

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES

TESIS DOCTORAL

**PROPIEDADES DE LA MADERA DE SEIS CLONES DE SALIX
Y SU RELACIÓN CON EL PULPADO QUIMIMECÁNICO**

SILVIA MONTEOLIVA

2005



AGRADECIMIENTOS

A Santiago, Lucía y Florencia por la paciencia que tuvieron en mis ausencias.

A mi Directora María Cristina Area por su paciencia infinita en la corrección de este manuscrito.

A mi Co Director Raúl Marlats por su apoyo incondicional.

A Fernando Felissia por su dedicación y enseñanzas en las experiencias de pulpado en la Planta Piloto. Sin su apoyo la parte experimental de esta Tesis no se hubiera concretado.

A Javier Clermont por su ayuda silenciosa en la Planta Piloto.

A Susana Aguilar por su ayuda en el Laboratorio de Ensayos Físicos.

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

INDICE

CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO II : ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	20
CAPÍTULO III : HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	51
CAPÍTULO V : REGRESIONES MÚLTIPLES.....	135
CAPÍTULO VI : ANÁLISIS MULTIVARIADOS.....	156
CAPÍTULO VII : CONCLUSIONES	192
CAPÍTULO VIII : BIBLIOGRAFÍA	198
RESUMEN.....	211

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La aptitud papelera de una especie representa su capacidad para formar una hoja de papel con características y rendimientos aceptables. Esta capacidad depende de las particularidades físicas y químicas, intrínsecas de la materia prima (Panshin y De Zeeuw, 1980; Pipan, 1989; Deka et al., 1992) y de las condiciones operativas de pulpado. Tradicionalmente, se usan coníferas (gimnospermas) en la fabricación de pulpas para papel, pero en las últimas décadas, los costos de las materias primas han permitido el ingreso al mercado de las latifoliadas (angiospermas), con gran éxito.

Desde el punto de vista histológico, una conífera es mucho más simple y homogénea, y el 95% de su materia madera es apta como materia prima fibrosa. En cambio, las latifoliadas presentan una estructura xilemática con otros tipos celulares, además de los elementos fibrosos. Químicamente, también presentan diferencias cuali y cuantitativas frente a las gimnospermas. Las coníferas poseen menor cantidad de extractivos y mayor cantidad de lignina que las latifoliadas. Todas estas diferencias hacen que la versatilidad frente a los pulpados sea diferente en cada grupo (Barnett y Jeronimidis, 2003).

Asimismo, la decisión del uso de una determinada especie, se rige por el proceso de obtención de pulpa y por el tipo de producto final a fabricar (Foelkel, 1998). Para cada grado de papel, existe una serie de requisitos que pueden cumplirse solo con determinados procesos de obtención de pulpa y con determinadas especies, o por medio de mezclas de pulpas obtenidas a partir de diferentes especies y procesos.

Establecida la especie y proceso a utilizar, es posible estudiar y modificar la calidad del leño para mejorar la producción de dicho producto final (papel). Los planes de mejoramiento de la calidad de la madera para la industria papelera complementan actualmente los planes apoyados en la mejora del rendimiento en volumen de madera (Zobel y Talbert, 1988; Whiteman et al., 1996).

Propiedades de la madera – Calidad del leño para papel

No es posible referirse a calidad de una materia prima sin relacionarla con el proceso de pulpado a emplear y el tipo de producto papelerero a obtener, ya que para cada uno de ellos existe una situación óptima. Por eso, se hará referencia al pulpado quimimecánico (CMP) de latifoliadas (angiospermas dicotiledóneas) para papel de diario.

Entre las variables de la madera usualmente evaluadas para calificar un recurso para la industria papelera, se encuentran la densidad básica, la morfología de fibras (longitud, ancho, diámetro de lumen y espesor de pared), la composición química y la blancura. Otros parámetros, como contenido de humedad, porcentaje de tejidos, anomalías en la madera (nudos, madera de reacción, biodeterioro), tilosis, ángulo microfibrillar, y resistencia individual de las fibras, pueden ser importantes en la evaluación completa del recurso fibroso (Barnett y Jeronimidis, 2003).

La densidad básica ha probado ser un apropiado estimador de la calidad papelera, en términos de los rendimientos de pulpado, del consumo de reactivos, de las resistencias de los papeles y otras características, como propiedades ópticas y calidad superficial (Ferreira, 1972; Valente et al., 1992). Es un parámetro de fácil determinación, que depende principalmente de las dimensiones celulares y de las proporciones relativas de los tejidos, entre los que se destaca el tejido fibroso. En la madera de sauces, las fibras representan alrededor del 55-60% de los elementos celulares, y los vasos el 30%. Esta

proporción de tejidos genera una baja densidad de la madera y un menor rendimiento de pulpa. Por otra parte, una densidad uniforme es importante en la industria del pulpado, ya que está directamente relacionada con la regularidad de la calidad de la pulpa (Bonavía de Guth, 1991; Downes et al., 1997b).

Las dimensiones de las fibras - longitud, ancho y espesor de las paredes celulares - son también características cuya variación está asociada con el logro de diferentes calidades de papel en términos de sus resistencias, propiedades ópticas y características superficiales (Braun y Davis, 1969; Amidon, 1981). Los sauces poseen fibras cortas (de alrededor de 1 mm) y de espesores de pared relativamente bajos (Senisterra et al., 2000). En general, estas dimensiones fibrosas se estudian a través de relaciones biométricas que intentan medir el comportamiento que tendrá esa fibra en la trama de papel, como son, el índice de afieltramiento o fieltrabilidad (relación entre la longitud y el ancho), el índice de flexibilidad (relación entre el lumen y el ancho) y el índice de runkel (relación entre el espesor de pared con respecto al lumen y al ancho de la fibra). Estos 2 últimos miden la capacidad de colapso de la fibra. En el pulpado quimimecánico (CMP), el tratamiento químico es suave y no extrae la lignina, por lo tanto las fibras permanecen rígidas. Esto es compensado por el bajo espesor de pared del sauce, con lo que logra una cierta flexibilidad de fibras (Deka et al., 1994).

La proporción de tejidos, es decir, la proporción entre vasos, fibras y parénquima que presenta la madera, tiene influencia sobre varias características (Downes et al., 1997a; Ona et al., 2001). Una mayor proporción de fibras produce mayor rendimiento de pulpa, mientras que un mayor porcentaje de vasos implica menor rendimiento, pero mayor facilidad de impregnación, sobre todo si son numerosos y dispersos (porosidad difusa). Los vasos y radios suelen romperse durante la refinación, de esta forma aumenta la cantidad de finos de "tipo harinoso". Estos finos no sirven de nexo en la trama fibrosa ya que no están fibrilados, por lo tanto no aportan superficie de contacto

y unión (bonding) pero sí superficies de reflexión, incrementando la opacidad y sirviendo de relleno. Es necesario un adecuado balance entre finos fibrilares y harinosos para no disminuir las propiedades de resistencia. Los radios, además, pueden presentar contenidos indeseables (extractivos) que producen mermas de rendimiento y blancura.

Composición química. Las características superficiales que pueden lograrse con la refinación de las fibras, dependen en gran medida de la composición química de la madera. Una mayor cantidad de lignina las hace más rígidas y menos propensas a la fibrilación interna. Con un pretratamiento químico suave, como el CMP, se logra un hinchamiento relativo de la pared de las fibras (sweeling), por lo tanto la acción mecánica también se restringe a las capas más externas de la pared celular. A menores tenores de lignina, menor reversión del blanco y menor gasto de energía en la refinación. Los extractivos suelen impartir color y además influyen en el rendimiento, ya que los solubles en agua se pierden principalmente en este tipo de pulpado (Hillis y Sumimoto, 1989). Los sauces, en general, presentan mayor cantidad de extractivos que los álamos (latifoliadas de la misma familia que los sauces: Salicáceas). Los extractivos, por otra parte, se hallan vinculados al sitio.

El color de la madera es muy importante en estos procesos, en los cuales el blanqueo posterior de la pulpa es mínimo o nulo (García Volonté y Suárez, 1989). La “blancura” está estrechamente relacionada a la composición química de la materia prima y a su estado de deterioro, producido por agentes biodegradadores. Los sauces utilizados en la industria papelera son de madera clara, pero durante el proceso de pulpado suelen producirse reacciones indeseables que perjudican el grado de blanco alcanzado (Johansson y Gellerstedt, 2000). Una madera con uno o dos puntos menos de blanco (%ISO) puede generar la necesidad de blanquear la pulpa, con el correspondiente aumento en los costos.

El contenido de humedad en la madera varía enormemente. La humedad en la madera existe bajo dos formas: agua ligada (unida químicamente en las paredes celulares) y agua libre (generalmente en los lúmenes celulares). La madera recién cortada, conteniendo una gran cantidad de agua libre, comienza a secarse. Dependiendo del lugar en la cual se estacione, el agua se evapora con mayor o menor velocidad hasta lograr un punto de equilibrio con el ambiente circundante (equilibrio higroscópico). La madera se seca rápidamente hasta el punto de saturación de la fibras (aproximadamente 30%), que es el punto en el cual las paredes celulares se encuentran completamente saturadas de agua, pero sin líquido en los lúmenes. El contenido de humedad se relaciona estrechamente con la calidad de la pulpa quimimecánica. A mayor humedad, la impregnación química previa se produce en forma más homogénea, se consume menos energía en la refinación y se genera una menor cantidad de astillas. Las propiedades más afectadas son las resistencias (Tyrvainen, 1995).

El ángulo microfibrilar es el ángulo en el que están depositadas las microfibrillas de celulosa en la capa S2 de la pared celular, con respecto al eje vertical de la fibra. Se ha demostrado, en pulpas químicas, que cuanto menor es el ángulo, mayor es la resistencia individual de la fibra a la tracción (French et al., 2000; Evans et al., 2000; Wang et al., 2001). Es una variable poco estudiada por su difícil determinación.

La resistencia individual de las fibras se asocia fuertemente al ángulo microfibrilar. Se determina por la resistencia de las fibras a la rotura por tracción. Su determinación en pulpas mecánicas no es muy difundida (Jayne, 1959; Wangaard y Williams, 1970).

El deterioro sufrido en la madera por hongos, bacterias o insectos es una fuente importante de pérdida de rendimiento y resistencias en las pulpas. Dependen en gran medida del estacionamiento y modo de almacenaje de la madera. Un estudio profundo del tema requiere experiencias controladas de

inoculación en diferentes situaciones ambientales. (Klasnja et al., 1997; Sakamoto et al., 2000, 2002; Kim y Singh, 2000). De los muchos tipos de hongos degradadores de la madera, posiblemente los hongos de pudrición blanca sean los que más incidencia tienen en latifoliadas. Estos hongos degradan preferentemente la lignina (degradación selectiva), aunque finalmente, en un estadio avanzado, atacan también la celulosa (degradación simultánea). La madera pierde rigidez y se torna blanca. Cuando la degradación es simultánea, la pérdida de rendimientos y resistencias se hacen evidentes. Los hongos de pudrición castaña degradan solamente los carbohidratos, dejando la madera con esta coloración y sin la birrefringencia característica de la celulosa. Las manchas, en cambio, son producidas, en general, por hongos no xilófagos, es decir, que solo producen la aparición de una coloración negruzca o azulada, sin degradar a los componentes de la madera.

Tilosis es el taponamiento de los vasos producido por la introducción del contenido de las células parenquimáticas a través del par de puntuaciones. El desarrollo de tilosis es un proceso fisiológico normal, que indica la transformación de albura en duramen en muchas especies de latifoliadas. Normalmente, no se forman en la zona externa albura, pero pueden desarrollarse en respuesta a daños mecánicos, invasión fúngica o infección viral (tilosis traumática) (Leitch et al., 1999). Dependiendo de las especies, el proceso de duraminización de una madera se produce en mayor o menor medida. En las especies de rápido crecimiento y de turnos de aprovechamiento cortos, como es el caso de los sauces, la cantidad de duramen es mínimo. Una mayor proporción de tilosis impide una buena impregnación del chip en la etapa química previa a la refinación.

Los nudos son las bases de ramas incluidas en el tronco. No existe madera libre de nudos, ya que las ramas son parte de la estructura del árbol. El número, tamaño y tipo de nudos formados en la madera, dependen del número y tamaño de las ramas de las cuales se originaron, de la edad de esas ramas y

del tiempo que permanecieron en el tronco luego de muertas. Los nudos están siempre asociados a la madera de reacción. Alteran la homogeneidad de la madera, ya que el alineamiento de los tejidos de la rama (grano) es perpendicular al del tronco. La cantidad de nudos influyen notoriamente en el proceso de pulpado (Barnett y Jeronimidis, 2003). Aumentan la densidad básica y características químicas como contenido de celulosa y extractivos. Sus fibras son de menor longitud y de morfología más heterogénea (Tyrvaainen, 1995).

La presencia de madera de reacción es habitual en la madera y posee características morfológicas y químicas diferentes a la madera “normal”. Las fibras poseen mayor cantidad de celulosa y menor ángulo microfibrilar. Vistas al microscopio óptico, las fibras presentan una capa interna de la pared celular llamada capa G (o gelatinosa). Estas fibras se comportan de manera muy diferente a las de la madera “normal” frente a los licores de impregnación y al proceso de refinación. Se la encuentra generalmente alrededor de los nudos, en la parte superior de ramas y en ciertas porciones de troncos inclinados. Se ha demostrado que en especies de rápido crecimiento su presencia puede no estar asociada al crecimiento excéntrico de las ramas o tronco (Peszlen, 1995).

Procesos de Pulpado

Para conocer como se relacionan las propiedades de la madera con el papel, es necesario entender qué le ocurre a la madera durante el proceso industrial de pulpado. Por ello, se presenta una introducción sobre generalidades de los pulpados, antes de analizar las relaciones madera-pulpa.

Por medio de varios procesos de obtención de pulpas celulósicas, la madera y otras partes fibrosas de vegetales se convierten en fibras aptas para la

fabricación de papel. Estos procedimientos se denominan “pulpados” y su propósito es la liberación de las fibras.

Pulpados de Alto Rendimiento

Pulpas de alto rendimiento son aquellas que contienen prácticamente toda la lignina presente en la madera y requieren considerable tratamiento mecánico para separar y preparar las fibras.

Pueden considerarse Pulpados de Alto Rendimiento (PAR) a los mecánicos puros (procesos mecánicos a la piedra SGW y PGW, mecánico con refinador RMP, termomecánicos TMP), y a los que combinan acción química previa y mecánica (quimimecánicos de diferentes tipos CMP y quimitemomecánicos CTMP).

Estos procesos han representado siempre una parte importante en la producción mundial de pulpas celulósicas, favorecidos frente a los pulpados químicos y semiquímicos por su menor costo global, mayor aprovechamiento de los recursos fibrosos y menor carga contaminante. Por otra parte, brindan pulpas con mejor formación de hoja, mayor opacidad y otras propiedades específicas que las hacen virtualmente irremplazables para determinados usos como el caso de los papeles para periódicos. Sus mayores desventajas consisten en sus menores resistencias, alto requerimiento de energía específica y limitada capacidad para alcanzar elevadas blancuras (Area, 2002).

Con la aparición del pulpado quimimecánico (CMP) comenzaron a utilizarse las latifoliadas de baja densidad como materia prima fibrosa. El proceso consiste en una impregnación con químicos (en bajas concentraciones y por corto tiempo) previa a la refinación, logrando así una cierta degradación de la lignina, pero sin llegar al punto de separación de fibras.

Caracterización microscópica de las pulpas quimimecánicas

Al examinar una muestra de pulpa quimimecánica al microscopio óptico, se puede observar una variedad infinita de formas y tamaños que dificulta enormemente una caracterización (Heikkurinen y Leskela, 1999). Para describir mejor este tipo de pulpas, se la fracciona en un clasificador Bauer McNett, que permite dividir la pulpa completa en diferentes tamaños al pasar por tamices estandarizados (TAPPI 233). De esta manera, podemos analizar las fracciones por separado y cuantificarlas.

Las pulpas mecánicas en general están compuestas por 3 tipos diferentes de elementos fibrosos:

Fracción de fibras	Fibras enteras Fibras cortadas	Su cantidad, calidad superficial y forma en que se disponen definen en parte la resistencia de la hoja
Fracción de finos	Segmentos muy cortos de fibras Fragmentos de paredes celulares	Contribuyen a conferir resistencia y producen una buena formación de la hoja Aportan a las propiedades de impresión, opacidad y alisado postcalandrado
Haces fibrosos	Conjunto de pocas fibras sin separar (astillas)	Producen irregularidades en la trama fibrosa

Lo que se busca es aumentar la flexibilidad de las fibras largas, disminuir la fracción de astillas y aumentar la proporción de finos fibrilares.

Proporcionalmente, la fracción de fibras en estas pulpas es de aproximadamente 1/3, siendo los otros 2/3, finos y haces.

Las resistencias y propiedades ópticas de estas pulpas, se pueden explicar a través del delicado equilibrio de estas 3 fracciones y su función en la formación de la trama de papel (Lehtonen et al., 2004). Las resistencias están ligadas a la proporción de fibras enteras y a la fibrilación de sus paredes que aumenta la habilidad de “bonding”. La presencia de los finos fibrilares, complementa, también, la unión y nexo entre estas fracciones (Lindholm, 1980 a y b; Jones y Richardson, 1999). Las propiedades ópticas y de impresión, se asocian fuertemente a la presencia de finos y a la trama abierta de la hoja, que permite reflexiones y absorciones de la luz en forma difusa (Mohlin, 1989; Olander et al., 1991; Reme y Helle, 1998).

En 1963, Forgacs realizó la caracterización microscópica de las pulpas mecánicas (SGW y TMP de coníferas). En su trabajo, determinó que la longitud de fibras promedio en la pulpa y la forma de las partículas, son los factores determinantes que afectan las propiedades de resistencia mecánicas para este tipo de pulpas. Definió así, un Factor L para caracterizar la longitud de la fracción de fibras de la pulpa, y un Factor S para caracterizar la forma y superficie de las partículas. Actualmente, estos factores se siguen utilizando en la cuantificación de las fracciones de las pulpas mecánicas (Area y Gavazzo, 1990; Olander et al., 1991; Carrasco et al., 1991; Ruzinsky et al., 1996).

La caracterización microscópica de pulpas CMP indica la presencia de pocas fibras enteras, fibras rígidas con cortes limpios y sin fibrilación y fibras colapsadas con fibrilación superficial y extremos desenrollados o escobados. Las fracciones menores muestran la aparición de cintas de pared. Se visualizan haces fibrosos en todas las fracciones, siendo la fracción R30 la que presenta mayor heterogeneidad en los haces fibrosos (Area y Gavazo, 1990; Morseburg y Lonnberg, 1999; Zanuttini y Marzocchi, 2000).

Evaluación de las pulpas

Una serie de ensayos estándar permite evaluar la calidad de las pulpas. Las evaluaciones se realizan sobre hojas de ensayo a un dado grado de refino. El grado de refino (medido a través de los Grados Shopper Reigler, °SR) es una forma de medir el desarrollo de propiedades de las fibras adquirido a través del tratamiento mecánico con el molino. Con mayor tratamiento mecánico se logra mayor fibrilación, lo que permite un mejor nexo en la trama de papel. En las pulpas CMP, cuanto mayor es el refino, mayor es la opacidad por generación de finos y menor es la proporción de fibras enteras. La fibrilación que se alcanza es principalmente externa, ya que las fibras son rígidas y no se hinchan totalmente con el agua (sweeling).

La composición tan compleja de las pulpas CMP hace que, frecuentemente, la medición del grado de refino a través del aparato Schopper Riegler no represente exactamente la calidad de la pulpa, debido a que el porcentaje de astillas y de finos presentes puede alterar los resultados. Por este motivo, se mide también el valor de agua retenida (water retention value, WRV), que estima el hinchamiento de las paredes de las fibras por el agua, como una medida complementaria al grado de refino. El WRV no influencia el drenaje de la pulpa, por lo tanto es independiente de la medida de °SR. Así, una pulpa con alto WRV puede tener bajo °SR (Jayme, 1958). El efecto de refino de un equipo puede ser definido como la relación entre el °SR y el WRV.

El ensayo de tracción, mide la resistencia de la hoja al realizar un esfuerzo de tracción sostenido en una tira de papel de dimensiones estandarizadas. Otra medida de resistencia es el rasgado, cuyo ensayo mide la cantidad de trabajo realizado al rasgar el papel a través de una distancia fija, luego de realizado un corte inicial.

En papel periódico, las propiedades de resistencias a la tracción y al rasgado son importantes, debido a que la impresión se realiza en máquinas rotativas de

alta velocidad. La formación de la hoja de papel se desarrolla también a altas velocidades (960 metros/minuto), por lo tanto, la exigencia en esfuerzos de tracción y rasgado es muy elevada.

La resistencia a la explosión no es una medida importante en papel periódico. Se define como la presión hidrostática necesaria para lograr la ruptura de una probeta de dimensiones normalizadas, cuando ésta se deforma por la acción de una membrana de látex de aproximadamente 1,2 pulgadas de diámetro, que se fuerza contra la misma a una velocidad controlada de carga

La densidad de la pulpa (o su inversa, el volumen específico) están estrechamente relacionados con la trama de la hoja. Se podría decir que, cuanto mayor es la densidad, mayor es el contacto entre las fibras, y por lo tanto aumenta la unión entre fibras (bonding) y las propiedades de resistencia.

La elongación es el máximo estiramiento que puede realizar la fibra antes de romperse por tracción. Su valor, también, se relaciona con las uniones interfibras (bonding), con el módulo elástico de las fibras y con la presencia de torceduras, enrollamientos (curl, kinks, crimps) y microcompresiones en las fibras. Es un indicativo de la aptitud del papel para resistir tensiones de tracción no uniformes. Su valor es importante en la reducción de la frecuencia de roturas en las máquinas de impresión rotativas.

El TEA (energía absorbida a la tracción) es el área bajo la curva del gráfico tracción y elongación. Indica la durabilidad del papel cuando está sujeto a esfuerzos dinámicos repetitivos. Expresa la fortaleza (toughness) de la hoja.

La resistencia al paso del aire es la capacidad del papel a ser atravesado por un fluido (líquido o gas). A mayor porosidad en la trama del papel, menor es el valor de resistencia al paso del aire, por lo tanto se utiliza la medida de resistencia como indicativo de la porosidad del un papel. El papel prensa tiene normalmente una mayor permeabilidad que otros papeles de impresión o el

kraft. La estructura porosa, no solamente afecta a la penetración de líquidos en el papel (tinta) sino que, es en parte responsable, de las propiedades de aspecto, en especial el blanco y la opacidad. Los papeles muy densos (poco porosos) son, en general, menos blancos y más transparentes (menos opacos).

Las propiedades ópticas miden el aspecto de la hoja de papel y dependen de la interacción de la luz que éste refleja, absorbe y difunde. Según el destino final del papel, éste deberá poseer determinadas características de grado de blancura, opacidad, brillo y color. Para el papel de diario, debido a su bajo gramaje ($45-50\text{g/m}^2$), la opacidad es muy importante, ya que es imprescindible que no se vea a través de la hoja.

Tradicionalmente, las medidas de las propiedades ópticas se realizan midiendo la blancura o "brightness". Brightness se define como la reflectancia a 457 nm medida bajo luz difusa sobre una muestra "opaca". Este método sirve para las medidas de rutina, pero no brinda información sobre la composición química del material. Para conocer su contenido de cromóforos se utiliza la teoría de Kubelka-Munk. Esta teoría incluye dos conceptos: el coeficiente de absorción (k), que depende de la composición química del material, ya que es una medida de la cantidad de cromóforos que absorben la luz; y el coeficiente de dispersión (s), que depende de la estructura física del material y representa una medida de su habilidad para dispersar la luz. Los coeficientes k y s dan información relevante cuando se estudian los cambios físicos y químicos del material. El brightness del material finalmente depende de k y s (Johansson y Gellerstedt, 2000). Es posible aumentar la blancura de un material modificando su composición química, es decir reduciendo su k (por blanqueo por ejemplo) o aumentando su s (aumentando el gramaje). Tanto k como s se encuentran afectados por el proceso de pulpado, pero son independientes entre sí.

El uso tan difundido del brightness como medida de la blancura observada visualmente, se debe a que es una medida caracterizada por una única variable, y por lo tanto, más fácil de interpretar que el color, caracterizado por 3

variables. Otra razón es que el brightness representa la cantidad de luz reflejada en el espectro del azul (457nm), donde el blanqueo tiene su mayor efecto. Pero esta variable también tiene sus limitaciones, ya que mide exclusivamente lo que ocurre en la banda del azul.

El mejor modo de medir eficazmente el progreso de la decoloración por blanqueo, es el uso del sistema tridimensional de color. En estos sistemas denominados tristímulus, los cambios de color son cuantificados usando un sistema de coordenadas de colores opuestos. Así, en la escala utilizada en el sistema CIELab* se define el extremo +a* como el rojo, el -a* como el verde, +b* como el amarillo y -b* como el azul. El L* representa la escala de grises, desde L*=0 (negro) a L*=100 (blanco), (Popson et al., 1997).

Usos

Los usos a los que se destinan las pulpas quimimecánicas (CMP) son:

- papel para diario, reforzado con 10-15% de pulpa química
- papel para revistas
- papeles de impresión en general mezcladas con 30-70% de pulpa química
- papel base para estucar
- cartulina para envases de alimentos

Grados

Las pulpas mecánicas generalmente se clasifican en grados, de acuerdo con el papel en el cual se usan (diario, empapelar, impresión, tisú, cartones, entre

otros). Las divisiones entre grados no son estrictas, aunque los patrones de calidad se encuentran bien definidos (Wood y Karnis, 1991; Ainomaija, 2000).

Las características del papel periódico son:

Gramaje: bajo, 40-48 g/m²

Grado de refino: 48-52 (°SR)

Tracción y rasgado: 20-25 N m/g y 3,5-4 mN m²/g

Densidad: 0,350-0,400 g/cm³

Blancura: 58-60 %ISO

Opacidad: alta, 98 %

En general, se utilizan mezclas de pulpas (empastes), para obtener las características deseadas en cada tipo de producto al menor costo. El tipo o técnica usada en la impresión también tiene peso sobre la decisión del empaste utilizado. El uso de pulpas mecánicas y quimimecánicas para papel de diario es del orden de 80-100%. Los beneficios de este alto porcentaje de pulpa mecánica, como ya se mencionó, son su aporte a la opacidad, su elevado volumen específico y su buena imprimabilidad. Estos papeles son una opción económica para la publicación masiva, ya que el costo de estas pulpas es mucho más bajo que el de las químicas. La desventaja del dominio de pulpa mecánica en el papel, es la tendencia al amarillamiento de las hojas con la exposición a la radiación UV, lo que limita su uso a papeles que no requieren estabilidad óptica.

Relación madera-pulpa

Las relaciones que existen entre la madera y la pulpa pueden cuantificarse mediante la aplicación de modelos de regresión múltiple y análisis multivariado. La validación de estos modelos, permite predecir el comportamiento de un determinado material fibroso, a partir de sus características físicas y químicas.

La aplicación de estos modelos de predicción en la selección de materias primas con mejores aptitudes para el pulpado, conduce a un ahorro de tiempo y de trabajo, ya que permite direccionar los esfuerzos de selección y mejoramiento sobre los individuos mejor calificados para el uso final requerido.

Estas relaciones fueron muy estudiadas para los pulpados químicos (Wangaard 1962; Marklund et al., 1998; Ona et al., 2001). Los pulpados de alto rendimiento, por su complejidad, han recibido menos atención. Los estudios indican que existe una interrelación muy estrecha entre propiedades de la madera, condiciones operativas de pulpado y propiedades finales de la pulpa (Eskelinen y Marton, 1978; Carrasco et al., 1991). Las propiedades de estas pulpas dependerán de la cantidad y calidad de los tres tipos de elementos fibrosos que las caracterizan: las fibras, los finos y los haces fibrosos. La cuantificación del estado de estas 3 fracciones es difícil y tediosa. Se ha intentado relacionar algunas propiedades de la madera con la calidad de la pulpa, en iguales condiciones operativas de procesamiento, con resultados dispares. En general, podría asegurarse que ninguna de las variables de la madera provee los mejores ajustes con todas las propiedades (Lindholm, 1980 a y b; Delfederico y Area, 1986).

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

1- La madera de sauce en Argentina

Desde los años 1980, los clones de sauces han sido estudiados de una u otra forma. Sin embargo, estos estudios no fueron sistemáticos, ni abarcaron la totalidad de las características que definen la aptitud papelera de un recurso fibroso.

Existen antecedentes de estudios parciales de las características del leño para *Salix babylonica* var *sacramenta*, *Salix nigra*, *S.nigra* N°4, *Salix alba*, *Salix alba* var. *calva*, híbridos interespecíficos cvs A-131-25 , A-131-27, 13-44, 131-16, 250-33, 250-36, 250-52, 160-16, Amos, Usoz, Calvete, 395-112, 395-77, 395-32, 395-21, 339-12, 337-1, 114-1, 278-25, Familia 13 (Fiaño, 1976; Bonavía de Guth y Ragonese, 1980; Bonavía de Guth, 1981, 1982, 1984, 1987; Repetti, 1983; Bonavía de Guth y Piussan, 1987; Cerrillo et al., 1992). En general, estos trabajos toman una única altura de muestreo (1,30 m) y un número de árboles entre 3-5. El sauce americano (*Salix babylonica* var *sacramenta*), se encuentra siempre como especie testigo por ser la de mejor aptitud papelera hasta el presente.

Fiaño (1976) y Fiaño et al. (1976) exponen el resultado de varios trabajos sobre sauces híbridos y su comportamiento frente a pulpados de alto rendimiento, en donde se incluyen datos interesantes sobre composición química completa y morfología celular. No se incluyen relaciones entre las propiedades de la madera y de las pulpas obtenidas a la soda fría y al sulfito neutro.

Celulosa Argentina SA (1968/69) publicó un trabajo con 7 especies e híbridos de sauces, entre los que se encuentran el sauce americano, el clon 131-25 y el clon 131-27, en el cual se analizó la composición química completa de la madera y los caracteres morfológicos de las fibras (longitud y ancho e índice de afieltramiento). Se destacó el sauce americano por presentar mayor longitud de fibras, mayor índice de afieltramiento y menores porcentajes de extractivos. Es interesante destacar, que se obtuvo una medida de la blancura de la madera, a partir de la determinación de blancura de las hojas de ensayo de pulpa RMP sin blanquear.

En los trabajos de Bonavía de Guth y Ragonese (1980) y Bonavía de Guth (1981, 1982), se estudiaron la densidad básica de la madera, la longitud y ancho de las fibras, el índice de afieltramiento y los extractivos en alcohol-benceno de las especies e híbridos interespecíficos de *Salix* más cultivados en el Delta. La autora, realizó un ranking de clones en base a estas características, sobre las cuales definió la mejor "aptitud papelera", aunque sin considerar el análisis de los extractivos. En sus resultados, destacó los clones 160-16 y 250-33 frente a los otros evaluados, aunque ninguno superó los valores del sauce americano tomado siempre como testigo. Los híbridos 131-25 y 131-27 tan ampliamente difundidos en su cultivo fueron, en este sentido, relegados a las últimas posiciones en el ranking.

Bonavía de Guth y Piussan (1987) reportaron un estudio sobre *Salix nigra* en el cual se citan diferencias de crecimiento en diámetro, densidad de la madera, longitud y ancho de fibras, índice de afieltramiento y extractivos en alcohol-benceno según 5 sitios de implantación diferentes en el Delta Paranaense. Para la misma especie, Bonavía de Guth (1984) estudió la variación axial y radial dentro del árbol de estas mismas variables en árboles de 14 años, siendo ésta la primer y única cita hallada en cuanto a variación axial de clones de sauces en Argentina. En este trabajo, la autora registró un aumento de la densidad y extractivos hacia el ápice, medidas sobre 8 alturas fijas. Para la

longitud de fibras, encontró diferencias en las alturas pero no menciona la tendencia. En sentido radial, la densidad aumentó de médula a corteza hasta los 8-10 años y luego descendió bruscamente; la longitud de fibras aumentó hacia la periferia hasta los 10-12 años y luego descendió; los extractivos no fueron considerados radialmente.

En 1987, Bonavía de Guth publicó un trabajo sobre la evaluación de nuevos cruzamientos de sauces. En este estudio demostró que los descendientes de cruzamientos en los que intervenían como progenitores *S. matsudana* y *S. nigra* heredaban las buenas características de la madera, medidas en términos de densidad, longitud y afieltramiento, así como también los buenos crecimientos en diámetro (DAP). En cambio, los cruzamientos con *S. babylonica* no heredan las buenas propiedades del leño del americano. Estableció un ordenamiento de clones en base a rendimiento en toneladas por hectárea de madera y por características del leño. A pesar de estos resultados promisorios, no se han continuado ni profundizado los estudios sobre estos clones ni se han establecido plantaciones comerciales en el Delta.

Cerrillo et al. (1992), en el marco de un programa de mejoramiento de sauces llevado a cabo en el CIEF (Centro de Investigación y Experiencias Forestales, Buenos Aires), publicaron la evaluación de un ensayo de 22 clones de sauces en 3 sitios del Delta. Uno de estos sitios corresponde al mismo ensayo en el que se muestrearon los árboles para esta tesis. La evaluación se realizó a los 5 años de instalado el ensayo y tomó en cuenta las siguientes variables: altura total del árbol, DAP, densidad básica de la madera y productividad, a través de un índice. Se demuestran diferencias significativas entre clones y sitios para todas las variables analizadas, sin embargo no se halló significativa la interacción clon x sitio. Se estableció un ranking de clones en el cual los más destacados son el *Salix nigra* 18, híbrido 26992, *S. nigra* 3 y 4, híbrido 13-44 y *S. nigra* 82, superando todos ellos al americano.

Novaresi et al. (1997), en un informe técnico, realizaron una evaluación de madera y pulpados de 5 clones de sauces de 8 años implantados en Las Animas en el Delta (americano, 13-44, 131-27, 395-112 y *Salix nigra* 4). Se rescata como importante que los valores de las variables son tomados sobre 5-10 individuos muestreados a 3 alturas diferentes, y que además, se realizaron los análisis químicos completos de la madera y los pulpados quimimecánicos en forma similar a los efectuados para esta tesis.

Villegas et al. (2002a y b) y Villegas y Marlats (2003) estudiaron la variación axial y radial de la densidad básica de la madera en sauce americano y 131-25 de 13 años implantados en dos sitios en el Delta. La densidad básica presentó diferencias entre clones, siendo el americano el de mayor densidad. La variación axial no fue significativa. La variación radial presentó distintos patrones según el clon, sin una tendencia clara en el americano y con aumentos médula-corteza en el híbrido. Ambos clones presentaron diferencias significativas entre árboles para la variable estudiada y una clara interacción orientación cardinal x posición radial.

No se hallaron estudios de cuantificación de madera de reacción, tilosis, nudos, deterioro, espesores de pared de las fibras y lumen, índices papeleros de flexibilidad y de runkel, proporción de tejidos, ángulo microfibrilar y resistencia individual de las fibras.

Levin y Castro (1998) describieron diferentes estados de degradación in vitro de la madera de *Salix* sp. y *Populus* sp. del Delta del Paraná causados por *Trametes trogii* (pudrición blanca). Presentaron los diferentes patrones morfológicos de degradación simultánea y selectiva marcando las diferencias halladas en los géneros. Fotos de microscopía óptica y electrónica de barrido acompañan los resultados.

La información dendrométrica y epidométrica disponible para estos clones es también escasa, encontrándose algunos trabajos en los que se citan datos de crecimiento en altura, diámetro, volumen de madera y porcentaje de corteza a determinadas edades (Bonavía de Guth 1981, 1982, 1984; Cerrillo et al., 1992).

Cerrillo y Di Meo (1997), comunicaron resultados preliminares de crecimiento de un estudio correspondiente a 13 familias de sauces, obtenidos a través de cruzamientos controlados entre distintas especies e híbridos. Algunas combinaciones de especies demostraron una supremacía de crecimiento, a temprana edad, en relación al vigor inicial. Las familias que combinaron la especie *Salix nigra* en sus individuos progenitores, seguidas por una familia en la que interviene *S. matsudana* como madre, resultaron las más destacadas en respuesta volumétrica. Las familias originadas en el cruzamiento de *S. babylonica* var *sacramenta* (sauce americano) resultaron las de peor evolución.

Algunos trabajos incluyen la medición de los anillos de crecimiento y su relación con otras variables, así para *Salix nigra* de 14 años Bonavía de Guth y Piussan (1987) determinaron que el crecimiento de los 10 primeros años representó el 83-98% del crecimiento total. Bonavía de Guth (1987) en un estudio de 15 clones de sauces correlacionó la medición de los anillos de crecimiento (últimos 3, 4 y 5 años) con el DAP siendo la correlación positiva y significativa.

Garau et al. (1983), midieron los incrementos de los anillos hasta los 10 años de edad, en los híbridos 131-25 y 131-27, implantados en dos situaciones edáficas diferentes en la provincia de Buenos Aires. Realizaron curvas comparativas de incrementos corrientes y medios anuales, entre clones y entre sitios.

Baraño et al. (1983), realizaron un estudio comparativo del sauce híbrido 131-25 y *Populus x euroamericana* cv Conti 12, a los 10 años implantados en Luján, Buenos Aires, evaluando los incrementos corrientes anuales.

Estudios de análisis fustal y cálculo de volumen, área basal y coeficientes mórnicos fueron publicados para *Salix nigra* y *S. nigra* 4 (Cortizo et al., 1993; Alonzo, 1980). Los estudios indican la supremacía de esta especie en cuanto a crecimiento en diámetro y volumen siendo 100% superior con respecto a otros híbridos de gran difusión. También se demuestra que esta especie no está dotada de la plasticidad de otros clones y resulta más afectado cuando no se satisfacen sus requerimientos, comportándose como un clon muy exigente en calidad de suelo, eficiencia del drenaje y en un tenor adecuado de humedad permanente.

