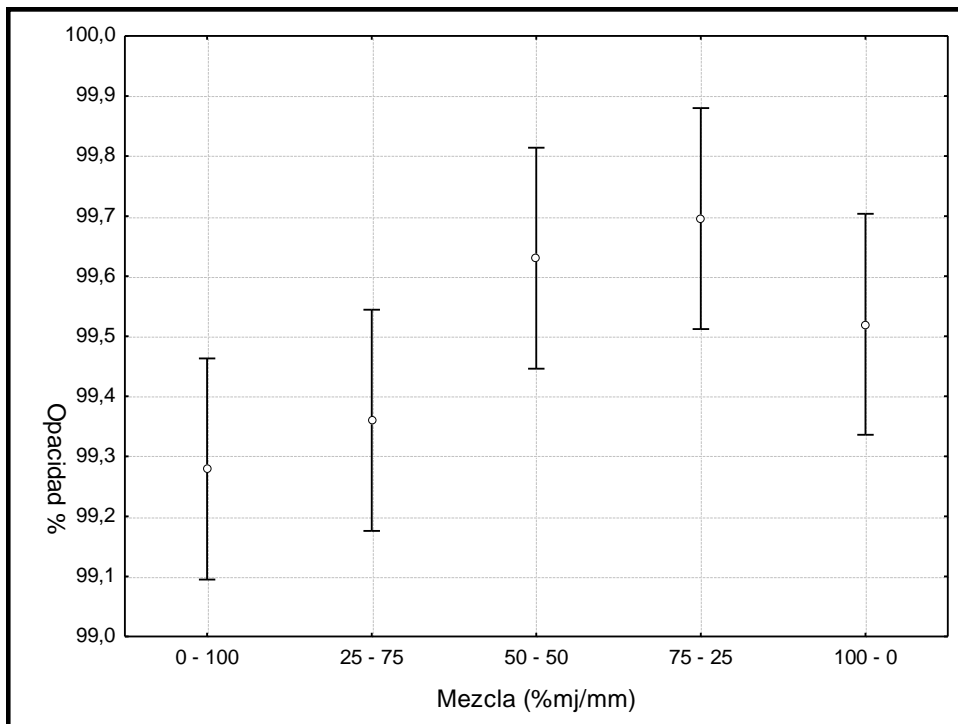


Figura 4.52: Variación de la opacidad de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.

De acuerdo a la figura 4.52 la opacidad aumenta hasta la mezcla de 75 % de madera juvenil y luego disminuye (100 % de madera juvenil).

Volumen específico (Bulk)

De acuerdo a la tabla 4.77 las principales diferencias significativas se presentan entre las primeras tres mezclas (0 %; 25 % y 50 %) y las dos últimas (75 % y 100%).

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.77: Valores de Bulk en mezclas de pulpas de sauce.

Mezclas (MJ/MM)	Bulk (cm ³ /g)
0-100	2,45 bc*
25-75	2,49 c
50-50	2,41 b
75-25	2,31 a
100-0	2,33 a

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey

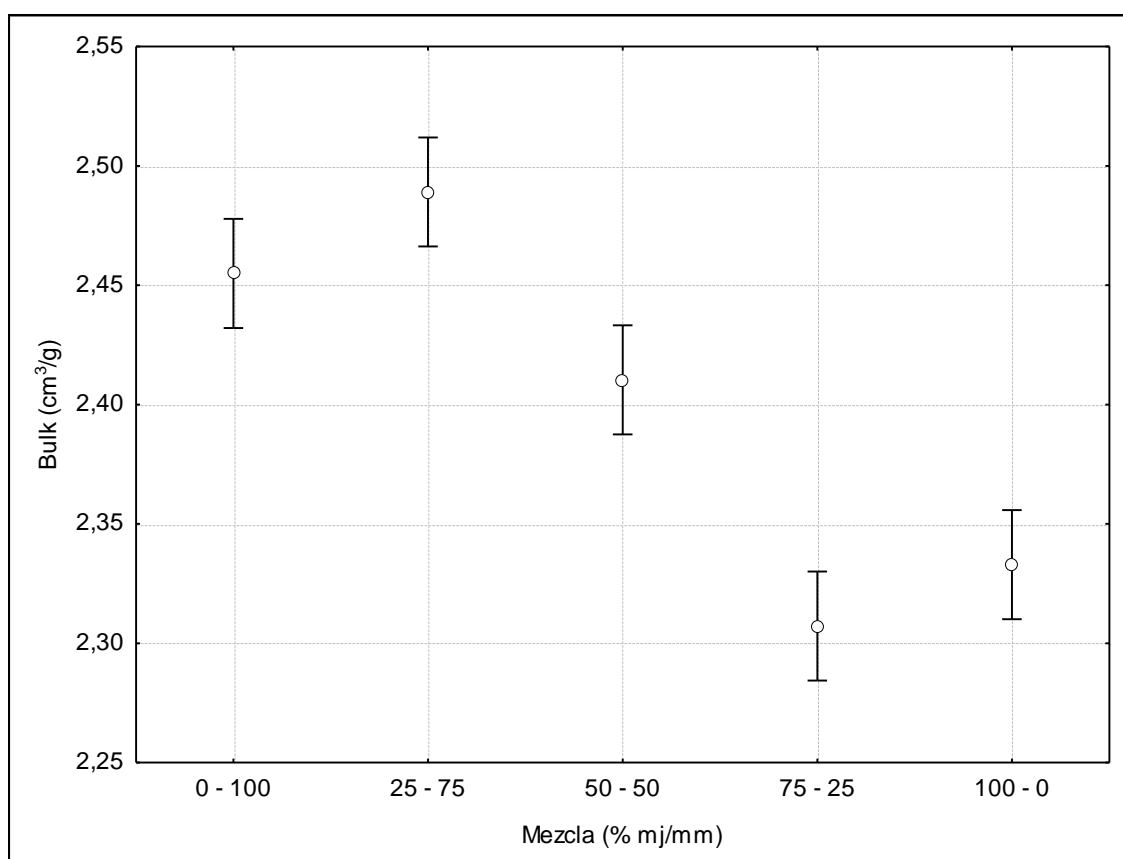


Figura 4.53: Variación del Bulk de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.

La figura 4.53 presenta un valor máximo de bulk (2,49 cm³/g) en la mezcla de 25 % de madera juvenil y luego una disminución de sus valores a medida que aumentamos el porcentaje de madera juvenil en las mezclas.

4. Resultados y Discusión

Z span

Los valores de Z span se pueden agrupar en dos grupos homogéneos de acuerdo al test de Tukey (tabla 4.78) el primero conformado por la mezcla de 0 % de madera juvenil y el segundo por el resto de las mezclas (25 a 100 % de madera juvenil).

Mezclas (MJ/MM)	Z span (N)
0-100	43,25 a *
25-75	50,76 b
50-50	51,27 b
75-25	51,12 b
100-0	49,33 b

*Las letras se leen verticalmente e indican diferencias significativas (0,05). Test de Tukey.

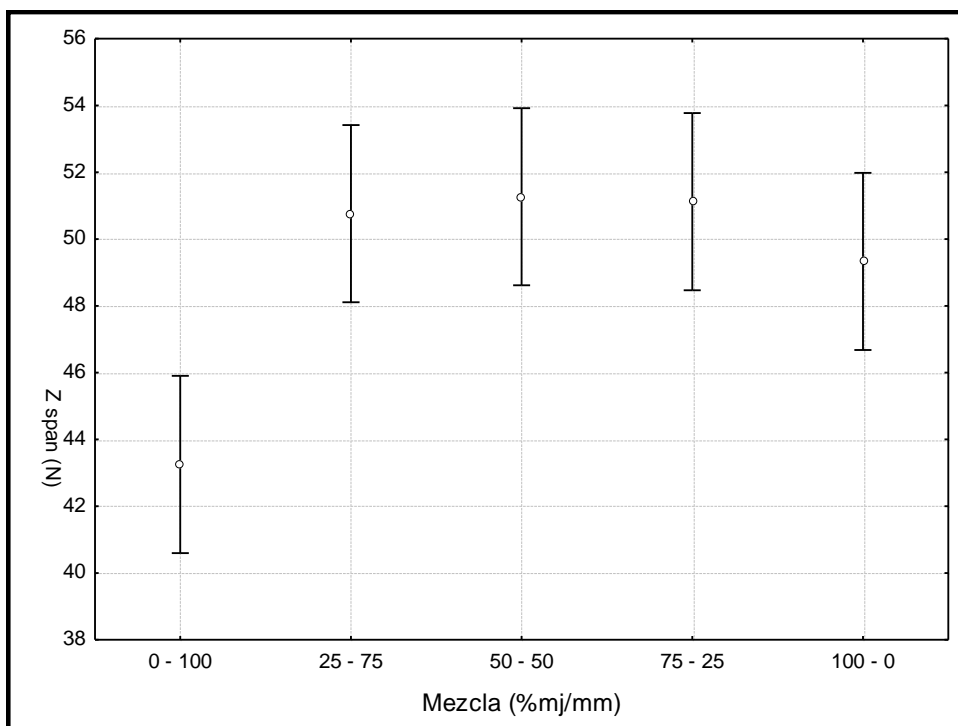


Figura 4.54. Variación del Z span de acuerdo al tipo de mezcla de pulpa en sauce.