Cellini et al. (2001) publicaron modelos de perfil de fuste para el sauce híbrido cv. 131-27 que permiten predecir el diámetro del tronco a cualquier altura y así estimar el volumen de madera producido en una fracción del fuste o en su totalidad.

Se registran pocos trabajos en *Salix* que estudien variables dendrométricas y su asociación con características de la madera que importan a la industria papelera. Bunse y Sparnochia (1989), estudiaron la asociación de características morfológicas y tecnológicas en progenies de híbridos de sauces. Establecieron correlaciones a diferentes edades entre densidad básica de la madera, blancura y variables de crecimiento, tales como diámetro basal, altura total y porcentaje de corteza. Hallaron una correlación negativa entre el diámetro y la altura al tercer año y el porcentaje de corteza, lo cual permitiría mejorar todos los caracteres por la selección de vigor. La blancura tiene una correlación positiva con la altura y la densidad con los diámetros basales, lo que indica que una mayor velocidad de crecimiento mejora la densidad y el blanco.

Repetti et al. (1981), estudiaron la incidencia de la inclusión de la corteza, de la edad del árbol y la densidad de la plantación sobre pulpas de alto rendimiento (soda fría y sulfito neutro) en sauce americano, *Salix nigra* e híbridos interespecíficos cv 131-25 y 131-27. La corteza produce una disminución de la blancura, la densidad y la resistencia a la tracción y un aumento de la opacidad, el rendimiento y el rasgado. Los resultados analizados a 3 edades (4, 7 y 10 años) demostraron que hay un aumento de la resistencia al rasgado con la edad como es de esperarse con fibras más largas (10 años) y una disminución de la tracción, no se notaron diferencias en cuanto a las propiedades ópticas, composición química y rendimientos. La comparación de 2 densidades de plantación no generó resultados con diferencias significativas de rendimiento y consumo de reactivos. La madera proveniente de las plantaciones más espesas proporcionó pulpas más densas y de mejor tracción, mientras que el rasgado no se vio afectado.

2- Antecedentes a nivel mundial sobre madera de sauces

A nivel mundial las plantaciones de *Salix* no son tan importantes. Se las utiliza en Canadá, Estados Unidos, Checoslovaquia, Rumania, Italia, Holanda, Finlandia, Suecia, China, India y Nueva Zelanda. Los objetivos de las plantaciones son diversos e incluyen la industria papelera, bosques energéticos, cestería (mimbres), cajonería, cortinas rompevientos y funciones ornamentales.

Taylor (1975) estudió la especie *Salix nigra* del delta del Mississippi (USA) y determinó la variación de algunas propiedades de la madera dentro del individuo. Halló que la densidad básica aumenta significativamente con la altura del árbol. Demostró que la longitud de fibras, el volumen de vasos, el diámetro y espesor de pared de las fibras aumentan desde la médula a la corteza,

mientras que el volumen de radios permanece constante en todo el tronco. Determinó además, que las zonas de lento crecimiento poseen mayor proporción de vasos. Analizando el factor sitio de implantación, demostró que no es significativo para la densidad, el volumen de fibras del tejido, el ancho del anillo de crecimiento, el ancho y espesor de pared de las fibras. En cambio, los sitios resultaron fuentes significativas de variación, para el porcentaje de vasos, de radios y la longitud de fibras. No halló relación entre el crecimiento en diámetro, medido a través del ancho de los anillos, y la densidad de la madera.

En Finlandia, Lonnberg (1975) estudió la especie *Salix caprea*, entre otras especies de latifoliadas de corta rotación, como materia prima fibrosa para la industria papelera. Analizó la densidad de la madera, la longitud de fibras, composición química completa de la madera a diferentes edades. Encontró diferencias significativas de estas variables en las especies analizadas y realizó comparaciones con la respuesta al pulpado Kraft de *Betula*, especie de latifoliada normalmente utilizada en la industria papelera de ese país.

Deka et al. (1992, 1994), estudiaron varios híbridos de sauces en Canadá analizando densidad de la madera, morfología de las fibras (longitud, ancho, lumen, espesor de pared), proporción de tejidos, índices papeleros y cantidad de lignina soluble e insoluble, demostrando diferencias significativas entre clones. Realizaron experiencias de pulpado Kraft y demostraron su aptitud como materia prima para este tipo de pulpado.

Valade et al. (1996) estudiaron las características papeleras de *Salix viminalis* y *S. discolor*, cultivadas en Canadá, a muy corta rotación (1 a 3 años), para la fabricación de papel corrugado con el proceso semiquímico NSSC (sulfito neutro). El comportamiento de estas especies frente a ese pulpado, arrojó muy buenos resultados, con propiedades de resistencia superiores a los obtenidos con las especies de latifoliadas usadas con CTMP como *Populus tremuloides* y *Betula*. Las variables analizadas en el estudio fueron densidad de la madera,

longitud de fibras, porcentaje de fibras cortadas, coarseness (peso por unidad de longitud de fibras), composición química completa y propiedades físicas y ópticas de las pulpas.

Existen antecedentes de estudios de biodeterioro en madera de sauces. Klasnja et al. (1997), determinaron la influencia de especies de hongos xilófagos en la composición química de la madera de sauces en Rumania, encontrando que el ataque disminuyó notablemente la cantidad de extractivos totales.

Sakamoto et al. (2000, 2002) determinaron que las “marcas de inundación” o watermark que presentaban la madera de sauces en Japón, se debían a la presencia de la bacteria *Erwinia salicis*. Describieron los patrones morfológicos macroscópicos y microscópicos de la madera afectada. Compararon este tipo de marcas con otros patrones de oscurecimiento de la madera (discoloured wood) determinando que corresponde a los modelos conocidos como wetwood.

3- Estudios de pulpados de sauces

Las Salicáceas (sauces y álamos), por su baja densidad de madera y su blancura, son sumamente aptas para la elaboración de pulpas de alto rendimiento con destino a la fabricación de papel de diario. Su menor densidad favorece la impregnación con reactivos químicos y el desfibrado mecánico. Se logran pulpas de buenos rendimiento y opacidad, blanqueables con bajos consumos de reactivos.

En Argentina, la madera de sauce es utilizada por Papel Prensa SA como parte de sus empastes en la producción de papel de diario y de revistas o impresión en general. El empaste consiste en 40-45% de pulpa quimimecánica de sauce, 35% de pulpa quimimecánica de álamo, 10-12% de reciclado (destintado de

papel de diario) y 7-10% de pulpa química Kraft blanqueada de pino. Gran parte de los diarios de país utilizan este papel.

Losada et al. (1973), realizaron un estudio de la respuesta de Salicáceas a diferentes pulpados mecánicos y quimimecánicos para la producción de papel de diario. Se demostró empíricamente la mejor respuesta del pulpado quimimecánico “soda-sulfito” para la elaboración de este tipo de papel. La experiencia fue llevada a escala industrial elaborando papel de diario con mezclas de 40% de sauce americano 40% de sauce álamo y 20% de álamo, con 20% de fibra larga Kraft.

Zilli y Vaschetto (1975) presentaron una evaluación de las Salicáceas (mezcla de especies de sauces y álamos) y su respuesta frente a diferentes tipos de pulpados mecánicos, quimimecánicos, semiquímicos y químicos. Demostraron así, la aptitud y versatilidad de estas especies para su uso en la industria papelera, de acuerdo con los diferentes productos finales que se desee obtener (papel de diario, impresión, para encapar, onda corrugado, cartulinas, etc). Analizaron también variables de la madera como por ejemplo densidad básica, morfología de fibras, proporción de tejidos, flexibilidad de las fibras, solubles en hidróxido de sodio y lignina. No se establecen relaciones entre las propiedades de la madera y de las pulpas obtenidas.

García Volonté y Suárez (1989), informaron propiedades de las maderas de 16 sauces y de sus pulpas a la “soda-sulfito”, similar al que se realiza en Papel Prensa. Las características de madera medidas fueron densidad, longitud y ancho de fibras, índice de afieltramiento; y las de pulpa fueron rendimiento, densidad, blancura, coeficiente de dispersión, resistencia al rasgado y tracción. Este trabajo presentó al sauce americano como el más apto para este tipo de pulpado, por su balance entre resistencias mecánicas y características ópticas de blanco y opacidad. No se demostraron las relaciones existentes entre características de la madera y las propiedades de las pulpas medidas.

Piussan et al. (1990), en un estudio comparativo de pulpas a la “soda fría” de sauce americano, S. nigra 4 y el híbrido 131-27, determinaron la supremacía del sauce americano en lo que respecta a las propiedades de resistencia sobre todo al rasgado. S. nigra, pese a presentar buenos valores en las resistencias mecánicas, tiene muy baja blancura en la madera y por lo tanto requiere mayor carga de reactivos de blanqueo para obtener el mismo grado de blanco que las pulpas obtenidas con los otros clones.

Vaschetto (1995), realizó un análisis de algunas propiedades de la madera y pulpas de los 6 clones en estudio en esta tesis. Se ensayaron muestras a 2 edades (8 y 14 años), y con lotes de estacionamiento diferente (recién cortados y estacionados por 2 meses). Se midieron cantidad y humedad de la corteza, contenido de humedad y densidad de la madera, rendimiento de xilema, longitud y ancho de fibras, resistencia al rasgado y tracción de pulpas quimimecánicas “soda-sulfito”, blancura y coeficiente de dispersión. Utilizando el criterio de valorizar las diferencias obtenidas en resistencia al rasgado y blancura, se concluyó que el clon 250-33 es el que más se aproxima al sauce americano y supera sustancialmente a los clones comerciales 131-25 y 131-27, presentado mejor blancura con resistencias razonables. El híbrido 26992 presentó pobre rendimiento por su alta humedad de recepción. El 13-44 fue el de peor performance, si bien tiene un valor adecuado de blanco, el pobre nivel de resistencia lo descalifica. La comparación de los resultados a lo 8 y 14 años, no arrojó diferencias. Las muestras ensayadas con 2 meses de estacionamiento no mostraron diferencias con las muestras frescas, pero debe destacarse que la humedad disminuyó muy poco. Se destacó la escasa correlación que demuestran los resultados obtenidos en longitud de fibras de la madera y los valores de resistencia obtenidos en las pulpas.

Se han reportado otros trabajos para pulpados de alto rendimiento (a la soda fría y al sulfito neutro) y químicos (Kraft) que no se incluyen, ya que se refieren a otros clones no relacionados con los estudiados en esta tesis o, como se

expresó anteriormente, no se refieren a pulpados quimimecánicos “soda-sulfito” (Celulosa Argentina SA., 1968/69; Sucatte y Repetti, 1975; Fiaño et al., 1975 a y b, 1976; FAO, 1980; Repetti et al., 1981; Piussan et al., 1990; Novaresi et al., 1997; Klansja et al., 1997). Las condiciones de pulpado no fueron similares en cuanto a cantidad de reactivos, temperatura y tiempos de cocción en los distintos estudios, lo que los hace incomparables. Las variables involucradas fueron coeficiente de dispersión de la luz, blancura, tracción y rasgado. En ningún caso se presentó un análisis estadístico de los resultados ni relaciones establecidas con las propiedades de la madera.

4- Modelos – Relación madera-pulpa

La relación que existe entre la madera y la pulpa puede cuantificarse mediante la aplicación de modelos de regresión múltiple y análisis multivariado.

No son muchos los antecedentes que existen para establecer esta relación con pulpas de alto rendimiento en especies de latifoliadas. En particular para el género *Salix*, no se encontró ningún trabajo sobre el tema.

Pulpas de Alto Rendimiento en Coníferas

Forgacs (1963), estudió 15 pulpas mecánicas de coníferas norteamericanas (SGW y RMP) realizando una descripción y caracterización completa de este tipo de pulpas. Realizó una cuantificación de la composición estructural de las mismas ideando el factor L y S (factor de longitud y de forma respectivamente). Estableció asociaciones entre estos factores y las propiedades de resistencia (tracción, rasgado y explosión), volumen específico, resistencia al aire, drenabilidad, a través de regresiones múltiples obteniendo muy buenos coeficientes de determinación (entre 0,78 y 0,91).

Delfederico y Area (1986), establecieron correlaciones entre características microscópicas y propiedades físicas en pulpas TMP de *Pinus elliottii*. Trabajando con la longitud promedio ponderada por peso de fibra y con las fracciones obtenidas en la clasificación del material (Bauer McNett), encontraron ecuaciones de regresión que permiten predecir las propiedades físicas de resistencia, volumen específico y blancura de las pulpas obtenidas. Area y Gavazzo (1990), probaron ecuaciones de regresión lineales y exponenciales en pulpas RMP y CMP de *Pinus elliottii*, utilizando como variables independientes a la longitud ponderada por peso de fibras, factor L y S, fracción de finos. Los resultados indican que las ecuaciones que ajustan son de tipo potencial y que ninguna de las variables independientes provee los mejores ajustes con todas las propiedades. La longitud ponderada por peso de la pulpa se presenta como uno de los mejores parámetros de caracterización.

Pulpas de alto rendimiento en latifoliadas

Ruzinsky et al. (1996), establecieron la relación que existe entre las características de las fibras del álamo temblón (*Populus tremuloides*) y pulpas CMP, CTMP, RMP y SEP (pulpas de explosión por vapor) a través de regresiones lineales múltiples. Las características de las fibras fueron medidas en términos de Factor L y Factor S. Las variables independientes del modelo incluyeron el factor L y S, la densidad de la pulpa, el rendimiento, la energía específica y el contenido de sulfonatos. Las variables a predecir de las pulpas fueron las propiedades de resistencia (tracción, rasgado y explosión) y las ópticas (coeficiente de dispersión, opacidad y blancura). Los mejores coeficientes de regresión fueron obtenidos con modelos de 2 variables independientes: factor L y densidad de la pulpa.

Carrasco et al. (1991), estudiaron pulpas de “muy alto rendimiento” (VHYP) de *Populus*. Por medio de regresión lineal múltiple, obtuvieron una serie de ecuaciones que permiten predecir el consumo de energía específico, las

propiedades de resistencia y las ópticas considerando en el modelo 2 variables independientes que para los mejores ajustes fueron el rendimiento en pulpa y el contenido de sulfonatos. Otras de las variables independientes usadas fueron factor L y S, volumen específico, contenido de carboxilatos y contenido iónico. Con los factores L y S no se obtuvieron ajustes significativos.

Jones y Richardson (1999), establecieron la relación entre densidad y longitud de fibras de la madera de *Eucalyptus nitens* y las propiedades de las pulpas CMP “a la soda fría”. Se registraron correlaciones significativas entre densidad de la madera y resistencia a la tracción y explosión, opacidad y coeficiente de absorción y contenidos de finos (P200 de Bauer McNett). La longitud de fibras correlacionó positivamente con la resistencia al rasgado, con la longitud de fibras en la pulpa, con la fracción R50 y negativamente con las fracciones R100 y R200 de la clasificación de fibras (Bauer McNett). Un análisis de componentes principales (PCA) determinó las propiedades de las pulpas que mayor influencia ejercían en el total. La correlación entre estos factores hallados por PCA y las propiedades de la madera determinaron que la densidad ejerce una gran influencia en propiedades de las hojas como densidad, explosión, tracción, TEA, coeficiente de absorción, opacidad y que la longitud de fibras modifica sustancialmente la resistencia al rasgado. No se establecieron ecuaciones de predicción.

Pulpados Kraft de Latifoliadas

Ona et al. (2001), estudiaron la relación entre propiedades celulares (longitud de fibras, índices papeleros, proporción de tejidos, diámetro y espesor de pared de todos los tipos celulares) y propiedades de pulpas Kraft, en 2 especies de *Eucalyptus*. A través de regresiones múltiples demostraron que la proporción de parénquima y el espesor de pared tienen una importante influencia en las propiedades de las pulpas, incluidas las de resistencia. Las diferentes especies muestran diferencias en los ajustes para determinadas propiedades de las

pulpas. Todas las medidas celulares tomadas en cuenta tuvieron algún grado de asociación con propiedades de la pulpa.

Wangaard (1962), estudió 17 especies de latifoliadas y su comportamiento ante el pulpado Kraft a través de regresiones lineales múltiples. Tomó como variables independientes a la longitud de fibras, espesor, ancho y lumen de las fibras, índices papeleros y la resistencia individual de las fibras (medida como zero-span tensile strength). Las variables dependientes del modelo fueron las propiedades de resistencia de las pulpas, volumen específico y densidad. Encontró ecuaciones lineales y cuadráticas con 2, 3 y 5 variables independientes en el modelo, para cada una de las variables dependientes. Los coeficientes de determinación de las ecuaciones variaron entre 0,77 y 0,93. El índice de flexibilidad, la resistencia individual de la fibra y el índice de runkel, fueron las variables independientes que aparecen como significativas en los ajustes.

Otros estudios incluyen pulpados Kraft en coníferas. Se publicaron modelos de regresión múltiple para Abies (Matolcsy, 1975), para Abies y Tsuga (Kellogg y Thykeson, 1975) y para Pseudotsuga (Hatton y Cook, 1992), entre otros.

Análisis multivariados fueron publicados para pulpados químicos de Pinus y Abies (Marklund et al., 1998).



HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Hipótesis

Existen relaciones entre las propiedades de la madera y de las pulpas, que expresadas como modelos matemático-estadísticos, permitirían predecir la performance de clones de Salix como materia prima para la producción de pulpas quimimecánicas.

Objetivo principal

Desarrollar modelos de predicción de las propiedades de pulpas quimimecánicas del género Salix, a partir de la determinación de las características intrínsecas de la madera de 6 clones y su variabilidad.

Objetivos particulares

- 1- Analizar la variación intraclonal e interclonal de la densidad básica de la madera, la morfología de las fibras, el porcentaje de tejidos, la composición química, el ángulo microfibrilar, la madera de reacción, la tilosis, los nudos, el biodeterioro en 6 clones de Salix.
- 2- Comparar las magnitudes de variación de algunas de las variables en estudio en dos sitios de plantación.
- 3- Confeccionar índices papeleros a partir de la morfología celular hallada.
- 4- Determinar algunas variables dendrométricas (altura total, DAP, espesor de corteza, incrementos anuales) y establecer la asociación entre ellas.
- 5- Determinar la correlación de las variables e índices estudiados con las propiedades de las pulpas quimimecánicas obtenidas con los seis clones.

6- Confeccionar modelos matemáticos que permitan inferir la aptitud papelera de la materia prima mediante las variables analizadas en este estudio.

Materiales y métodos

Se trabajó sobre 6 clones de Salix cuyo origen parental y procedencia se detalla en la tabla III.1.

Tabla III.1. Material genético estudiado

Clon	Origen parental y procedencia
Sauce americano	Salix babylonica var sacramenta. Rusia
Sauce híbrido cv "A 131-25"	Salix babylonica x Salix alba. INTA Castelar 1957
Sauce híbrido cv "A 131-27"	Salix babylonica x Salix alba. INTA Castelar 1957
Sauce híbrido cv "A 13-44"	Salix matsudana x Salix alba. INTA Castelar 1967
Sauce híbrido cv "NZ 26992"	Salix matsudana x Salix alba. Nueva Zelanda
Sauce híbrido cv "A 250-33"	Salix babylonica x Salix alba. INTA Castelar 1961

Este material genético fue muestreado en dos sitios de implantación diferentes.

Descripción de los sitios:

A) Sitio DM: 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.

- B) Sitio C: Zona continental de la Provincia de Buenos Aires, Los Hornos, correspondientes a plantaciones desarrolladas en la Estación Experimental Julio Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de La Universidad Nacional de La Plata (34° 55' SL; 57° 57' WL; 5 m snm). Los suelos son los característicos de la zona centro-este de la Provincia de Buenos Aires, identificados como argiudol típico, fino, ilítico, térmico; de relieve normal. La temperatura media máxima es de 22,6°C, la mínima media de 10,2°C, la temperatura máxima absoluta de 42,7°C (diciembre) y la mínima absoluta de -5,7°C (junio). Los valores de precipitación media anual son de 1100 mm con régimen isohídrico.

Selección de árboles

El muestreo fue realizado en febrero de 2001, para comenzar los estudios relativos a la densidad básica y longitud de fibras de estos clones. En el presente estudio se utilizaron los resultados de densidad en ambos sitios y longitud de fibras en el sitio C (Los Hornos) (Monteoliva et al, 2002a y b).

La edad de las plantaciones muestreadas fue de 13 años, con distanciamiento de 3 m entre filas y 2 m entre plantas.

Se seleccionaron 5 árboles por clon, sin condición de borde, vivos, con el leño en buen estado sanitario, con diámetros a la altura del pecho (DAP) y alturas comerciales (hasta un diámetro mínimo de 7,5 cm) próximos a las medias generales (medidas con relascopio de Bitterlich), derechos. Estos criterios, intentaron evitar las situaciones diferenciales que pudieran distorsionar los orígenes de variación de los parámetros en estudio.

Los ejemplares seleccionados fueron marcados en su posición cardinal norte (N), medido su DAP con cinta dendrométrica, apeados y precisada su altura total con cinta métrica.

Se tomaron muestras del fuste a 3 alturas: 1,30 m (altura utilizada habitualmente para la toma de muestras), 4,3 m y 6,5 m.

Una vez calculados y marcados los niveles en el fuste, se procedió a sacar 2 discos completos sucesivos de 5 cm de espesor cada uno. De las 6 rodajas cortadas por árbol, una de cada altura se utilizó para la determinación de la densidad. Con esta misma rodaja se determinaron las anomalías, el espesor de la corteza y los anillos de crecimiento. Sobre la otra, se midió la morfología fibrosa, el porcentaje de vasos, la madera de reacción, la composición química y se realizaron las experiencias de pulpado.

Procedimiento de pulpado

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

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. Se chipeó una muestra representativa de todos los árboles y todas las alturas para construir una muestra del clon.

1- Los chips fueron prevaporizados durante 40 minutos, dado su bajo contenido de humedad inicial.

2- La impregnación se realizó en un Digestor M/K de 7 litros de capacidad, con recirculación, durante 40 min a 80°C. 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.

3- La desfibración-refinación se realizó en un molino refinador Bauer de 8 pulgadas de diámetro de discos.

La tabla III.2 muestra un resumen de las condiciones de pulpado para todos los clones. Se utilizó un número variable de etapas de molino, aberturas y consistencias, debido a que algunos clones necesitaron condiciones diferentes para alcanzar el grado de refino deseado.

Tabla III. 2. Condiciones y etapas de pulpado para todos los clones

Clon	Sitio*	Etapas de Molino								
		1° etapa		2° etapa		3° etapa		Otras etapas**		
		Cons	Sep	Cons	Sep	Cons	Sep	Cant	Cons	Sep
13-44	2	18	40	1,2	5		2,0	4	2	2
	1	18	40	1,1	5	1,1	3,0	2	2	4
250-33	2	18	40	1,0	5	1,2	4,0	1	2	2
	1	18	40	2,0	5	2,0	5,0	0	-	-
131-27	2	18	40	0,9	5	1,1	4,0	1	2	2
	1	18	40	1,0	5	1,1	4,0	2	2	4
131-25	2	18	40	1,0	5	1,1	4,0	1	2	3
	1	18	40	1,1	5	1,0	3,0	1	2	2
26992	2	18	40	1,0	5	1,1	5,0	0	-	-
	1	18	40	2,0	10	1,9	10,0	0	-	-
americano	2	18	40	2,0	10	2,0	5,0	3	2	5
	1	18	40	2,0	10	2,0	10,0	3	2	5

*Sitio: 1: Delta; 2: Continental

Etapas previas al molino para todos los clones: prevaporización por 40 min, impregnación por 40 min a 80°C con relación licor madera:5,5/1

** Otras etapas: Can: cantidad etapas; Con: consistencia (%); Sep: separación de discos en milipulgadas (mpg)

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

Luego de cada etapa se determinó el °SR para conocer el grado de refinado alcanzado. El °SR objetivo fue entre 49-55 °SR luego de la depuración.

Se realizó el lavado de la pulpa con 20 L de agua destilada sobre una batea de malla 270 mesh.

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

La formación de hojas para ensayos físico-mecánicos se realizó según norma TAPPI T 205 sp-95, en una formadora de hojas standard TAPPI. En este caso particular de pulpa quimimecánica, se trabajó con recirculación de agua para no perder finos que pueden aportar material para una mejor formación.

Variables

Se midieron las siguientes variables

1- Dendrométricas: Altura total, Diámetro a la altura de pecho (DAP) con corteza y sin corteza, Porcentaje de corteza, Ancho de anillos de crecimiento.

2- De la madera: Contenido de humedad de los chips, Densidad básica, Morfología de Fibras (longitud, ancho, lumen y espesor de la pared de las fibras), Porcentaje de tejidos (vasos, fibras y parénquima radial), Índice de afieltramiento (longitud de fibras/ancho de fibras), Índice de flexibilidad (lumen/ancho de fibra), Índice de runkel (2 x espesor de pared/lumen), Angulo Microfibrillar, Composición química (extractivos en agua caliente, extractivos en alcohol benceno, extractivos totales, solubles en hidróxido de sodio, lignina insoluble, lignina soluble, lignina total, celulosa, hemicelulosa y cenizas), Nudos, Podredumbre, Manchas, Marcas de Inundación, Madera de Reacción y Tilosis.

3- De la pulpa: Clasificación de Fibras, Longitud de Fibras de las fracciones, Longitud ponderada por peso de fibra en las fracciones, Longitud promedio de fibras ponderada total, Factor L y Factor S, Grados Schopper (°SR), Valor de agua retenida (WRV, Water Retention Value), Densidad Aparente, Volumen Específico, Índice de tracción, Rasgado y Explosión, Resistencia al aire, Energía absorbida a la tracción (TEA), Elongación, Resistencia Individual de las Fibras, Opacidad, Coeficiente de dispersión (s) y de absorción (k), Blancura y Color.

Metodología y/o normas para la medición de las variables

1- Dendrométricas:

- Altura total (m): con cinta métrica una vez apeado el árbol.

- 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).

- Porcentaje de corteza (%): se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Corteza} = \frac{(\text{DcC}-\text{DsC})}{\text{DcC}} \times 100$$

Donde:

DcC= diámetro con corteza

DsC= diámetro sin corteza

- Ancho de los anillos de crecimiento (mm): se midieron sobre las rodajas pulidas a la altura del pecho, en 2 radios opuestos bajo lupa binocular 15X, con reglilla micrométrica.

2- De la madera:

- Contenido de humedad de los chips (CH %): se calculó como:

$$CH = \frac{(Ph-Ps)}{Ps} \times 100$$

Donde:

Ph= peso húmedo

Ps= peso seco

- Densidad básica (g/cm³): se midió sobre las rodajas enteras de las 3 alturas de muestreo, previo descortezado. Calculadas por el cociente entre el peso seco y el volumen saturado de la madera (TAPPI 258-om-94). Por cada árbol se promediaron las densidades de las 3 alturas, y para cada clon se promediaron los 5 árboles.

- Longitud (µm) y ancho de fibras (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. Las astillas a macerar fueron tomadas según el siguiente diseño de muestreo: sobre el radio norte de cada rodaja y en 3 posiciones radiales desde la médula a la corteza. Se consignan como: posición "a" interna (a 10% de la longitud total del radio), posición "b" intermedia (correspondiente al 50% de la longitud del radio) y posición "c" externa (90% de la longitud del radio). Se midieron 30 fibras por posición radial de muestreo en las rodajas de las 3 alturas. El promedio por árbol se construyó calculando la media aritmética de todas las medidas radiales y axiales (9 puntos de muestreo, 270 medidas) y el promedio por clon con los 5 árboles (45 puntos de muestreo, 1350 medidas). Las mediciones se realizaron con un microscopio óptico Olympus con analizador de imágenes.

- Ancho, Lumen y Espesor de la pared de las fibras (µm): se midieron con microscopio óptico, sobre cortes transversales teñidos con safranina-fastgreen

y montados en forma permanente. Las cortes se realizaron con micrótomo de deslizamiento de 15 µm de espesor sobre las 3 posiciones radiales mencionadas anteriormente, pero sobre una sola rodajas por árbol (a la altura de 1,3 m). 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. El espesor de pared se calculó como:

$$\text{Espesor} = \frac{(\text{Ancho} - \text{Lumen})}{2}$$

Se midieron 150 medidas por árbol y 750 medidas por clon.

- Proporción de tejidos (vasos, fibras y parénquima radial) (%): las medidas se tomaron sobre los mismos cortes y posiciones de muestreo que los mencionados para ancho, lumen y espesor de pared. Se tomaron 5 fotos en cada posición radial, sobre las cuales se determinó la superficie ocupada por vasos, fibras y radios con respecto al 100 % de la superficie de la foto. Se realizaron 15 mediciones por árbol y 75 por clon.

- Índice de afieltramiento: se calculó con los valores promedio por clon de longitud de fibras y ancho de fibras en macerado.

$$\text{Afieltramiento} = \frac{(\text{Longitud})}{\text{Ancho}} \times 100$$

- Índice de flexibilidad: se calculó con los valores promedio medidos en el corte transversal.

$$\text{Flexibilidad} = \frac{(\text{Lumen})}{\text{Ancho}} \times 100$$

- Índice de runkel: se calculó con los valores promedio medidos en el corte transversal.

$$\text{runkel} = \frac{(2 \times \text{Espesor})}{\text{Lumen}}$$

- Angulo Microfibrillar (°): se midió sobre dos tipos de preparados, en corte longitudinal radial de la madera sin teñir y en un preparado de pulpa. En cada tipo de muestra se midieron 50 ángulos con aumentos de 400x bajo microscopio óptico. Para ello se enfocó una puntuación simple de la fibra teniendo en cuenta que la fibra estuviera entera y la puntuación sin romper. La morfología de la puntuación es oval, con el eje mayor de la apertura inclinado con respecto al eje vertical de la fibra. La inclinación del eje mayor de la apertura de la puntuación sigue la dirección de las microfibrillas de celulosa (Long et al., 2000). Se trazó, como referencia, una línea vertical por el eje mayor de la fibra, luego se trazó otra línea, atravesando la puntuación y pasando por el eje mayor de la apertura, hasta lograr la intersección con la línea vertical de referencia. Se procede de esta manera en 50 puntuaciones de diferentes fibras. Se midieron en total 100 ángulos por clon.

- Composición química: las determinaciones se realizaron por duplicado en una muestra representativa del clon, es decir, que se mezclaron en forma proporcional los 5 árboles y las 3 alturas involucradas en cada uno. Se separó una fracción que fue molida en molino Willey hasta que el 85% de la misma pasó por malla de 40 mesh, obteniéndose 400 gramos de muestra de cada clon.

Se realizó un análisis sumativo de todas las sustancias. La determinación de extractivos en alcohol benceno se realizó sobre el aserrín original de la muestra. La determinación de extractivos en agua caliente se hizo sobre madera extraída con alcohol benceno, y las de lignina y celulosa sobre madera extraída en alcohol benceno y agua caliente. Los valores obtenidos se corrigieron posteriormente a porcentajes sobre madera total para que el análisis sumativo de todos los componentes totalice el 100%.

Se utilizaron las normas TAPPI en la mayoría de las determinaciones. Las técnicas utilizadas se detallan en la tabla III.3

Tabla III.3. Normas para la determinación de la composición química

Cenizas a 525°C	T211 om-93
Extractivos alcohol-benceno	T204 cm-97
Extractivos agua caliente	T207 cm-99
Solubles en NaOH 1%	T201 cm-97
Lignina insoluble	T222 cm-98
Lignina soluble	Tappi UM-250
Celulosa	Seifert*
Hemicelulosas	por diferencia

* Descripción de la técnica de obtención de celulosa por el método Seifert: muestrear 1 g seco de aserrín extraído con alcohol – benceno y agua caliente (según normas TAPPI). Agregar 6 mL de acetilacetona, 2 mL de dioxano y 1,5 mL de ácido clorhídrico concentrado. Colocar en baño María, con reflujo durante 30 minutos. Volcar el contenido en un filtro de vidrio sinterizado. Lavar con alcohol puro. Agregar sucesivamente: 20 ml de dioxano, 100 ml de agua caliente en dos porciones, 20 ml de dioxano, 50 ml de alcohol. Luego de cada solvente, esperar unos segundos y escurrir. Agregar 25 ml de éter, escurrir hasta que no salgan más gotas por la parte inferior del filtro y colocar en estufa a 105 – 110°C hasta peso constante. Calcular el contenido de celulosa como la relación porcentual entre el peso del residuo y el peso de la muestra seca original. (Seifert, 1965).

- Nudos: sobre cada rodaja se contaron los nudos encontrados. Se promediaron los valores de las 3 alturas por individuo y de los 5 árboles para el clon.

- Podredumbre, manchas y marcas de inundación: se codificaron todas las rodajas por la presencia o ausencia en forma macroscópica de podredumbre, marcas de inundación y manchas, en base al número de árboles que la

presentaban. Se codificaron como: códigos 1, 2, 3, 4 y 5 (presente en 1, 2, 3 4 y 5 árboles respectivamente).

- Madera de Reacción: se midió sobre los cortes transversales realizados para medir espesor de pared. Bajo el microscopio óptico se detectó el número de fibras gelatinosas presentes en 3 campos por posición radial de muestreo, y se calculó el porcentaje que representan de la superficie total. Se le asignó el código 1 a los rangos de porcentajes de fibras gelatinosas entre el 0 y 20%, el código 2 a los porcentajes que variaron entre 20 y 60% y el código 3 a los que lo hicieron entre el 60 a 100%.

- Tilosis: se midió sobre los cortes transversales realizados para espesor de pared. Bajo el microscopio óptico se detectó el número de vasos con tílides en 3 campos por posición radial de muestreo, y se calculó el porcentaje que representaban de la superficie total.

3- De la pulpa:

- Grado de refino (°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).

- Valor de retención de agua (WRV, Water Retention Value): es una medida del agua de hinchamiento de las fibras. Se colocan 10g de pulpa en unos tubos especiales de centrífuga, que contienen en su fondo una malla de 100 mesh por donde escurre el agua. Se centrifuga 15 minutos a 3000g y 25°C. Se pesa la pulpa centrifugada (peso húmedo) y se la coloca en un pesafiltro tarado en estufa para obtener el peso seco. La diferencia entre peso húmedo y peso seco de la pulpa por 100 es el valor de retención de agua de la misma, o WRV, (Jayme, 1958; Ottestam et al., 1991).

- Clasificación de fibras: se realizó con el equipo Bauer Mc Nett, para determinar la composición fibrosa mediante el porcentaje en peso de diferentes fracciones. TAPPI 233 cm-95

- Longitud de fibras de las fracciones (μm): es la longitud promedio de fibras en cada fracción de clasificación. Se midieron 200 fibras (o partículas) de cada fracción, sobre preparados microscópicos transitorios, con analizador de imágenes, y aumentos de 10x y de 40x.

- Longitud de fibras promedio ponderada por peso: es una medida representativa de la longitud real del material en una pulpa. Se calcula como la sumatoria de las longitudes ponderadas por peso de todas las fracciones dividido la suma de los pesos de todas las fracciones. TAPPI 232 cm-85.

- Longitud de fibras ponderada por peso de las fracciones de clasificación: se calcula como el producto de la longitud de fibras de la fracción por el peso de esa fracción. TAPPI 232 cm-85.

- Factor L: se calcula como la suma de las fracciones R30 + R50 (Forgacs, 1963).

Factor S: se calculó una estimación del factor S de Forgacs como el °SR de la fracción R100 (Forgacs, 1963)

Medidas sobre las hojas de ensayo:

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 1,2 g de las hojitas estándar.

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

Volumen específico [cm³/g]: es la inversa de la densidad aparente. Se define como el volumen en cm³ ocupado por 1 g de pulpa. T 220 sp-96

Propiedades ópticas: Se determinaron en un equipo Technydine 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 (m²/kg), Absorción de la luz (m²/kg) y Color (en el sistema CIELab*). Se efectuaron 3 lecturas de cada propiedad sobre cada hoja.

Propiedades mecánicas Tappi T 220 sp-96

- Resistencia a la tracción [N m/g]: se mide por la fuerza de tensión necesaria para romper una tira de papel de dimensiones estandarizadas.
- 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 paso de 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.

Energía absorbida a la tracción (TEA): se mide como el área bajo la curva del gráfico tracción - elongación. T 220 sp-96.

Elongación (%): es el máximo estiramiento que puede realizar la fibra antes de romperse por tracción. Se mide en el mismo ensayo de tracción. T 220 sp-96.

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

Análisis estadístico

Se calcularon las medidas de tendencia central y de dispersión. Los promedios de cada variable por clon se determinaron separadamente en los 2 sitios. Se eliminaron outliers y se recurrió a herramientas gráficas y analíticas para determinar la normalidad de la distribución de las variables.

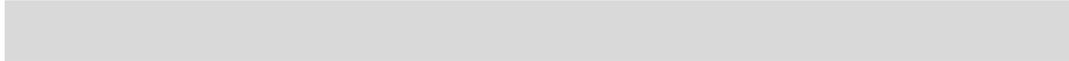
Los valores obtenidos fueron analizados y contrastados mediante análisis de la varianza y test de comparaciones múltiples (Tuckey). Se tomaron como fuentes de variabilidad el tipo de clon y el sitio. En algunos casos se incluyó la altura a lo largo del fuste y la posición radial (Steel y Torrie, 1985).

Se analizaron las matrices de correlación múltiple de todas las variables.

Se buscaron ecuaciones de regresión, simples o 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.

Se realizaron estudios de análisis multivariado con el fin de detectar las variables más importantes que influyen sobre la varianza total, reducir el número de variables y establecer agrupamientos y correlaciones entre ellas.