De acuerdo a la figura 4.54 los valores de Z span aumentan entre las mezclas de 0 a 25 % de madera juvenil y luego se mantienen constantes (Figura 4.55).

4. Resultados y Discusión

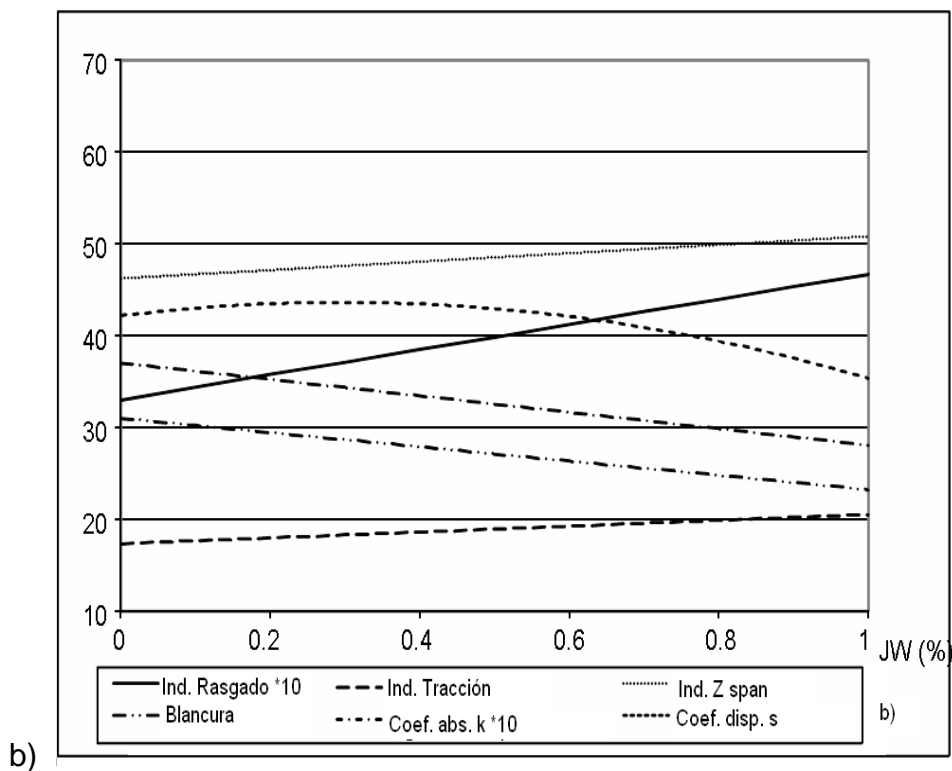
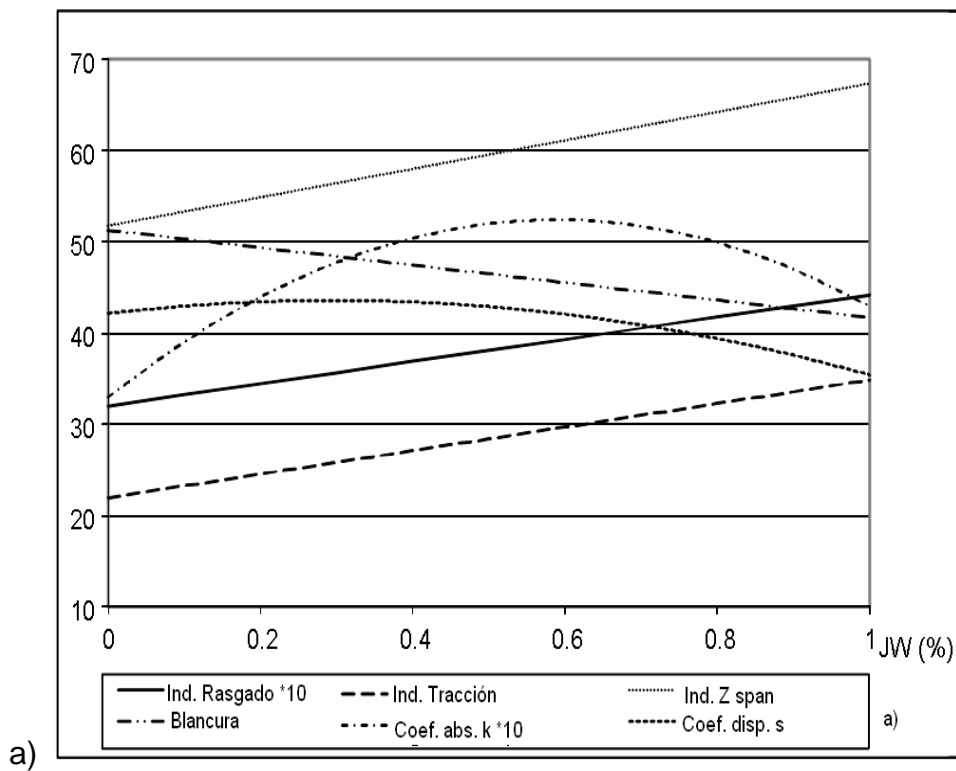


Figura 4.55: Representación de las propiedades físicas según la proporción de madera juvenil en la región de mezcla a) álamo y b) sauce

4. III.C. Análisis Estadísticos sobre mezclas de pulpas

4. III.C.a. Correlaciones y Regresión Múltiple

Los análisis de correlación realizados entre los resultados de los ensayos físicos y mecánicos de las pulpas y las propiedades anatómicas en álamo y en sauce, considerando solamente madera juvenil y madera madura se presentan en las tablas 4.79 y 4.80 respectivamente.

Tabla 4.79: Correlaciones de las propiedades físicas (densidad básica), anatómicas y químicas y ensayos físicos y mecánicos en pulpas entre madera juvenil y madura en álamo.

Propiedades	R2	p
Densidad y Longitud de fibra	0,78	0,007
Densidad y Espesor	0,66	0,038
Densidad y Hemicelulosas	-0,74	0,015
Densidad y Celulosa	0,76	0,010
Densidad y Tracción	0,71	0,021
Densidad y Rasgado	0,77	0,009
Densidad y Resistencia al paso del aire	0,85	0,002
Densidad y Z span	0,87	0,001
Longitud de fibra y Extractivos	-0,63	0,049
Longitud de fibra y Tracción	0,66	0,037
Longitud de fibra y Rasgado	0,78	0,008
Longitud de fibra y Resistencia al paso del aire	0,87	0,001
Longitud de fibra y Z span	0,90	0,000
Ancho de fibra y Lumen	0,72	0,018
Ancho de fibra y Diámetro de vasos	0,88	0,001
Lumen y Diámetro de vasos	0,79	0,007
Lumen y Frecuencia de vasos	-0,72	0,020
Espesor y Hemicelulosas	-0,69	0,028
Espesor y Rasgado	0,69	0,028
Espesor y Z span	0,79	0,007
Lignina y Hemicelulosas	0,67	0,034
Hemicelulosas y Celulosa	-0,85	0,002
Hemicelulosas y Extractivos	0,76	0,011

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.80: Correlaciones de las propiedades físicas (densidad básica), anatómicas y químicas y ensayos físicos y mecánicos en pulpas entre madera juvenil y madura en sauce.

Propiedades	R2	p
Densidad y Frecuencia de vasos	-0,67	0,035
Densidad y Opacidad	-0,67	0,035
Densidad y Z span	-0,65	0,041
Ancho de fibra y Lumen	0,73	0,016
Ancho de fibra y Resistencia al paso del aire	0,69	0,029
Ancho de fibra y Z span	-0,70	0,025
Espesor y Lignina	-0,63	0,050
Frecuencia de vasos y TEA	0,69	0,027
Frecuencia de vasos y Elongación	0,65	0,043
Hemicelulosas y Rasgado	-0,88	0,001
Hemicelulosas y Elongación	-0,80	0,005
Hemicelulosas y Resistencia al paso del aire	0,75	0,012

Los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las pulpas, en ambas especies, pueden explicarse parcialmente por algunas propiedades de la madera. El Índice de tracción se correlacionó positivamente con el ancho de fibra y el diámetro de vasos (ambos con $p < 0.005$), probablemente debido a que la flexibilidad de estos componentes celulares favorece el colapso incrementando el enlace interfibrilar (bonding). La resistencia al paso del aire se correlacionó positivamente con la densidad básica y longitud de fibra (ambos con $p < 0.000$), ya que una mayor rigidez de la madera produce más finos en un pulpado quimimecánico, cerrando la trama de la hoja. Mientras que la Opacidad se correlacionó positivamente con la densidad básica, longitud de fibra y espesor de pared y negativamente con el ancho de fibra y diámetro de vasos (todos con $p < 0.000$). Asimismo, la composición química no tuvo gran influencia sobre las propiedades físicas de las pulpas quimimecánicas estudiadas. La Opacidad se correlacionó positivamente con el contenido de Extractivos y negativamente con el contenido de Celulosa ($p = 0.001$). El contenido de extractivos disminuyó ligeramente la blancura e incrementó el coeficiente de absorción de las pulpas.