Se utilizaron las técnicas de Agrupamiento (Clusters) y de Análisis de Componentes Principales (PCA).



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DESCRIPTIVOS, ANOVAS Y CORRELACIONES

1- Análisis de las variables de crecimiento

1- Variables dendrométricas: altura, diámetro, corteza, incrementos anuales.

La Tabla IV.1 muestra los valores promedio en altura, diámetro a la altura del pecho con corteza (DAPc/c) y porcentaje de corteza de todos los clones en los sitios Delta medio (DM) y continental (C). Asimismo, se incluyen las dimensiones de los radios (RAD) de las rodajas tomadas a 1,3 m, correspondientes a las edades 2, 7 y 12 años, medidos como incrementos acumulados expresados en milímetros.

Tabla IV.1. Valores por clon en cada sitio de Altura total media, DAP medio c/c, espesor de corteza a los 13 años y dimensiones de los radios (RAD) alcanzados a los 2, 7 y 12 años (por clon en cada sitio).

Clon	Sitio*	Altura Total (m)	DAP c/c (cm)	Espesor corteza (%)	RAD 2 (mm)	RAD 7 (mm)	RAD 12 (mm)
13-44	C	13,36	17,14	6,20	13,79	65,75	89,29
	DM	18,22	18,90	6,40	17,35	66,23	83,59
250-33	C	13,00	15,56	9,00	6,20	45,50	62,14
	DM	18,98	20,00	15,00	19,28	68,92	81,46
131-27	C	14,80	20,80	6,20	7,44	59,79	80,60
	DM	14,07	12,05	5,81	10,83	43,49	58,28
131-25	C	14,20	22,70	4,80	5,79	72,15	108,36
	DM	19,20	25,80	9,50	17,39	69,61	84,28
26992	C	12,60	17,69	5,90	5,53	49,56	74,14
	DM	19,82	22,08	4,10	7,43	81,07	99,81
americano	C	10,70	9,79	5,75	5,69	31,08	44,95
	DM	16,22	13,12	6,80	10,90	58,70	76,98

*Sitios: DM: Delta Medio C: Continental

Se observa que en el sitio DM los valores son superiores en altura total media y DAPc/c medio, excepto para el clon 131-27. Las condiciones del sitio DM son claramente superiores para el cultivo de sauces, como puede apreciarse a través de la altura total media alcanzada por los árboles implantados en ese sitio. Los porcentajes de corteza también siguen este patrón, con la excepción del 26992, que es mayor en el sitio C.

El RAD alcanzado a los 2 años de edad es mayor en el sitio DM, para todos los clones. A los 7 y 12 años la situación se invierte para los híbridos 131-25; 131-27 y 13-44. El sauce americano y los híbridos 250-33 y 26992, mantienen diferencias de crecimiento favorables en el sitio DM.

Altura, DAP y corteza, muestran diferencias significativas entre sitios y entre clones. La interacción entre estas dos fuentes de variación también resultó significativa.

En las tablas IV. 2, 3 y 4 se presentan los posicionamientos relativos de los clones según el sitio y se marcan los grupos homogéneos según el test de Tukey.

Tabla IV.2. Alturas totales promedios por clon y por sitio

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	Altura (m)	grupos homogéneos	clon	Altura (m)	grupos homogéneos
131-27	14,7	a	americano	10,7	a
americano	16,2	ab	26992	12,6	b
13-44	18,2	bc	250-33	13,0	b
131-25	18,7	bc	13-44	13,4	bc
250-33	18,9	c	131-25	14,2	bc
26992	19,8	c	131-27	14,8	c

*Sitios: DM: Delta Medio C: Continental

Los mayores valores de altura, corresponden a los clones 26992 y 250-33 en el sitio Delta, y a los clones 131-25 y 131-27 en el sitio Continental (tabla IV.2).

Los valores hallados para el clon 131-27 en el DM resultan atípicos para ese clon en la región.

Cerrillo et al. (1992), publicaron los resultados de las mediciones sobre los árboles del sitio DM de este mismo trabajo a la edad de 5 años, encontrando que el clon más destacado en altura fue el 26992 con 14,7 m seguido por el 13-44 con 13,4 m y el 131-25 con 13,2 m, sin diferencias significativas entre sí. Los clones 250-33 y 131-27 se encontraron en un segundo grupo de alturas, con 12,6 m y 12,3 m respectivamente. En último lugar, se ubicó el sauce americano con 8,8 m de altura. Este ordenamiento de los clones del sitio DM coincide con los resultados hallados a la edad de 13 años.

Para el sitio C, las mediciones sobre los árboles a la edad de 5 años, arrojaron resultados similares a los presentados a los 13 años (Cioccini, comunicación personal). Los híbridos 131-27 y 131-25 alcanzaron las mayores alturas (8,50 m y 7,75 m respectivamente). En un segundo grupo se encontraron los clones 13-44 con 6,99 m, el 250-33 con 6,81 m y el 26992 con 6,34 m; y por último, el sauce americano con 3,84 m.

Cerrillo y Di Meo (1997), demostraron la supremacía en altura y diámetro de los individuos de las familias en los que interviene *S. matsudana* como madre, en un estudio comparativo de 13 familias de *Salix*. Las familias originadas en el cruzamiento de sauce americano resultaron las de peor evolución. Estos resultados coinciden con los de esta tesis.

Los clones que mayor diámetro alcanzaron fueron el 26992 y el 131-25 para el sitio DM y para el C los clones 131-25 y 131-27, como se detalla en la tabla IV.3.

A la edad de 5 años para el sitio DM, Cerrillo et al. Op. Cit. (1992), encontraron similares posicionamientos que los registrados en este trabajo (13 años). Igual

situación se registró en el sitio C con los valores medidos a los 5 años (Ciocchini, comunicación personal).

Tabla IV.3. Diámetros promedios por clon y por sitio

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	DAP (cm)	grupos homogéneos	clon	DAP (cm)	grupos homogéneos
americano	13,12	a	americano	9,79	a
131-27	13,69	a	250-33	15,56	b
250-33	18,46	b	13-44	17,14	bc
13-44	18,65	b	26992	17,69	bc
131-25	21,24	b	131-27	20,80	cd
26992	22,08	b	131-25	22,76	d

*Sitios: DM: Delta Medio C: Continental

La tabla IV.4 presenta los valores hallados para porcentaje de corteza en todos los clones.

Tabla IV.4. Espesores de corteza por clon y por sitio.

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	Corteza (%)	grupos homogéneos	clon	Corteza (%)	grupos homogéneos
26992	4,09	a	131-25	4,76	a
13-44	6,31	ab	americano	5,75	b
131-25	6,62	ab	26992	6,02	b
americano	6,78	abc	131-27	6,18	b
131-27	7,39	bc	13-44	6,20	b
250-33	9,85	c	250-33	9,20	c

*Sitios: DM: Delta Medio C: Continental

El clon 26992 presentó los menores valores de corteza en el DM. En cambio, en el sitio C, el de menor porcentaje fue el 131-25.

Estas 3 variables (altura, DAP y corteza) se relacionan con el costo de los rollizos (madera + corteza) como materia prima para la industria papelera. Lo deseable es que los clones proporcionen la mayor cantidad posible de madera en volumen (y en densidad) y la menor proporción de corteza. Estas

variables se relacionan, junto con el contenido de humedad y la densidad de la madera, con el rendimiento en pulpa.

Analizando los resultados con este criterio, se observa que para las plantaciones del DM, el clon 26992 es el que mayor ventaja presenta, seguido por el 13-44 y el 131-25. El clon 250-33, pese a presentar buena altura y buen DAP, posee niveles de corteza que lo descalifican.

Para las plantaciones Continentales, los clones 131-25 y 131-27 presentan claras ventajas frente a los otros.

Incremento corriente anual y medio anual (ICA-IMA)

En las Figuras IV.1 a IV.6 se observan los incrementos corrientes anuales (ICA) y crecimientos medios anuales (IMA) en área basimétrica, por clon en ambos sitios.

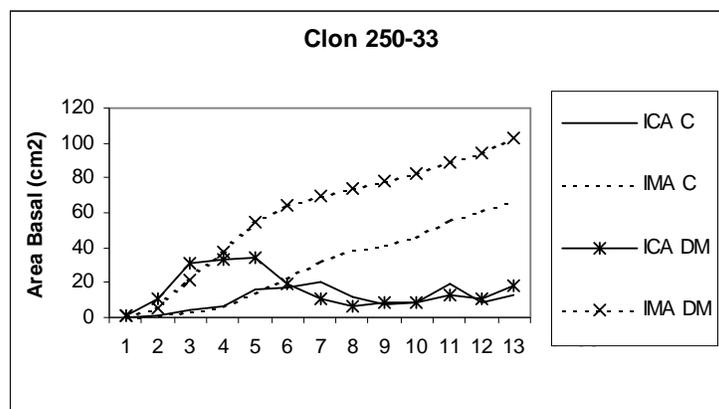


Fig. IV.1. Incrementos corrientes anuales (ICA) e crecimientos medios anuales (IMA) para el clon 250-33 en ambos sitios

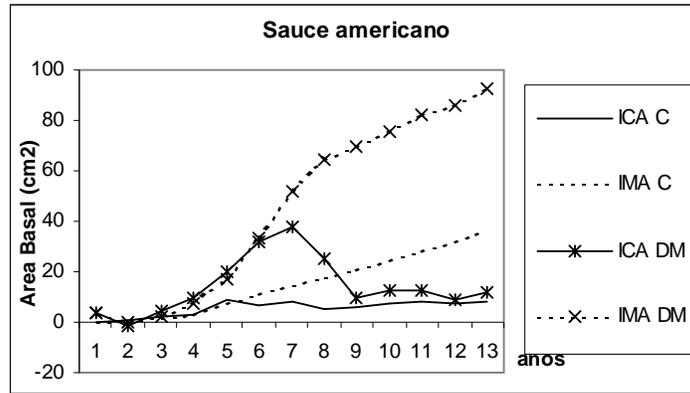


Fig. IV.2. Incrementos corrientes anuales (ICA) e crecimientos medios anuales (IMA) para el sauce americano en ambos sitios

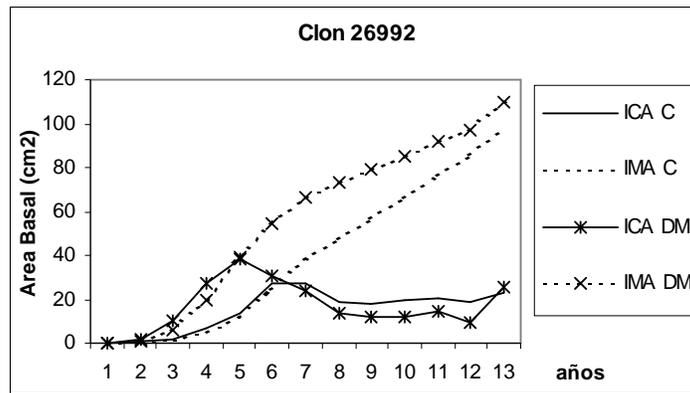


Fig. IV.3. Incrementos corrientes anuales (ICA) e crecimientos medios anuales (IMA) para el clon 26992 en ambos sitios

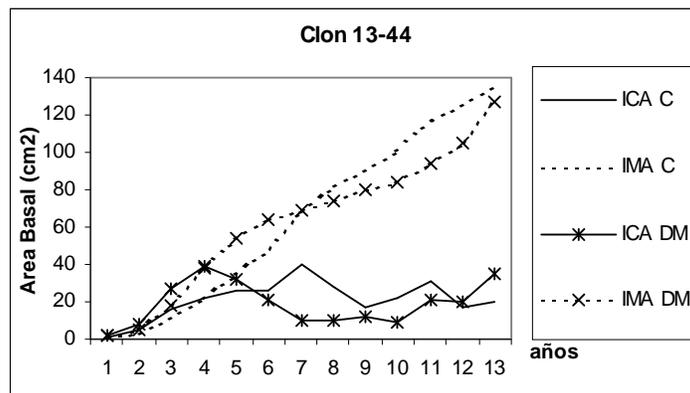


Fig. IV.4. Incrementos corrientes anuales (ICA) e crecimientos medios anuales (IMA) para el clon 13-44 en ambos sitios

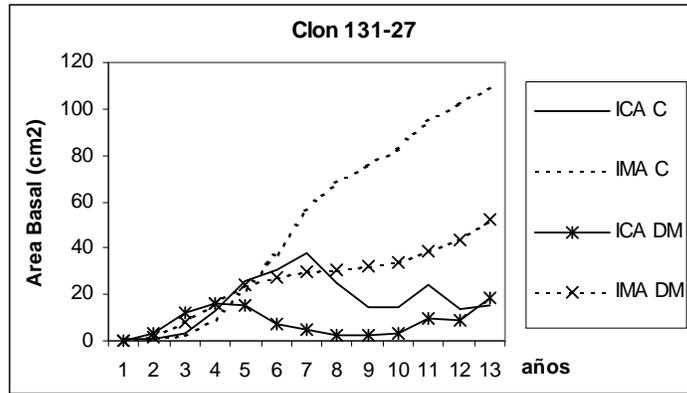


Fig. IV.5. Incrementos corrientes anuales (ICA) e crecimientos medios anuales (IMA) para el clon 131-27 en ambos sitios

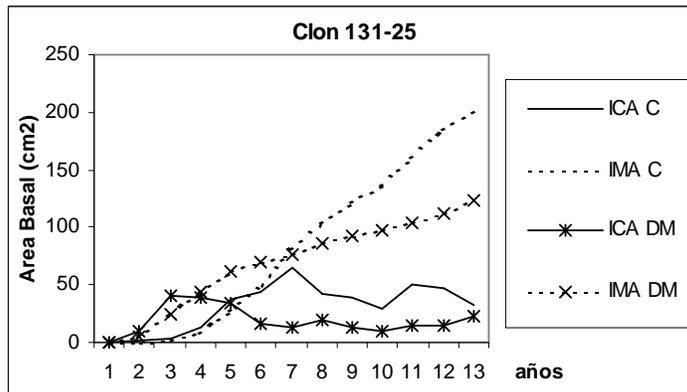


Fig. IV.6. Incrementos corrientes anuales (ICA) e crecimientos medios anuales (IMA) para el clon 131-25 en ambos sitios

En el sitio DM se observa que los sauces híbridos (250-33, 26992, 131-25, 131-27 y 13-44) presentaron ICA en área basimétrica superiores y sostenidos en los primeros años de crecimiento, alcanzando su punto de culminación entre los años 3, 4 y 5. En cambio, el sauce americano alcanzó ese punto entre los años 7 y 8. En el sitio C, los puntos de culminación se alcanzaron para todos los clones entre los 6, 7 y 8 años, con patrones de crecimiento similares al americano. El cruce de las curvas entre ICA e IMA se produjeron primero en el sitio DM.

Cabe destacar que en todos los casos del sitio DM, se percibe una inflexión en el ICA entre los 9 y 10 años, coincidente con los 10 meses de anegamiento ocurridos en 1998, que involucraron dos estaciones de crecimiento.

Garau et al. (1983), estudiaron los incrementos hasta los 10 años de edad de los híbridos 131-25 y 131-27, implantados en dos situaciones edáficas diferentes en la provincia de Buenos Aires. Hallaron, para los dos clones y ambos sitios, que los crecimientos en diámetro fueron mayores en los primeros 4 años, descendiendo a partir del quinto año hasta estabilizarse a los 8 años.

Baraño et al. (1983), realizaron un estudio comparativo del cv 131-25 y Populus x euroamericana cv Conti 12, a los 10 años, implantados en Luján, Buenos Aires. Para todas las clases diamétricas evaluadas, los incrementos corrientes anuales mostraron un crecimiento inicial ascendente hasta el 3° - 4° año y luego un descenso hasta el 7°- 8°.

Las curvas de ICA y IMA presentadas en estos dos estudios concuerdan con las halladas en el sitio DM para estos clones.

Asimismo, son coincidentes los resultados hallados por Bonavia y Piussan (1987) para Salix nigra de 14 años, implantados en diferentes sitios en el Delta. Los patrones de crecimiento de esta especie siguieron la tendencia general de los sauces en el DM. Según los autores, el crecimiento porcentual de los 10 primeros años fue del 91%.

Correlaciones juvenil-adulto

Las correlaciones establecidas entre las variables de crecimiento fueron significativas en algunos casos (tabla IV. 5). Es posible entonces, obtener mejores crecimientos en DAP conjuntamente con mayor altura total. Asimismo,

las correlaciones juvenil-adulto, para algunas de las características de crecimiento, son prometedoras.

Tabla IV.5. Correlaciones entre variables dendrométricas

	Altura	DAP	Corteza	RAD 2	RAD 7	RAD 12
Altura	1	0,65*	0,35	0,65*	0,79*	0,55
DAP		1	0,17	0,30	0,83*	0,80*
Corteza			1	0,64*	0,08	-0,12
RADP 2				1	0,41	0,17
RAD 7					1	0,94*
RAD 12						1

* Significativo ($p \leq 0,05$).

La longitud del radio (RAD) alcanzado a los 7 años presenta una correlación alta y positiva con el RAD de los 12 años ($r= 0,94$). La altura total correlaciona significativamente con el DAP ($r= 0,65$), el radio alcanzado a los 2 años ($r= 0,65$) y a los 7 años ($r= 0,79$). Esta importante correlación entre características de los árboles juveniles y adultos permite evaluarlos precozmente, y seleccionar en forma temprana a los individuos que presentan las características de crecimiento deseadas para su uso final.

En el caso de estos clones, se podría realizar una selección por altura a los 2 años y por vigor a los 7 años.

Bunse y Sparnochia (1989), establecieron correlaciones de variables de crecimiento en progenies de híbridos de sauces a los 5 años de edad. Establecieron que una selección por vigor mejora la altura, DAP y corteza, además de otros caracteres de la madera como densidad básica y blancura.

Las correlaciones halladas concuerdan con los resultados de Bonavía de Guth (1987), quien publicó asociaciones significativas con los DAP y los anillos de crecimiento, en un estudio de 15 clones de sauces en Argentina.

2- Análisis de las variables de la Madera

2- Variables medidas en madera: contenido de humedad, densidad básica, longitud, ancho, lumen y espesor de la pared de las fibras, porcentaje de tejidos (vasos, fibras y parénquima radial), índice de afieltramiento, índice de flexibilidad, índice de runkel, ángulo microfibrilar, composición química (extractivos en agua caliente, extractivos en alcohol benceno, extractivos totales, solubles en hidróxido de sodio, lignina insoluble, lignina soluble, lignina total, celulosa, hemicelulosa y cenizas), cantidad de nudos, podredumbre, manchas, marcas de inundación, madera de reacción, tilosis.

2.1- Contenido de Humedad (CH)

El contenido de humedad, medido antes de realizar las experiencias de pulpado, varió en un rango entre 13,34% a 23,36% para las maderas del primer muestreo (Tabla IV.6).

Tabla IV. 6. Contenidos de Humedad por clon y por sitio

Sitio DM*		Sitio C*	
clon	CH (%)	clon	CH (%)
Americano		Americano	
1°muestreo	16,15	1°muestreo	16,31
2° muestreo	32,11	2°muestreo	112,2
250-33	23,36	250-33	21,02
13-44	17,07	13-44	16,27
131-27	15,83	131-27	18,06
26992	14,80	26992	17,59
131-25	13,34	131-25	18,29

*Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

Las muestras tuvieron diferente tiempo de estacionamiento, variando desde 1año, en el caso de los clones del Delta, hasta 1año y 8 meses en los del

continente. Esto se debió a que se utilizó material de plantaciones experimentales que fueron cosechados con anterioridad a la planificación de las experiencias de pulpado. Como fue necesario repetir los ensayos de pulpado de sauce americano de ambos sitios, se realizó un segundo muestreo. El CH de este sauce fue más elevado que el de los otros del sitio Delta (32,11%) y superior a los del sitio continental (112,14%) debido a que el segundo muestreo se realizó con pocas semanas de anticipación a los pulpados.

El CH de las muestras es importante para el proceso de impregnación de los chips. Es preferible que sea alto y cercano al 30%. En este caso no pudieron planificarse las experiencias de pulpado sin estacionamiento de la madera, ya que 3 de los 6 clones involucrados en el estudio estaban representados solamente en estas plantaciones experimentales, que fueron apeadas en el 2000 y 2001 para realizar los estudios previos de densidad y longitud de fibras. En general los CH de los clones fueron bajos, pero similares entre sí.

El CH de las maderas en los primeros meses de estacionamiento desciende en diferentes proporciones dependiendo del estado inicial y de la densidad de la madera (Vaschetto, 1995). Esto implica, que a igual período de estacionamiento, algunos clones tendrían mayor CH y menor densidad (250-33, 131-25, 131-27), por lo que el rendimiento que se obtendría por volumen de madera sería más bajo que el de otro clon de menor CH y mayor densidad de madera (americano, 13-44). Los costos de transporte también se elevarían con un pequeño aumento en el CH de la madera.

En este caso, y utilizando el CH de los sauces americanos del primer muestreo (16,31% y 16,15%), no se encontraron correlaciones significativas entre CH, densidad, espesor de pared, porcentaje de vasos, y de fibras, DAP y altura. Se encontraron correlaciones significativas con el índice de runkel ($r = -0,70$) y con las fracciones de clasificación R50 ($r = 0,65$) y R100 ($r = -0,63$). Podría decirse entonces, que un mayor porcentaje de humedad en los chips aumenta la

elasticidad de las fibras, produciendo un aumento de la fracción de fibras enteras (R50) y una menor proporción de fibras partidas (R100).

2.2- Densidad básica de la madera

La Tabla IV.7 muestra los valores de densidad de los clones en estudio para los dos sitios y el test de Tukey determinando los grupos homogéneos.

Tabla IV.7. Densidad básica promedio por clon y sitio

Sitio 1			Sitio 2		
clon	Densidad (g/cm ³)	grupos homogéneos	clon	Densidad (g/cm ³)	grupos homogéneos
131-25	0,366	a	26992	0,372	a
26992	0,369	ab	131-25	0,383	ab
131-27	0,385	bc	131-27	0,386	abc
250-33	0,387	bc	250-33	0,398	bc
americano	0,435	d	americano	0,427	d
13-44	0,438	d	13-44	0,444	d

*Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

Se puede observar que el ordenamiento de los clones en los dos sitios fue aproximadamente el mismo, existiendo diferencias solo entre los clones en estudio.

Los clones 13-44 y americano presentaron una mayor densidad de madera en ambos sitios (Fig. IV.7). Estos resultados coincidieron con los publicados por otros autores sobre clones del sitio Delta (Vaschetto, 1995; Bonavía de Guth, 1982, 1987).

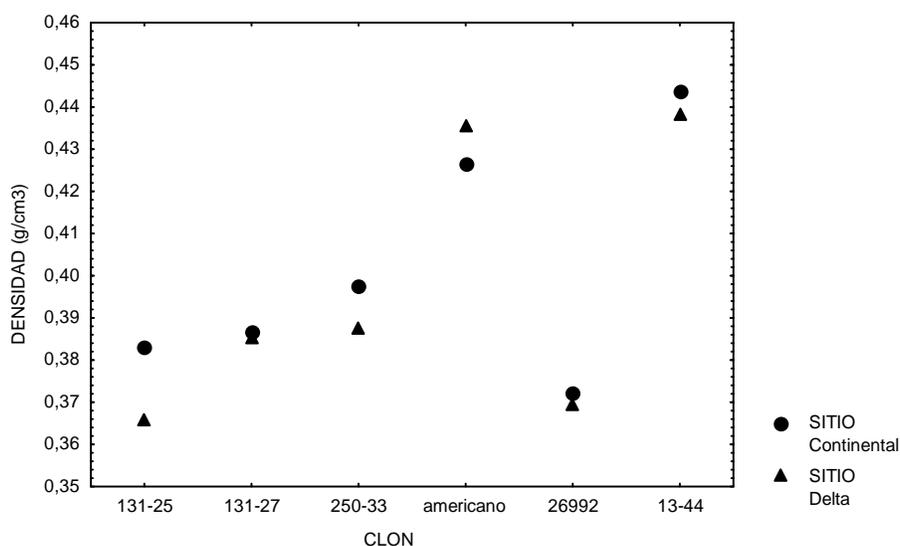


Fig. IV. 7. Densidad básica promedio por clon y por sitio

El ranking de densidades de árboles, de la misma plantación del DM, a los 5 años de edad publicados por Cerrillo et al. (1992), coincidió con el de la Tabla IV.7 a los 13 años. Esta información indica que la densidad a una edad temprana se podría utilizar como índice de detección precoz de los mejores clones o individuos.

Bonavía de Guth (1981) obtuvo valores de densidad para el híbrido 250-33 ($0,408 \text{ g/cm}^3$) superiores al americano ($0,372 \text{ g/cm}^3$) ambos de 9 años implantados en un sitio continental de la Provincia de Buenos Aires. Bonavía y Ragonese (1980) trabajando con sauces de 15 años en el mismo sitio mencionado, registran el mayor valor en el americano ($0,432 \text{ g/cm}^3$) seguido por el 250-33 ($0,393 \text{ g/cm}^3$) y con gran diferencia los híbridos 131-25 y 131-27.

Dentro de una misma especie, la densidad puede variar según la procedencia, el sitio, el clon, la edad, entre árboles y dentro de un mismo individuo, tanto en sentido axial (base a tope) como radial (médula a corteza), (Zobel y Talbert 1988; Barnett y Jeronimidis, 2003).

La Tabla IV.8 muestra que la densidad es diferente en los distintos clones del sitio Delta, según las alturas de muestreo. No se detectó un único patrón de variación axial. Algo similar ocurrió en el otro sitio. Resultados similares fueron hallados por Villegas y Marlats (2003) en sauce americano y en el híbrido 131-25, implantados en dos sitios del Delta paranaense y analizados a dos edades.

De todos modos, Monteoliva et al. (2002) demostraron que para establecer la variabilidad entre los clones, puede utilizarse el valor obtenido a 1,30 m de altura, ya que no cambia la clasificación de los clones con respecto a la obtenida con las otras alturas o con la densidad promedio del árbol.

Tabla IV.8. Densidad (g/cm^3) de los clones en el sitio Delta según altura de muestreo

Clon	Densidad (g/cm^3) a 1,3 m	Densidad (g/cm^3) a 4,3 m	Densidad (g/cm^3) a 6,5 m	Densidad (g/cm^3) Promedio 3 alturas
131-25	0,368 a	0,357 a	0,365 a	0,366 a
26992	0,383 ab	0,371 b	0,367 ab	0,369 ab
131-27	0,408 cd	0,368 ab	0,377 b	0,385 bc
250-33	0,392 bc	0,373 b	0,377 b	0,387 bc
americano	0,433 de	0,431 c	0,433 c	0,435 d
13-44	0,447 e	0,429 c	0,431 c	0,438 d

Las letras se leen verticalmente y denotan diferencias significativas

La Tabla IV.9 y las Fig. IV 8 y 9 muestran la evolución radial de la densidad, en 3 edades, para todos los clones en ambos sitios. Se aprecia que la tendencia no fue homogénea, aunque en muchos casos, las diferencias no son estadísticamente significativas. En algunos clones (13-44 DM, 131-27 C, americano C y DM), la densidad básica aumentó en forma significativa desde la médula (año 2) a la corteza (año 13); en otros clones se mantuvo aproximadamente constante en todas las posiciones radiales, o presentó diferentes fluctuaciones en la posición intermedia (250-33 C, 26992 C, 250-33 DM, 131-27 DM, 26992 DM, 131-25 DM, 131-25 C). Solo el clon 13-44 C presentó un descenso significativo entre los 2 y 13 años de edad. La diferencia

de tendencias puede deberse al tamaño reducido de las muestras y a la cantidad de nudos interiores que presentaban las mismas.

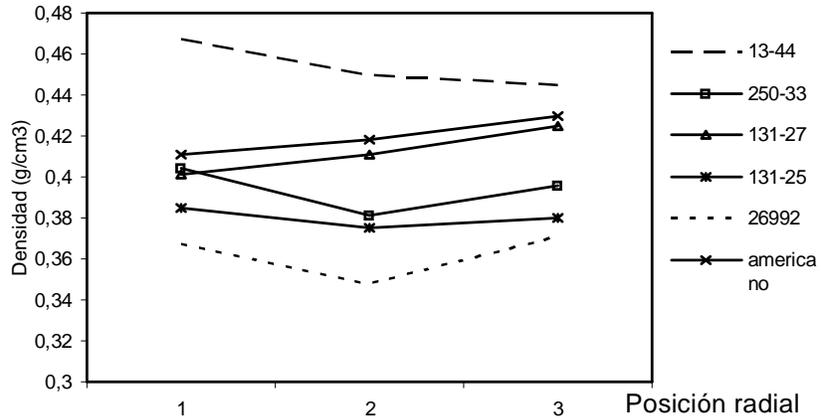


Fig. IV. 8 Densidad básica según 3 posiciones radiales y a la altura de pecho en sitio C

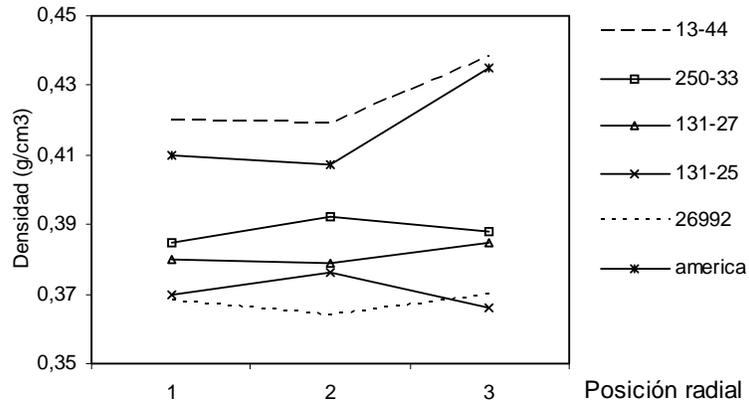


Fig. IV. 9 Densidad básica según 3 posiciones radiales y a la altura de pecho en sitio DM

El ANOVA mostró que existen diferencias significativas entre las densidades medidas para los sitios de implantación y los clones ($p= 0,000$). Según el clon considerado, no se presentaron diferencias significativas entre las edades de medición (posiciones radiales), (Tabla IV.9).

Tabla IV.9. Densidad básica para todos lo clones en 3 posiciones radiales, a la altura de pecho (1,3m)

Clon	Sitio*	Densidad básica (g/cm ³)		
		Posición 1 (año 2)	Posición 2 (año 7)	Posición 3 (año 13)
13-44	C	0,457b	0,450ab	0,445a
	DM	0,420a	0,419a	0,438b
250-33	C	0,404b	0,381a	0,396b
	DM	0,385a	0,392a	0,388a
131-27	C	0,401a	0,411a	0,425b
	DM	0,380a	0,379a	0,385a
131-25	C	0,385b	0,375a	0,380ab
	DM	0,370ab	0,376b	0,366a
26992	C	0,367b	0,348a	0,371b
	DM	0,368a	0,364a	0,370a
Americano	C	0,411a	0,418a	0,430b
	DM	0,410a	0,407a	0,435b

Las letras se leen horizontalmente y marcan diferencias significativas a $p < 0,05$

Villegas et al. (2002) y Villegas y Marlats (2003), mostraron que la variación de densidad de médula a corteza aumenta en el híbrido 131-25 del Delta. Estos mismos autores encontraron que, para el sauce americano de un sitio, la densidad aumentó de médula a corteza, mientras que en otro sitio del Delta se mantuvo estable en las 3 posiciones radiales. Este comportamiento podría explicarse por el tipo de muestreo radial, que fue realizado con dos metodologías diferentes (en posiciones fijas y en posiciones proporcionales a la longitud del radio).

La densidad no se correlacionó significativamente con las variables de crecimiento (altura, DAP, radios alcanzados a los 2, 7 y 12 años). La ausencia

de correlación significativa permite la selección de clones por vigor sin desmejorar la densidad de la madera. En cambio, se hallaron correlaciones significativas entre las densidades halladas a las 3 edades, siendo el coeficiente de correlación entre la densidad a los 2 años y los 7 años de $r= 0,92$, entre los 2 años y 13 años de $r= 0,88$ y entre los 7 y 13 años de $r= 0,92$. Estas correlaciones juvenil-adulto son muy importantes para la predicción de esta propiedad. Seleccionando los individuos de mejor densidad a los 2 ó 7 años, aumenta la probabilidad de obtener muy buena densidad al turno de corta.

La densidad además se correlacionó con el espesor de pared de las fibras ($r= 0,59$), con el lumen celular ($r= -0,75$), con el índice de flexibilidad ($R^2= -0,58$) y con el índice de runkel ($r= 0,75$). Es decir que a mayor espesor de pared, mayor densidad básica y menor colapso de las fibras.

Esta variable no correlacionó significativamente con el rendimiento de la pulpa, ni con la tasa de extractivos o el porcentaje de solubles en NaOH.

2.3- Morfología de fibras: longitud, ancho, lumen y espesor

La Tabla IV.10 muestra el resultado de todas las variables medidas como morfología de fibras y el cálculo de los índices papeleros. El ancho de fibras se midió de dos formas: en macerado (ma) y en corte transversal (CT).

Coincidiendo con Area (1990), desde el punto de vista de la fabricación del papel, en la que se utilizan las fibras aisladas de su matriz xilológica, la medición del ancho en un macerado representaría una medida mas cercana a la que se puede encontrar en una hoja de pulpa química (fibras colapsadas).

Sin embargo, en la obtención de los índices papeleros el valor del ancho en macerado fue utilizado solo para el índice de afieltramiento ya que se construye

a partir de la medida de longitud tomada en macerado. En cambio, para los índices de flexibilidad y runkel, en los que intervienen las variables espesor de pared y lumen de las fibras medidos en CT, se tomó el ancho medido en esa misma sección para no distorsionar los resultados.

Tabla IV.10. Morfología de fibras e índices papeleros por clon y por sitio.

Clon	Sitio *	Morfología de fibras (μm)					Índices Papeleros**		
		longitud	Ancho ma	Ancho CT	espesor	lumen	L/A	F	R
13-44	C	864	23,6	14,3	2,8	8,0	37	56	0,70
	DM	847	21,5	13,5	2,7	9,0	39	66	0,60
250-33	C	946	25,3	14,8	3,1	9,2	37	62	0,67
	DM	968	23,6	15,5	2,5	9,9	41	64	0,49
131-27	C	838	21,5	14,5	2,9	10,1	39	70	0,57
	DM	899	23,8	15,9	2,1	10,4	38	65	0,40
131-25	C	941	22,8	15,8	2,3	11,8	41	75	0,38
	DM	885	22,5	16,4	2,5	10,7	39	65	0,48
26992	C	841	24,9	15,8	2,7	9,2	34	59	0,58
	DM	812	22,3	14,6	2,3	11,2	36	77	0,41
americano	C	1069	25,5	15,7	3,3	9,2	42	59	0,73
	DM	1167	25,0	16,1	3,3	9,1	47	57	0,72

*Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

** Índices Papeleros: L/A: afieltramiento (longitud/ancho ma); F: flexibilidad (lumen/ancho*100); R: runkel (2*espesor/lumen)

Las correlaciones que se establecieron entre las diferentes variables incluidas en la morfología de fibras fueron: longitud de fibras y espesor de pared ($r= 0,59$), longitud y ancho en macerado ($r= 0,65$) espesor y lumen ($r= -0,64$). Las correlaciones fueron mayores entre los parámetros morfológicos y los índices papeleros. Por ejemplo, el espesor de pared se correlacionó negativamente con el índice de flexibilidad ($r= -0,64$) y en forma positiva con el de runkel ($r= 0,93$). El lumen mostró correlaciones inversas a las del espesor

($r = 0,66$ con flexibilidad y $r = -0,87$ con runkel). El ancho en macerado presenta un $R^2 = -0,66$ con el índice de flexibilidad.

Puede decirse que maderas con mayor longitud de fibras tendrían mayor espesor de pared y menor lumen, por lo tanto serían más rígidas y colapsarían menos.

2.3.1- Longitud de fibras

El análisis de la varianza demostró que los sitios no resultaron fuentes significativas de variación ($p = 0,149$) mientras que los clones si lo hicieron ($p = 0,000$). La interacción clon x sitio resultó significativa como puede apreciarse en la Tabla IV.11 donde el ordenamiento de los clones cambió según el sitio.

Tabla IV.11. Longitud de fibras promedio por clon y por sitio. Test de Tuckey.

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	Longitud fibras (μm)	grupos homogéneos	clon	Longitud fibras (μm)	grupos homogéneos
26992	812	a	131-27	838	a
13-44	847	b	26992	841	a
131-25	885	c	13-44	837	a
131-27	899	c	131-25	941	b
250-33	968	d	250-33	946	b
americano	1167	e	americano	1069	c

*Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

Los valores medios de longitud de fibras variaron desde 1167 μm para el sauce americano a 812 μm para el híbrido 26992. El sauce americano fue el que obtuvo los mayores valores en ambos sitios y el único que superó el milímetro (Fig. IV.10).