Asimismo, se realizaron análisis de regresión múltiple con los datos de las propiedades anatómicas ponderadas por el porcentaje de madera juvenil y madura y los datos de los ensayos físicos y mecánicos de las mezclas de pulpas

4. Resultados y Discusión

analizadas. Para ambas especies las ecuaciones de regresión obtenidas no dieron resultados significativos (Anexo).

4. III.C.b. Varianza Multifactorial

Se realizó un análisis de varianza multifactorial para comparar las respuestas de las pulpas de sauce y álamo, encontrándose diferencias significativas entre ambas especies. Los factores considerados fueron el género (*Populus* y *Salix*) y la proporción de madera juvenil y madura. Los valores promedio de índice TEA, Elongación, Tracción, Zero span, Blancura y coeficiente de dispersión (s) fueron mayores en las pulpas de sauce. Por el contrario, el Bulk, la Resistencia al paso del aire y el Índice de rasgado no presentaron diferencias significativas.

Al considerar las pulpas de ambas especies, la proporción de madera juvenil y madura no afectó la Resistencia al paso del aire, Opacidad y Coeficiente de absorción (k), pero produjo diferencias significativas en las propiedades mecánicas, mostrando una tendencia progresiva de aumento desde 0-100 a 100-0 (madera juvenil/madera madura). El Bulk, Blancura y Coeficiente de dispersión (s), mostraron un comportamiento contrario.

4. Resultados y Discusión

4. III.C.c. Diseño de mezclas: Optimización de las propiedades de las mezclas de pulpas.

Álamos

Las ecuaciones para el modelo matemático ajustado de cada propiedad para las mezclas de pulpas de madera juvenil y madura en álamo se presentan en la tabla 4.81.

Propiedades	Ecuación*	R ²
Bulk	$2,02*MJ + 2,38*MM + 0,98*MJ*MM$	99
Resistencia al paso del aire	$57,79*MJ + 11,27*MM - 87,33*MJ*MM$	97
Índice de Rasgado	$4,41*MJ + 3,20*MM$	96
Índice de Tracción	$34,78*MJ + 21,94*MM$	82
Elongación	$1,39*MJ + 1,09*MM$	99
Índice TEA	$0,31*MJ + 0,14*MM$	96
Índice Z span	$67,27*MJ + 51,72*MM$	97
Blancura	$41,70*MJ + 51,18*MM$	98
Opacidad	$93,46*MJ + 93,34*MM + 5,60*MJ*MM$	99
Coefficiente de absorción k	$4,29*MJ + 3,29*MM + 1,02*MJ*MM$	99
Coefficiente de dispersión s	$35,34*MJ + 42,10*MM + 16,57*MJ*MM$	97

* MJ y MM varían entre 0 y 1.

El modelo matemático presentado en la tabla anterior permite buscar matemáticamente una combinación de parámetros para la cual las respuestas deseadas dan valores óptimos, como se muestra en la tabla 4.82:

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.82: Combinación de proporciones MJ/ MM que optimizan las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de álamo.				
Propiedad	Objetivo	Valor Optimo	MJ (%)	MM (%)
Bulk	Maximizar	2,48	32	68
Resistencia al paso del aire	Minimizar	6,50	77	23
Índice de Rasgado	Maximizar	4,41	100	0
Índice de Tracción	Maximizar	34,8	100	0
Elongación	Maximizar	1,39	100	0
Índice TEA	Maximizar	0,31	100	0
Índice Z span	Maximizar	64,3	100	0
Blancura	Maximizar	51,2	0	100
Opacidad	Maximizar	94,8	51	49
Coefficiente de absorción k	Minimizar	3,29	0	100
Coefficiente de dispersión s	Maximizar	43,5	30	70

Los valores óptimos para los Índices de Tracción y Rasgado son comparables con los obtenidos para pulpas quimitemomecánicas de clones de álamo de 15 años de edad provenientes de Quebec (Kwei N. et al, 2000).

Para la optimización de un enfoque multirespuesta, la función de Deseabilidad es la solución más utilizada. Su objetivo es optimizar las múltiples ecuaciones, trasladar las funciones a una escala común (0,1) y combinarlos usando la media geométrica.

La función de Deseabilidad para las propiedades mecánicas: Índice de tracción, Elongación, Índice de Rasgado, Z span e Índice TEA, alcanzó un valor de 0,99 cuando la proporción de MJ/MM fue de 100 %. Por el contrario, para las propiedades ópticas (maximizando la Blancura, Opacidad y Coeficiente de dispersión y minimizando el Coeficiente de absorción), el mayor valor (0,82) para la función de Deseabilidad se obtuvo cuando la proporción de MJ/MM fue de 13:87 %.

4. Resultados y Discusión

Sauces

Las ecuaciones para el modelo matemático ajustado de cada propiedad para las mezclas de pulpas de madera juvenil y madura en sauce se presentan en la tabla 4.83:

Tabla 4.83: Ecuaciones obtenidas para las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de pulpas de sauce.		
Propiedad	Ecuación*	R ²
Bulk	$2,32*MJ + 2,48*MM$	81
Resistencia al paso del aire	--	--
Índice de Rasgado	$20,5* MJ + 17,3* MM$	81
Índice de Tracción	$4,67* MJ + 3,30*MM$	88
Elongación	$1,25* MJ + 1,12*MM - 0,68*MJ*MM$	98
Índice TEA	$0,17* MJ + 0,12*MM - 0,10*MJ*MM$	99
Índice Z span	$50,78* MJ + 46,21*MM$	80
Blancura	$23,2* MJ + 31,0*MM$	98
Opacidad	--	--
Coeficiente de absorción k	$18,25* MJ + 13,61*MM + 6,63*MJ*MM$	98
Coeficiente de dispersión s	$28,02* MJ + 36,94*MM$	93
* MJ y MM varían entre 0 y 1.		

La Resistencia al aire y la Opacidad no presentaron ecuaciones.

En el caso de los sauces, las ecuaciones no se ajustaron tan bien como en el caso de los álamos (tablas 4.81 y 4.83).

Las proporciones de madera juvenil y madera madura que optimizan cada propiedad se muestra en la tabla 4.84:

4. Resultados y Discusión

Tabla 4.84: Combinación de proporciones MJ/ MM que optimizan las propiedades físicas, mecánicas y ópticas de las mezclas de sauce.

Propiedad	Objetivo	Valor optimo	MJ (%)	MM (%)
Bulk	Maximizar	2,48	0	100
Resistencia al aire	Minimizar	---	---	---
Índice de Rasgado	Maximizar	4,67	100	0
Índice de Tracción	Maximizar	20,0	100	0
Elongación	Maximizar	1,2	100	0
Índice TEA	Maximizar	0,16	100	0
Índice Z span	Maximizar	50,8	100	0
Blancura	Maximizar	31,0	0	100
Opacidad	Maximizar	---	---	---
Coefficiente de absorción k	Minimizar	13,6	0	100
Coefficiente de dispersión s	Maximizar	36,9	0	100

La influencia del porcentaje de madera juvenil y madura difiere entre las pulpas de sauce y de álamo. Para el sauce, la función de Deseabilidad fue mayor cuando se usó el 100 % de madera juvenil en el caso de las propiedades mecánicas y el 0 % de madera juvenil para las propiedades ópticas.

5. CONCLUSIONES

Patrones de variación radial y axial de las propiedades de la madera

En general, el álamo australiano y el sauce americano reproducen las tendencias radiales reportadas por diversos autores para las latifoliadas de porosidad difusa. Para la mayoría de sus propiedades, ambas especies presentan una tendencia de variación radial que consiste en un aumento de sus valores de médula a corteza. El comportamiento radial de la densidad básica en ambas especies coincide con el tipo 1 de variación presentado por Panshin y De Zeeuw (1980) de leve aumento de médula a corteza. La longitud de fibra presenta un aumento sostenido de los valores en los primeros anillos (10-15 años) y luego una estabilización de los mismos. La mayor edad analizada en el caso de sauce americano (45 años) permite observar que el patrón de aumento, tanto en densidad como en longitud de fibras, se estabiliza en valores algo inferiores a los alcanzados a los 15 años, por ese motivo el patrón general de médula a corteza no es tan marcado para sauce.

Los resultados en densidad y longitud de fibras parecen corroborar la influencia de la edad cambial en estas importantes propiedades.

Los resultados hallados para el resto de las propiedades anatómicas muestran que los patrones de variación radial se diferencian entre ambas especies debido fundamentalmente al diseño de muestreo y sus muy diferentes edades (álamo 17 años analizados cada 4-5 años, sauce 45 años analizados cada 5-10 años). En general, las dimensiones transversales de las fibras y vasos aumentan sus magnitudes de médula a corteza, en algunos casos con fluctuaciones o estabilizaciones en edades intermedias dependiendo de la especie. La frecuencia de vasos se mantiene constante en álamo mientras que en sauce disminuye con la edad.

En cuanto a la composición química, y con el diseño de muestreo interno realizado, la madera de álamo y sauce resultó bastante homogénea. La principal diferencia en el patrón radial hallado se presenta en el contenido de celulosa que describe un aumento de médula a corteza en los álamos y una disminución en ese sentido en los sauces.

5. Conclusiones

Las variaciones de las propiedades en sentido axial no son tan uniformes como las radiales. Las principales diferencias, se producen en la primera troza comercial (entre la base y la altura del pecho). Dentro de las limitaciones que impuso la sanidad del sauce americano sobre el muestreo axial, se considera que para ambas especies el patrón de variación axial de la densidad básica es similar al presentado para las latifoliadas de porosidad difusa de leve aumento hacia el ápice, más marcado en álamo. Para la longitud de fibras, se encuentra un aumento de los valores entre las primeras trozas y luego una disminución hacia el ápice en el caso del álamo y valores constantes para el sauce. El tamaño de las fibras aumenta hacia el ápice (espesor y ancho de fibras), al igual que la frecuencia de vasos, mientras que el diámetro de los mismos se mantiene constante o aumenta levemente muy cerca del ápice. El comportamiento de las dimensiones transversales de las fibras y vasos se encuentra asociado al comportamiento de la densidad en sentido axial. Dentro de la composición química la troza basal de álamo presentó los menores valores de celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos en alcohol-tolueno, siendo estos extractivos los únicos que aumentaron con la altura de muestreo en el fuste. En sauces, en cambio, ambos tipos de extractivos fueron estables con la altura, mientras que la celulosa aumentó y la lignina y hemicelulosa disminuyeron hacia el ápice.

Los cambios hallados en el sentido axial dentro del fuste son de menor magnitud que los hallados en sentido radial, tal como lo mencionaron otros autores para las latifoliadas de porosidad difusa

Se puede arribar a la conclusión, desde esta extensa revisión bibliográfica, que los patrones de variación de las propiedades (radial y axial) son dependientes de la especie, ya que dentro del mismo género se han reportado distintos comportamientos. Incluso, podemos afirmar por las referencias en los géneros *Eucalyptus* y *Populus*, que se presentan variaciones dentro de la misma especie si consideramos el sitio de implantación. Es necesario continuar con estas líneas de investigación sobre otros clones y sitios de implantación de salicáceas en Argentina, de forma de aportar tendencias que sirvan para la construcción de un modelo más generalizado en estas especies.

5. Conclusiones

La identificación de los patrones de variación axial y radial aporta nuevas herramientas de decisión para determinar el turno de corta de acuerdo a la propiedad que se quiera optimizar y el uso final de la madera. Asimismo, el conocimiento de estos patrones, principalmente el radial, servirá para determinar la estrategia de muestreo en el fuste. La determinación del valor promedio de una determinada propiedad en el árbol completo, debe basarse en una elaborada estrategia de muestreo que incluye el conocimiento de los patrones de variación internos. De esta manera se conoce el error de sobreestimación o subestimación de la propiedad en estudio cuando se reduce la determinación a una única altura en el fuste o se realiza a través de métodos no destructivos.

Este conocimiento también aporta información valiosa dentro de los programas de mejoramiento genético de Salicáceas, por ejemplo referida a dónde y cuándo muestrear para la selección temprana de nuevos genotipos, con vistas a obtener materias primas mejoradas para un determinado uso final.

Madera Juvenil/ Madera Madura

La identificación de los patrones generales de variación de densidad y propiedades anatómicas y químicas permitió determinar por primera vez en el país, la edad de transición de madera juvenil a madera madura para un clon de álamo y uno de sauce de interés comercial. En las muestras de álamo de 17 años de edad estudiadas, la zona estimada de transición entre madera juvenil y madura no fue idéntica para todas las propiedades, definiéndose edades de 5, 7 y 9 años dependiendo de la variable (vasos, fibras o densidad). En el caso de sauces de 45 años, dependiendo de la variable analizada, la edad de transición entre madera juvenil y madura presentó diferentes valores entre los rangos de 5 a 10 y 10 a 15 años. La longitud de fibras y el diámetro de vasos fueron los primeros parámetros en madurar (5 a 10 años) mientras que el resto tuvo como edad de transición el rango de 10 a 15 años.

Considerando los turnos de rotación cortos (10-12 años) utilizados en la industria papelera en Argentina, en ambas especies el 82 % del área basal sería madera juvenil.

5. Conclusiones

Al comparar solamente la madera juvenil entre los sauces y los álamos, la densidad básica, el espesor de pared y el contenido de extractivos fueron significativamente superiores en los sauces. Por el contrario, la longitud de fibra, el ancho de fibra, el diámetro de vasos, el contenido de hemicelulosas y el contenido de celulosa fueron significativamente superiores en los álamos.

Independientemente de la edad de transición y la propiedad elegida para su análisis, la madera juvenil presentó calidad inferior. Esto podría suponer que, dependiendo de la industria consumidora (triturado, aserrado o laminado), la edad de cosecha del rodal (turno) podría manejarse para influir en las propiedades del árbol completo considerando la proporción final de madera juvenil y madura.

Los resultados de esta tesis indican que el modelo de madera juvenil y madura hallado para álamo australiano y sauce americano y con el diseño de muestreo aplicado, se asemeja al modelo de cilindro central aplicado para coníferas. Este modelo fue citado por Zobel y Sprague (1998) para caracterizar el modelo más difundido en latifoliadas, considerando un cilindro juvenil pero de menor diámetro en el ápice. Sin embargo, y retomando el concepto de madera "juvenil más madura" presentado para coníferas (Burdon et al, 2004), este esquema podría aplicarse a la variación axial hallada en la tesis para la variable densidad de la madera, donde los valores en el ápice tienen un grado de maduración superior a las de la base en ambas especies. Sin embargo, la longitud de fibras no presenta este comportamiento.

Pulpas quimimecánicas.

Las relaciones halladas en esta tesis entre las propiedades físicas (densidad básica), químicas y anatómicas de la madera y las propiedades de las pulpas quimimecánicas considerando solamente la madera juvenil y madura presentaron las correlaciones con elevados coeficientes para algunas propiedades de las pulpas en particular: Índice de Tracción, Resistencia al paso del aire y Opacidad.

Los valores de las propiedades de la madera juvenil en ambas especies, obtuvieron las magnitudes más bajas en todos los parámetros anatómicos y físicos con respecto a la madera madura, sin embargo, la resistencia de las

5. Conclusiones

pulpas CMP elaboradas con mayor proporción de madera juvenil fue superior en todos los casos. Las pulpas con mayor porcentaje de madera juvenil (100 %) fueron las que presentaron los valores más elevados en las propiedades mecánicas (tracción y rasgado fundamentalmente) para ambas especies. Sin embargo, el comportamiento es inverso para las propiedades ópticas, lo que genera un compromiso en la optimización de la mezcla MJ-MM para responder a las necesidades y requerimientos del papel periódico a producir.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ai, J. y Tschirner, U. 2010. Fiber length and pulping characteristics of switchgrass, alfalfa stems, hybrid poplar and willow biomasses. *Bioresource Technology* 101: 215–221.

Ainomaija, H. 2000. Printing and writing papers. In: *Papermaking Science and Technology Book 18: Paper and Board Grades*, Chapter 1.

Alteyrac, J., Cloutier, A. y Zhang, Y. 2006. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. *Wood Sci Technol* 40: 124–138.

Alves Ramos, L., Figueiredo Latorraca, J., Scaramussa Pastro, M., Teixeira de Souza, M., Garcia, R. y Monteiro de Carvalho, A. 2011. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. *Sci. For.*, Piracicaba, 39 (92): 411-418.

Bhat, K., Bhat, V. y Dhamodaran, K. 2001. Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. *Wood and fiber Science* 22 (1): 54-61.

Balatinecz, J., y Kretschmann, D. 2001. Properties and utilization of poplar wood. In *Poplar Culture in North America*. National Ottawa, ON KIA OR6, Canada. Part A, Chapter 9.

Barnet, J. y Jeronimidis, G. 2003. *Wood Quality and its biological basis*. CRC Press.

Bendtsen, B. y Senf, J. 1986. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. *Wood and Fiber Science* 18 (1): 23-38.

6. Bibliografía

Bonavía de Guth, E. y Ragonese, A. 1980. Evaluación de las características del leño en relación a la calidad del papel de algunos híbridos de sauces obtenidos en Castelar (INTA). IDIA n° 393-394: 25–30.