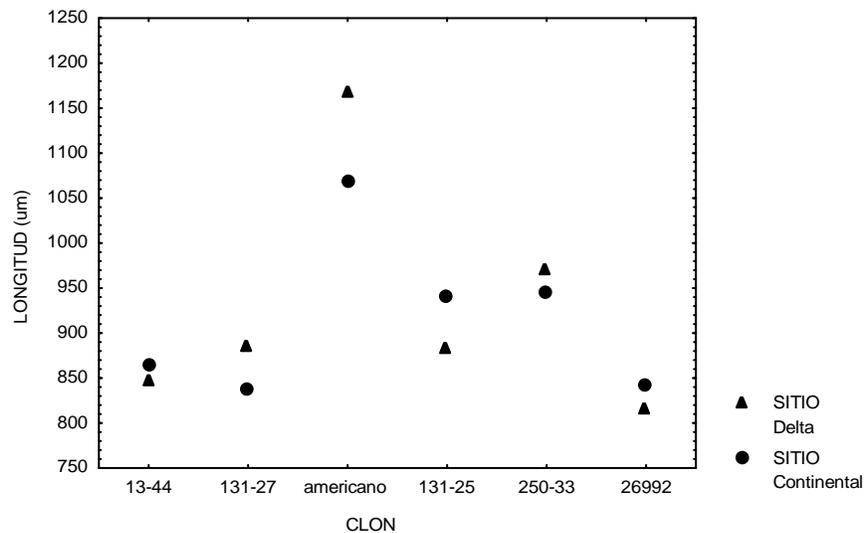


Fig. IV. 10. Longitud de fibras por clon y por sitio

El análisis de la varianza mostró diferencias significativas entre alturas y posiciones radiales de muestreo (Tablas IV.12 y 13).

Tabla IV.12. Longitud de fibra promedio para todos los clones por altura (variación axial). Test de Tukey.

Altura de muestreo (m)	Longitud fibras (μm)	Grupos homogéneos
1,30	945	a
4,30	942	a
6,50	911	b

Se presentan en la Tabla IV.12 los valores medios para todos los clones de longitud de fibras en las 3 alturas estudiadas. Se aprecia, como tendencia general, un descenso de la longitud de fibras desde la base hacia el ápice, siendo significativas solo las diferencias entre las alturas media (4,3m) y superior (6,5m).

De todos modos, la medida de longitud de fibras tomadas a la altura de pecho (1,3m) no cambia el ordenamiento de los clones obtenido con el promedio de las 3 alturas, con excepción del clon 131-27 de sitio C (Tabla IV. 13). Por lo

tanto, la medida de longitud de fibras al DAP, puede considerarse representativa del árbol completo.

Tabla IV. 13. Comparación longitud de fibras medidas a la altura de pecho y como promedio de 3 alturas

Clon	Sitio*	Longitud de fibras (μm)	
		A 1,3 m	Promedio 3 alturas
13-44	C	845	864
	DM	857	847
250-33	C	886	946
	DM	937	968
131-27	C	870	838
	DM	859	899
131-25	C	915	941
	DM	880	885
26992	C	756	841
	DM	830	812
Americano	C	974	1069
	DM	1159	1167

La variación radial hallada muestra un aumento de médula (posición 1) a corteza (posición 3) con diferencias significativas para las 3 posiciones radiales (Tabla IV. 14).

Tabla IV.14. Longitud de fibras promedio para todos los clones por posición radial (variación radial). Test de Tukey.

Posición radial *	Longitud fibras (μm)	Grupos homogéneos
1	735	a
2	911	b
3	1056	c

*Posición 1: año 2, 2: año 7, 3: año 13

Si se discriminan los valores por clon y por sitio (Tabla IV.15 y Fig. IV 11 y 12) se observa que la tendencia es homogénea para todos los clones.

Tabla IV.15. Longitud de fibras por clon en las 3 posiciones radiales, a la altura de 1,3 m

Clon	Sitio*	Longitud de fibras (μm)		
		Posición 1 (año 2)	Posición 2 (año 7)	Posición 3 (año 13)
13-44	C	726	842	967
	DM	686	917	968
250-33	C	736	912	1011
	DM	729	998	1084
131-27	C	734	910	967
	DM	690	901	985
131-25	C	819	854	1072
	DM	680	931	1029
26992	C	665	735	868
	DM	666	878	946
Americano	C	759	1053	1111
	DM	960	1195	1322

Como lo muestran las Figuras IV. 11 y IV.12 el aumento de longitud de fibras de médula a corteza, a la altura de pecho, fue más marcado en el sitio DM.

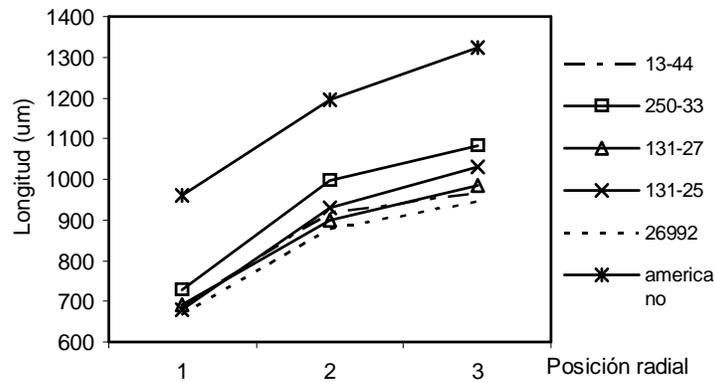


Fig. IV.11. Longitud de fibras en 3 posiciones radiales por clon en el sitio DM

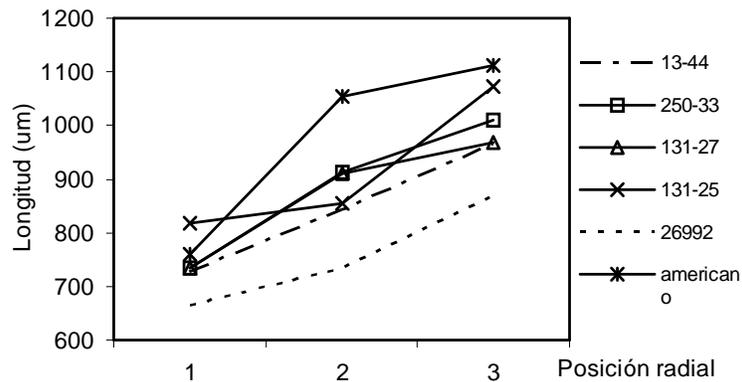


Fig. IV.12. Longitud de fibras en 3 posiciones radiales por clon en el sitio C

El rango de variación de la longitud de fibras entre clones coincidió con los valores observados por otros autores del país en estudios previos (Sucatte y Repetti, 1975; Fiaño, 1976; Bonavía y Ragonese, 1980; Bonavía 1982, 1984, 1987, García Volonté y Suarez, 1989; Noveresi et al., 1997). En todos los casos el sauce americano presentó los mayores valores. Algunas diferencias se pueden apreciar con los resultados presentados por Vaschetto (1995), quien encontró longitudes de fibras superiores a 1mm en los clones 13-44 y 131-27 de 8 años.

Bonavía de Guth (1981) publica valores de longitud de fibras para el híbrido 250-33 (1015 µm) superiores al americano (904 µm) ambos de 9 años, implantados en un sitio continental de la Provincia de Buenos Aires.

Asimismo, los patrones de variación axial y radial fueron mencionados por otros autores (Bonavía de Guth y Ragonese, 1980; Bonavía de Guth, 1984).

Las correlaciones establecidas entre la longitud de fibra en las 3 posiciones radiales y las longitudes de los radios alcanzados a esa edad no fueron significativas. Es posible entonces, obtener mejores crecimientos en DAP sin

desmejorar la longitud de fibras formada a esa edad. Por otro lado, las correlaciones juvenil-adulto fueron significativas. Así, la longitud de fibras producida por el cambium a los 2 años, presentó una correlación importante con la longitud de fibras del leño producida en los años 7 y 12 ($r= 0,72$ y $0,90$ respectivamente). Esta elevada correlación permite una selección precoz de los individuos que posean las características deseadas del leño de acuerdo con el uso final de la madera.

En el caso de estos clones, se podría realizar una selección por vigor y longitud de fibras a los 2 años.

2.3.2- Ancho de fibras:

Esta variable fue medida sobre preparados histológicos utilizando dos métodos diferentes: en macerado y en corte transversal. En la Tabla IV.10 de la sección 2.3 puede apreciarse la diferencia notoria de magnitudes halladas con cada método.

Como se grafica en la Fig IV.13, las mediciones sobre macerado (método 1) fueron significativamente superiores a las realizadas sobre CT (método 2), en todos los clones. También las interacciones con clon y sitio fueron significativas con ambos métodos ($p= 0,000$).

Esta diferencia se debe a que cuando se realiza la medición del ancho en un macerado se toma la medida en el punto central de la fibra que corresponde al de mayor ancho. En cambio, en un CT no se tiene certeza sobre el punto de la fibra seleccionado para la medición.

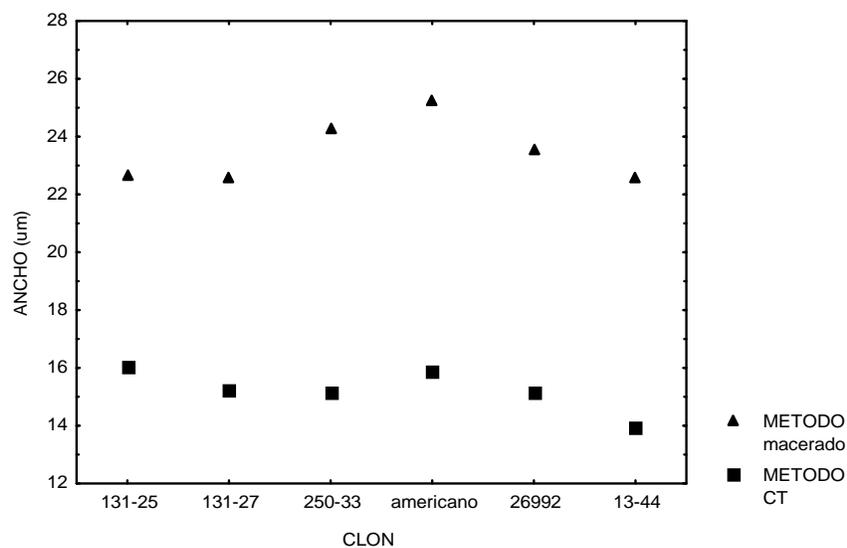


Fig. IV.13. Valores de ancho de fibras para todos los clones en macerado y en CT.

El análisis de la variable ancho de fibras en macerado indicó que tanto los clones ($p= 0,000$) como los sitios ($p= 0,002$) resultaron fuentes significativas de variación. La Tabla IV.16 muestra el ordenamiento relativo de los clones según el sitio y el test de Tukey.

Tabla IV.16. Ancho de fibras sobre macerado, por clon y por sitio. Test de Tuckey.

Sitio DM*			Sitio C*		
Clon	Ancho fibras (µm)	grupos homogéneos	Clon	Ancho fibras (µm)	grupos homogéneos
13-44	21,5	a	131-27	21,5	a
26992	22,3	a	131-25	22,8	ab
131-25	22,5	a	13-44	23,6	abc
250-33	23,6	b	26992	24,8	bc
131-27	23,8	b	250-33	25,3	c
americano	25,0	c	americano	25,5	c

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

El sitio continental presentó los valores mas altos excepto en el clon 131-27. El sauce americano superó los 25 µm en ambos sitios.

La variación radial de las muestras tomadas de médula a corteza, no mostró una tendencia uniforme en todos los clones, como lo muestra la Fig. IV.14.

Los anchos de fibra de cuatro de los clones (americano, 250-33, 131-25 y 13-44) aumentaron sus magnitudes desde la posición interna 1 (médula) hacia la posición intermedia 2, y luego descienden hacia la posición externa 3 (corteza). En los clones 26992 y 131-27, aumentaron de médula a corteza.

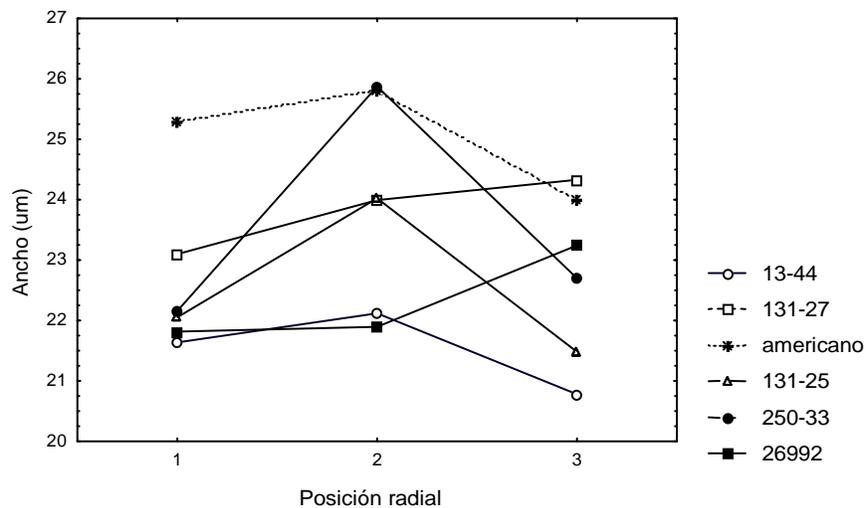


Fig. IV.14. Variación del ancho de fibras (μm) según la posición radial.

Las diferencias entre las posiciones 1 y 3 no fueron significativas, mientras que sí lo fueron, entre éstas y la intermedia 2.

Para la variable ancho de fibras en corte, el ANOVA demostró que tanto los clones ($p= 0,000$) como los sitios ($p= 0,049$) resultaron fuentes significativas de variación. La Tabla IV.17 presenta el ordenamiento relativo de los clones según el sitio y el test de Tukey.

Tabla IV.17. Ancho de fibras en CT promedio por clon y por sitio. Test de Tuckey.

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	Ancho fibras (µm)	grupos homogéneos	clon	Ancho fibras (µm)	grupos homogéneos
13-44	13,5	a	13-44	14,3	a
26992	14,6	b	131-27	14,5	ab
250-33	15,5	c	250-33	14,8	b
131-.27	15,9	cd	Americano	15,6	c
americano	16,1	cd	131-25	15,7	c
131-25	16,4	d	26992	15,7	c

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

Los clones del sitio continental presentan los valores más altos, excepto el 13-44 y el 26992.

2.3.3- Espesor de pared

Los análisis de la varianza demostraron que tanto los clones como los sitios resultaron fuentes significativas de variación. La Tabla IV.18 muestra el ordenamiento relativo de los clones según el sitio y el test de Tukey.

Tabla IV.18. Espesor de pared promedio por clon y por sitio. Test de Tuckey.

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	Espesor de pared (µm)	grupos homogéneos	clon	Espesor de pared (µm)	grupos homogéneos
131-27	2,1	a	131-25	2,3	a
26992	2,3	b	26992	2,7	b
250-33	2,5	c	13-44	2,8	b
131-25	2,5	cd	131-27	2,9	bc
13-44	2,7	d	250-33	3,1	c
americano	3,3	e	americano	3,3	d

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

El clon que superó los 3 μm en ambos sitios fue el sauce americano.

Novaresi et al. (1997) publicaron valores mayores para árboles de 8 años del Delta, registrándose espesores medios de 3,3 μm en el sauce americano y en el híbrido 131-27 y de 4 μm en el 13-44.

La correlación con la densidad básica fue baja y positiva ($r= 0,59$), y con el lumen fue baja y negativa ($r= -0,64$). Un mayor espesor de pared genera un menor colapso de las fibras, como lo demostró su correlación negativa con el índice de flexibilidad ($r= -0,64$) y positiva con el índice de runkel ($r= 0,93$).

2.3.4- Lumen

Los análisis de la varianza demuestran que tanto los clones como los sitios resultaron fuentes significativas de variación. La Tabla IV.19 muestra el ordenamiento relativo de los clones según el sitio y el test de Tukey.

Tabla IV.19. Ancho de lumen promedio por clon y por sitio. Test de Tuckey.

Sitio DM*			Sitio C*		
clon	Lumen (μm)	grupos homogéneos	clon	Lumen (μm)	grupos homogéneos
13-44	8,9	a	13-44	8,0	a
americano	9,1	a	americano	9,2	b
250-33	9,9	b	250-33	9,2	b
131-27	10,4	c	26992	9,2	b
131-25	10,7	c	131-27	10,1	c
26992	11,2	d	131-25	11,8	d

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

En el sitio continental los valores de ancho de lumen fueron menores con excepción del clon 131-25. En ambos sitios, los menores valores correspondieron a los clones 13-44, americano y 250-33.

Los estudios de variables morfológicas anteriormente citados no han reportado valores de ancho del lumen.

La relación de esta variable con el ancho de la fibra y el espesor de pared permite explicar la posibilidad de colapso que puede presentar la fibra. La correlación positiva que se observó con el índice de flexibilidad ($r= 0,66$) y negativa con runkel ($r= -0,67$) confirman esta relación.

2.4- Indices papeleros: afieltramiento, flexibilidad y runkel

A través de estas relaciones biométricas se trata de establecer la capacidad de entrelazarse de las fibras y su posibilidad de colapso. En pulpas químicas, las fibras de mayor longitud y mayor colapso forman una trama con mayor área de enlace (bonding), que le otorga al papel una mayor resistencia mecánica. Estos índices han sido desarrollados para coníferas, donde las fibras presentan valores de longitud y ancho mucho mayores que en las latifoliadas.

En las coníferas, valores de índice de afieltramiento mayores a 60 producen buenas resistencias, sobre todo al rasgado. En este trabajo ningún clon alcanzó este valor. El mayor índice (47) correspondió al sauce americano del Delta (Tabla IV.10). Se evidencia la diferencia entre sitios, siendo el DM el que registró las magnitudes mas elevadas para un mismo clon. La correlación entre afieltramiento y rasgado no fue significativa.

Valores superiores de este índice fueron publicados por Fiaño (1976) para sauce americano (55), híbrido 131-25 (46) y 131-27 (58). Sucatte y Repetti (1975) destacaron la magnitud hallada para el americano frente a los híbridos, (61, 21 y 40, como máximo, respectivamente). García Volonté et al. (1989)

publicaron rangos de valores, en donde el americano y el híbrido 250-33 se hallaron entre los más altos (mayores a 60). Bonavía de Guth (1982) halló valores de 33 para el híbrido 13-44 en árboles de 8 años. La misma autora publicó rangos muy bajos para sauce americano (de 29 a 38) y para el híbrido 250-33 (de 33 a 35) en árboles de 9 y 15 años, en un sitio Continental de la Provincia de Buenos Aires (Bonavía de Guth, 1981; Bonavía y Ragonese, 1980).

En el caso del coeficiente de flexibilidad, valores mayores de 50 producirán buenas resistencias, principalmente a la tracción y al reventamiento. En este estudio, aunque todos los clones superaron ese valor, solo algunos se destacaron en sus propiedades de resistencia y en ningún caso se evidenció una relación clara entre esa propiedad de las pulpas y el índice. Valores similares fueron citados por Zilli y Vaschetto (1975).

Valores bajos en el índice de runkel (menores de 0,50) indicarían un mejor colapso de las fibras. Los resultados de la Tabla IV.10 revelaron que la mayoría de los clones superaron el valor de 0,50 demostrando una mediocre formación y colapso de las fibras. El clon 131-25 del sitio Continental presentó el menor valor (0,38), coincidiendo con uno de los mayores valores de flexibilidad (75), marcando la mayor capacidad de colapso de ese clon en relación a los otros.

No hay antecedentes de cálculo de este índice en los trabajos sobre sauces en Argentina. En Canadá, Deka et al. (1994) publicaron un trabajo con resultados de 13 clones de sauces, cuyos valores oscilaron entre 0,51 y 1,02 para árboles de 2 y 3 años.

2.5- Proporción de tejidos:

La Tabla IV.20 muestra la proporción de tejidos medidos en corte transversal como porcentaje de vasos, fibras y tejido parenquimático (radios).

Comparativamente con otras latifoliadas, los sauces poseen una alta proporción de fibras, debido principalmente a la ausencia de parénquima axial, que limita este tejido solo a los radios uniseriados. Zilli y Vaschetto (1975) y Deka et al. (1994), establecieron esta misma comparación al estudiar sauces del Delta y 13 clones de sauces en Canadá, respectivamente.

Tabla IV.20. Proporción de tejidos. Valores promedio.

Clon	Sitio*	Proporción Tejidos (%)		
		Vasos	Fibras	Radios
13-44	C	24	68	8
	DM	16	73	11
250-33	C	31	57	12
	DM	23	66	11
131-27	C	33	57	10
	DM	22	69	9
131-25	C	30	61	9
	DM	22	72	6
26992	C	27	65	8
	DM	17	75	8
americano	C	31	63	6
	DM	27	64	9

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

La proporción de vasos varió significativamente con el sitio ($p= 0,000$) y con el clon ($p= 0,02$), siendo más altos los valores del sitio continental (Fig. IV.15). La interacción clon x sitio no resultó significativa ($p= 0,84$). Si se consideran las posiciones radiales de muestreo, se observó un aumento significativo de la proporción de vasos hacia la corteza. Esta evolución se registró en ambos sitios y en todos los clones.

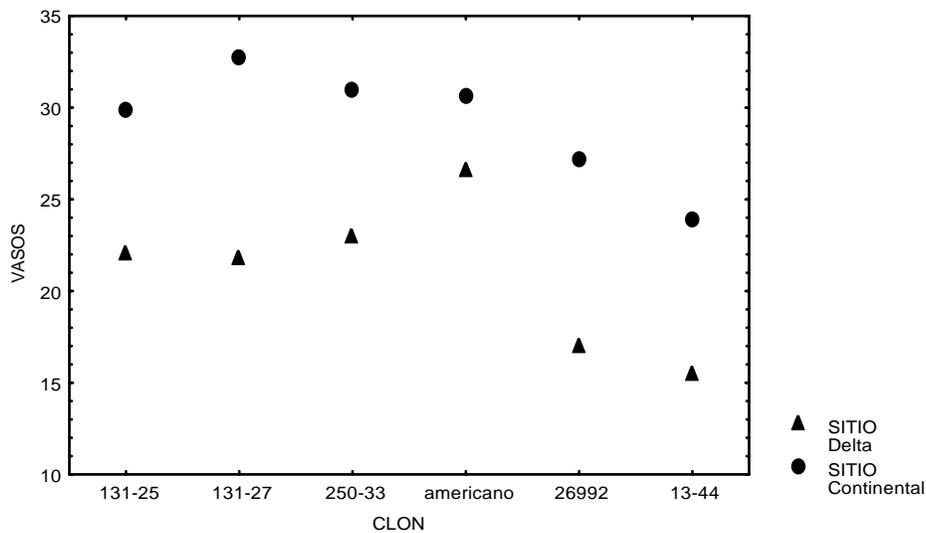


Fig. IV.15. Porcentaje de vasos por clon y por sitio

El tejido parenquimático, medido como porcentaje de radios (Fig. IV.16), varió significativamente con el clon considerado ($p= 0,027$), pero no con el sitio ($p= 0,89$). La posición radial de muestreo tampoco resultó fuente significativa de variación ($p= 0,48$).

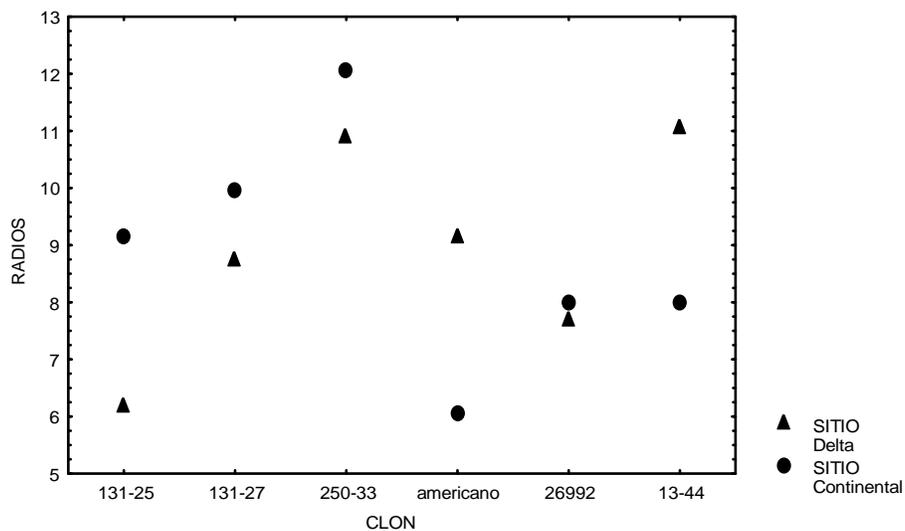


Fig. IV.16. Porcentaje de radios por clon y por sitio

El análisis de la varianza del tejido fibroso demostró que tanto el sitio ($p= 0,00$) como los clones ($p= 0,02$) fueron fuente significativa de variación. La

interacción clon x sitio resultó no significativa ($p= 0,41$), siendo la proporción de fibras mayor en el sitio Delta (Fig. IV.17).

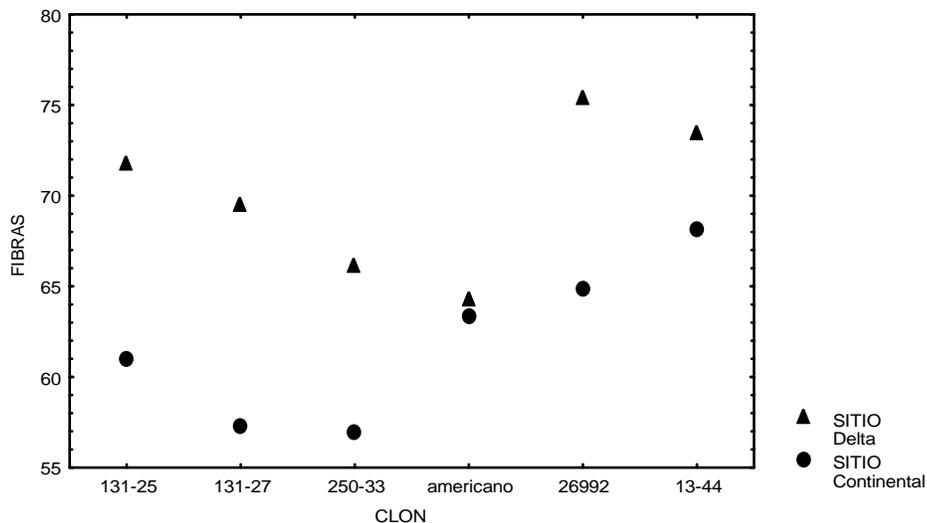


Fig. IV.17. Porcentaje de fibras por clon y por sitio

Existe una importante diferencia entre la cantidad de fibras de los clones del DM y los del sitio C, que llega en algunos casos al 18%. Esto marca una importante diferencia a favor de los clones del sitio DM en cuanto al rendimiento esperable en pulpa de dichos árboles.

Valores similares de proporción de tejidos fueron publicados por Zilli y Vaschetto (1975) para el sauce álamo (*Salix alba* var. *calva*) del Delta del Paraná.

Considerando la composición química, solamente existió correlación con los extractivos en agua y la proporción de vasos ($r= 0,60$) y fibras ($r= -0,67$). Tampoco se establecieron correlaciones con las fracciones de Clasificación de fibras en la pulpa. Las marcas de inundación correlacionaron en forma negativa con la proporción de vasos ($r= -0,61$) y positiva con las fibras ($r= 0,75$). Esta última relación podría deberse a la mayor presencia de marcas de inundación en árboles del sitio Delta y la marcada diferencia de la proporción de vasos y fibras entre sitios.

2.6- Angulo microfibrilar:

Los valores de ángulo microfibrilar (Tabla IV.21) presentaron niveles más altos en el sitio continental, siendo el sitio y los clones fuentes significativas de variación. El ordenamiento de los clones en cada sitio no varió, ya que la interacción clon x sitio no resultó significativa (Fig. IV.18).

Tabla IV.21. Angulo microfibrilar promedio por clon y por sitio. Test de Tuckey.

Sitio DM			Sitio C		
clon	Angulo (°)	grupos homogéneos	clon	Angulo (°)	grupos homogéneos
26992	11,0	a	26992	17,6	a
131-25	13,7	b	131-25	21,3	ab
americano	15,0	bc	americano	22,0	abc
131-27	15,8	bcd	131-27	24,0	bc
250-33	18,3	cd	250-33	24,3	d
13-44	19,0	d	13-44	24,3	d

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental

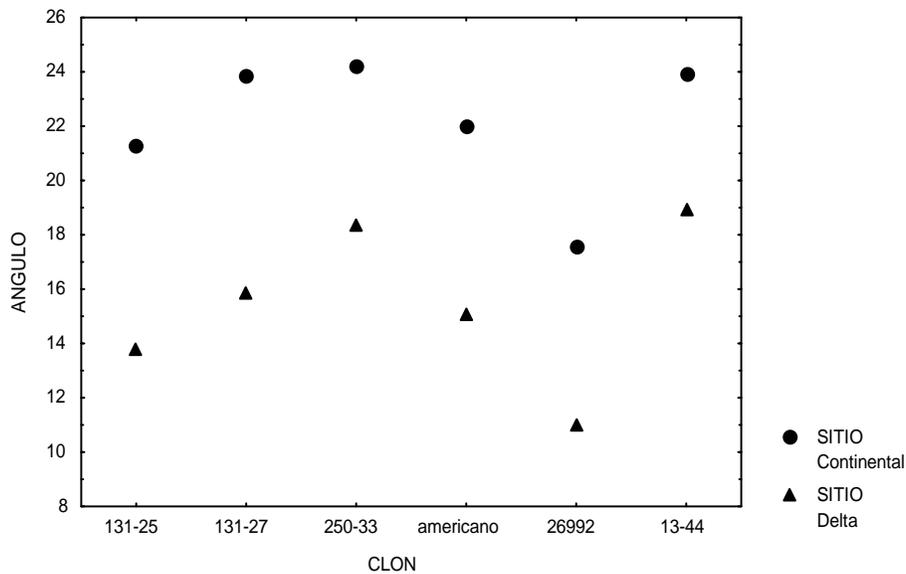


Fig. IV.18. Angulo microfibrilar por clon y por sitio

La resistencia a la tracción del papel está controlada por la resistencia a la tracción de las fibras individuales y por la firmeza de las uniones entre fibras.

Cualquier incremento en la resistencia de las fibras, o en las uniones de las mismas, aumentará la resistencia a la tracción de la hoja.

Mientras que en las pulpas químicas, la resistencia individual de las fibras depende del ángulo microfibrilar y del grado de polimerización de la celulosa, en las mecánicas, la lignina toma un rol preponderante (Area, comunicación personal). La unión entre fibras depende, a su vez, del área enlazada y de la resistencia de los enlaces. Mientras que en las pulpas químicas el área unida depende del colapso de las fibras, en las pulpas mecánicas es muy inferior, dependiendo la unión casi exclusivamente de la fibrilación y calidad de los finos.

2.7- Composición química

En la Tabla IV.22 se muestran los análisis químicos completos de todos los clones.

Tabla IV.22. Análisis químicos completos promedio por clon y por sitio

Clon	Sitio *	Extr.	Extr.	Extr.	Solubl	Lignina	Lignina	Lignina	Celulosa	Hemic	Ceniz
		a-b**	ac**	totales	NaOH	ins**	soluble	total		**	**
		%sms	%sms	%sms	%sms	%sms	%sms	%sms	%sms	%sms	%sms
13-44	C	3,0	3,3	6,3	24,2	20,4	2,6	23,0	42,3	28,4	0,6
	DM	2,4	2,1	4,5	24,7	20,7	2,3	23,0	43,8	28,7	0,5
250-33	C	3,1	4,2	7,3	24,4	20,5	2,2	22,7	42,0	28,0	0,6
	DM	2,4	2,2	4,6	20,5	21,3	2,0	23,3	43,8	28,3	0,5
131-27	C	2,8	3,5	6,3	23,3	20,1	2,2	22,3	41,7	29,6	0,6
	DM	2,5	2,7	5,2	20,4	21,0	2,4	23,4	44,8	26,7	0,5
131-25	C	2,9	3,6	6,5	23,3	21,5	2,1	23,6	41,2	28,6	0,4
	DM	2,8	2,3	5,1	22,3	22,2	2,3	24,5	41,9	28,6	0,6
29662	C	2,9	3,1	6,0	22,5	19,0	2,7	21,7	42,2	30,0	0,6
	DM	3,1	2,3	5,4	22,5	20,5	2,5	23,0	43,1	28,5	0,8
americano	C	2,3	2,2	4,5	20,5	19,5	2,5	22,0	44,6	28,8	0,5
	DM	1,9	1,9	3,8	19,0	21,1	2,0	23,1	46,3	26,7	0,5

* Sitio DM: Delta Medio; Sitio C: Continental. ** Extr a-b.: extractivos en alcohol benceno; Extr.ac: extractivos en agua caliente; Solubl NaOH: solubles en hidróxido de sodio al 1%; Lignina ins: lignina insoluble; Hemic.: hemicelulosas; Ceniz: cenizas

2.7.1- Extractivos

El nivel de extractivos fue mayor en el sitio Continental, a excepción de los extractivos en alcohol benceno del clon 26992. Los análisis de la varianza demostraron que el clon, el sitio y la interacción clon x sitio, fueron fuentes significativas de variación.

El sauce americano en ambos sitios presentó siempre los menores valores (Fig. IV. 19). Estos resultados coinciden con otros autores (Celulosa Argentina SA, 1968/1969; Fiaño et al., 1976; Bonavía de Guth, 1981, 1982; Arreghini y Cerrillo, 1996).

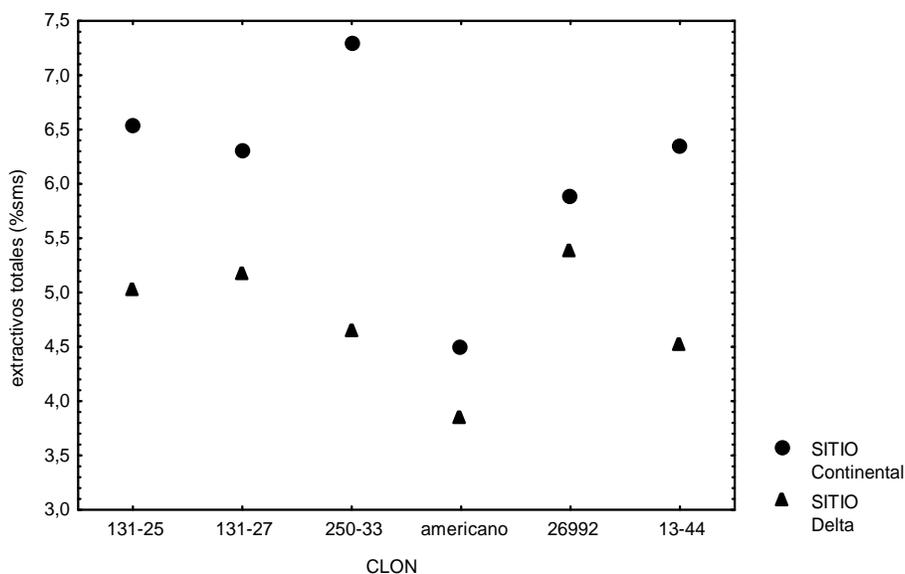


Fig. IV.19. Nivel de extractivos totales por clon y por sitio

Un alto nivel de extractivos podría disminuir el blanco, aunque las correlaciones no lo demostraron. Los extractivos en alcohol benceno correlacionaron con WRV ($r= 0,70$), elongación ($r= -0,60$), TEA ($r= -0,58$), fracción R50 ($r= -0,58$) y R270 ($r= -0,62$). En cambio, los extractivos en agua no presentaron correlaciones significativas con estas variables.

2.7.2- Solubles en hidróxido de sodio

Así como los extractivos, los solubles en hidróxido de sodio al 1% son también más altos en el sitio Continental. El ordenamiento relativo de los clones cambió según el sitio, como lo demuestra la Figura IV.20. El sauce americano mostró los menores valores.

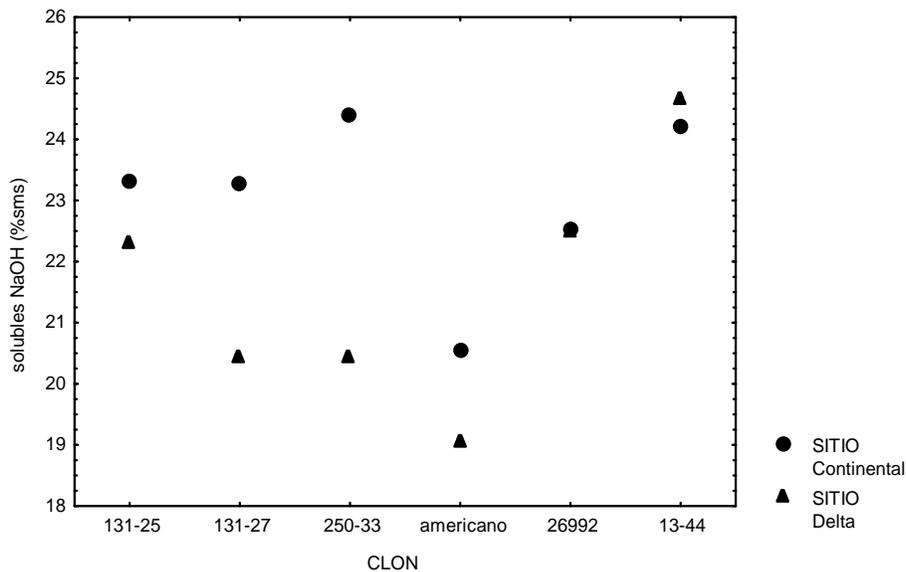


Fig. IV.20. Valores de Solubles en hidróxido de sodio al 1% por clon y por sitio.

Tanto los clones como el sitio fueron fuentes altamente significativas de variación según el ANOVA.

Los niveles de solubles coinciden con los publicados por Arreghini y Cerrillo (1996) para 19 genotipos de sauces en Argentina.