Bonavía de Guht, E. y Piussan, C. 1987. Evaluación con fines papeleros de diez clones de álamo en ensayos del INTA-Delta del Paraná. 25° Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Argentina. 265-277.

Bonavía de Guth, E. 1991. Variación radial de la densidad y morfología celular en *Populus*. Congreso Atipca Trab. Téc: 491-509.

Burdon, R., Kibblewhite, P., Walker, F., Megraw, A., Evans, R. y Cown, D. 2004. Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. Forest Science 50 (4): 399-415.

Castro Silva, J., Tomazello Filho, M., da Silva Oliveira, J. y Resende de Castro, V. 2007. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. R. Árvore, Viçosa-MG, 31 (6): 1081-1090.

Chow, P., Rolfe, G., Motter, W. y Majerus, K. 1987. Site, spacing, tree portion, and species influence ash and extractives content of five juvenile hardwoods. 6th Central Hardwood Forest Conference: 247-253.

Clark, A., Daniels, R., y Jordan, L. 2006. Juvenile/mature wood transition in loblolly pine as defined by annual ring specific gravity, proportion of latewood, and microfibril angle. Wood and fiber science 38 (2): 292-299.

Cown, D. 1980. Radiata pine: Wood age and wood property concepts. N. Z. J. For. Sci. 10: 504–507.

6. Bibliografía

Da Silva Perez, D. y Fauchon, T. 2003. Wood quality for pulp and paper. En: Wood quality and its biological basis (Barnett & Jeronimidis, eds.), Blackwell Publ. Ltd., U.K., cap. 7.

DeBell, D., Singleton, R., Harrington, C. y Gartner, B. 2002. Wood density and fiber length in young *Populus* stem: relation to clone, age, growth rate, and pruning. Wood and Fiber Sci. 34 (4): 529-539.

Deka, G., Wong, B. y Roy, D., 1999. Variation of specific gravity, fiber length and cell wall thickness in young *Salix* clones. Journal of Wood Chemistry and Technology 14 (1): 147–158.

Diaz, G., Monteoliva, S., Alvarez, J. y Fernández Tschieder, E. 2010. *Populus deltoides* 'Australiano 129/60': variación axial de la densidad y desarrollo de un modelo predictivo de la densidad del árbol completo. BOSQUE 31 (1): 65-72.

Downes, G., Hudson, I., Raymond, C., Dean, A., Micheli, A., Schimlek, L., Evans, R. y Muneri, A. 1997. Sampling *Eucalyptus* for wood and fiber properties. Australia. CSIRO Publishing: 132.

Duff, G. y Nolan, N. 1953. Growth and morphogenesis in the Canadian forest species: I. The controls of cambial and apical activity in *Pinus resinosa* Ait. Can. J. Bot. 31: 471-513.

Evans, J., Senft, J. y Green, D. 2000. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones Forest Products Journal 50 (7/8): 75-87.

Ferreira, N., Balloni, E., Pinto junior, J. y Jacob, W. 1978. Adaptabilidade de espécies, fontes de sementes e possibilidades de melhoramento de *Eucalyptus* em Minas Gerais. Boletim Informativo. IPEF 6 (16):E1-E42.

6. Bibliografía

Francis, R., Brown, A., Bosshart, R., Balch, S. y Waite, D., 2005. Four additional hybrid poplars with papermaking properties superior to aspen. *Tappi Journal* 4 (11):13–17.

Francis, R., Hanna, R., Shin, S., Brown, A. y Riemenschneider, D. 2006. Papermaking characteristics of three *Populus* clones grown in the north-central United States. *Biomass and Bioenergy* 30 (8–9):803–808.

Fucheng, B., Zehui, J., Xiaomei, J., Xixian, L., Xiuwu, C. y Xiugin, L. 1997. Comparative studies on wood properties of juvenile vs mature wood of major plantation and of wood from plantation vs natural forest in China. *CTIA/IUFRO Int. Wood Quality Workshop, Canada*: 73-85.

Fukasawa, K. 1984. Juvenile wood of hardwoods judged by density variation. *IAWA Bulletin n.s.* 5 (1): 65-73.

Ganesh, C., Barry, M. y Roy, D. 1992. Suitability of hybrid willow as a source of pulp. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 12 (2): 197–211.

Gartner, B. 2005. Assessing wood characteristics and wood quality in intensively managed plantations. *Journal of Forestry*: 75-77.

Harris, J. 1981. Effect of rapid growth on wood processing. En *Proceedings of the XVII IUFRO World Congress, Kyoto, Japón*: 117-125.

Hazman, K. y Lewark, S. 1994. Sampling for Wood properties in trial plots of 4 *Eucalyptus* species at Ruvu, Tanzania. *Ann. Sci. For.* 51: 233-240.

Hillis, W. 1980. Some basic characteristics affecting wood quality. *Appita* 33 (5): 339-344.

Hudson, I., Wilson, L. y Van Beveren, K. 2001. Between species differences in whole tree maps of fiber properties in *E. nitens* and *E. globulus*-utility of control deviation charts to assess optimal sampling height. *Appita J.* 54:182-189.

6. Bibliografía

Igartua, D., Monteoliva, S., Monterubbianesi, M. y Villegas, S. 2000. Calidad del leño en *Eucalyptus globulus ssp. globulus*: Variaciones en la densidad básica y la longitud de fibra en Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía. La Plata 105 (1): 35-45.

Jett, J. y Zobel, B. 1975. Wood and pulping properties of young hardwoods. Tappi Journal 58 (1): 92-96.

Jorge, F., Quilhó, T. y Pereira, H. 2000. Variability of fiber length in wood and bark in *Eucalyptus globulus*. International association of Wood Anatomist Journal 21(1): 41-48.

Kandus P., Morandeira, N. y Schivo, F. 2010. Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales del Delta del Paraná. Wetlands International (2-6): 28.

Kiaei, M., Bakhshi, R. y Veylaki, S. 2012. Determination of fiber length and juvenile and mature wood zones in *Acer velutinum* Boiss. trees grown in Iran. Forestry Studies in China 14 (4): 323-326.

Kojima, M., Yamamoto, H., Yoshida, M., Ojio, Y. y Okumura, K. 2009. Maturation property of fast-growing hardwood plantation species: A view of fiber length. Forest Ecology and Management 257:15–22.

Kojima, M., Yamaji, F., Yamamoto, H., Yoshida, M. y Saegusa, K. 2009 b. Determining factor of xylem maturation in *Eucalyptus grandis* planted in different latitudes and climatic divisions of South America: A view based on fiber length. Canadian Journal of Forest Research 39 (10): 1971-1978.

Kojima, M., Yamamoto, H., Okumura, K., Ojio, Y., Yoshida, M., Okuyama, T., Ona, T., Matsune, K., Nakamura, K., Ide, Y., Marsoem, S., Sahri, M. y Hadi, Y. 2009 c. Effect of the lateral growth rate on wood properties in fast-growing hardwood species. Journal of Wood Science 55 (6): 417-424.

6. Bibliografía

Koubaa, A., Hernandez, R., Beaudoin, M. y Poloquin, J. 1998. Interclonal, intraclonal and within-tree variation in fiber length of poplar hybrid clones. *Wood and Fiber Science* 30 (1): 40-47.

Kwei, N., Rioux, S. y Valade, J. 2000. Wood and paper properties of short rotation poplar clones. *Tappi Journal* 83 (5): 1-5.

Larson, P, Kretschmann, D., Clark III, A. y Isebrands, J. 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines. A synopsis United States Department of Agriculture Forest Service General Report FPL GTR: 129.

Marinen, H., Jaakkola, T., Piispanen, J. y Saranpaa P. 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 241: 175–188.

Mátyás, C. y Peszlen, I. 1997. Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. *Silvae Genetica* 46 (2-3): 64-72.

McDonald, D., Miles, K. y Amiri, R. 2004. The nature of the mechanical pulping process. *Pulp & Paper Canada* 105 (8): 27-32.

Meza Juárez, J., Vargas Hernández, J, López Upton, J., Vaquera-Huerta, H. y Borja de la Rosa, A. 2005. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *pinus patula* schl. et cham. *Ra Ximhai* 1 (2): 305- 321.

Micko, K., Hiroyuki Y., Masato, Y., Yasuhisa, O. y Kayo, O. 2009. Maturation property of fast-growing hardwood plantation species: A view of fiber length *Forest Ecology and Management* 257: 15–22.

Monteoliva, S., Senisterra, G., Marquina, J. y Marlats, R. 2002. Clones de sauce longitud de la fibra en su madera., *Rev FCA UNCuyo* tomo XXXIV 2: 49-56.

6. Bibliografía

Monteoliva, S., Senisterra, G., Marquina, J., Marlats, R y Villegas S. 2002. Estudio de la variación de la densidad básica de la madera de ocho clones de sauce (*Salix spp.*). Rev FCAYF La Plata 105 (1): 29-34.

Monteoliva, S., Senisterra, G., Marquina, J. y Marlats, R. 2003. Variación axial y radial de la longitud de fibras en seis clones de *Salix*. R Rev FCAYF La Plata 106 (1): 13-19.

Monteoliva, S., Senisterra, G. y Marlats, R. 2005. Variation of Wood density and fiber length in six willow clones (*Salix spp*). IAWA Journal 26 (2): 197-202.

Monteoliva, S. y Area, M. 2006. Análisis multivariados para relacionar las propiedades de la madera de *Salix* con sus pulpas CMP. IV Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, CIADICYP 2 Santiago de Chile, Trabajo completo en CD (Actas).

Monteoliva, S., Area, M. y Felissia, F. 2007. CMP pulps of willows for newsprint. Part 1: Pulp evaluation. Cellulose Chem. Technol. 41 (4-6): 263-272.

Monteoliva, S. y Marlats, R. 2007. Efecto del sitio, clon y edad sobre el crecimiento y la calidad de madera en sauces de corta rotación. Invest Agrar: Sist Recur For 16 (1): 15-24.

Monteoliva, S., Area, M. y Felissia, F. 2008. CMP pulps of willows for newsprint. Part 2: relationships between wood characteristics and pulp properties. Cellulose Chem. Technol. 42 (1-3):45-59.

Monteoliva, S. 2011. Madera de sauces para la producción de papel periódico. Editorial Académica Española. 212.

Muneri, A. y Raymond, C. 2001. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* for wood properties. II. Fiber length and coarseness. Wood Science and Technology 35: 41-56.

6. Bibliografía

Myers, G., Arola R., Horn, R. y Wegner, T. 1996. Chemical and mechanical pulping of aspen chunkwood, mature wood, and juvenile wood. *Tappi Journal* 79 (12): 161-168.

Novaresi, M., Delorenzi F., De Rosa G., Cervantes, P. y Rozas, C. 1997. Aptitud de Salicáceas para la industria del papel. CICEIPA. Informe Técnico n° OT 18-2927: 19.

Núñez, C. 2011. Morfología fibrosa de la madera del *Eucalyptus grandis* implantado en la Mesopotamia argentina. 4 - En relación a la madera juvenil. *Rev. Cienc. Technol.* Año 13 (15):25–29.

Ona, T.; Sonoda, T.; Shibata, M. y Fukazawa, K. 1995 a. Small-scale method to determine the contents of wood components from multiple eucalypt sample *Tappi Journal* 78 (3): 121-126.

Ona, T. Sonoda, T., Ito, K. y Shibata, M. 1995 b. Relationship of lignin content, lignin monomeric composition and hemicellulosic composition in the same trunk sought by their within tree variation in *E. camaldulensis* and *E. globulus*. *Holzforshung* 51: 396-404.

Panshin, A. y de Zeeuw, C. 1980. *Textbook of wood Technology*. McGraw-Hill Book Company: 722.

Phelps, J., Isebrands, J., Einspahr, D., Crist, J. y Sturos, J. 1985. Wood and paper properties of vacuum airlift segregated juvenile poplar whole-tree chips. *Wood and Fiber Science* 17 (4): 529–539.

Pereira, H. y Sardirha, R. 1984. Chemical composition of *Eucalyptus globulus* lab. *Appita* 37(8).

Pereira, H., Graça, J. y Rodríguez, J. 2003. Wood chemistry in relation to quality. En: *Wood quality and its biological basis* (Barnett & Jeronimidis, eds.), Blackwell Publ. Ltd., U.K., cap. 3: 53-86.

6. Bibliografía

Peszlen, I. 1985. Gelatinous fibres in *Populus x euroamericana* clones. Recent Advance in wood anatomy 18: 327-333.

Peszlen, I. 1998. Influence of age on selected anatomical properties of populus clones. IAWA Journal 3 : 311-321.

Raymond, C. y Mac Donald, A. 1998. Where to shoot your pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* in Tasmania. New Forests 15: 205-221.

Raymond, C. 2006. Density assessment of radiata pine: Sampling strategy revisited. Holzforschung 60: 580–582.

Ridoutt, B. y Sands, R. 1993. Within-tree variation in cambial anatomy and xylem cell differentiation in *Eucalyptus globulus* . Trees 8: 18-22.

Riu, N., Perez, S., Bustamante, J., Settepani, V., Calderón, A. y Zanetti, R. 2008. Comportamiento de clones de álamos en San Carlos. Mendoza, Argentina. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XL.1: 79-83.

Saranpää, P. 2003. Wood density and growth. En: Wood quality and its biological basis (Barnett & Jeronimidis, eds.), Blackwell Publ. Ltd., U.K., cap. 4: 87-117.

Sauter, H., Mutz, A. y Munro, B. 1999. Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density. Wood Fiber Sci. 31(4): 416 - 425.

Senisterra, G., Ducid, M. y Marlats, R. 2005. Variación de la densidad básica de la madera en clones del género *Populus*. 3er Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Corrientes, Argentina.

Sett, C. , de Oliveira, I. , Filho, M. , Yamaji, F. y Laclau, J. 2012. Effect of age and sampling position on density and anatomical characteristics of wood in eucalyptus trees. Revista Arvore 36 (6): 1183-1190.

6. Bibliografia

Shupe, T., Hse, C. y Choong, E. 1997. Differences in some chemical properties of innerwood and outerwood from five silviculturally different loblolly pine stands. *Wood and Fiber Sci.* 29 (1): 91-97.

Smook, G. 1990. *Manual para Técnicos de Pulpa y Papel*. TAPPI Press. Cap. 5.

Sundholm, J. 1999. "Mechanical Pulping". Volume 5 in *Papermaking Science and Technology Series*. Fapet Oy, Helsinki.

Sykes, R., Kodrzycki, B., Tuskan, G., Foutz, K. y Davis, M. 2008. Within tree variability of lignin composition in *Populus*. *Wood Sci Technol* 42:649–661.

Tasissa, G. y Burkhart, H. 1998. Juvenil-mature wood demarcation in loblolly pine trees. *Wood and Fiber Science* 30 (2):119-127.

Talbert, T. y Jett, B. 1981. Regional Specific gravity values for plantation growth Loblolly pine in the Southeastern United State. *Forest Sci.* 27 (4): 801-807.

Ting-Feng, Y., Braun, J., Goldfarb, B., Chang, H. y Kadla, J. 2006. Morphological and chemical variations between juvenile wood, mature wood, and compression wood of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Holzforschung*, 60: 1–8.

Tomazello Filho, M. 1985. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica de madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. *IPEF* 29: 37-45.

Tsuchiya, R. y Furukawa, I. 2009. Radial variation of vessel lumen diameter in relation to stem increment in 30 hardwood species. *IAWA J.* 30 (3): 331-342.

Tyrväinen, J. 1995. Comparison between wood from first thinnings, regeneration cutting and sawmill residuals; a case study of thermomechanical pulp manufacture in mill scale. *Acta Forestalia Fennica* 249: 76-153

Valente, C. 1992. Improvement program for *Eucalyptus globules* at Portucel: Technological component. *Appita* 45 (6): 403-407.

6. Bibliografía

Van Buijtenen, J. 1982. Fiber for the future. TAPPI 65 (8): 10-12.

Villegas, S. y Marlats, R. 2003. Densidad de la madera: variación axial y radial en dos clones de *Salix sp.* X Jornadas Técnicas Forestales Ambientales FCFINTA, El Dorado.

Villegas, S. y Marlats, R. 2005. Altura de extracción de la muestra para la evaluación de densidad básica y blancura en madera de *Salix sp.* Bosques 26 (3): 121-132.

Villegas, S., Area, C. y Marlats, R. 2009. Caracterización de la madera de *Salix*. 1: Influencia del sitio, clon, edad y altura de muestreo. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 18(2): 192-203.

Wang, X., y Braaten K. 1997. Growth rings and spruce pulpwood sorting. Pulp and paper research journal 12 (3): 196-202.

Wilkes, J. 1988. Variations in wood anatomy within species of *Eucalyptus*. IAWA J. 9 (1): 13-23.

Wood, J. y Karnis, A. 1991. Future furnish requirements for newsprint and mechanical printing papers. Pulp and Paper Canada 92 (1): T21-T25.

Yang, K., Chen, C. y Chiu Can, J. 1994. Formation and vertical distribution of juvenile and mature wood in a single stem of *Cryptomeria japonica*. For Res Vol 24.

Yang, K. y Benson, C. 1997. Formation, distribution and it's criteria for determining the juvenile-mature wood transition zone. En: Timber management toward wood quality and end-product value. Canada. IX-7.

Yanchuk, A. y Micko, M. 1990. Radial variation of wood density and fibre length in trembling aspen. IAWA J. 11 (2): 211-215.

6. Bibliografía

Yanchuk, A. y Micko, M. 1984. Variation and heredability of wood density and fiber length of trembling aspen in Alberta, Canada. *Silvae Genetica* 33 (1): 11-16.