Según la norma TAPPI (T201 cm-97), la tasa de solubles se relaciona con el deterioro sufrido en las cadenas de celulosa por hongos xilófagos. En nuestro estudio, las maderas presentaban ataque de hongos de pudrición blanca (que degradan lignina principalmente), por lo tanto es de esperar que el daño sufrido en las cadenas de celulosa sea mínimo. Las correlaciones indican que la asociación entre solubles y podredumbre no fue significativa.

Los solubles correlacionaron negativamente con las propiedades de resistencia mecánica ($r = -0,70$ con tracción y elongación, $r = -0,74$ con TEA) y con la fracción de finos R270 ($r = -0,65$).

2.7.3- Lignina

Los valores de lignina total variaron entre 22,0 %sms y 24,5 % sms, siendo los clones 26992, 131-27 y americano del sitio C los que menor contenido presentaron. El clon 131-25 es el que mostró los mayores valores. El sitio continental es el que presentó las mayores diferencias entre clones (Tabla IV. 23).

La lignina insoluble se correlacionó positivamente con la opacidad ($r = 0,79$) y con el coeficiente de absorción de la luz ($r = 0,83$) y negativamente con la blancura ($r = -0,70$), evidenciando que es esta fracción de lignina la que aporta los cromóforos y confieren opacidad a la pulpa.

La lignina soluble tiene un comportamiento inverso a la insoluble. Correlacionó negativamente con la opacidad ($r = -0,59$) y k ($r = -0,60$), y además presentó una correlación negativa con los finos ($r = -0,61$).

2.7. 4- Celulosa y hemicelulosas

El contenido de celulosa para los distintos clones varió en forma similar en ambos sitios, excepto en el caso del clon 131-27, que presentó un pico anormalmente alto en el sitio Delta.

En la Figura IV.21 se puede apreciar que el sauce americano presentó los mayores valores seguido de los clones 131-27, 13-44 y 250-33. El clon 131-25

registró los menores valores en ambos sitios, (9% menores que en sauce americano).

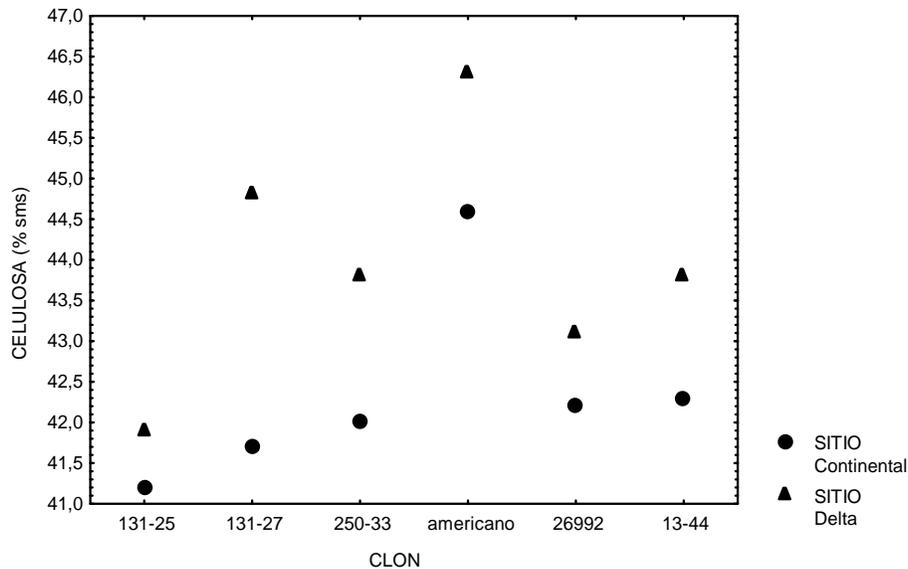


Fig. IV.21. Contenido de celulosa por clon y por sitio

La celulosa correlacionó positivamente con la densidad aparente de la pulpa ($r= 0,58$), con las propiedades de resistencia (tracción $r= 0,61$; explosión $r= 0,66$; elongación $r= 0,72$; I TEA $r= 0,73$) y con la resistencia individual de las fibras ($r= 0,60$).

2.7. 5- Cenizas

El nivel de cenizas varió significativamente con el clon y no con el sitio. El clon 26992 del Delta presentó un nivel anormalmente alto, de 0.8% (Tabla IV. 26).

La mayor fuente de metales insolubles en el pulpado es la madera, con excepción del sodio (que suele ingresar como hidróxido de sodio) y el calcio (que proviene también del agua del proceso). Estos iones metálicos producen la descomposición y consecuente consumo del peróxido de hidrógeno en los procesos de blanqueo.

2.7.6-General

La composición química general de los clones en el sitio Delta (Fig. IV.22), nos muestra que las variaciones entre los clones no son muy marcadas. No obstante, los clones americano y 131-27, son los que presentaron mayor contenido de celulosa y menor de hemicelulosas. El clon 131-25 posee la mayor cantidad de lignina y elevados contenidos de extractivos totales.

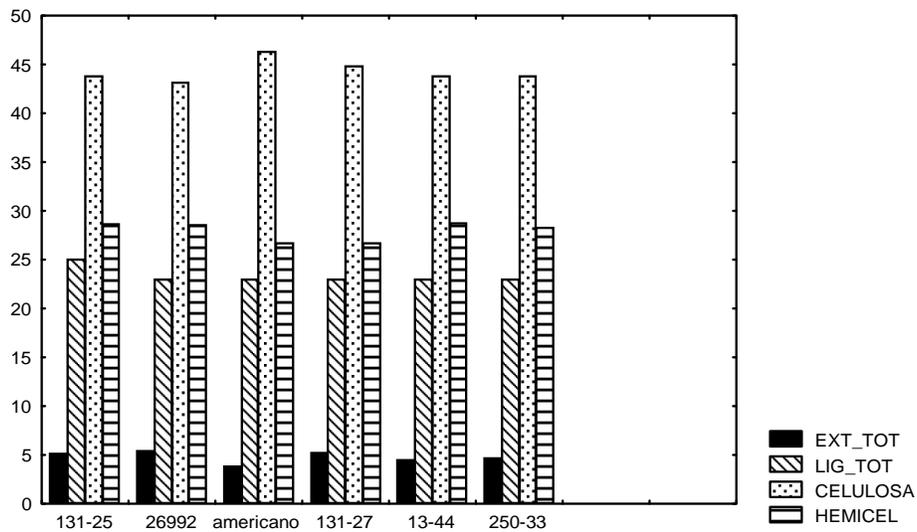


Fig. IV.22. Composición química completa de todos los clones en el sitio Delta

En el sitio Continental, el sauce americano presentó los mayores contenidos de celulosa y un bajo contenido de extractivos (Fig. IV.23). El clon 131-25 mostró las mismas características que en el sitio Delta.

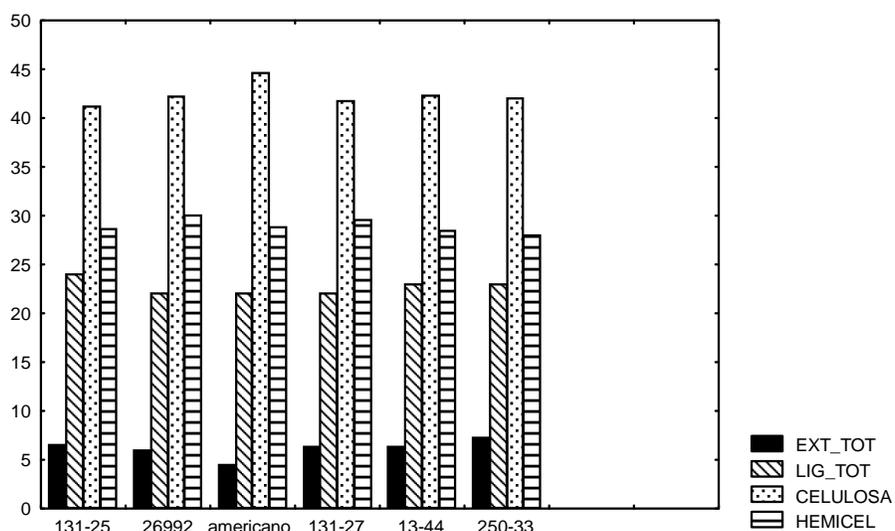


Fig. IV.23. Composición química completa de todos los clones en el sitio Continental

El nivel hallado de los diferentes componentes de la pared celular, coincide con los valores publicados por diversos autores, para estos clones, en diferentes sitios (Celulosa Argentina, 19868/69; Sucatte y Repetti, 1975; Zilli y Vaschetto, 1975, Fiaño, 1976, Bonavía y Ragonese, 1980; Bonavía, 1981, 1982; Arreghini y Cerrillo, 1996). En estos trabajos, el sauce americano se encuentra siempre entre los genotipos que presentan los menores valores de extractivos en alcohol benceno, agua caliente y fría y solubles en NaOH.

Repetti et al. (1981), analizando madera de sauce americano de 3 edades (4, 7 y 10 años), encontraron que la composición química no varió significativamente con la edad.

2.8 - Otras características

Algunas particularidades de la madera, como biodeterioro, nudos, madera de reacción y tilosis, se han considerado en esta tesis en forma descriptiva, para caracterizar a cada clon de Salix. Debido a que no se encontró una forma de cuantificación precisa de estas propiedades, las mismas no se incluyen en el

análisis cuantitativo, ni en las relaciones madera-pulpa, aunque aparecen en el análisis multivariado de clusters.

Podredumbre

El deterioro sufrido por hongos, bacterias o insectos, es una fuente importante de pérdida de rendimiento y resistencia de las pulpas (Barnett y Jeronimidis, 2003). Depende en gran medida del estacionamiento y del modo de almacenaje de la madera (Klasnja et al., 1997). Zilli y Vaschetto (1975) advierten sobre la pérdida de blancura que producen estos organismos degradadores durante el estacionamiento de maderas de salicáceas.

Se midió la presencia de “podredumbre”, la presencia de manchas y la de marcas de inundación sobre la superficie de las rodajas pulidas (a 1,30 m).

La Tabla IV.23 muestra las anomalías detectadas, en forma comparativa.

Tabla IV.23. Biodeterioro y otras anomalías por clon y por sitio

clon	Sitio*	Podredumbre **	Mancha**	Marca** inundación	Nudos***	Tilosis %
13-44	C	0	3	0	5	8,3
	DM	1	5	5	5	22,1
250-33	C	5	0	0	1	19,3
	DM	4	5	5	7	10,9
131-27	C	0	3	0	0	6,3
	DM	4	2	5	12	18,8
131-25	C	5	5	0	9	3,3
	DM	5	5	5	18	24,9
26992	C	5	3	0	1	12,0
	DM	5	5	5	21	9,0
americano	C	3	0	0	1	1,1
	DM	3	3	4	14	3,4

*Sitio DM: Delta; C: Continente

** Codificación para podredumbre, mancha y marcas de inundación: 0-ausente, 1-presente en 1 árbol, 2- presente en 2 árboles, 3- presente en 3 árboles, 4- presente en 4 árboles, 5- presente en 5 árboles.

*** Nudos: cantidad de nudos contados al DAP en los 5 árboles.

En general, puede decirse que el deterioro fue más pronunciado en el sitio Delta, por ejemplo, las marcas de inundación se registraron solo en ese sitio. El clon 131-25 es el que presentó mayor cantidad de anomalías en ambos sitios.

La podredumbre se observó como una alteración en las características morfológicas de la madera a nivel de todos los tipos celulares. Visto con un aumento de 15x, se caracterizó por una coloración blanca y con pérdida de material (Foto IV. 1 y 2). En algunos casos, se observó en los cortes longitudinales la presencia de una línea de avance del ataque de color negro.

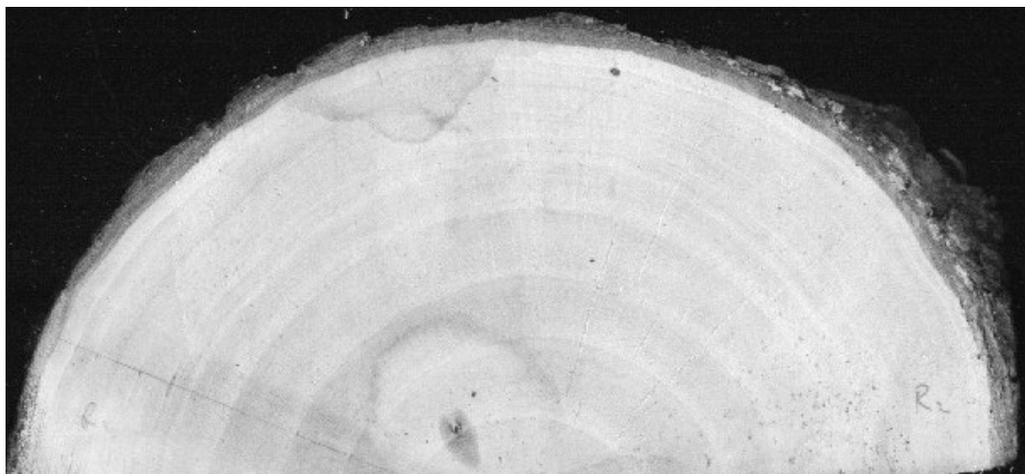


Fig. IV.1. Clon 13-44 C sin ataque aparente (testigo)

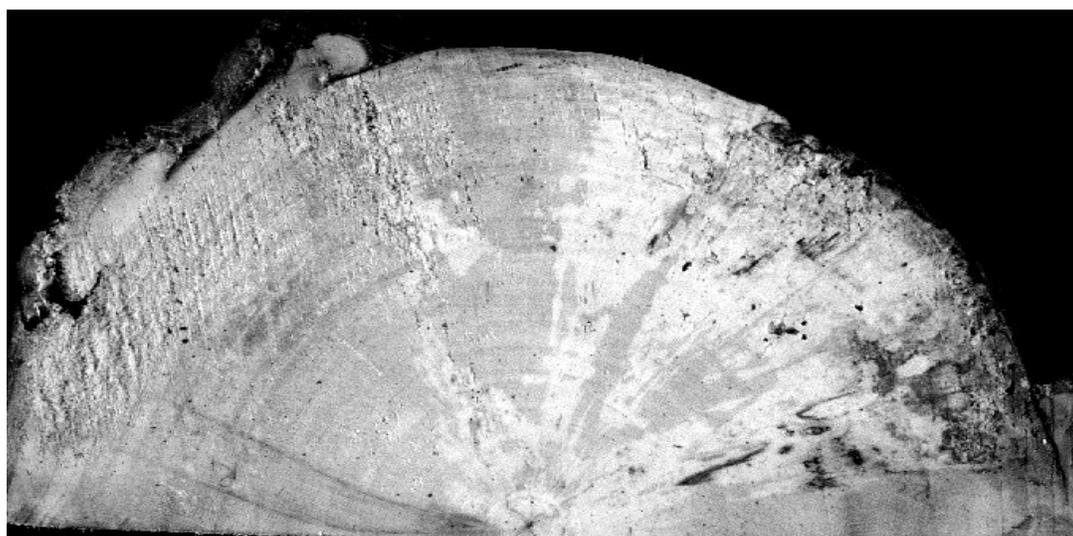


Fig. IV.2. Clon 250-33 DM con ataque severo de hongos de pudrición blanca

Se refieren a continuación los diferentes grados de ataque, mediante la descripción microscópica de las muestras.

- 1- Las Fotos IV.3 y 4 muestran un ataque “severo” producida por hongos en el clon 13-44 y americano del sitio DM. Se observa claramente en el corte transversal, la pudrición simultánea en paredes de fibras y vasos (Foto IV. 3). Se detectan escotaduras o ranuras desde el lumen hasta la laminilla media, que evidencian la degradación de todos los componentes químicos. En otras porciones, se nota la falta de pared celular en grandes partes de fibras y vasos. Se observa la falta de tinción en algunos sectores de fibras (pequeños grupos). Se aprecia la pudrición selectiva, ya que las fibras aparecen separadas unas de otras por la ausencia de la laminilla media (Foto IV.4).

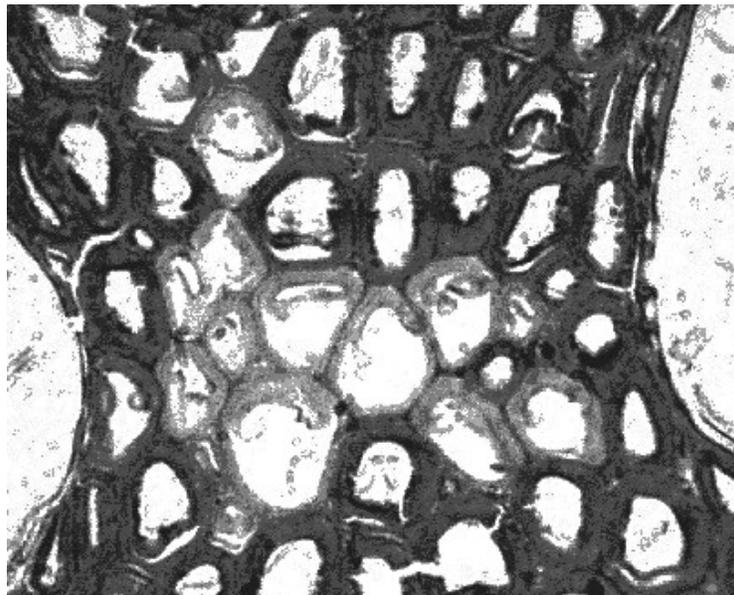


Foto IV.3. Clon 13-44 C atacado en forma severa por hongos de pudrición blanca simultánea y selectiva

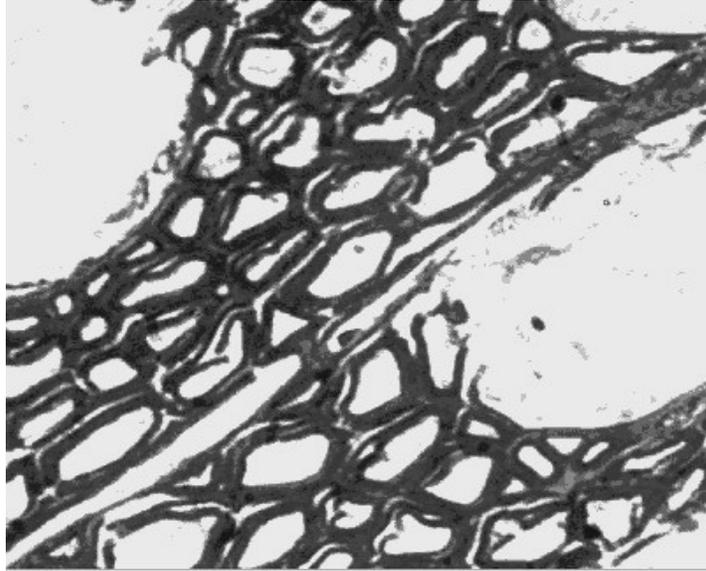


Foto IV.4. Sauce americano atacado por hongos de pudrición blanca simultánea y selectiva

2- Las Fotos IV.5 y 6 muestran la madera sin ataque aparente, tomada como “testigo”. La muestra pertenece al clon 250-33 del sitio DM. El aspecto general de todos los tipos celulares parece intacto. Hay abundante leño de tensión (Foto IV.5). Se aprecia un principio de separación de fibras (pocas) por la laminilla media y por las esquinas (cell corners) (pudrición blanca selectiva).

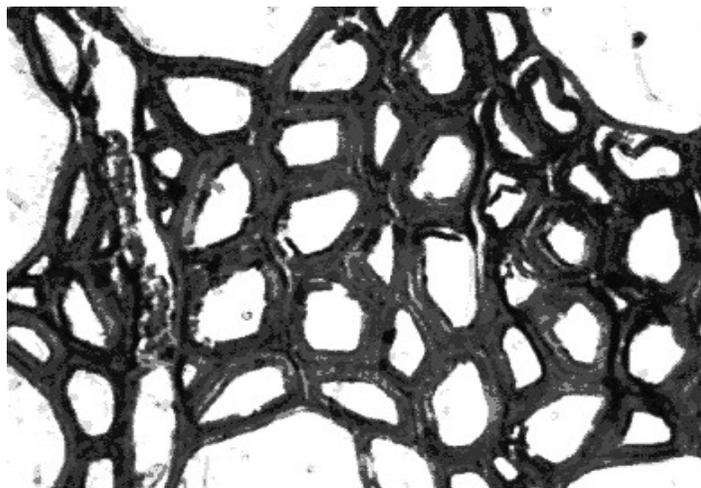


Foto IV.5. Clon 250-33 DM testigo con leño de tensión

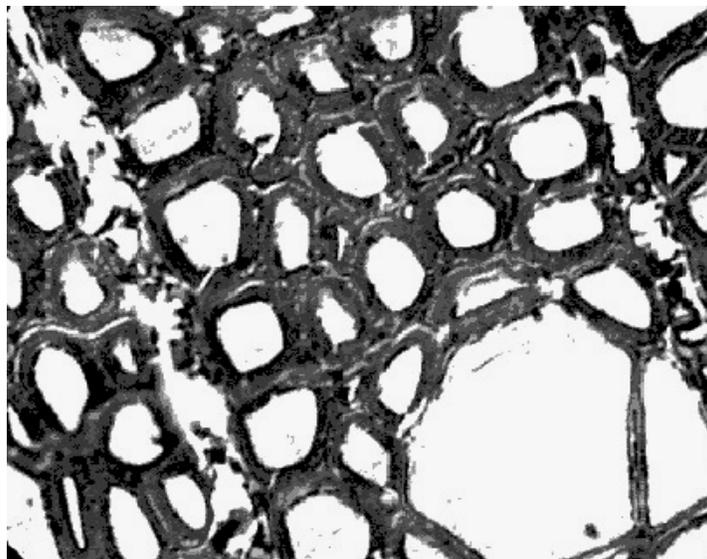


Foto IV.5. Clon 250-33 DM testigo con principio de pudrición blanca selectiva (en cell corners)

La podredumbre se describe en general como incipiente, con hongos de pudrición blanca simultánea y selectiva. Esto coincide con la bibliografía consultada sobre el tema y las referencias existentes sobre algunos de estos clones del delta entrerrriano (Levin y Castro, 1988). Estas autoras demostraron la presencia de *Trametes trogii* como el causante de la pudrición blanca en *Salix* y *Populus*. Este tipo hongo es capaz de atacar a todos los componentes químicos de la pared celular, especialmente la lignina. Remueven la lignina con diferentes patrones de degradación y pueden hacerlo simultáneamente o selectivamente (es decir, en etapas tempranas degradan solo la lignina y en las tardías a los carbohidratos).

Manchas

Las manchas, en la mayoría de los casos, se refieren a hongos que producen una coloración negruzca o azulada y no a hongos degradadores de la madera. Los cultivos realizados sobre madera fresca de sauce americano (Foto IV.6), no revelaron la presencia de hongos sino que, en todos los casos, se observó la aparición de colonias de bacterias.

Es probable que, debido a las condiciones de cultivo del sauce, la madera normalmente conviva con un elevado nivel de bacterias y hongos.



Foto IV.6. Sauce americano DM con mancha marrón y nudos

Klasnja et al. (1997), estudiaron el efecto de los cambios microbiológicos ocurridos durante el almacenamiento de troncos de *Salix* y *Populus* sobre las características y rendimiento de pulpas Kraft, en Rumania. Identificaron a los géneros *Trametes* y *Coriolus* como los hongos de pudrición blanca responsables de la pérdida de densidad en la madera (-7%), cambios en la composición química de lignina y extractivos (-3.6%), y pérdida de rendimientos. La composición microbiológica fue cambiando en el tiempo durante el período de almacenamiento. Mientras que al inicio, detectaron una composición de 40-50% de hongos saprofitos y 35-45% de bacterias, después de 4 meses, pasó a 87% de hongos saprofitos y 13% de bacterias, y al año, llegó a 62% de hongos saprofitos y 38% de hongos de pudrición blanca.

Marcas de inundación

En los clones del sitio Delta, se pudo observar en determinados anillos de crecimiento, un tipo de mancha oscura en el límite del anillo, a modo de “marca de inundación”. Estas marcas coinciden con períodos de gran anegamiento en el terreno (10 meses). (Fig. IV.7)

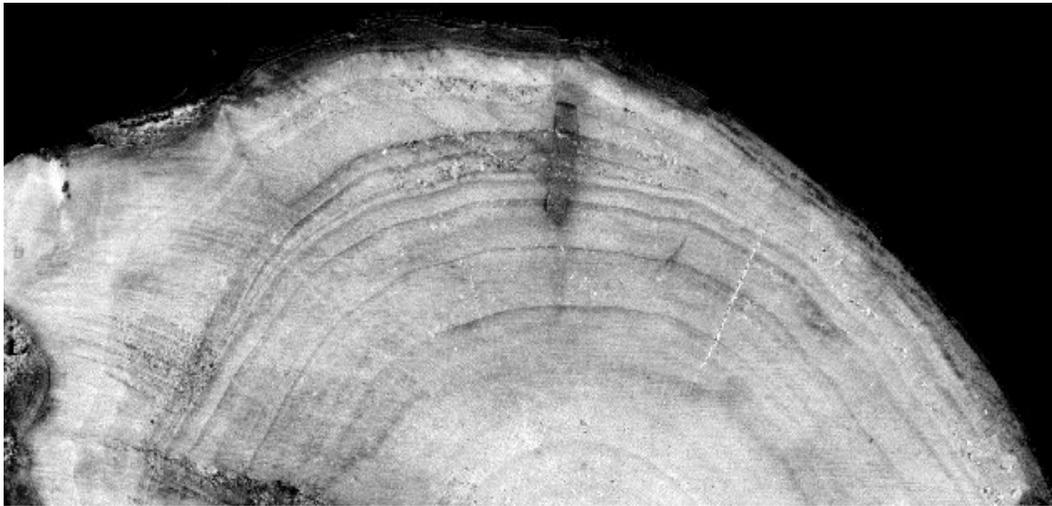


Fig. IV. 7. Clon 250-33 DM con marcas de inundación y nudos

Existen descripciones similares en maderas de Salix de Japón, denominadas “watermark”, donde se ha detectado la presencia de la bacteria *Erwinia salicis* (Sakamoto et al., 2000, 2002). En nuestro caso, no se han realizado pruebas de laboratorio para confirmar su origen.

Estas marcas afectan solamente a los clones cultivados en el Delta. En ambientes acuáticos o de alta humedad ambiental, la degradación por bacterias es muy importante. La madera se coloniza con bacterias en término de pocos días, pero esta primera colonización no es degradativa, sino que deben pasar unos meses para que las bacterias degraden la madera (Kim & Singh, 2000). Las marcas de agua (“watermark”) se forman como un mecanismo de defensa cuando la albura es atacada por microorganismos o dañada mecánicamente. Se acumulan ciertos extractivos de tipo fenólico, el

parénquima se muere por dicha acumulación y el color de los tejidos se torna pardo a negro, con oxidación y polimerización de estas sustancias. Se pierde la habilidad de conducción de agua en esa parte del tejido xilemático (Sakamoto et al., 2000). Otras características de la madera afectada son un alto contenido de humedad (wetwood), acumulación de polisacáridos extracelulares en las esquinas de las paredes celulares (cell corners), vasos taponados por masas de bacterias, rotura o ausencia de las membranas de las puntuaciones entre los vasos y los radios y plasmólisis y necrosis de las células parenquimáticas del radio.

En la Foto IV.8 se observa un corte transversal del clon 131-25 del sitio DM con signos de madera afectada por wetwood. Se aprecian claramente los contenidos en el lumen de fibras y vasos, y las paredes celulares sin ataque fúngico evidente. Se observan fibras gelatinosas.

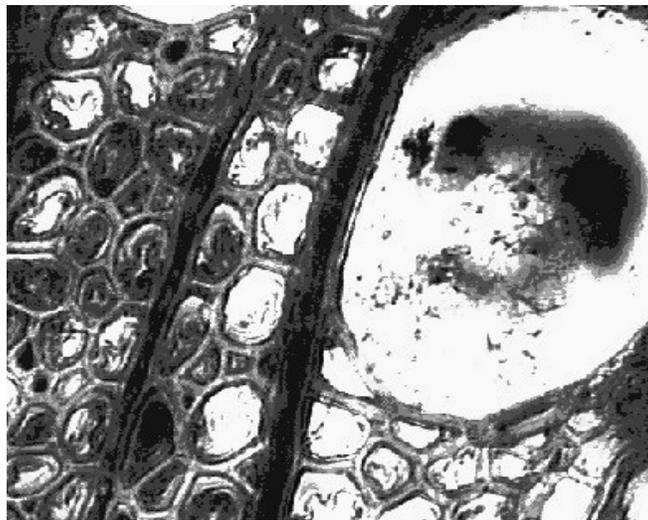


Fig. IV. 8. CT del Clon 131-25 DM con signos de madera afectada por wetwood

La modificación química de la pared celular como sustrato y el alto contenido de humedad, favorecen la propagación de hongos, aumentando la velocidad de deterioro del material.

Estas modificaciones de la estructura normal de la madera tienen un efecto negativo sobre la calidad de la pulpa. La impregnación no es homogénea, debido a las diferencias en la madera y el taponamiento de los vasos, que no permite el ingreso normal del licor.

Tilosis

La presencia de tílides en maderas jóvenes no es usual, ya que el proceso de duraminización es incipiente. Sin embargo, pueden presentarse taponamientos debido al ataque microbiológico.

En la Tabla IV.23 se observa que los diferentes clones y sitios tienen distintos comportamientos. El análisis de la varianza demostró que los sitios y los clones son fuentes altamente significativas de variación ($p= 0,000$), como se aprecia en la Fig. IV.23, mientras que las diferencias de posición radial de muestreo de médula a corteza fueron no significativas ($p= 0,58$).

Los clones del sitio Delta presentaron, en general, una mayor proporción de tílides, salvo en el 250-33 y el 26992, que no mostraron diferencias significativas. El sauce americano presentó los menores valores en ambos sitios.

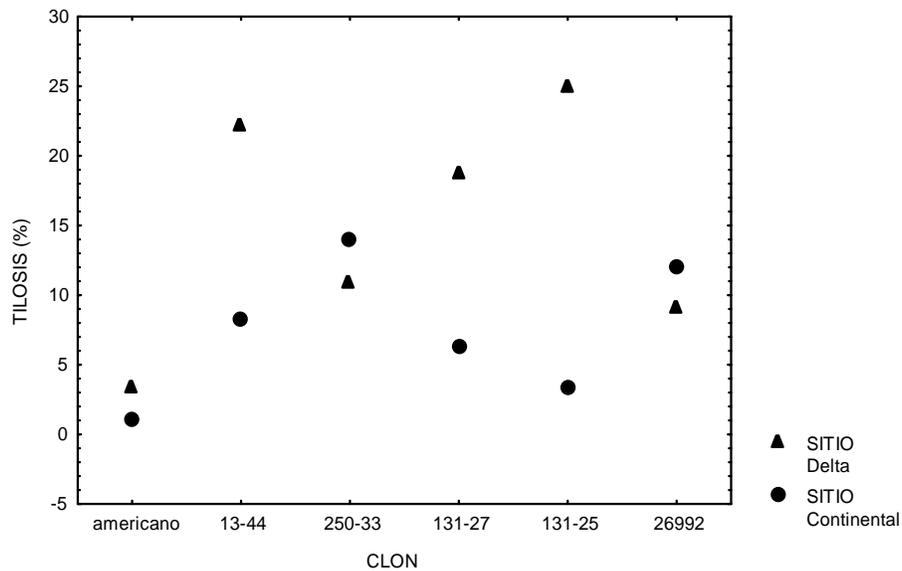


Fig. IV.24. Porcentaje de tilosis presente en los 6 clones en ambos sitios.

Las correlaciones realizadas entre tilosis y algunas propiedades de la madera como podredumbre, manchas y densidad no fueron significativas. Tampoco se establecieron correlaciones entre tilosis y propiedades de las pulpas, tales como WRV y fracciones de clasificación.

La presencia de vasos taponados no es una característica deseable en las maderas a pulpar en ningún tipo de proceso. Una mayor proporción de tílides impide una buena impregnación del chip en la etapa química previa a la refinación.

Nudos

Los nudos influyen notoriamente en el proceso de pulpado ya que disminuyen la homogeneidad de la madera. Producen un aumento de la densidad básica, alteran el contenido de celulosa y extractivos, las fibras presentan menor longitud y morfología más heterogénea. Además, siempre se encuentran

asociados a la madera de reacción (Tyrvaäinen, 1995). Por este motivo, se descartaron los chips con nudos al realizar los pulpados de este trabajo.

La Tabla IV.23 muestra el número de nudos presentes en las rodajas muestreadas. La cantidad de nudos es notoriamente más alta en el sitio Delta. El clon 131-25 presentó altos valores en los dos sitios.

Madera de reacción

La presencia de madera de tensión se caracteriza, en las latifoliadas, por la presencia de fibras gelatinosas (Foto IV.9). Estas fibras se comportan de manera muy diferente a las de la madera “normal” frente a los licores de impregnación, y al proceso de refinación (Barnett y Jeronimidis, 2003).

Según muestra la Tabla IV.23, el sauce americano y el clon 250-33 del sitio Continental presentaron los mayores valores de leño de tensión. Por las correlaciones obtenidas, no está vinculado a la cantidad de nudos presentes.

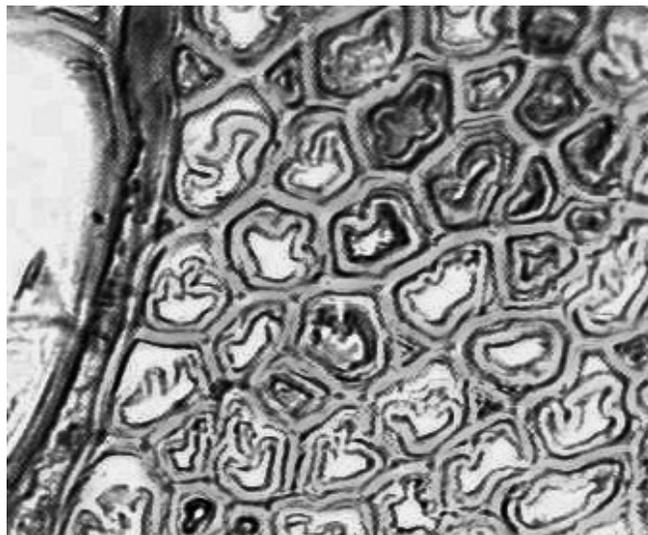


Fig. IV. 9. CT Sauce americano con abundante leño de tensión

3- Análisis de las variables de la Pulpa

3- Variables de la pulpa: Clasificación de fibras, Longitud de fibras (partículas) de las fracciones, Longitud ponderada por peso de fibra en las fracciones, Longitud promedio de fibras ponderada total, Factor L, una estimación del Factor S, Grados Schopper Riegler (°SR), WRV (Water Retention Value), Densidad aparente, Volumen específico, Índice de tracción, rasgado y explosión, Resistencia al aire, Energía absorbida a la Tracción (TEA), Elongación, Resistencia individual de las fibras, Blancura, Opacidad, Coeficiente de dispersión de la luz (s), Coeficiente de absorción de la luz (k), Color.

3.1- General

Las tablas IV.24 y IV.25 presentan los resultados obtenidos para las propiedades físico-mecánicas y ópticas de las hojas de ensayo estándar.

Tabla IV.24. Ensayos físicos de todos los clones

Clon	Sitio	°SR	WRV %	Vol. Esp. cm ³ /g	IT Nm/g	IR mNm ² /g	IE kPam ² /g	Elong. %	Rf N/cm	TEA J/m ²	R. aire s
13-44	C	52	155,0	2,71	16,9	2,93	0,65	1,10	25,8	7,22	5,04
	DM	49	156,1	2,53	15,7	3,69	0,88	1,04	27,3	6,16	12,4
250-33	C	54	166,9	2,54	19,1	3,70	0,85	1,23	29,6	9,10	9,43
	DM	50	156,4	2,48	26,8	4,03	1,07	1,50	30,8	15,98	25,3
131-27	C	54	162,3	2,51	20,8	3,35	0,81	1,13	30,8	9,01	11,1
	DM	50	169,5	2,63	21,0	3,39	0,72	1,14	32,1	8,92	10,5
131-25	C	52	180,8	2,66	18,1	3,23	0,57	1,04	25,5	6,78	8,00
	DM	45	161,4	2,76	15,1	2,93	0,54	0,89	24,2	4,62	5,83
26992	C	53	173,7	2,70	18,1	3,80	0,90	1,15	26,4	8,43	10,3
	DM	53	172,7	2,45	27,6	3,51	1,20	1,46	32,9	16,13	31,1
americano	C	49	144,0	2,50	23,3	3,76	1,10	1,79	29,8	16,81	13,6
	DM	56	146,4	2,41	28,2	3,20	1,25	1,82	31,9	21,91	22,6

Referencias: °SR: grados Shopper Riegler; WRV: valor de retención de agua; Vol. Esp.: volumen específico; Da: densidad aparente; IE: Índice de explosión; IR: Índice de rasgado; IT: Índice de tracción; Elong: Elongación; Rf: Resistencia individual de la fibra; TEA: energía absorbida a la tracción; R. aire: Resistencia al paso del aire.

Tabla IV.25. Propiedades ópticas de todos los clones

Clon	Sitio	Blancura	k	s	Opacidad	Color		
						L*	a*	b*
		(% ISO)	(m ² /kg)	(m ² /kg)	(% ISO)			
13-44	C	49,4	4,66	44,6	96,5	83,1	1,35	13,2
	DM	48,1	6,37	42,0	97,6	82,5	1,50	13,6
250-33	C	44,2	6,15	42,3	96,9	80,6	2,63	14,6
	DM	42,3	7,59	46,1	98,3	78,6	2,82	13,5
131-27	C	48,6	5,50	44,3	97,2	82,5	0,97	13,0
	DM	45,4	7,48	45,5	98,2	79,7	0,73	11,7
131-25	C	38,9	8,18	39,8	97,7	38,9	3,87	16,0
	DM	40,4	8,66	43,3	98,4	78,0	1,52	14,6
26992	C	46,8	4,92	39,9	95,8	82,6	2,46	15,1
	DM	40,0	8,11	43,4	98,5	77,5	3,94	14,4
americano	C	50,4	3,69	43,1	94,8	84,6	2,87	14,8
	DM	41,2	8,69	44,1	98,6	77,2	3,05	12,2

Para comprender apropiadamente estos datos se presentarán primero los resultados de la Clasificación de Fibras.

3.2- Clasificación de fibras

Los resultados de la clasificación de fibras en la pulpa se muestran en la tabla IV.26. Los resultados se expresan en porcentaje en peso seco de cada fracción retenida. Asimismo, se presentan los valores calculados del Factor L (R30+R50) y una estimación del factor S (como °SR de la fracción R100) de Forgacs (1963).

Se puede observar que los diferentes clones se comportaron de manera similar. Todas las fracciones presentaron valores similares en porcentaje. Así lo demuestra el ANOVA, en el cual los clones no resultaron fuentes significativas de variación ($p= 0,99$), en cambio, como se aprecia en la Tabla IV.27, las fracciones si lo hicieron ($p= 0,000$).

Tabla IV.26. Fracciones de clasificación de fibras y Factores L y una estimación del factor S (Forgacs).

clon	sitio	Fracciones de Clasificación (%)						Factor L	Factor S
		R30	R50	R100	R150	R270	P270		
13-44	C	24,4	20,8	26,6	7,1	8,9	12,2	45,3	14,0
	DM	29,9	22,5	24,4	6,8	9,8	6,6	52,3	12,6
250-33	C	30,9	21,7	20,8	6,5	10,6	9,7	52,5	14,0
	DM	27,8	25,3	24,1	7,3	11,3	4,4	53,1	14,2
131-27	C	26,1	20,0	23,6	4,5	8,9	17,0	46,1	14,0
	DM	31,2	20,4	22,7	5,9	10,0	9,8	51,6	14,6
131-25	C	32,7	20,4	19,9	7,4	10,9	8,8	53,1	14,0
	DM	27,5	19,4	19,7	6,6	11,3	15,8	46,8	13,4
26992	C	34,6	19,3	24,4	4,8	8,3	8,7	53,9	13,0
	DM	30,5	23,9	23,5	7,6	11,1	3,6	54,3	15,4
americano	C	30,7	26,5	16,4	6,1	11,3	9,1	57,2	12,4
	DM	30,6	24,7	17,7	4,9	14,8	7,5	55,3	13,3

Tabla IV.27. Valores promedio por fracción. Test de Tukey.

Fracción	%	Grupos homogéneos
R30	29,71	a
P50	22,05	b
R100	21,12	b
R270	10,59	c
P270	9,41	c
R150	6,27	cd

Se definieron 3 grupos estadísticamente diferentes (Tabla IV.27). En primer término, se ubicó la fracción R30 con un mayor porcentaje en peso frente a las otras. En segundo término, se ubicaron las fracciones R50 y R100, sin diferencias significativas entre sí, y en tercer lugar, las fracciones R270, P270 y R150, con porcentajes notoriamente inferiores.

Si discriminamos estos grupos por sitios (Fig. IV.25 y Fig. IV.26), vemos que existe una interacción clon x fracción ($p= 0,03$), es decir que el ordenamiento relativo de las fracciones cambia según el clon que se analice.

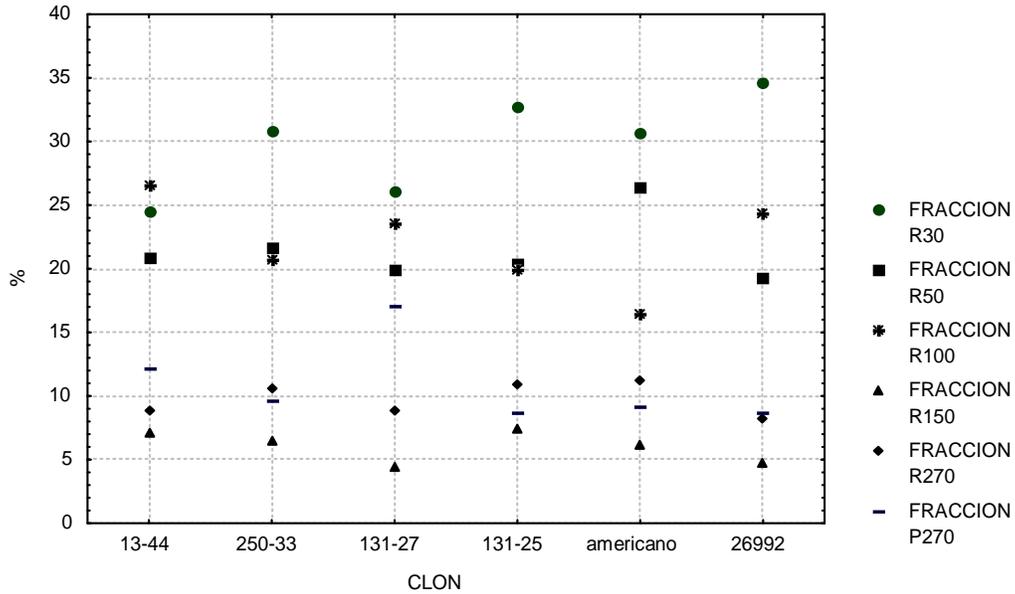


Fig. IV.25 Fracciones de Clasificación de los diferentes clones en el sitio Continental

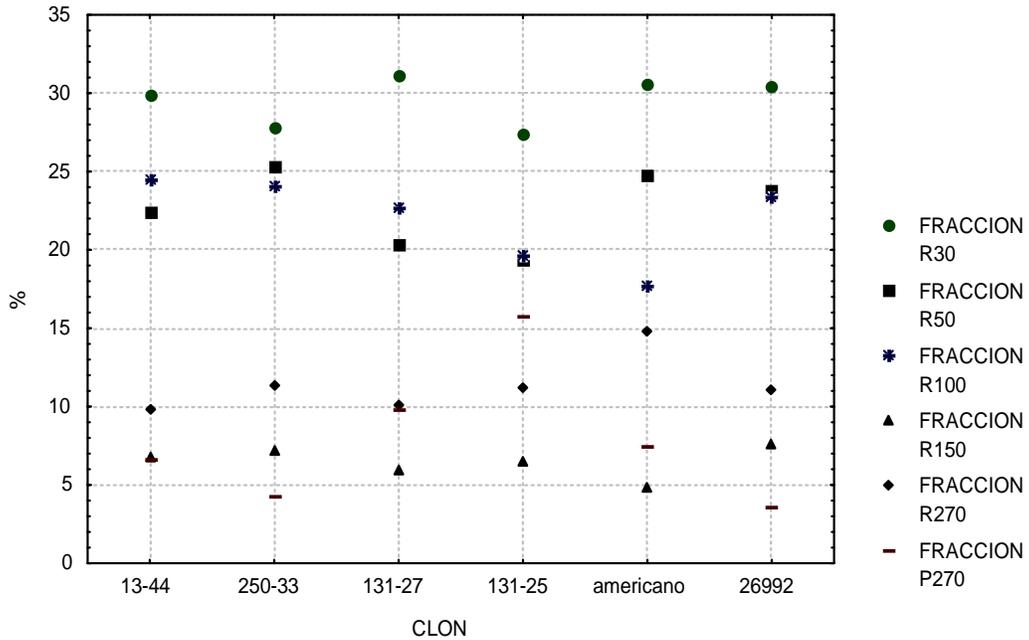


Fig. IV.26. Fracciones de Clasificación de los diferentes clones en el sitio Delta

La tabla IV.28 muestra las correlaciones encontradas entre variables de la madera y de las pulpas, y las 6 fracciones de clasificación.

Tabla IV.28. Valores del coeficiente de correlación (R^2) entre los pares de variables

	Fracción R30	Fracción R50	Fracción R100	Fracción R150	Fracción R270	Fracción P270
Ancho macerado	0,58	-	-	-	-	-
Longitud fibras	-	0,63	-0,77	-	0,81	-
Vasos	-	-	-	-	-	0,62
I. afieltramiento	-	-	-	-	0,62	-
Extractivos a-b	-	-0,58	-	-	-0,62	-
Extractivos Totales	-	-0,62	-	-	-0,60	-
Solubles	-	-	-	-	-0,65	-
Lignina soluble	-	-	-	-	-0,61	-
Celulosa	-	0,67	-	-	0,63	-
WRV	-	-0,63	-	-	-	-
Volumen específico	-	-0,79	-	-	-	-
Densidad aparente	-	0,79	-	-	-	-
I.Rasgado	-	-	-	-	-	-0,59
I.Tracción	-	0,74	-	-	0,61	-
Elongación	-	0,89	-	-	0,65	-
I TEA	-	0,84	-	-	0,71	-
Resistencia aire	-	0,70	-	-	-	-0,73
k	-	-	-	-	0,60	-
s	-0,66	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-0,66

Se observa que las fracciones R50 y R270 son las que obtuvieron la mayor cantidad de correlaciones significativas. Ambas fracciones, fueron las únicas que influyeron positivamente en las propiedades físico-mecánicas de las pulpas. Las propiedades ópticas tuvieron muy poca relación con las fracciones de clasificación.

La asociación positiva que presentaron las fracciones R50 y R270 con la longitud de fibras en la madera indicaría que las maderas con mayores

longitudes de fibras tendrán una mayor probabilidad de incrementar el porcentaje en peso de las fracciones R50 y R270. La composición química, en términos de extractivos y lignina, tendría un efecto contrario.

Descripción de las fracciones

Se presenta una caracterización general de las fracciones vistas al microscopio óptico.

Fracción R30: (Foto IV.10 y 11)

Las fibras se presentan enteras y reunidas en minihacecillos, con extremos escobados y fibrilación externa. Presencia de fibras aisladas cortadas y haces cortados. Gran cantidad de haces de fibras integradas por 3, 4 hasta más de 10 fibras y porciones de radios. Haces con los “extremos liberados” y fibrilados. No se evidencia gran cantidad de fibrilación. Ausencia de vasos y parénquima aislados. Longitud promedio: 1670 μm a 1340 μm .



Foto IV. 10. Fracción R30 con minihaces y fibras enteras con extremos escobados



Foto IV. 11. Fracción R30 con fibras enteras con fibrilación externa

Fracción R50: (Foto IV.12 y 13)

Las fibras se encuentran enteras, aisladas y poco colapsadas. Se observa fibrilación externa. Presencia de algunos haces de fibras compuestos de 3, 4, 5 y 6 elementos, en general cortados. Fibras cortadas. Algunas de las fibras individuales están colapsadas y presentan parte de la pared rota, con el lumen expuesto y extremos escobados. Presencia de vasos aislados, enteros y rotos. Longitud promedio: 990 μm a 600 μm .

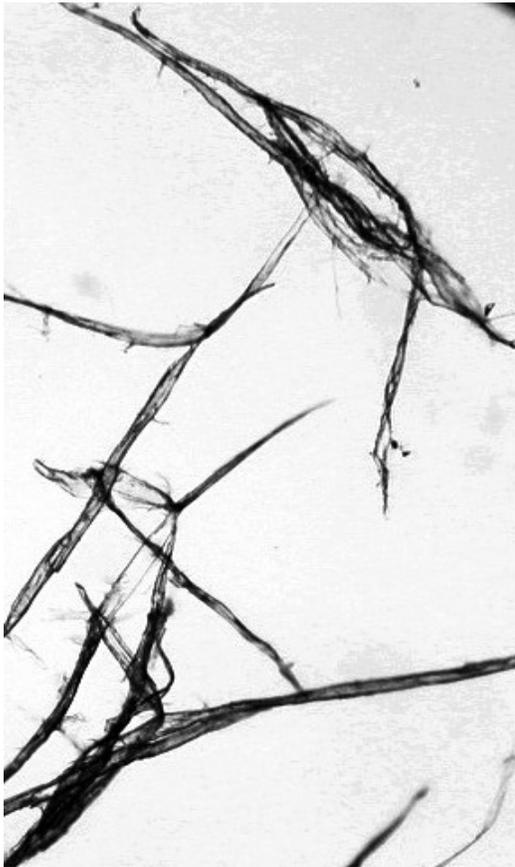


Fig. IV. 12. Fracción R50 con fibras aisladas y enteras con fibrilación externa

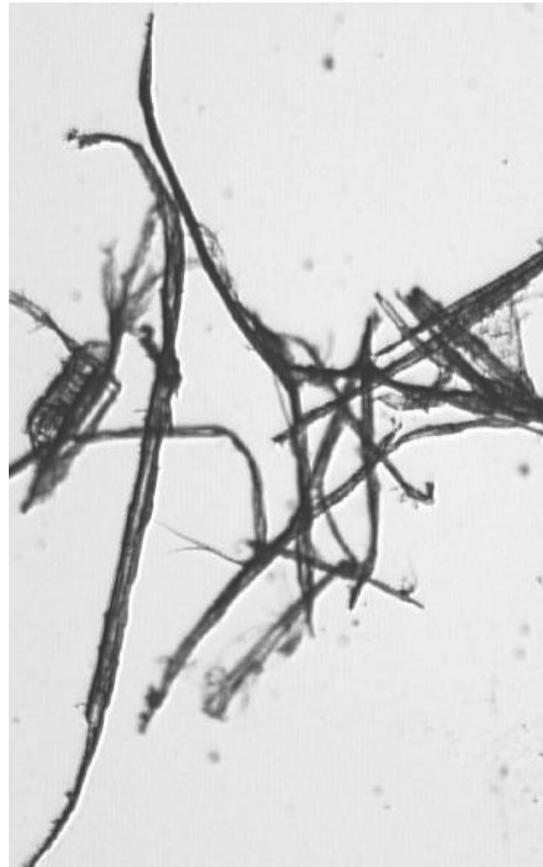


Fig. IV. 13. Fracción R50 con fibras aisladas enteras y cortadas, con extremos escobados y fibrilación externa

Fracción R100: (Foto IV.14 y 15)

Se observan pocas fibras enteras. Las fibras se presentan cortadas al igual que los hacecillos. Los trozos de fibras son largos y fibrilados, con extremos

escobados, paredes rotas (rajaduras) y el lumen expuesto. Se observa la presencia de vasos enteros y rotos, de parénquima radial (manteniendo la estructura del radio), de cintas de pared y de fibrilas sueltas. Longitud promedio: 670 μm a 530 μm .



Fig. IV.14. Fracción R100 con fibras cortadas, cintas de pared y vasos enteros

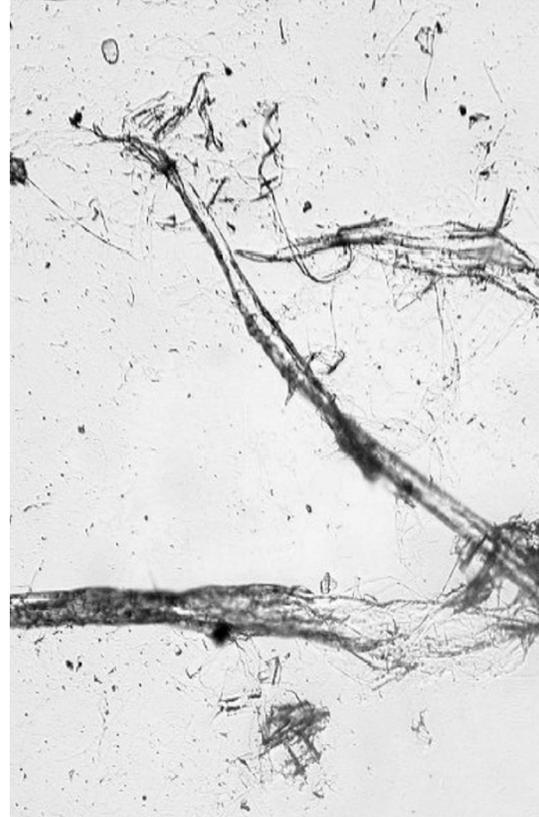


Fig. IV.15. Fracción R100 con fibras cortadas con fibrilación externa y lumen expuesto

Fracción R150: (Foto IV.16)

Las fibras se presentan todas cortadas, con extremos escobados y fibrilados. Se observan pedazos de pared, cintas de pared, trozos de vasos y de radios armados. Muy parecido a R100 pero mas cortado y fibrilado. Se observa una fuerte tendencia de los diferentes elementos a unirse a través de sus fibrilas. Presencia de pequeños radios armados en haces, de contenido color rojizo. Longitud promedio: 490 μm a 330 μm .

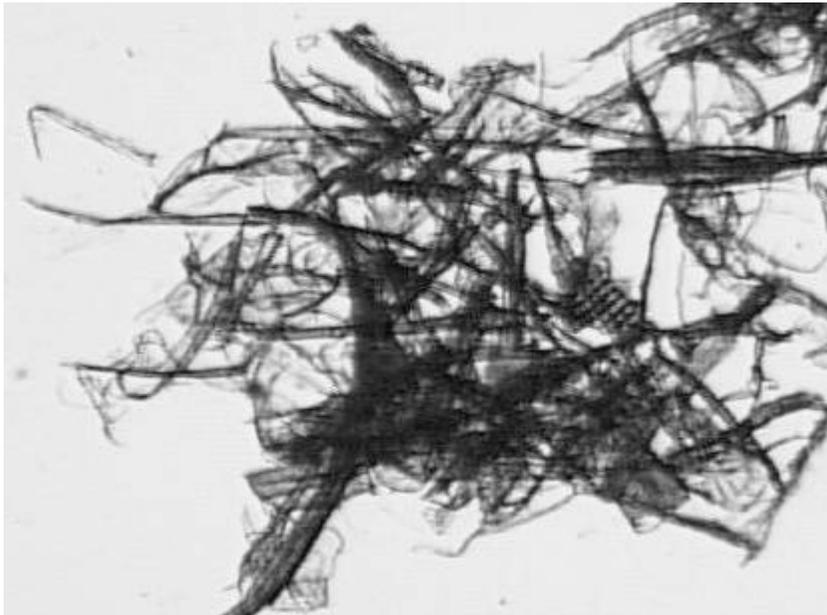


Foto IV. 16. Fracción R150 con fibras cortadas con gran fibrilación externa y pequeños radios en haces

Fracción R270: (Foto IV.17)

Se observan todos los elementos del leño, cortados en pedazos y fibrilados. Se pueden distinguir las paredes de las fibras cortadas y muy fibriladas, con extremos escobados. El parénquima radial se observa suelto y con contenidos rojizos. Son finos fibrilares que tienden a unirse en "cúmulos". Longitud promedio: 290 μm a 190 μm .



Foto IV. 17. Fracción R270 con fibras muy cortadas con gran fibrilación externa, pequeñas porciones de vasos y parénquima radial

Dos clones del sitio DM, el 131-25 y el 13-44, presentaron algunas diferencias en la composición de sus fracciones. Las pulpas de ambos híbridos tuvieron inferiores grados de refino (45 y 49 °SR respectivamente). Las características que presentaron estos clones y que los diferencia del resto fueron:

R30: presenta haces más grandes.

R50: haces más largos.

R100: los trozos de fibras son más largos con mayor cantidad de fibras enteras. Todas las partículas están menos fibriladas. Vasos enteros y menos haces fibrosos.

R150: el material presenta mucha menor fibrilación. No se agregan tanto las partículas. Presencia de vasos enteros. No se observan fibrilas sueltas.

R270: elementos poco fibrilados y sin agregación. Parénquima radial aislado con contenidos notorios.

La diferencia de fibrilación se nota en las 3 fracciones menores.

3.3- Factor L y estimación del factor S

Las magnitudes del Factor L variaron con el clon considerado, los mayores valores correspondieron al sauce americano, seguido por el clon 26992 en ambos sitios (Tabla IV.26, Fig. IV.27).

El Factor L correlacionó positivamente con las fracciones R30 ($r= 0,76$) y su longitud LR30 ($r= 0,92$), y con la fracción R50 ($r= 0,66$), y negativamente con la fracción de finos P270 ($r= -0,76$).

Asimismo, este factor se correlacionó positivamente con varias propiedades de resistencia: índice de rasgado ($r= 0,62$) y de explosión ($r= 0,68$), elongación ($r= 0,69$) y TEA ($r= 0,64$).

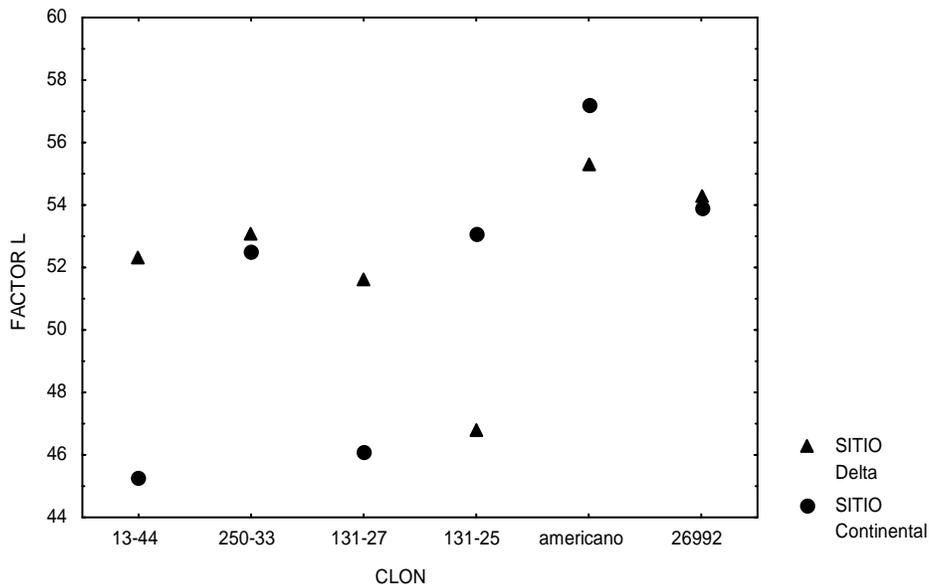


Fig. IV.27. Valores del Factor L por clon y por sitio

En cambio, la estimación del factor S no correlacionó con ninguna fracción de clasificación, presentando correlaciones significativas con el índice de

flexibilidad ($r= 0,63$), el de runkel ($r= -0,62$) y con la cantidad de lignina total ($r= 0,60$).

Las diferencias entre clones del Factor S estimado, no son importantes (tabla IV. 26).

3.4- Longitud de las partículas en las fracciones de clasificación

Se midió la longitud de las partículas (fibras enteras, cortadas, haces y finos) de cada fracción. Los resultados se expresan en la tabla IV.29, como longitudes (L) por fracción y longitudes ponderadas por peso (%) (LW). Finalmente se obtuvo la longitud ponderada de la pulpa completa (LW Total).

Tabla. IV.29. Longitudes (L) y longitudes ponderadas (LW) de las fracciones de clasificación expresadas en μm .

Clon	R30 L	R50 L	R100 L	R150 L	R270 L	P270 L	R30 Lw	R50 Lw	R100 LW	R150 Lw	R270 Lw	P270 Lw	Lw Total
13-44	1344	804	599	329	265	80	328	168	159	23	24	10	712
	1435	775	536	479	242	80	428	174	131	33	24	5	795
250-33	1549	994	677	354	263	80	478	215	141	23	28	8	892
	1592	796	600	462	236	80	443	201	144	34	27	4	852
131-27	1397	786	545	338	263	80	364	157	129	15	23	14	702
	1557	878	648	347	202	80	485	179	147	21	20	8	860
131-25	1533	887	571	352	237	80	501	181	113	26	26	7	854
	1383	938	521	368	206	80	380	182	102	24	23	13	724
26992	1544	838	554	339	197	80	534	162	135	16	16	7	870
	1581	796	646	499	203	80	482	190	152	38	23	3	886
Americano	1641	832	628	383	274	80	504	220	103	23	31	7	888
	1673	827	552	460	291	80	511	204	97	23	43	6	884

La fracción R30 presentó longitudes mayores que el largo de fibras medido en la madera, debido a que se compone principalmente de haces fibrosos. En

cambio, la fracción R50 siempre mostró magnitudes inferiores a la longitud de fibras de la madera. De todos modos, puede considerarse a ésta última como la fracción de fibras enteras, y a la fracción R100 como representante de las fibras cortadas. A partir de la fracción R150 en adelante, todo el material puede considerarse como finos de diferentes dimensiones y características, representando entre el 20 y 30% del material según el clon considerado.

Si analizamos las ponderaciones por peso (LW), vemos que las magnitudes descienden drásticamente. Las fracciones R30, R50 y R100 mantuvieron sus diferencias, ya que la proporción en peso de cada una fue similar. En cambio, los valores de longitud ponderada de las fracciones R150 y R270 se acercaron notoriamente, indicando un mayor aporte de la fracción de finos (R270).

Los valores de la longitud ponderada de la pulpa completa (LW total) fueron muy cercanos a los hallados para la longitud de la fracción R50.

Las correlaciones entre las longitudes, las longitudes ponderadas de las fracciones de clasificación y las propiedades de la madera y pulpas, se muestran en la tabla IV.30.

Las longitudes de las fracciones R50 y R100 no presentaron ninguna correlación significativa. Tampoco lo hizo la longitud ponderada de la fracción R150.

La variable L R30 obtuvo las mayores correlaciones significativas. Esto indica la importancia de la longitud de las partículas en la mayoría de las propiedades de las pulpas. Sin embargo, al considerar la ponderación de la longitud de esa fracción por su porcentaje en peso, se observó que las correlaciones dejan de ser significativas, con excepción de la LW Total de la pulpa.

Analizando las fracciones ponderadas, se deduce que las fracciones LW R50, LW R270 y Lw total, tuvieron la mayor incidencia sobre las propiedades finales de la pulpa.

Tabla IV.30. Valores del coeficiente de correlación (R^2) entre los pares de variables

*	L R30	L R150	L R270	LW R30	LW R50	LW R100	LW R270	LW Total
Ancho ma	0,62	-	-	-	0,62	-	-	0,61
Long. fibras	0,67	-	0,65	-	0,72	-0,63	0,90	-
Densidad bás	-	-	0,75	-	-	-	-	-
Espesor	-	-	0,81	-	-	-	-	-
Extractivos ac	-	-0,71	-	-	-	-	-	-
Extrac. Tot.	-	-0,66	-	-	-	-	-	-
Solubles	-0,70	-	-	-	-	-	-	-
Celulosa	0,63	-	-	-	-	-	-	-
WRV	-	-	-0,68	-	-	-	-	-
Densidad ap	0,62	0,71	-	-	-	-	0,62	-
I.Explósión	0,73	0,70	-	-	-	-	-	0,59
I.Tracción	0,75	-	-	-	-	-	-	-
I. Rasgado	-	-	-	-	-	-	-	0,58
Elongación	0,81	0,58	-	-	0,70	-	0,72	0,60
TEA	0,82	-	-	-	0,64	-	0,71	0,59
Resist. fibras	0,61	-	-	-	-	-	-	-
Resist. aire	0,62	0,83	-	-	-	-	-	-
LW Total	0,92	-	-	0,93	0,65	-	-0,67	1

*Ancho m: ancho de fibras en macerado, Long. Fibras: longitud de fibras, Densidad bás.: densidad básica,

Extractivos ac: extractivos en agua caliente, Extractivos Tot: extractivos totales, Solubles: solubles en hidróxido de sodio, WRV: valor de agua retenida, Densidad ap: densidad aparente de la pulpa, TEA: energía absorbida a la tracción, Resist. Fibras: resistencia intrínseca de las fibras, Resist. Aire: resistencia al paso del aire, LW Total: longitud ponderada por peso de pulpa completa

A pesar de que todas las correlaciones presentadas en la tabla IV.30 resultaron significativas, fueron superiores los coeficientes de correlación calculados para las fracciones expresadas como porcentaje en peso, (tabla IV.28).

3.5- Grado de refinado y retención de agua: SR y WRV

El grado de refinado alcanzado en las etapas de refinación se midió a través de la determinación del °SR de la pulpa depurada. Los rangos variaron, según lo previsto, entre 45 y 56 °SR (Tabla IV.24).

Los valores de WRV variaron entre 144 a 181, correspondiendo los menores valores al sauce americano de ambos sitios.

El WRV correlacionó significativamente con algunas propiedades de la madera, tales como, densidad básica ($r = -0,73$), longitud de fibras ($r = -0,60$), espesor de pared ($r = -0,71$), lumen ($r = 0,65$), contenido de celulosa ($r = -0,63$) y contenido de extractivos totales ($r = 0,64$).

Considerando las propiedades de las pulpas, resultaron significativas las correlaciones de WRV con la fracción R50 ($r = -0,63$) y con la elongación ($r = -0,58$).

La variable °SR no correlacionó significativamente con ningún parámetro de madera ni de la pulpa.

3.6- Densidad aparente de la pulpa

La densidad aparente mide el peso de fibras en un determinado volumen de hoja.

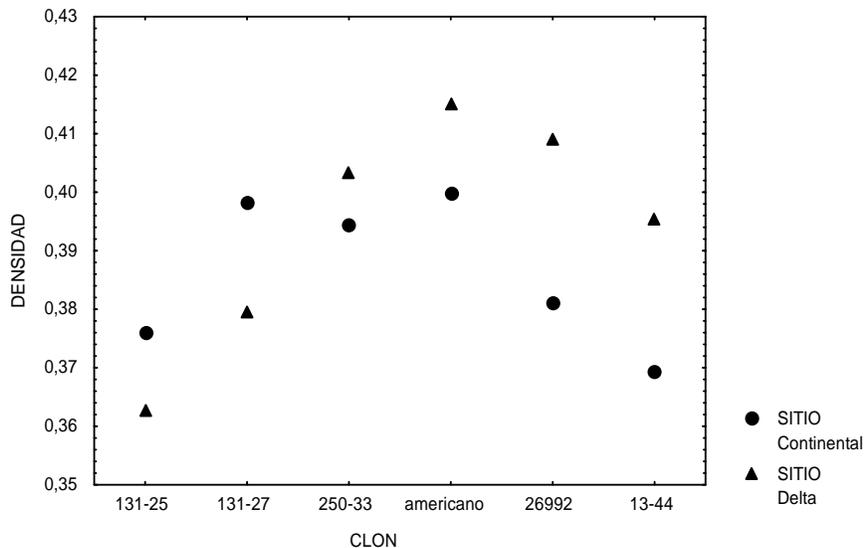


Fig. IV.25. Densidad aparente de las hojas de ensayo por clon y por sitio

El sauce americano y el híbrido 26992 del Delta presentaron los valores más elevados (Fig IV.25). Ambos se corresponden con los de mayor resistencia mecánica en las hojas de ensayo (Tabla IV.24).

La densidad de la pulpa correlacionó positivamente con el índice de afieltramiento ($r= 0,58$) y con la cantidad de celulosa ($r= 0,58$).

Las correlaciones con algunas propiedades de las pulpas resultaron significativas. Por ejemplo, los coeficientes de correlación fueron: con el índice de tracción, $r= 0,82$, con elongación, $r= 0,78$, con resistencia individual de las fibras $r= 0,81$, con TEA, $r= 0,81$, con resistencia al paso del aire $r= 0,80$, con la fracción de clasificación R50, $r= 0,79$ y con la longitud ponderada total de fibras $r= 0,60$.

Esta variable no se relacionó con ninguno de los parámetros que miden las propiedades ópticas.

3.7- Volumen específico

El comportamiento de esta variable es inverso al de la densidad aparente. Por lo tanto, los clones de mayor volumen específico corresponden a los de menor densidad aparente, tal como los híbridos 131-25 y 131-27 (tabla IV.24).

3.8- Índice de Tracción (IT)

Los valores de resistencia a la tracción variaron significativamente con el clon y con el sitio. En general, los valores del sitio Delta fueron mayores que los del sitio Continental, con excepción de los clones 131-25 y 13-44.

El sauce americano presentó los mayores valores dentro de cada sitio (Fig. IV.26). En el sitio Delta, los clones 26992 y 250-33 mostraron valores muy cercanos al americano (Tabla IV.24).

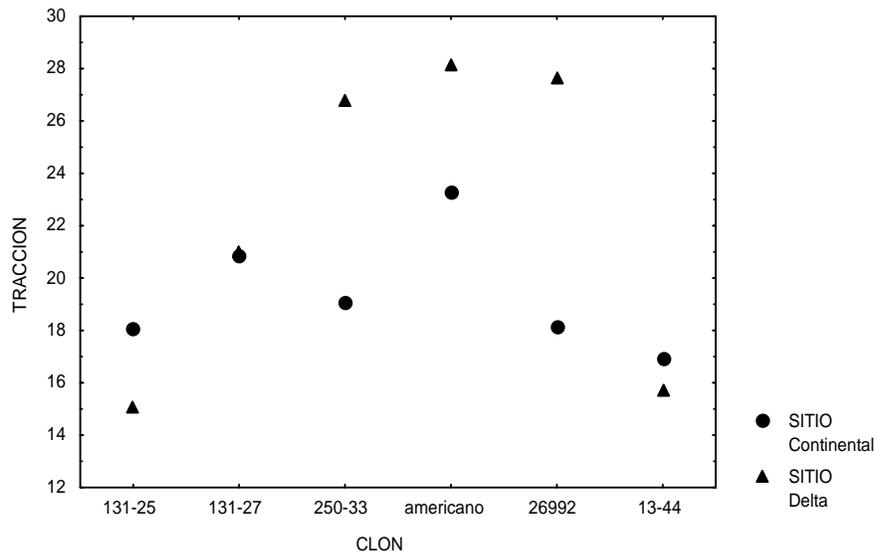


Fig. IV.26. Valores de resistencia a la tracción de todos los clones en ambos sitios

Vaschetto (1995) registró valores de 23,7 Nm/g para sauce americano de 8 años, realizando un pulpado quimimecánico soda-sulfito en condiciones operativas similares a los de esta tesis. Dentro del mismo trabajo, los sauces híbridos registraron valores inferiores al americano. Cabe destacar, que los híbridos 26992 y 250-33 fueron los únicos cuyos valores de IT se acercaron en magnitud al los del americano. Estos resultados son coincidentes con los de esta tesis. En el mismo informe, se compararon las resistencias entre pulpas obtenidas con maderas de 8 años y de 14 años. El sauce americano fue el único que incrementó la resistencia a la tracción con el aumento de edad de la muestra.

El IT correlacionó con el porcentaje de celulosa en forma positiva ($r= 0,61$) y con los solubles en NaOH, en forma negativa ($r= -0,70$).

Las correlaciones con otras propiedades de las pulpas siguen el comportamiento usual. Por ejemplo, se encontraron correlaciones positivas con densidad aparente ($r= 0,82$), con elongación ($r= 0,85$), con resistencia individual de las fibras ($r= 0,84$), con TEA ($r= 0,93$) y con las fracciones de clasificación R50 ($r= 0,74$) y R270 ($r= 0,61$).

3.9- Índice de Rasgado (IR)

Los clones se comportaron en forma muy diferente según el sitio de implantación. El mayor valor lo presentó el híbrido 250-33 en el sitio Delta, seguido del 13-44 y del 26992 (Tabla IV.24). En cambio, en el sitio Continental, el clon 26992 registró el máximo valor, seguido de cerca por el sauce americano y el híbrido 250-33, (Fig. IV.27).

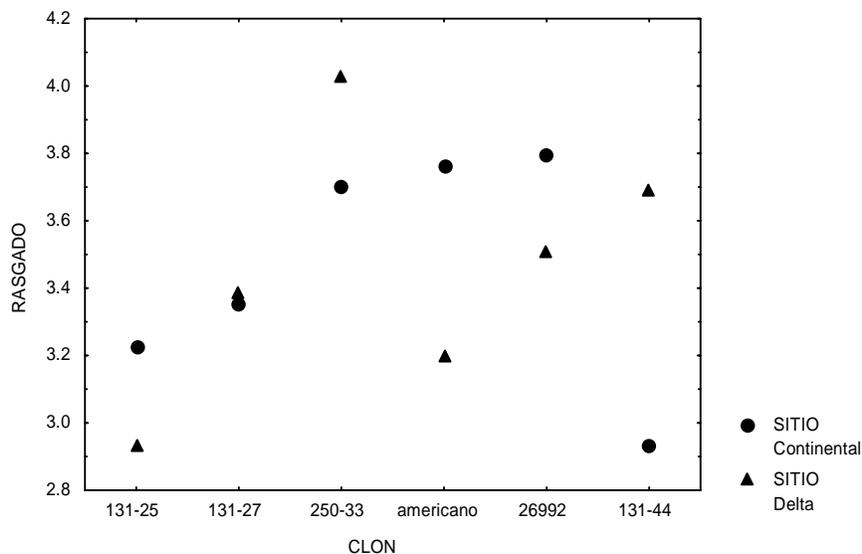


Fig. IV.27. Resistencia al rasgado de todos los clones en ambos sitios

En el papel periódico es necesario un nivel de rasgado cercano a 5 Nm²/Kg. En general, es necesario adicionar pulpa química de fibra larga (coníferas) para superar los valores obtenidos por debajo del mínimo requerido.

El promedio general de rasgado obtenido para los sauces estudiados fue de 3,46 Nm²/Kg, con un rango que varió entre 2,93 Nm²/Kg a 4,03 Nm²/Kg. El clon 250-33 se destacó en ambos sitios con valores de 3,7 Nm²/Kg y 4,03 Nm²/Kg.

El IR no presentó correlaciones significativas con las variables de la madera, mientras que correlacionó significativamente con la fracción P270 ($r = -0,59$) y con la fracción de fibras largas medida como Factor L ($r = 0,62$).