Zanuttini, M. 2006. Pulpados de muy alto rendimiento. Principios generales de pulpado- ITC – FIQ: 1-14.

Zarges, R., Neuman, D. y Crist, J. 1980. Kraft pulp and paper properties of *Populus* clones grown under short-rotation intensive culture. *Tappi* 63 (7): 91-94.

Zobel, B. y Jett, J. 1995. Genetics of wood production. Springer-Verlag, Germany: 337.

Zobel, B. y Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Editorial Limusa, México. Cap. 12, La madera y el mejoramiento genético forestal.

Zobel, B. y Sprague, J. 1998. Juvenile wood in forest trees. Ed Springer-Verlag, Berlín.

7. ANEXO

1. A. *Calculo de los valores ponderados para las propiedades medidas.*

Para poder realizar los análisis de regresión múltiple correlaciones entre las propiedades de las pulpas y las propiedades de la madera, se necesitó reproducir en las propiedades de la madera la composición de madera juvenil y madura (proporción de cada una de ellas) que había en las mezclas de pulpa. Por tal motivo, se realizó una ponderación de los valores por árbol y por altura de cada una de las propiedades de acuerdo al porcentaje de madera juvenil y madura contenido en las mezclas (25:75% MJ/MM; 50:50 % MJ/MM y 75:25 % MJ/MM).

Densidad y propiedades anatómicas:

Para los **álamos** se tomaron los valores de los 5 árboles de los anillos 4 y 8 (madera juvenil) y los anillos 11 y 15 (madera madura), esta separación surge de la determinación de la edad de transición antes calculada (9 años).

Para los **saucés** la separación se realizó de la siguiente madera: del rango de 0 a 5 años al de 15 a 20 años se consideró madera juvenil y a partir del rango 20 a 25 años madera madura, esta diferenciación es debida a la edad de transición previamente determinada (15 años).

En ambas especies, estos valores representan a la madera juvenil (100 %) y madera madura (0%). Tomando esos valores de madera juvenil y madura, se procedió a calcular los valores de las mezclas, de la siguiente manera:

-25:75 % (MJ/MM) : (valor de la madera juvenil de la propiedad analizada* 0,25) + (valor de la madera madura de la propiedad analizada * 0,75) (para los cinco datos).

7. Anexo

-50:50 % (MJ/MM): (valor de la madera juvenil de la propiedad analizada * 0,50) + (valor de la madera madura de la propiedad analizada * 0,50) (para los cinco datos).

-75:25 % (MJ/MM): (valor de la madera juvenil de la propiedad analizada 0,75) + (valor de la madera madura de la propiedad analizada * 0,25) (para los cinco datos).

Composición química:

El procedimiento realizado para la ponderación de los valores de la composición química en ambas especies, fue similar al presentado para las propiedades anatómicas. Sólo se diferencia la metodología aplicada para delimitar la zona de madera juvenil y madura.

Álamo:

Madera Juvenil (100%): valores promedios obtenidos por árbol y alturas en los rangos de 0 a 5 y 5 a 10 años.

Madera Madura (0 %): valores por árbol y alturas en el rango de 10 a 15 años.

Esta decisión se tomó debido a que la edad de transición fue de 9 años considerando que el rango de edad de 5 a 10 años era todo madera juvenil (sólo el anillo 10 sería considerado madera madura).

Sauce:

Madera juvenil (100 %): valores promedio entre los rangos de 0 a 10 y 10 a 20 años por árbol y alturas.

Madera madura (0 %): valores promedio entre los rangos de 10 a 20 y 20 a 30 años por árbol y alturas.

Esta decisión de promediar los valores entre rangos surge a raíz de la edad de transición encontrada (10 a 15 años), por lo tanto el rango de edad 10 a 20 años formaba parte tanto de la madera juvenil y madura.

Para el cálculo de los valores de la composición química en las mezclas se procedió de igual manera que en las propiedades anatómicas.

7. Anexo

Los valores de las propiedades de las pulpas son los obtenidos en los ensayos físicos, mecánicos y ópticos realizados a partir de las mezclas de pulpas.

Las tablas de la 1.1 a la 1.8, presentan los valores ponderados para cada una de las propiedades medidas y ensayos físicos, mecánicos y ópticos realizados para las dos especies estudiadas en este trabajo.

Mezclas (MJ/MM)	Densidad (g/cm ³)	Long de fibras (μm)	Ancho de fibra (μm)	Lumen (μm)	Espesor (μm)	Diámetro de vasos (μm)	Frecuencia de vasos (n°.mm ²)
0	0,39	1512,67	20,38	13,79	3,12	77,35	45,17
0	0,39	1550,68	21,56	14,01	3,80	78,49	54,60
0	0,39	1384,10	21,74	14,18	3,46	79,64	51,57
0	0,39	1519,10	21,30	13,82	3,61	77,97	63,78
0	0,38	1509,75	21,13	12,95	3,64	77,34	66,89
0,25	0,38	1454,13	20,36	13,79	3,12	77,36	45,51
0,25	0,38	1489,23	21,43	13,92	3,59	77,86	53,35
0,25	0,38	1323,18	21,42	14,11	3,42	78,17	52,71
0,25	0,38	1463,04	21,37	14,03	3,50	78,32	60,37
0,25	0,38	1455,15	20,64	12,79	3,56	74,86	67,72
0,5	0,37	1395,60	20,35	13,78	3,11	77,38	45,85
0,5	0,38	1427,78	21,30	13,84	3,38	77,22	52,10
0,5	0,38	1262,26	21,11	14,05	3,37	76,70	53,85
0,5	0,37	1406,97	21,43	14,24	3,40	78,68	56,96
0,5	0,38	1400,56	20,15	12,64	3,49	72,39	68,55
0,75	0,36	1337,06	20,33	13,78	3,11	77,39	45,51
0,75	0,37	1366,33	21,18	13,75	3,16	76,59	53,35
0,75	0,37	1201,35	20,80	13,99	3,33	75,23	52,71
0,75	0,37	1350,90	21,50	14,45	3,30	79,03	60,37
0,75	0,38	1345,96	19,66	12,48	3,41	69,91	67,72
1	0,35	1278,52	20,32	13,78	3,11	77,41	46,53
1	0,36	1304,87	21,05	13,66	2,95	75,96	49,60
1	0,36	1140,43	20,48	13,92	3,28	73,76	56,13
1	0,36	1294,83	21,57	14,66	3,20	79,38	50,13
1	0,38	1291,36	19,17	12,32	3,33	67,44	70,21

7. Anexo

Tabla 1.2: Valores de composición química calculados mediante las ecuaciones de ponderación para álamos.				
Mezcla (MJ/MM)	Lignina (%)	Hemicelulosas (%)	Celulosa (%)	Extractivos (%)
0	25,99	19,03	48,48	4,52
0	25,58	18,28	48,64	4,07
0	25,64	18,51	48,68	5,02
0	25,71	18,68	48,33	4,52
0	25,64	18,51	48,68	4,53
0,25	25,99	19,36	47,96	4,53
0,25	25,58	18,47	48,64	4,64
0,25	25,64	18,58	48,41	4,00
0,25	25,71	18,86	48,13	5,17
0,25	25,62	18,64	48,67	4,59
0,5	25,99	19,69	47,43	4,60
0,5	25,58	18,65	48,64	4,60
0,5	25,64	18,65	48,14	4,76
0,5	25,71	19,03	47,94	3,92
0,5	25,61	18,77	48,66	5,33
0,75	25,99	20,01	46,91	4,66
0,75	25,58	18,84	48,63	4,67
0,75	25,64	18,72	47,88	4,67
0,75	25,71	19,21	47,74	4,89
0,75	25,59	18,90	48,65	3,84
1	25,99	20,34	46,39	5,49
1	25,58	19,02	48,63	4,73
1	25,64	18,79	47,61	4,74
1	25,71	19,38	47,54	4,74
1	25,58	19,02	48,63	5,01