Vaschetto (1995) obtuvo IR semejantes a los hallados en este trabajo para muestras de sauces del Delta de 8 años. Según esta publicación, el sauce americano presentó el valor de IR más elevado, de 4,2 Nm²/Kg, mientras que los valores de los híbridos fueron más bajos. Los clones 250-33 y 26992 se destacaron dentro del grupo de los híbridos por sus valores de 3,3 Nm²/Kg.

La figura IV.28 muestra a los índices de tracción y rasgado graficados en forma estandarizada. De esta forma, los valores positivos y negativos de las propiedades representan a los que son superiores e inferiores a la media respectivamente.

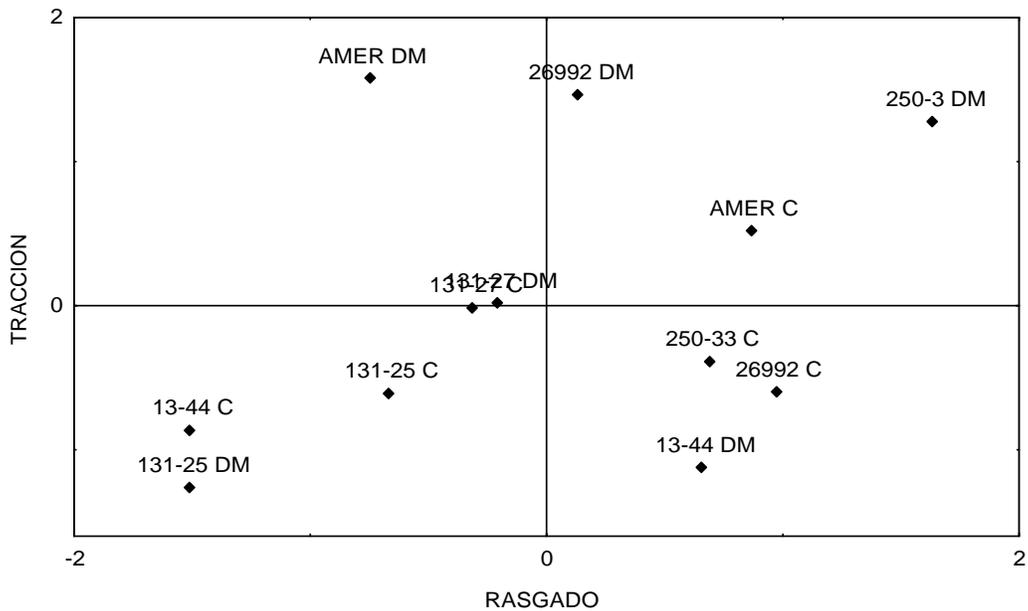


Fig. IV.28. Relación entre Índices de rasgado y tracción de todos los clones

Con este método gráfico, puede realizarse una selección de clones, estableciendo que los que presentan los mejores valores de ambas propiedades se encuentran en el cuadrante positivo. Así, sobre la base de sus resistencias, podrían seleccionarse los clones 250-33 y 26992 del sitio Delta y el americano del sitio Continental.

3.10- Explosión (IE)

No es una medida importante en el papel periódico. Los valores hallados son bajos y normales para este tipo de pulpa de latifoliadas.

Con respecto a las variables de la madera, la explosión solamente correlacionó con el porcentaje de celulosa ($r= 0,66$).

Las variables de la pulpa que se asociaron a la explosión son, densidad aparente ($r= 0,87$), tracción ($r= 0,85$), elongación ($r= 0,88$), resistencia individual

de las fibras ($r= 0,73$), TEA ($r= 0,90$), fracciones de clasificación R50 ($r= 0,81$) y P270 ($r=- 0,65$) y Factor L ($r= 0,68$).

3.11- Elongación

Tanto el clon ($p= 0,000$), como el sitio ($p= 0,002$), así como su interacción ($p= 0,000$), son fuentes significativas de variación en la elongación. El sauce americano presentó los máximos valores en ambos sitios, seguido del 250-33 y 26992 del sitio Delta (Fig. IV.29 y Tabla IV.24).

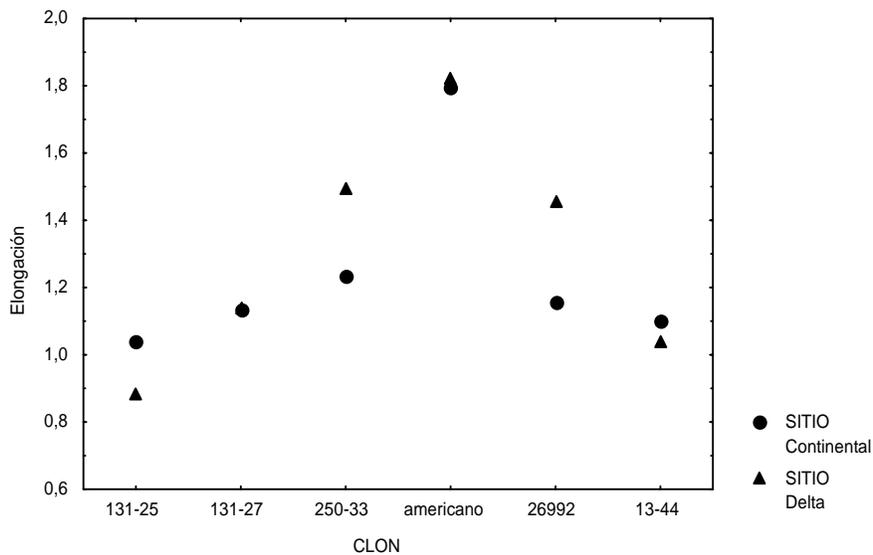


Fig. IV.29. Valores de elongación para todos los clones en ambos sitios

La elongación correlacionó en forma positiva con la longitud de fibras en la madera ($r= 0,75$) y con la cantidad de celulosa ($r= 0,72$), y negativamente con la cantidad de solubles en NaOH ($r= -0,70$).

Las variables de la pulpa que se asociaron a la elongación son, densidad aparente ($r= 0,78$), tracción ($r= 0,85$), resistencia individual de las fibras ($r= 0,65$), TEA ($r= 0,97$), las fracciones de clasificación R50 ($r= 0,89$) y R270 ($r=$

0,65), el Factor L ($r= 0,69$) y la longitud ponderada de fibras total en la pulpa ($r= 0,64$).

3.12- Resistencia individual de las fibras (Rf)

Los valores de resistencia individual de las fibras, medido mediante el ensayo de tracción a mordazas juntas (zero span tensile strength) variaron entre 24,20 N/cm y 32,90 N/cm (Tabla IV.24). Las magnitudes del sitio Delta son significativamente mayores ($p= 0,000$), excepto para el clon 131-25 (Fig. IV.30). El comportamiento del híbrido 26992 fue marcadamente diferente en cada sitio. También existe diferencia entre clones ($p= 0,000$), siendo significativamente bajos los valores del 131-25 y del 13-44.

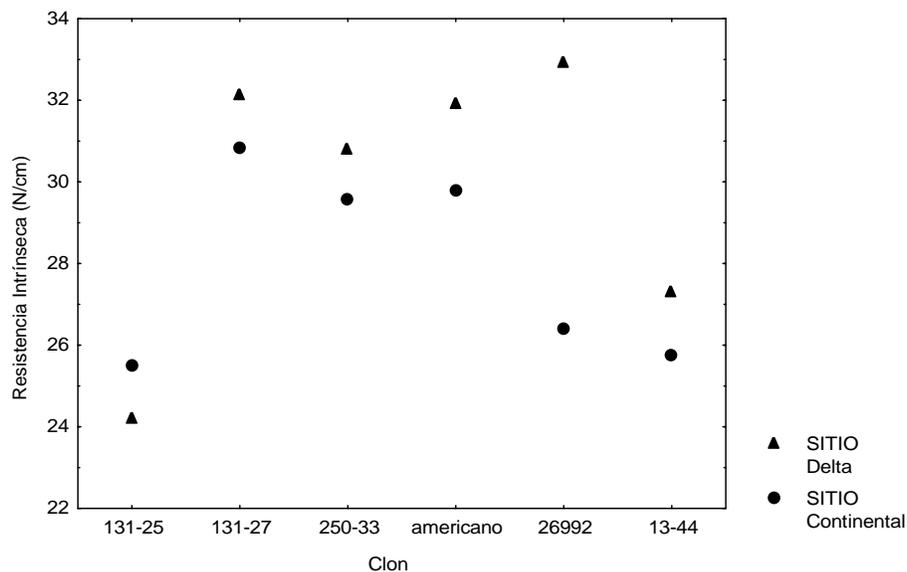


Fig. IV.30. Resistencia individual de las fibras de todos los clones en ambos sitios

En una pulpa química, esta variable se halla estrechamente relacionada con el ángulo microfibrilar y el grado de polimerización de la celulosa. En las

mecánicas, la lignina toma un rol preponderante, disminuyendo, y hasta anulando, la influencia de dichas propiedades (Area, comunicación personal).

La resistencia intrínseca de las fibras no correlacionó significativamente con el ángulo microfibrilar ($r = -0,28$), en cambio, su correlación con celulosa fue significativa ($r = 0,60$).

Dentro de las variables de la pulpa, la resistencia intrínseca de fibras correlacionó con la mayoría de las propiedades físico-mecánicas. Los coeficientes de correlación fueron, con densidad aparente $r = 0,81$, con explosión $r = 0,73$, con tracción $r = 0,84$, con elongación $r = 0,65$ y con TEA $r = 0,72$.

La Fig. IV.31 muestra la relación entre resistencia individual de las fibras y el índice de tracción.

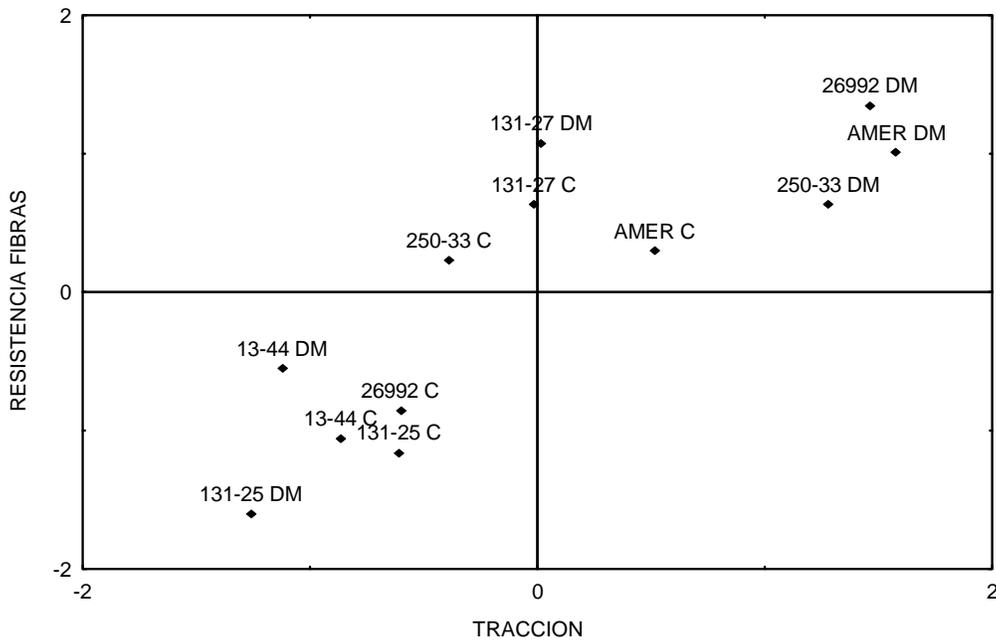


Fig. IV.31. Relación entre Resistencia de fibras y tracción de todos los clones

La relación que existe entre estas dos variables es casi lineal. Los 4 clones que presentaron mayor tracción, (250-33 DM, 26992 DM y americano de ambos sitios), presentaron también elevados niveles de resistencia de las fibras.

3.13- TEA (energía absorbida a la tracción)

El sauce americano presentó los mayores valores seguido por los híbridos 250-33 y 26992, especialmente en el sitio Delta (Fig. IV.32 y Tabla IV.24). Las diferencias halladas entre clones, sitios y la interacción, resultaron altamente significativas ($p= 0,000$).

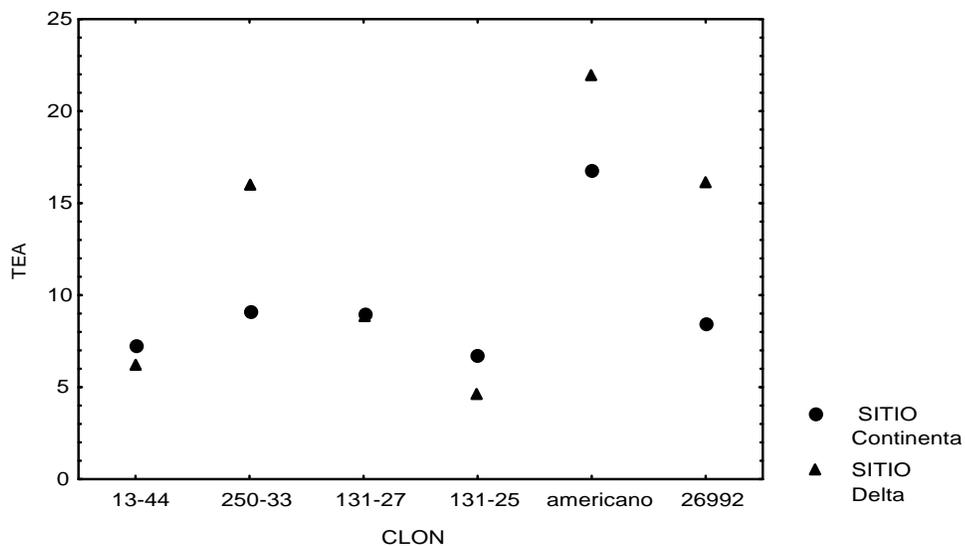


Fig. IV.32. TEA de todos los clones en ambos sitios

Las propiedades que mostraron correlaciones significativas fueron, densidad aparente ($r= 0,81$), tracción ($r= 0,93$), elongación ($r= 0,97$), resistencia individual de las fibras ($r= 0,72$), fracciones de clasificación R50 ($r= 0,84$) y R270 ($r= 0,71$), Factor L ($r= 0,65$) y longitud ponderada de fibras total en la pulpa ($r= 0,65$).

Dentro de las variables de la madera, el TEA presentó correlaciones significativas con la longitud de fibras ($r= 0,69$), y con los porcentajes de celulosa ($r= 0,73$) y de solubles en NaOH ($r= -0,74$).

3.14- Resistencia al paso del aire

Los resultados demostraron que los clones 26992, 250-33 y el sauce americano del sitio Delta, presentaron valores significativamente superiores al resto ($p= 0,00$), coincidiendo con los menores volúmenes específicos (Tabla IV.24). Es decir, que estos clones produjeron hojas con una trama fibrosa más cerrada. En el sitio Continental, los valores son significativamente más bajos ($p= 0,000$) y no difieren entre clones.

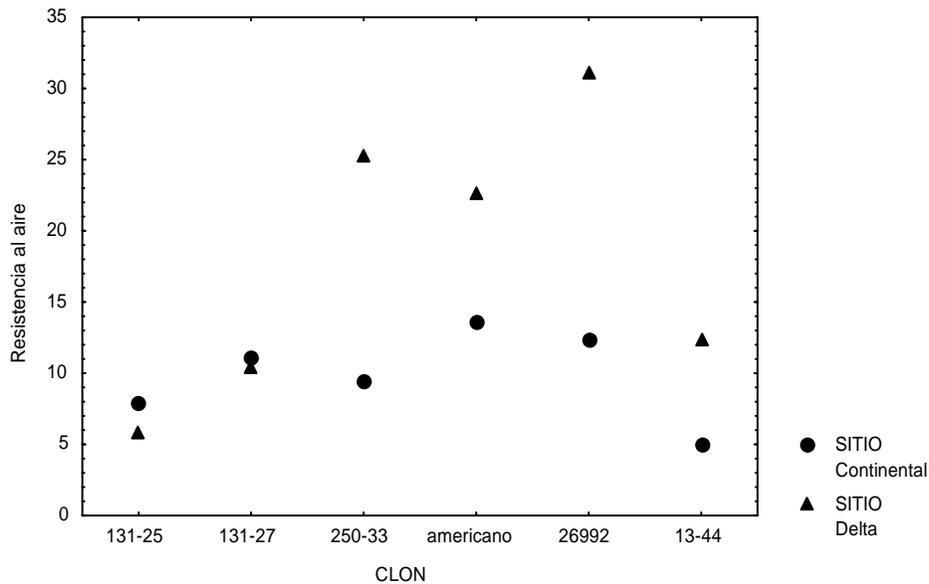


Fig. IV.33. Resistencia al paso del aire de todos los clones en ambos sitios

Las correlaciones indicaron que la resistencia al aire correlacionó positivamente con la densidad aparente de la pulpa ($r= 0,80$), con la fracción R50 ($r= 0,70$),

con la longitud ponderada de la fracción R150 ($r= 0,83$) y con la resistencia individual de las fibras ($r= 0,73$). También correlacionó negativamente con la fracción de finos P270 ($r= -0,73$).

Las correlaciones con las propiedades de resistencia de la pulpa fueron altas y positivas (con tracción, $r= 0,89$, con explosión, $r= 0,85$, elongación, $r= 0,67$ y TEA, $r=0,80$).

La elevada correlación entre resistencia al paso del aire y tracción puede visualizarse gráficamente en la Fig. IV. 34.

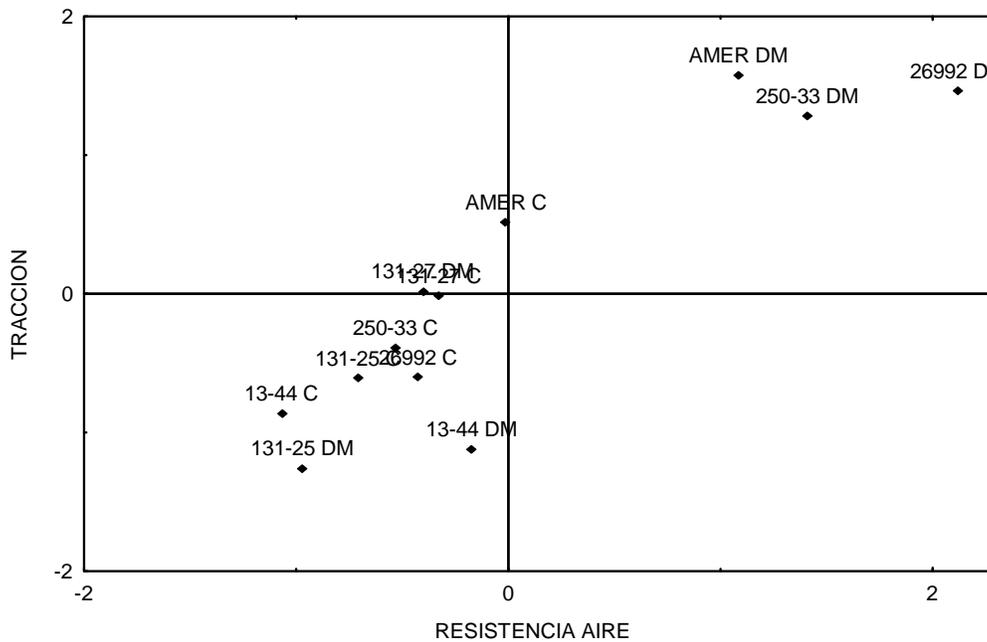


Fig. IV.34. Relación entre Resistencia al paso del aire y tracción de todos los clones

Los 3 clones que presentaron una trama más cerrada en la hoja de ensayo (mayor valor de resistencia al paso del aire) son los que obtuvieron altos valores de tracción (250-33 DM, 26992 DM y americano DM). Puede apreciarse en la figura que se separan notoriamente del resto.

El rasgado, a diferencia de la resistencia a la tracción, no se ve tan influenciado por la trama de la hoja de ensayo. Observamos en la figura IV.35 que los

clones que poseen los valores más elevados de rasgado, como el 250-33 DM, presentan además los máximos valores de resistencia al paso del aire. En cambio, el americano DM obtuvo valores inferiores de resistencia al rasgado a pesar de presentar una de resistencia al paso del aire similar al clon 250-33.

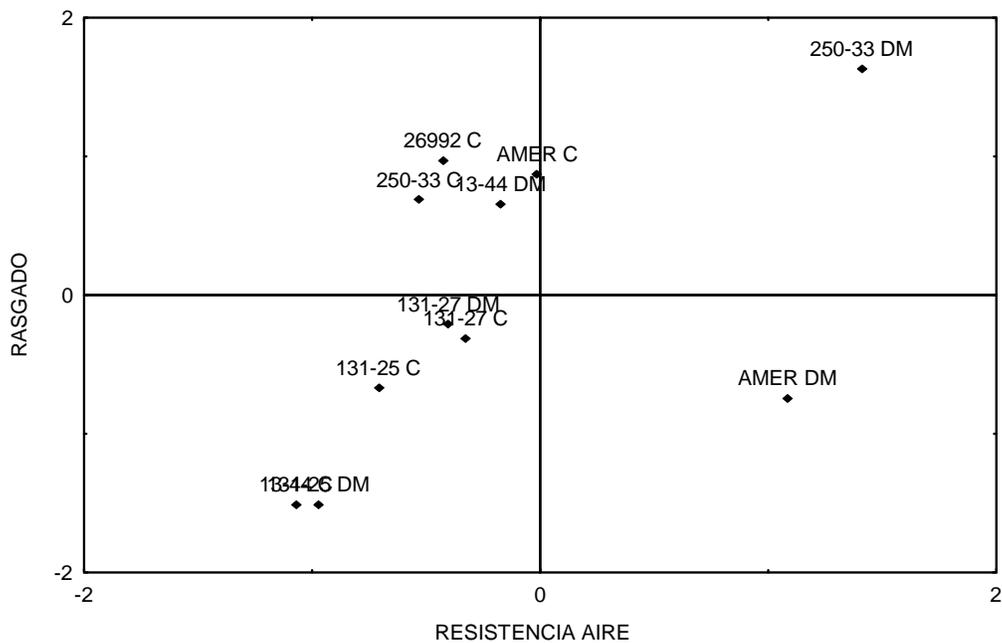


Fig. IV.35. Relación entre Resistencia al paso del aire y rasgado de todos los clones

3.15- Propiedades ópticas

3.15.1- Blancura

Los clones que obtuvieron mayores valores de blancura fueron los del sitio Continental (Fig. IV. 36), diferenciándose significativamente del sitio Delta ($p= 0,000$). Los valores medidos fueron bajos (entre 38 y 50 %ISO) ya que se necesita un valor de 54-56 %ISO para los requerimientos del papel prensa. El

clon 13-44 es el único que presentó valores elevados en ambos sitios (Tabla IV.25).

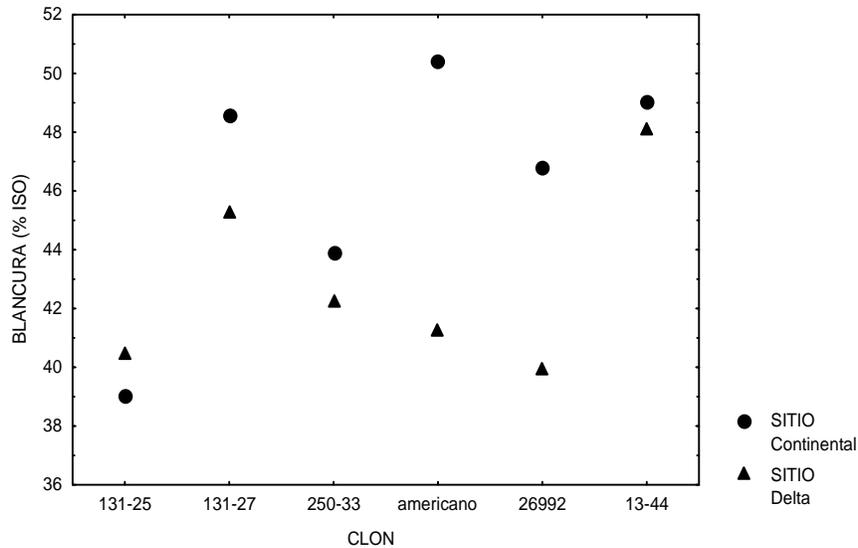


Fig. IV.36. Valores de blanco de todos los clones en ambos sitios

Vaschetto (1995) estudió el efecto del estacionamiento sobre la blancura (1 mes entre muestreos), en pulpas de 7 clones de sauces. Demostró que en todos los casos, la blancura descendió entre 1 y 9 %ISO. La elevada blancura del sauce americano del sitio Continental (50,4 %ISO) podría explicarse entonces, por su corto tiempo de estacionamiento.

La blancura no correlacionó significativamente con la cantidad de extractivos ($r= 0,05$ para extractivos totales). En cambio, la correlación con lignina insoluble fue significativa, ($r= -0,70$). También resultaron significativas las correlaciones con lumen ($r= -0,71$) y con índice de runkel ($r= 0,59$).

La correlación de la blancura con el coeficiente de absorción de la luz k ($r= -0,91$) y con la opacidad ($r= -0,74$) fue alta y negativa.

3.15.2- Opacidad

Contrariamente a la blancura, la opacidad de los clones implantados en el sitio Delta fue muy superior a la de los clones del sitio Continental (Fig. IV.37).

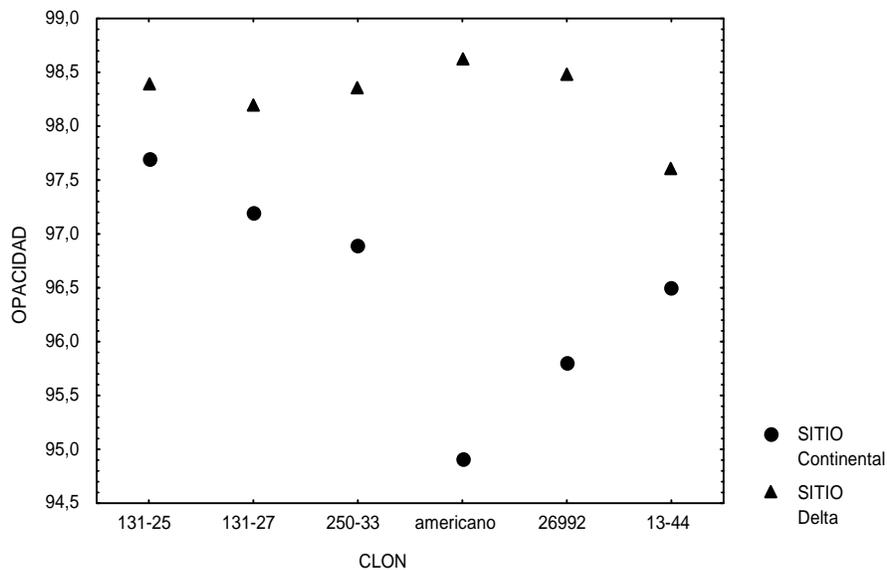


Fig. IV.37. Valores de opacidad de todos los clones en ambos sitios

El sauce americano y el híbrido 26992 del continente presentaron los valores más bajos (Tabla IV.25).

La opacidad correlacionó positivamente con la cantidad de lignina insoluble ($r=0,79$) y negativamente con la lignina soluble ($r=-0,59$).

Dentro de las propiedades de la pulpa, la opacidad correlacionó positivamente con el coeficiente de absorción k ($r=0,93$) y negativamente con la blancura ($r=-0,74$). Por lo tanto, los clones que originen pulpas con mayor blancura, producirán a la vez baja opacidad y viceversa. Como ambas propiedades son deseables, se establece un compromiso entre las mismas. Mientras que una elevada opacidad es fundamental para el papel de diario, una baja blancura generará mayores costos de blanqueo.

Combinando los valores estandarizados de Blancura y Opacidad, se obtiene el gráfico de la figura IV.38. Se visualiza claramente que la relación entre estas

variables es inversa. Clones de buena opacidad presentan baja blancura y viceversa.

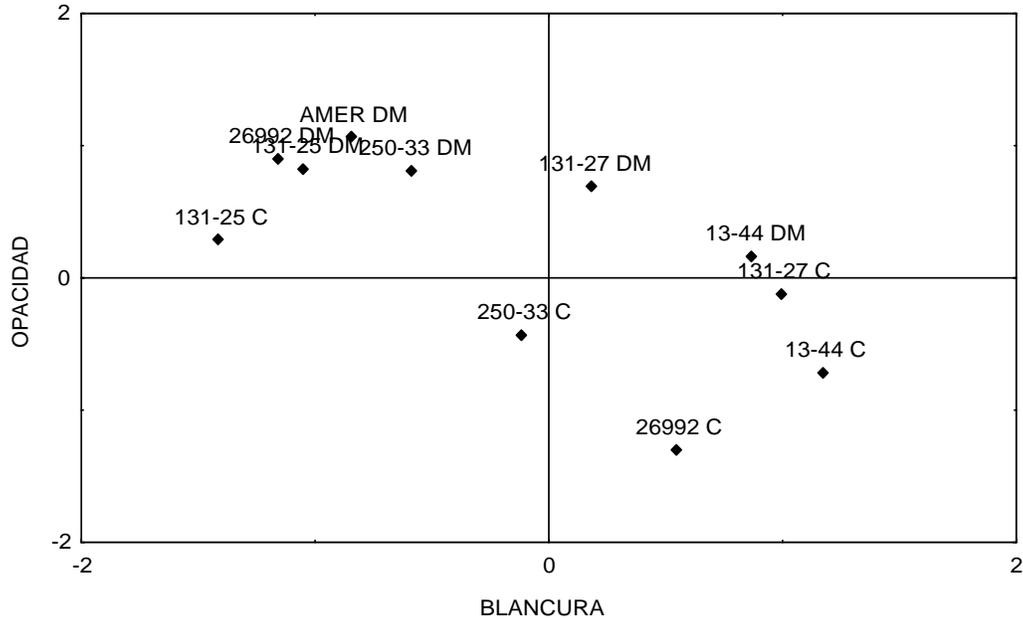


Fig. IV.38. Relación entre blancura y opacidad de todos los clones

Se observa que los clones 13-44 y 131-27 del sitio Delta, presentaron la mejor combinación de blancura y opacidad.

La opacidad se relaciona con el coeficiente de absorción de luz en forma positiva. Los clones del sitio DM presentaron alta opacidad y también elevados valores de k (Fig. IV.39). El único clon que se ubicó en el cuadrante de alta opacidad y bajo k es el 13-44 DM.

La lignina insoluble sería la responsable de esta asociación, debido a que produce el incremento del valor de k por su contenido de grupos cromóforos y aporta opacidad por su elevado índice de reflexión.

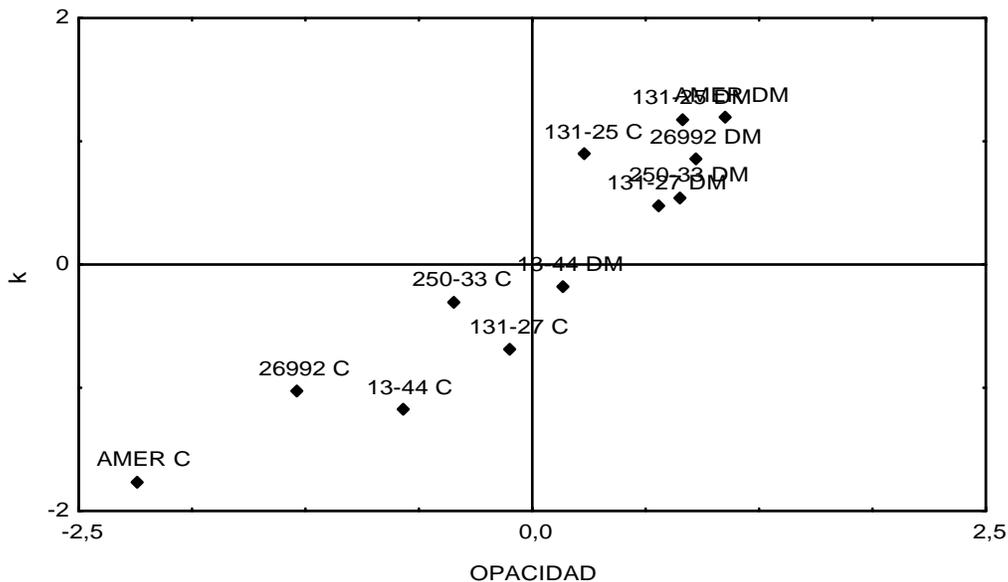


Fig. IV.39. Relación entre opacidad y k de todos los clones

3.15.3- Coeficiente de absorción de la luz, k

Los valores hallados para los clones en el sitio Continental son inferiores que los del sitio Delta (Tabla IV.25). El sauce americano del Continente presentó el menor valor registrado, de 3,69 m²/kg, y buena blancura (50,4 %ISO). Esta relación se cuantificó a través de una correlación alta y negativa ($r = -0,91$) entre k y blancura.

Si consideramos la composición química de la madera, el coeficiente de absorción no se relacionó con el nivel de extractivos, pero si lo hizo con la cantidad de lignina insoluble ($r = 0,83$) y soluble ($r = -0,60$). Puede decirse entonces, que la lignina insoluble fue el componente de la pared celular que aportó los cromóforos para elevar el valor de k.

Esta variable correlacionó también con la opacidad en forma alta y positiva ($r = 0,93$) y con la fracción de finos R270 ($r = 0,60$).

Se presentaron correlaciones significativas con el lumen celular ($r= 0,62$), con el coeficiente de flexibilidad ($r= 0,70$) y con el índice de runkel ($r= -0,59$).

3.15.4- Coeficiente de dispersión de la luz, s

Los valores obtenidos pueden catalogarse entre aceptables y bajos (Tabla IV.25). El máximo valor de $46 \text{ m}^2/\text{kg}$ lo presentó el clon 250-33 del sitio Delta.

Los valores usuales de estas pulpas se encuentran entre $42\text{-}50 \text{ m}^2/\text{Kg}$ (Piussan et al., 1990; García Volonté et al., 1989, Vaschetto, 1995).

El coeficiente s correlacionó con el parámetro de color b^* ($R^2= -0,78$) y con la fracción R30 ($R^2= -0,66$) en forma significativa.

Combinando los valores estandarizados de k y s, se obtiene el gráfico de la figura IV.40.

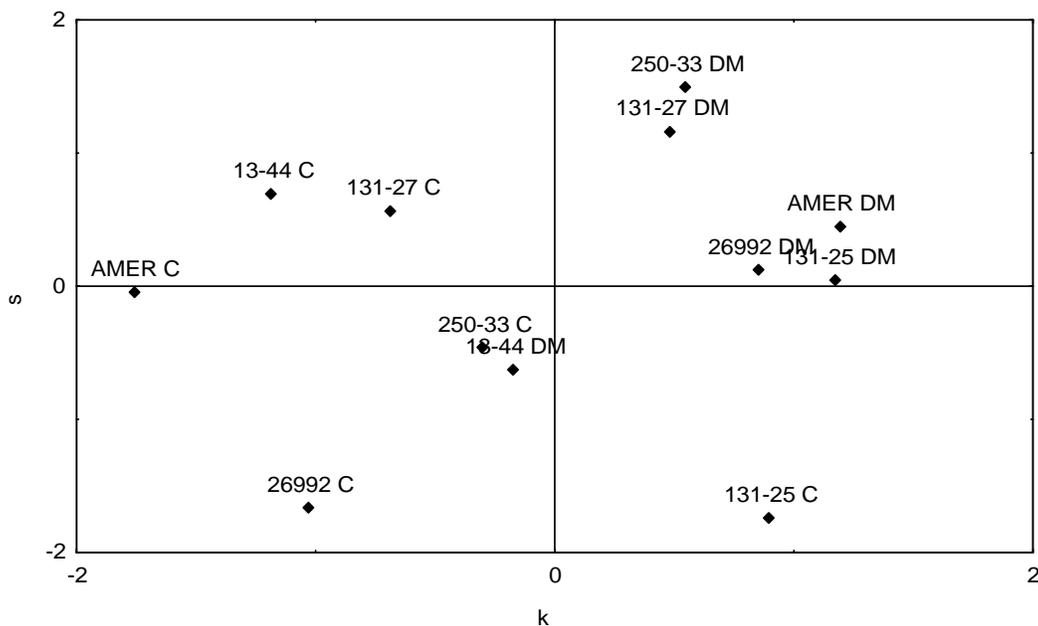


Fig. IV.40. Relación entre k y s de todos los clones

Se observa que los híbridos que se encuentran en el mejor cuadrante (menor k y mayor s) son el 13-44C, 131-27C y americano C.

3.15.5- Color

El parámetro de color b^* varió significativamente con el sitio ($p= 0,000$), siendo más amarillos los clones del sitio Continental. También varió con el clon ($p= 0,000$), siendo el híbrido 26992 (15,1) del sitio Delta, el más amarillo.

Con respecto al parámetro a^* , el clon 131-25 del sitio Continental y el 26992 del Delta, mostraron una coloración marcadamente rojiza. Los clones menos coloreados (valores de a^* y b^* cercanos a cero) fueron los híbridos 131-27 y 13-44 de ambos sitios.

Los valores de L^* variaron entre 77 y 84, con excepción del clon 131-25 del Continente, que presentó un valor de 39 (color gris) (Tabla IV.25).

Las correlaciones significativas fueron: L^* con lumen ($r= -0,67$), L^* con blancura ($r= 0,61$), L^* con cenizas ($r= 0,58$), b^* con s ($r= -0,78$), b^* con celulosa ($r= -0,62$), a^* con P270 ($r= -0,65$) y a^* con Factor L ($r= 0,69$).