7. Anexo

Mezclas (MJ/MM)	Tracción (Nm/g)	Rasgado [mN m ² /g]	TEA (J/g)	Elongación (%)	Opacidad (%)	Porosidad (%)	Z span (N)
0	35,57	3,84	0,32	1,39	93,37	19,60	53,42
0	30,38	4,04	0,19	1,18	94,03	17,01	58,77
0	43,03	4,65	0,44	1,69	94,09	12,99	56,97
0	32,77	5,05	0,18	1,07	93,03	12,12	57,00
0	39,30	4,65	0,51	1,81	93,88	11,19	56,33
0,25	32,03	3,71	0,22	1,19	95,00	13,30	64,54
0,25	29,28	4,12	0,34	1,32	94,92	14,15	60,00
0,25	31,82	3,50	0,29	1,36	94,79	12,25	55,65
0,25	30,55	4,12	0,23	1,32	94,45	11,36	52,75
0,25	34,99	4,33	0,24	1,26	94,66	12,01	63,33
0,5	24,57	3,44	0,16	1,06	94,29	13,99	51,41
0,5	23,43	4,45	0,24	1,39	93,98	10,81	57,70
0,5	28,61	4,45	0,26	1,38	95,50	8,31	66,35
0,5	28,41	4,65	0,23	1,28	95,17	9,53	53,77
0,5	25,40	3,84	0,20	1,19	95,51	7,87	52,10
0,75	24,29	3,01	0,23	1,34	94,31	7,62	48,9
0,75	25,01	3,60	0,16	1,07	94,51	7,02	50,4
0,75	26,45	3,40	0,22	1,29	94,6	5,24	52,1
0,75	24,29	3,40	0,19	1,20	94,5	5,16	47,09
0,75	26,55	3,01	0,18	1,14	94,45	5,29	50,7
1	23,60	3,23	0,18	1,16	93,15	2,20	44,4
1	21,64	3,42	0,15	1,12	93,00	1,85	39,6
1	24,12	3,03	0,15	1,07	93,00	1,97	39,2
1	21,95	3,23	0,17	1,18	93,27	2,16	43,7
1	20,41	3,42	0,13	1,04	93,8	2,11	45,9

7. Anexo

Mezcla (MJ/MM)	k [m ² /kg]	s [m ² /kg]	Blancura (%)
0	3,25	42,34	50,83
0,25	3,68	43,36	49,00
0,5	4,11	42,41	46,5
0,75	4,21	41,00	44,97
1	4,34	35,00	41,00

Mezclas (MJ/MM)	Densidad (g/cm ³)	Long de fibras (μm)	Ancho de fibra (μm)	Lumen (μm)	Espesor (μm)	Diámetro de vasos (μm)	Frecuencia de vasos (n°.mm ²)
0	0,42	1619,18	19,70	14,90	4,07	67,07	59,00
0	0,43	1608,41	18,78	14,68	4,89	66,13	49,00
0	0,41	1629,79	19,32	14,24	4,86	55,76	57,73
0	0,43	1604,51	19,29	12,36	4,30	63,28	47,53
0	0,43	1631,61	18,26	12,94	4,28	68,44	54,22
0,25	0,42	1607,16	19,46	14,40	4,04	64,20	59,15
0,25	0,43	1613,88	18,67	14,27	4,74	66,66	55,11
0,25	0,42	1637,57	19,42	14,28	4,75	62,37	58,00
0,25	0,42	1610,86	18,70	12,18	4,34	64,49	57,00
0,25	0,43	1629,47	17,55	12,69	4,25	68,45	60,74
0,5	0,41	1595,15	19,22	13,90	4,01	65,15	59,71
0,5	0,43	1619,35	18,55	13,86	4,60	66,49	53,55
0,5	0,42	1645,34	19,52	14,32	4,64	60,17	58,56
0,5	0,42	1617,21	18,12	12,00	4,38	64,09	53,36
0,5	0,42	1627,33	16,83	12,45	4,21	68,45	58,76
0,75	0,41	1583,13	18,98	13,40	3,98	64,20	59,00
0,75	0,42	1624,82	18,43	13,45	4,45	66,66	53,44
0,75	0,43	1653,12	19,62	14,35	4,53	62,37	53,24
0,75	0,41	1623,55	17,53	11,82	4,41	64,49	53,14
0,75	0,42	1625,19	16,12	12,21	4,18	68,45	53,54
1	0,41	1571,12	18,73	12,90	3,95	63,24	59,42
1	0,42	1630,29	18,31	13,04	4,30	66,84	57,87
1	0,43	1660,90	19,72	14,39	4,41	64,58	59,67
1	0,40	1629,90	16,94	11,64	4,45	64,90	60,00
1	0,41	1623,05	15,40	11,96	4,15	68,46	62,34

7. Anexo

Tabla 1.6: Valores de composición química calculados mediante las ecuaciones de ponderación para sauce.

Mezcla (MJ/MM)	Lignina (%)	Hemicelulosas (%)	Celulosa (%)	Extractivos (%)
0	26,57	20,02	40,56	6,42
0	24,89	17,60	45,81	5,89
0	24,78	18,30	44,84	5,21
0	25,41	18,64	43,74	5,84
0	24,78	18,25	40,56	5,59
0,25	26,72	19,71	40,95	6,11
0,25	24,68	17,12	46,34	5,82
0,25	24,98	17,70	45,21	5,37
0,25	25,46	18,18	44,17	5,77
0,25	24,98	17,60	40,95	5,51
0,5	26,67	19,40	41,34	5,80
0,5	24,75	16,63	46,87	5,76
0,5	24,91	17,10	45,59	5,52
0,5	25,44	17,71	44,60	5,69
0,5	24,91	16,95	41,34	5,43
0,75	26,72	19,09	41,73	5,48
0,75	24,68	16,14	47,39	5,69
0,75	24,98	16,50	45,97	5,67
0,75	25,46	17,24	45,03	5,61
0,75	24,98	16,31	41,73	5,35
1	26,76	18,78	42,11	5,17
1	24,61	15,66	47,92	5,63
1	25,05	15,90	46,35	5,82
1	25,47	16,78	45,46	5,54
1	25,05	15,66	42,11	5,26

7. Anexo

Tabla 1.7: Valores de ensayos ópticos en sauce.

Mezcla (MJ/MM)	k [m ² /kg]	s [m ² /kg]	Blancura (%)
0	13,66	36,7	31,51
0,25	15,65	34,05	28,75
0,5	17,97	33,5	26,64
0,75	18,12	31,30	25,22
1	18,31	26,98	23,50

Tabla 1.8: Valores de ensayos físicos, en sauce.

Mezclas (MJ/MM)	Tracción (Nm/g)	Rasgado [mN m ² /g]	TEA (J/g)	Elongación (%)	Opacidad (%)	Porosidad (%)	Z span (N)
0	18,58	3,01	0,13	1,09	99,14	16,79	42,00
0	17,90	3,93	0,11	1,14	99,32	14,53	47,65
0	16,85	3,37	0,12	1,13	99,57	16,79	44,35
0	19,68	3,56	0,13	1,08	99,00	14,69	40,55
0	16,08	3,37	0,11	1,09	99,43	14,78	41,83
0,25	16,41	2,81	0,10	0,94	99,27	29,35	54,15
0,25	17,51	3,36	0,11	0,97	99,34	29,92	47,43
0,25	17,08	3,36	0,13	1,13	98,94	22,07	55,25
0,25	16,31	3,92	0,10	1,00	99,49	17,53	45,05
0,25	19,04	3,55	0,12	1,07	99,76	18,47	51,95
0,5	17,54	3,35	0,13	1,15	99,44	20,22	51,32
0,5	19,30	4,09	0,12	0,98	99,57	21,24	51,95
0,5	17,49	4,46	0,10	0,94	99,88	17,55	50,22
0,5	19,30	4,09	0,13	1,09	99,79	17,59	51,85
0,5	19,59	3,72	0,11	0,98	99,46	20,22	51,05
0,75	19,56	3,70	0,13	1,05	100,00	17,19	53,75
0,75	19,66	5,24	0,12	0,98	100,00	13,62	51,87
0,75	20,81	4,85	0,14	1,10	99,41	12,08	50,27
0,75	19,36	4,28	0,14	1,08	99,48	13,33	49,15
0,75	21,61	4,48	0,17	1,19	99,59	10,23	50,77
1	19,60	3,58	0,15	1,17	99,62	19,31	50,65
1	20,26	4,18	0,15	1,20	99,72	14,40	46,05
1	20,41	4,96	0,17	1,305	99,17	13,16	46,35
1	20,72	4,96	0,18	1,32	99,72	12,54	51,11
1	20,16	4,96	0,17	1,30	99,36	9,95	52,5

7. Anexo

1. B. Modelos de regresión para Álamos y Sauces

Los valores ponderados fueron utilizados para realizar los análisis de regresiones múltiples con las siguientes variables:

Dependientes: tracción, rasgado, Z span y opacidad

Independientes: densidad, longitud de fibras, ancho de fibras, espesor de pared, lumen de fibras, frecuencia de vasos, diámetro de vasos, lignina, celulosa, hemicelulosas, extractivos y porosidad.

A continuación se presentan las variables que dieron significativas en el test.

Tabla 1.9: Modelos de regresión para álamo.	
Tracción = 0,735 * densidad	R ² : 0,52
Tracción = 1,01* lignina – 1,25 * hemicelulosas	R ² : 0,57
Rasgado = 0,676 * densidad	R ² : 0,43
Rasgado = -0,560 * hemicelulosas	R ² : 0,38
Z span = 0,72 * porosidad	R ² : 0,50
Z span = 0,68 * densidad	R ² : 0,44

Tabla 1.10: Modelos de regresión para sauce.	
Tracción = 0,81 * lignina – 1,19 * hemicelulosas	R ² : 0,55
Rasgado = -0,815 * hemicelulosas	R ² : 0,65