CAPÍTULO V

REGRESIONES

Se aplicaron análisis de regresión múltiple, lineal y no lineal, para evaluar la capacidad de predicción de las variables consideradas independientes, tomando como variables dependientes a las propiedades mecánicas y ópticas de las pulpas.

Se probaron modelos lineales y no lineales, del tipo:

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots$$

$$Y = b_{11}X_1 + b_{12}X_1^2 + b_{21}X_2 + b_{22}X_2^2 + \dots$$

No se incluyeron las interacciones entre variables independientes, por carecer de sentido físico.

Las variables se estandarizaron restando a cada valor la media aritmética y dividiendo el resultado por el desvío estándar de la muestra. Este método se utiliza para unificar el peso relativo de variables medidas con diferentes escalas. Al trabajar con variables estandarizadas, se elimina el término independiente (ya que la media de los valores es cero), y el valor absoluto del coeficiente de la variable indica su peso relativo en la ecuación. Los valores X en la ecuación representan valores positivos o negativos alrededor de la media.

Las regresiones se obtuvieron colocando a todas las variables independientes consideradas en la ecuación, y eliminando de a una las no significativas (backward). En algunos casos, se sacó un valor considerando que alteraba la ecuación, comportándose en forma anormal (unusual residual). Se eliminaron de las ecuaciones las variables independientes correlacionadas (hasta valores inferiores a 0,5). Se evaluó la significación de las ecuaciones comparando los

valores de R^2 ajustado por grados de libertad. Se consideraron significativas a las ecuaciones con $R^2 > 0,60$.

Variables medidas sobre madera, tomadas como variables independientes:

X1	=	db	=	Densidad básica
X2	=	lf	=	Longitud de fibras
X3	=	A	=	Ancho de fibras
X4	=	lu	=	Ancho de lumen
X5	=	e	=	Espesor de pared de fibras
X6	=	Eac	=	Extractivos en agua caliente
X7	=	Eab	=	Extractivos en alcohol benceno
X8	=	Et	=	Extractivos totales
X9	=	Ss	=	Solubles en hidróxido de sodio 1%
X10	=	Li	=	Lignina insoluble
X11	=	Ls	=	Lignina soluble
X12	=	Lt	=	Lignina total
X13	=	C	=	Celulosa
X14	=	Hc	=	Hemicelulosas

Variables medidas en las pulpas, consideradas independientes:

X15	=	R30	=	Fracción de clasificación Bauer Mac Nett retenida en 30 mesh
X16	=	R50	=	Fracción de clasificación Bauer Mac Nett retenida en 50 mesh
X17	=	R100	=	Fracción de clasificación Bauer Mac Nett retenida en 100 mesh
X18	=	R150	=	Fracción de clasificación Bauer Mac Nett retenida en 150 mesh
X19	=	R270	=	Fracción de clasificación Bauer Mac Nett retenida en 270 mesh
X20	=	P270	=	Fracción de clasificación Bauer Mac Nett que pasa 270 mesh
X21	=	P150	=	Suma de las fracciones de clasificación Bauer Mac Nett que pasa 150 mesh
X22	=	WRV	=	Retención de agua de la pulpa (Water Retention Value)
X23	=	°SR	=	Grado de refino
X24	=	Rf	=	Resistencia de las fibras (tracción a mordazas juntas)
X25	=	L	=	Factor L de Forgacs
X26	=	Lw	=	Longitud de fibras promedio ponderada por peso de la pulpa

VARIABLES MEDIDAS SOBRE PULPA, Y EVALUADAS COMO DEPENDIENTES:

Y1	=	Vol. Esp.	=	Volumen específico
Y2	=	IR	=	Índice de rasgado
Y3	=	IT	=	Índice de tracción
Y4	=	IE	=	Índice de Explosión
Y5	=	Blancura	=	Blancura
Y6	=	Opacidad	=	Opacidad
Y7	=	s	=	Coficiente de dispersión de la luz
Y8	=	k	=	Coficiente de absorción de la luz

Las anomalías de la madera no se tomaron en cuenta como variables independientes, debido a que su cuantificación no fue precisa.

La diferencia en la respuesta al pulpado de las distintas maderas puede apreciarse evaluando la granulometría del material y su estado superficial. Estas propiedades se miden a través de las fracciones de clasificación, del Factor L de Forgas, del °SR y del WRV.

Regresiones lineales

Los modelos de regresión se armaron incorporando conjuntos de variables independientes en forma progresiva.

En primer término se probaron 5 características físicas y microscópicas de la madera como variables independientes, denominadas variables 1. Estas comprendieron, densidad básica, longitud de fibras, ancho de fibras, espesor de pared y ancho del lumen. La tabla V.1 presenta las ecuaciones lineales significativas con dichas variables.

Tabla V.1. Ecuaciones de regresión lineales entre propiedades físicas de las pulpas y las características físicas y microscópicas (variables 1)

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	Ns	--	
IR	Ns	---	
IT	Ns	--	
IE	Ns	--	
Blancura	- 0,80 lu	64	sin fila 12
Opacidad	+ 0,80 lf - 0,51 A - 0,46 e	61	sin fila 11
s	Ns	---	
k	Ns	--	

Ns. No significativo

Los ajustes logrados fueron significativos para 2 propiedades ópticas con R² bajos. Con ninguna propiedad de resistencia se obtuvieron ecuaciones significativas.

Se incorporó la composición química de la madera al análisis, conjuntamente con las variables anteriores (variables 2). La tabla V.2 muestra las ecuaciones logradas con las variables 2.

Tabla V.2. Ecuaciones de regresión lineales entre propiedades físicas de las pulpas y características físicas, microscópicas y químicas (variables 2)

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	+ 0,69 Li + 0,94 Ls - 0,41 c	88	sin fila 10
I R	--	Ns	
I T	- 0,47 Li - 0,60 Ls - 0,62 Ss	85	sin fila 10
I E	- 0,42 db - 0,34 Li + 1,04 c	78	sin fila 6
Blancura	- 0,49 lu - 0,47 Li	65	
Opacidad	+ 0,31 lu + 0,43 Li + 0,42 c	84	sin fila 11
s	--	Ns	
k	+ 0,84 Li	76	sin fila 10

Se encontraron ecuaciones significativas para la mayoría de las propiedades de las pulpas. Se puede apreciar que los ajustes mejoraron sensiblemente, si bien los coeficientes R^2 no son elevados. Para el Índice de Rasgado y el coeficiente de dispersión no se obtuvieron ajustes significativos.

La lignina insoluble apareció en todas las ecuaciones. Para las propiedades de resistencia, como IT e IE, su incidencia fue negativa, ya que dificulta la fibrilación de las fibras, disminuyendo su capacidad de bonding. En la opacidad influyó en forma positiva, debido a que su índice de refracción es muy superior al de la celulosa. Lo mismo sucede con el coeficiente de absorción k , debido a que es una de las fuentes principales de grupos cromóforos de la madera. Por este mismo motivo, su efecto sobre la blancura fue negativo.

Todas las ecuaciones presentaron términos que involucran a la composición química de la madera, demostrando la importancia de estas variables en la construcción de modelos de predicción para el pulpado CMP de latifoliadas.

Para verificar la influencia del estado de las fibras y de la granulometría de las pulpas sobre las propiedades de las hojas finales, se incorporaron como variables independientes las fracciones de clasificación y la resistencia intrínseca de las fibras en la pulpa (variables 3). Los resultados se presentan en la tabla V.3.

En todas las ecuaciones aparecen las fracciones de clasificación, excepto en la de opacidad.

Tabla V.3. Ecuaciones de regresión lineales entre las propiedades físicas de las pulpas y las propiedades de la madera más la granulometría de las pulpas (variables 3)

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	- 0,77 rf - 0,29 R50	90	sin fila 6
I R	Ns	--	
I T	+ 0,54 rf + 0,45 R50	85	sin fila 2
I E	+ 0,44 rf + 0,69 R50	88	sin fila 9
Blancura	- 0,46 lu - 0,33 Eab - 0,74 R270	88	sin fila 11
Opacidad	+ 0,31 lu + 0,43 Li + 0,42 c	84	sin fila 11
s	- 0,38 Ss - 0,75 R30 + 0,39 rf	86	
k	+ 0,45 lu + 0,60 R270	88	sin fila 11

La fracción R50 (fracción de fibras enteras), que representa entre 19 y 25 % del material fibroso, con una longitud de fibras entre 775 μ y 994 μ, aumentó significativamente las propiedades de resistencia de las pulpas. Similar influencia tuvo la resistencia individual de las fibras (Fig. V. 1).

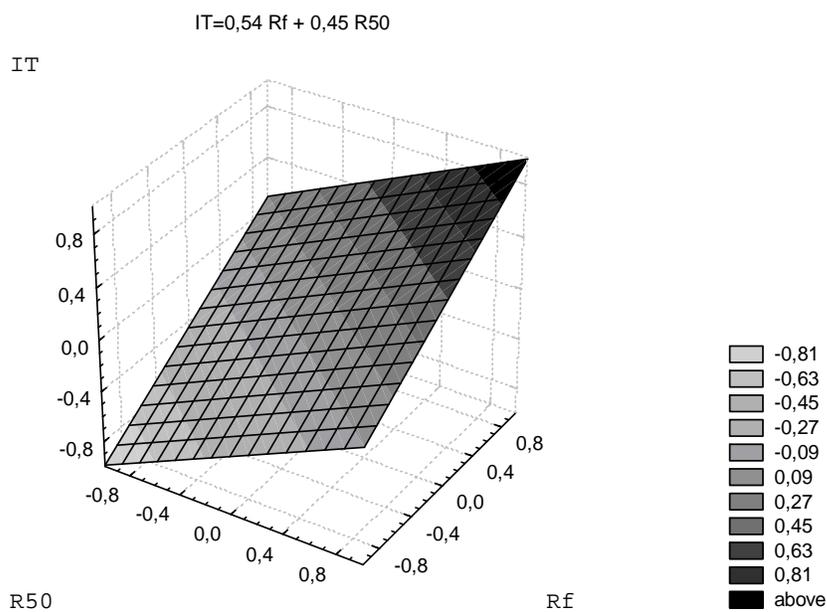


Fig. V.1. IT en función de R50 y Rf

La fracción de finos R270 produce una disminución de la blancura y un aumento del k (Fig. V.2). Esto podría ser consecuencia de una mayor proporción de lignina en los elementos componentes de la fracción.

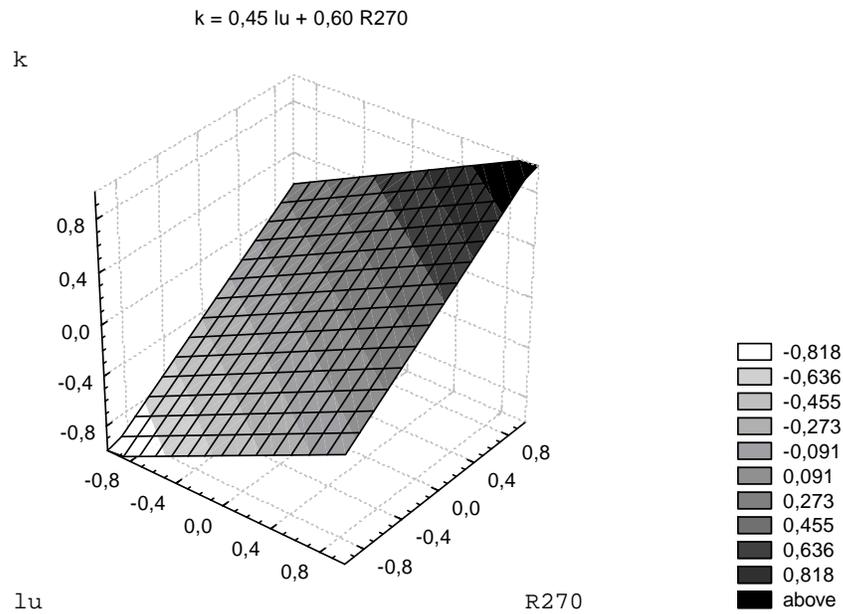


Fig. V.2. k en función de lumen (lu) y fracción de finos (R270)

El coeficiente de dispersión de la luz s, logró la primer ecuación significativa, siendo afectado negativamente por la presencia de haces fibrosos (R30), la tasa de solubles en hidróxido de sodio y la resistencia intrínseca de las fibras.

Regresiones lineales y no lineales

Se incorporaron en los modelos los términos cuadráticos además de los lineales, para comprobar si se elevaban los coeficientes de regresión y se lograban mejores ecuaciones significativas para el Índice de rasgado y el coeficiente de dispersión.

Las ecuaciones halladas entre características de la madera (variables 2) y propiedades de las pulpas se presentan en la tabla V.4.

Tabla V.4. Ecuaciones de regresión lineales y cuadráticas entre propiedades físicas de las pulpas y características de las maderas (variables 2)

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	$- 0,37 l_f^2 + 0,39 l_i^2$	66	sin fila 1
IR	Ns	--	
IT	$- 0,74 S_s - 0,23 l_i^2$	75	sin fila 10
IE	$+ 0,65 l_f - 0,44 l_t$	66	sin fila 10
Blancura	$- 0,78 l_t$	46	sin fila 9
Opacidad	$- 0,40 db + 0,24 l_f^2 + 0,94 l_i - 0,47 l_i^2$	86	sin fila 9
s	Ns	Ns	--
k	$- 0,58 db + 0,30 l_f^2 + 0,25 l_i^2 + 0,71 l_t$	88	--

Ns: no significativa

Los ajustes no mejoraron con la inclusión de las variables en forma cuadrática.

La lignina se presentó nuevamente en todas las ecuaciones.

Las representaciones gráficas de las ecuaciones obtenidas para el IT, la opacidad y coeficiente de absorción k, se muestran en las figuras V. 3, 4 y 5 respectivamente.

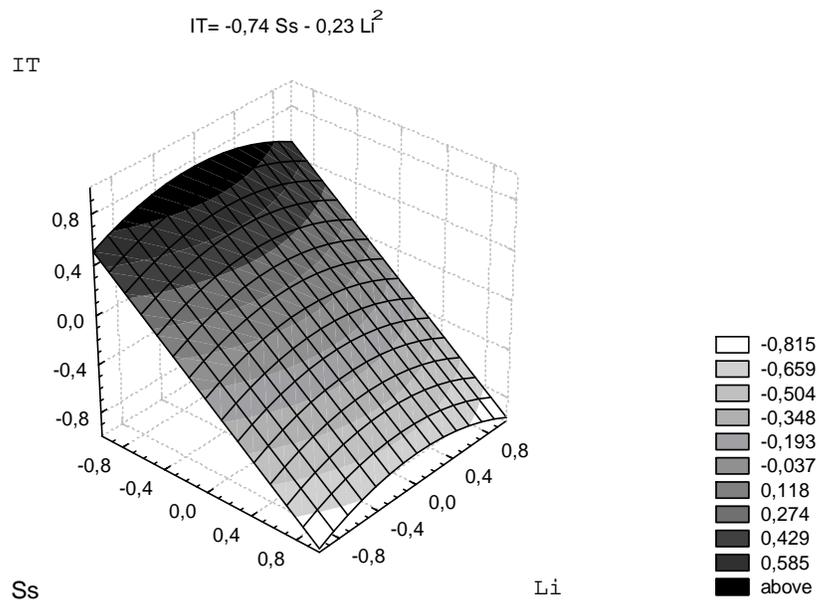


Fig. V.3. IT en función del nivel de solubles en NaOH (Ss) y de la lignina insoluble (Li)

El contenido de solubles disminuye la resistencia a la tracción. La lignina insoluble, debido a su efecto cuadrático negativo sin término lineal, produce una incidencia máxima alrededor del punto central, disminuyendo, hacia los valores extremos de la variable (Fig. V.3).

Las figuras V.4 y 5 muestran la existencia de variables cuadráticas sin su valor lineal correspondiente, e indican la presencia de un máximo o un mínimo en el valor medio (variable estandarizada igual a cero), dependiendo del signo de la misma en la ecuación.

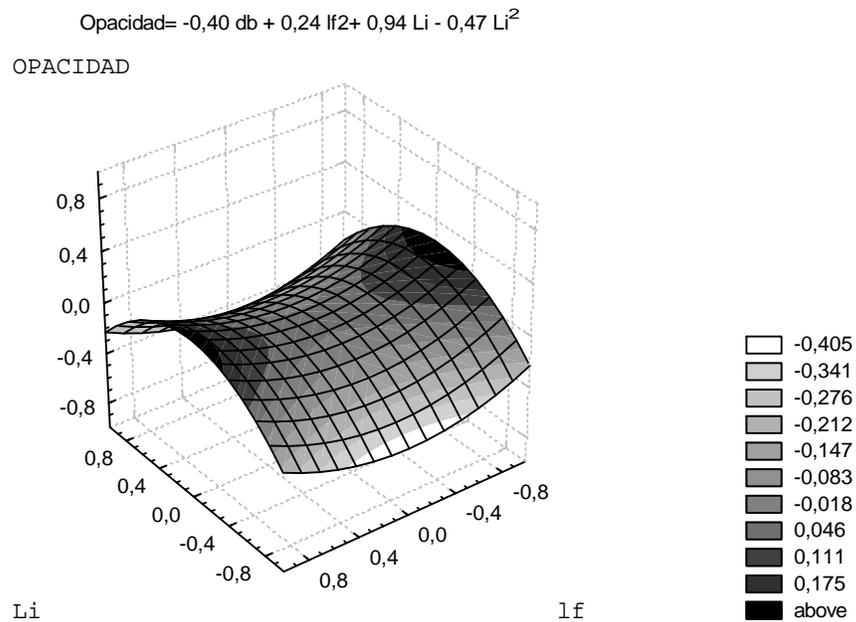


Fig. V.4. Opacidad en función del nivel de lignina insoluble (Li) y longitud de fibras (lf), con densidad básica en su valor medio (db=0).

La densidad básica produce una leve disminución de la opacidad. La longitud de fibras, en cambio, aumenta la opacidad, potenciándose este efecto a altos niveles de longitud. El contenido de lignina insoluble también la aumenta, aunque su influencia va disminuyendo hacia los valores extremos de la variable (Fig. V.4).

La densidad básica afecta negativamente el coeficiente de absorción. La longitud de fibras incide positivamente en el k, siendo mayor a medida que se elevan los valores de longitud (Fig. V.5).

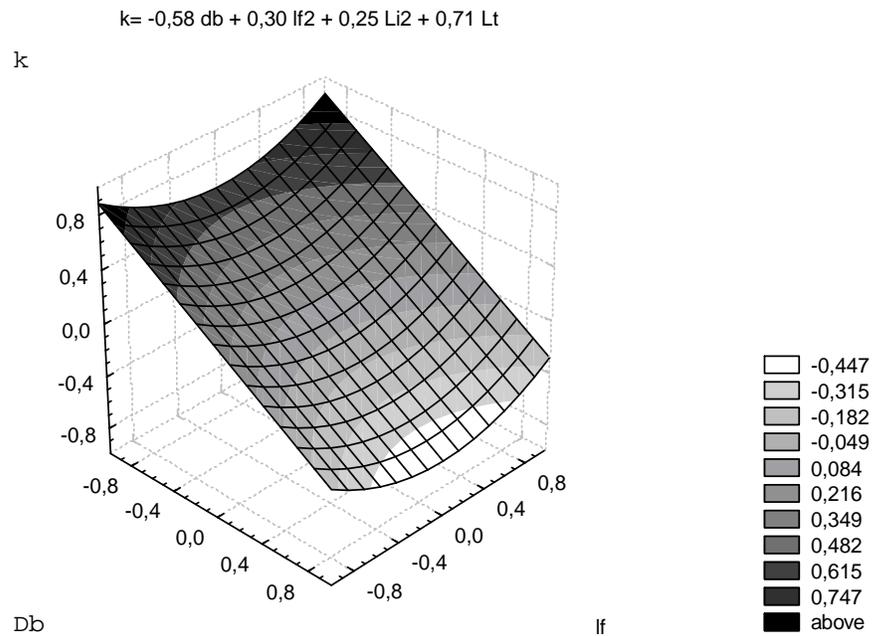


Fig. V.5. k en función de la densidad básica (db) y de la longitud de fibras (lf), con la lignina en sus valores medios ($Li=0$ y $Lt=0$)

No se encontraron ecuaciones significativas para el IR y el coeficiente de dispersión de la luz.

Para verificar la influencia de las condiciones de la pulpa (granulometría, fibrilación, etc.), se obtuvieron ecuaciones utilizando como variables las fracciones de clasificación, el grado de refinado ($^{\circ}SR$), el grado de retención de agua (WRV), y la resistencia intrínseca de las fibras en la pulpa. Las mismas se muestran en la tabla V.5.

Tabla V.5. Ecuaciones de regresión, lineales y cuadráticas, entre las propiedades físicas de las pulpas y la granulometría más el estado del material fibroso

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	- 0,97 Rf	86	sin fila 6
IR	+ 0,37 R50 ² - 0,61 P150 - 0,43 Rf ²	74	--
IT	+ 0,45 R50 + 0,54 Rf	85	sin fila 2
IE	+ 0,75 R50 - 0,48 R150 - 0,25 P150	93	sin fila 10
Blancura	+ 0,44 R50 + 0,36 R100 ² - 0,63 R150 - 0,28 R150 ² - 1,05 R270	93	sin fila 9
Opacidad	+ 1,26 R100 + 1,33 R270 + 0,51 P150 + 0,38 WRV	89	sin fila 1
s	- 0,64 R30 + 0,55 R50 - 0,20 WRV ²	87	sin fila 6
k	- 0,55 R30 ² + 0,55 R50 ² + 0,24 P150 + 0,40 WRV ²	82	sin fila 11

La granulometría de la pulpa y el estado de las fibras luego del pulpado, influyen sus propiedades, obteniéndose una ecuación significativa para rasgado.

Se observa en la tabla V.5 que la fracción R50, aumentó significativamente las propiedades de resistencia de las pulpas. La suma de las fracciones que pasan por la abertura de 150 mesh (P150, totalizando un 30% de la pulpa, con longitudes inferiores a 500 µm) afectó negativamente al rasgado y a la explosión.

En la tabla V.5 se percibe la importante influencia de la resistencia intrínseca de las fibras en el rango estudiado. Esta variable impacta positivamente en la tracción, negativamente en el volumen específico, y no influye en la explosión. Se observa que el grado de retención de agua de las pulpas (WRV), así como por las fracciones de clasificación R30, R100, R150 y R270, se encuentra únicamente en las ecuaciones de propiedades ópticas.

La representación gráfica de las ecuaciones obtenidas para los Índices de rasgado y tracción, se muestran en las figuras V. 6 y 7 respectivamente.

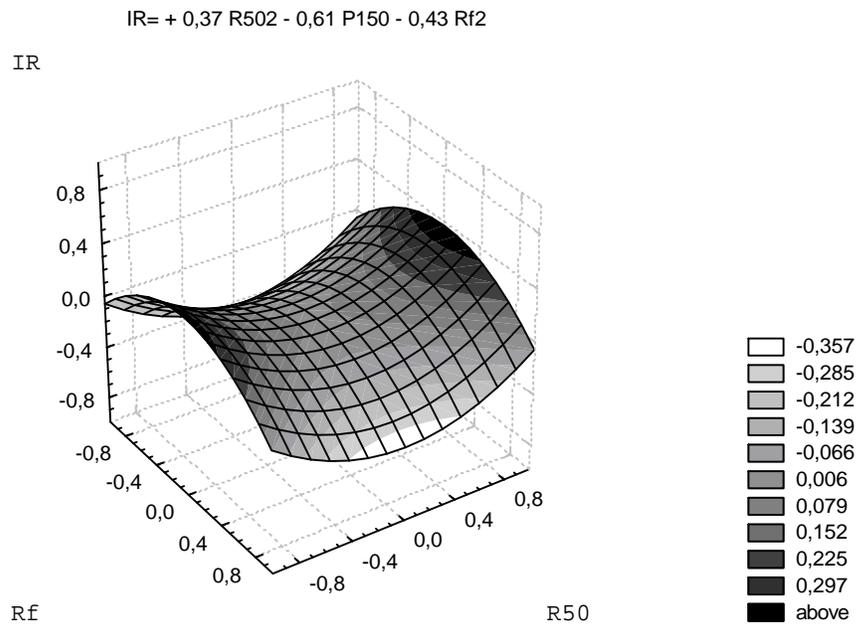


Fig. V.6. IR en función de la fracción R50 y de la resistencia de las fibras (Rf), con P150 en sus valores medios (P150=0).

La figura V.6 muestra que el rasgado se ve influenciado positivamente con los valores extremos de la fracción R50, mientras que solo los valores medios de la resistencia de las fibras lo aumentan.

Si se reemplazan las fracciones de clasificación por el factor L de Forgacs ($R30 + R50$) se obtienen las ecuaciones que figuran en la tabla V.6.

Tabla V.6. Ecuaciones de regresión, lineales y cuadráticas, entre las propiedades físicas de las pulpas y el Factor L más el estado del material fibroso

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	- 0,97 Rf	86	sin fila 6
IR	Ns	Ns	--
IT	+ 0,83 Rf	70	--
IE	+ 0,45 Rf + 0,56 L - 0,41 WRV	76	sin fila 11
Blancura	+ 0,62 L ² - 0,75 Rf ²	73	sin fila 2
Opacidad	+ 0,37 Rf + 0,60 Rf ² - 0,69 L - 0,70 L ²	77	sin fila 12
s	+ 0,80 Rf - 0,60 L - 0,27 SR - 0,32 WRV	88	sin fila 4
k	+ 0,80 Rf ² - 0,62 L ²	77	sin fila 9

Para la mayoría de las propiedades se encontraron ecuaciones significativas que incluyen al factor L de Forgacs (R30 + R50), en general combinado con la resistencia de fibras y el grado de retención de agua. Si bien los ajustes no son los mejores, las ecuaciones se simplifican.

Solamente en el caso del coeficiente de dispersión de la luz, aparecen como significativos el grado de refinado y el grado de retención de agua.

Al combinar las propiedades de las maderas con las características de las pulpas, se obtienen las ecuaciones de la tabla V.7.

Tabla V.7. Ecuaciones de regresión, lineales y cuadráticas, entre las propiedades físicas de las pulpas y la combinación de características de la madera y de las pulpas (variables 3)

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	- 0,20 Ss ² - 0,92 Rf	92	sin fila 6
IR	+ 0,37 R50 ² - 0,61 P150 - 0,43 Rf ²	74	--
IT	- 0,81 db - 0,26 Li ² + 1,05 R50 + 0,62 R270	95	sin fila 12
IE	- 0,43 db - 0,38 Li + 1,02 R50 - 0,29 R50 ² + 0,25 R270 ²	94	--
Blancura	+ 0,55 db - 0,32 R150 - 0,68 R270	91	sin fila 11
Opacidad	- 0,65 lf - 0,41 R50 + 0,59 R100 + 1,66 R270	80	--
s	- 0,64 R30 + 0,55 R50 - 0,20 WRV ²	87	--
k	- 0,55 R30 ² + 0,55 R50 ² + 0,24 P150 + 0,40 WRV ²	82	--

La fracción de fibras enteras R50 aparece afectando a la mayoría de los ajustes. Su incidencia fue positiva para las propiedades de resistencia.

La densidad básica y la lignina insoluble afectaron negativamente las ecuaciones de tracción y explosión.

Las ecuaciones de IR, k y s no presentaron variables de la madera entre sus términos.

La representación gráfica de las ecuaciones obtenidas para IT, Blancura y s, se muestran en las figuras V. 7, 8 y 9 respectivamente.

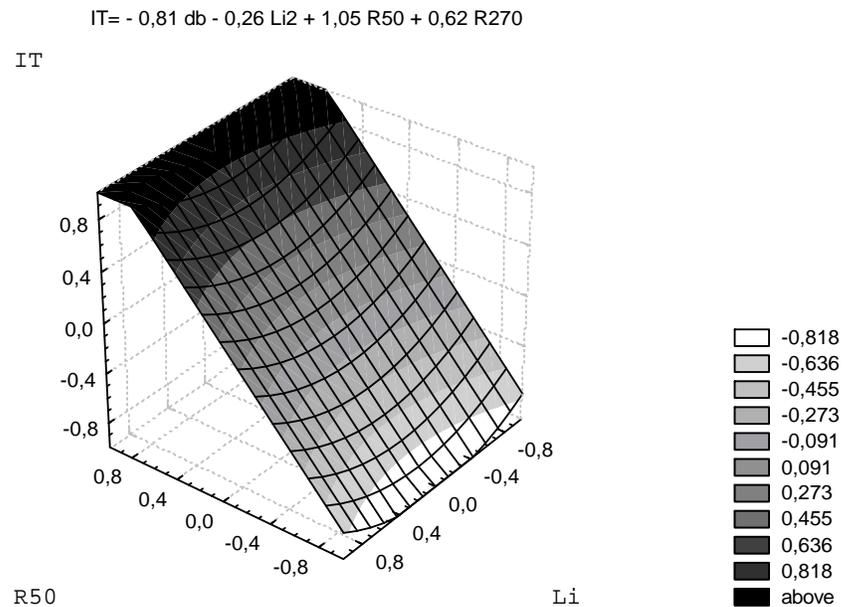


Fig. V.7. IT en función de la lignina insoluble (Li) y de la fracción R50, con densidad básica (db) y fracción R270 en sus valores medios (=0).

Altos valores de las fracciones R50 y R270 aumentan la resistencia a la tracción, debido a que aportan fibras enteras y finos fibrilares que incrementan la superficie de unión en la trama de papel. La lignina insoluble posee menor influencia sobre la tracción, sobre todo en sus valores medios (Fig. V.7).

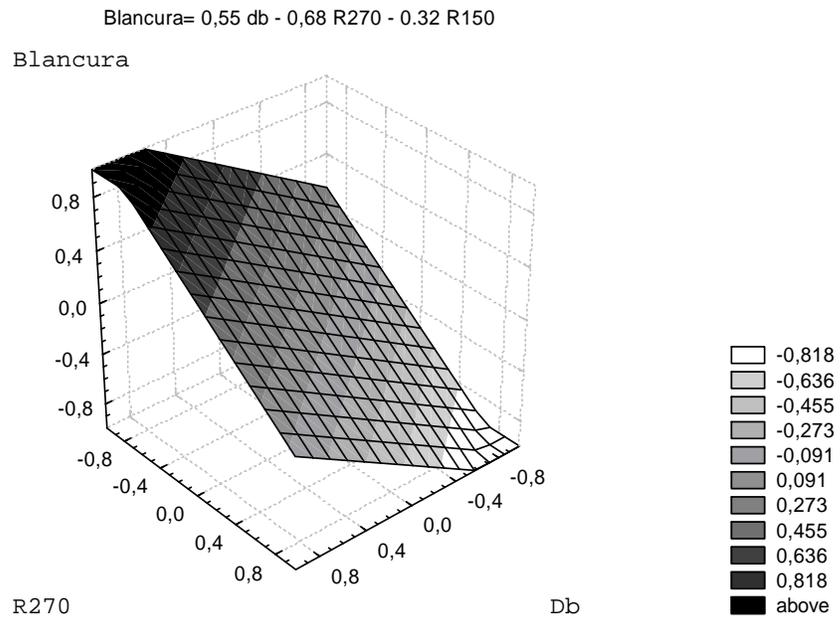


Fig. V.8. Blancura en función de la densidad básica (db) y de la fracción de finos (R270), con R150 en su valor medio (=0).

Mayores valores de densidad y menores de finos (R270), dentro de los rangos estudiados, aumentan la blancura de la pulpa (Fig. V.8).

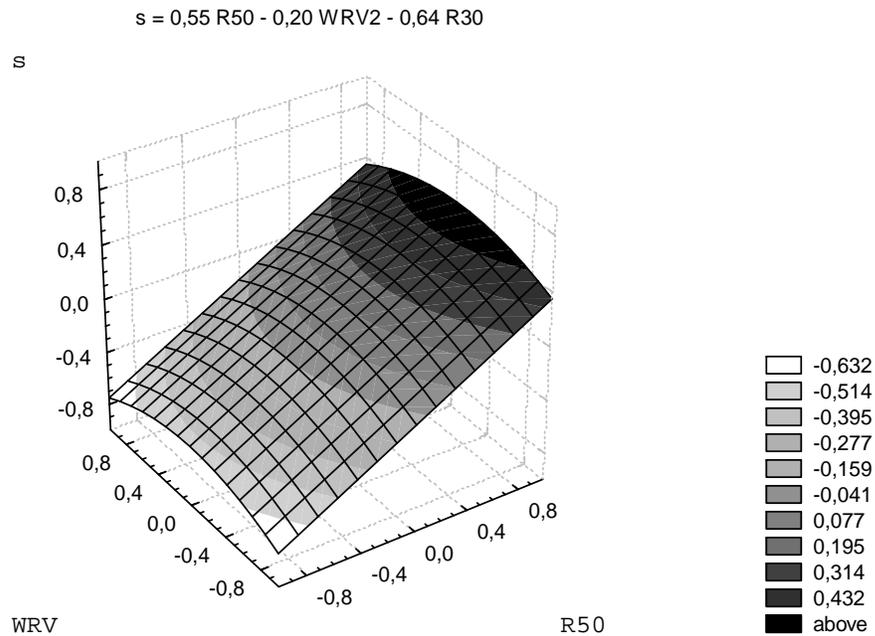


Fig. V.9. Coeficiente de dispersión de la luz s , en función del grado de retención de agua (WRV) y de la fracción R50, con R30 en su valor medio ($=0$).

Una mayor cantidad de fibras enteras (R50) con un valor intermedio de retención de agua (WRV), aumentan el coeficiente de dispersión (Fig. V.9).

Resumen

En la tabla V.8 se presenta el resumen de los R^2 ajustados para diferentes conjuntos de variables independientes.

Los modelos logrados con el conjunto de variables 1 (características físicas y microscópicas de la madera) solo permiten aproximar ecuaciones pobres sobre algunas propiedades ópticas.

Tabla V.8. R² ajustados para diferentes conjuntos de variables independientes

	Variables 1	Variables 2		Variables 3	
	Lineal	Lineal	Cuadrático	Lineal	Cuadrático
	Tabla 1	Tabla 2	Tabla 4	Tabla 3	Tabla 7
Vol esp	Ns	88	66	90	92
I T	Ns	85	75	85	95
I R	Ns	Ns	Ns	Ns	74
I E	Ns	78	66	88	94
Opacidad	61	84	86	84	80
Blancura	64	65	Ns	88	91
s	Ns	Ns	Ns	86	87
k	Ns	76	88	88	82

Para el conjunto de propiedades de la pulpa, las ecuaciones logradas con modelos lineales y variables de la madera considerando las características físicas, microscópicas y químicas de la madera (Variables 2) fueron mejores. Solo dos propiedades no ajustaron con este conjunto de variables (IR y s), aunque tampoco lograron ecuaciones significativas con los modelos cuadráticos. Los modelos lineales ajustaron mejor con este conjunto de variables independientes, siendo además más sencillos de interpretar.

Todos los ajustes (excepto opacidad) mejoran sus coeficientes R² cuando se agregan las variables que miden la granulometría y estado de las fibras (Variables 3). El rasgado logra una ecuación significativa con este conjunto de variables en el modelo cuadrático.

Entre las resistencias, la tracción alcanza los máximos valores de R², seguida por la explosión. En el caso de las propiedades ópticas, el mejor ajuste se obtuvo para la blancura, siendo los R² para el resto de las propiedades, razonablemente buenos.

Los ajustes, para la mayoría de las propiedades, mejoran cuando se combinan las características de la madera con la granulometría y estado general de las fibras (variables 3), con respecto a las ecuaciones logradas exclusivamente con las primeras (variables 1). Esto indica la importancia de los efectos de la etapa mecánica en las pulpas quimimecánicas de latifoliadas.

Pese a lo anterior, la utilización de las variables independientes de la madera (Variables 2) permite predecir en forma razonable muchas de las propiedades de las pulpas quimimecánicas, por lo cual, pueden utilizarse como criterio de selección, para obtener materias primas con mejores propiedades mecánicas y ópticas. Las características básicas a determinar son la densidad básica, longitud de fibras, lumen, lignina insoluble y soluble (lignina total), solubles en hidróxido de sodio y celulosa.

Frecuencia de aparición de variables independientes:

La importancia de las variables predictivas difiere según la propiedad de la pulpa considerada. La frecuencia de aparición de cada una (simple o cuadrática) se presenta en las figuras V.10 y 11.

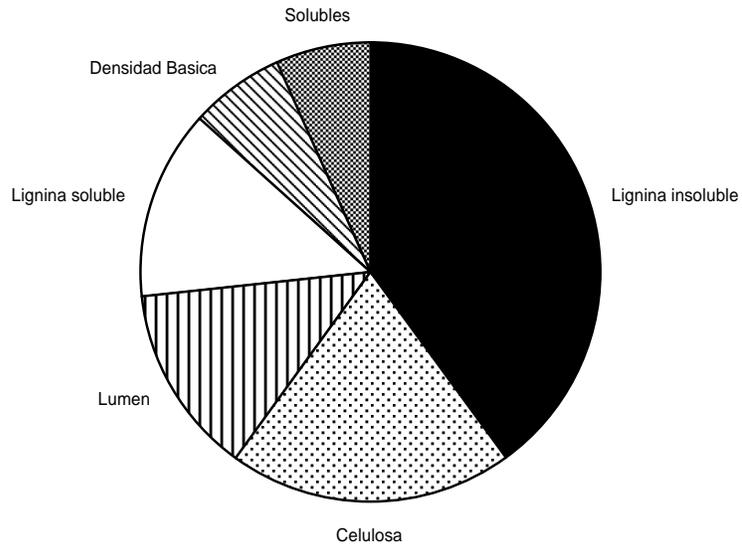


Fig. V.10. Frecuencia de aparición de las variables independientes en la Tabla V. 2.

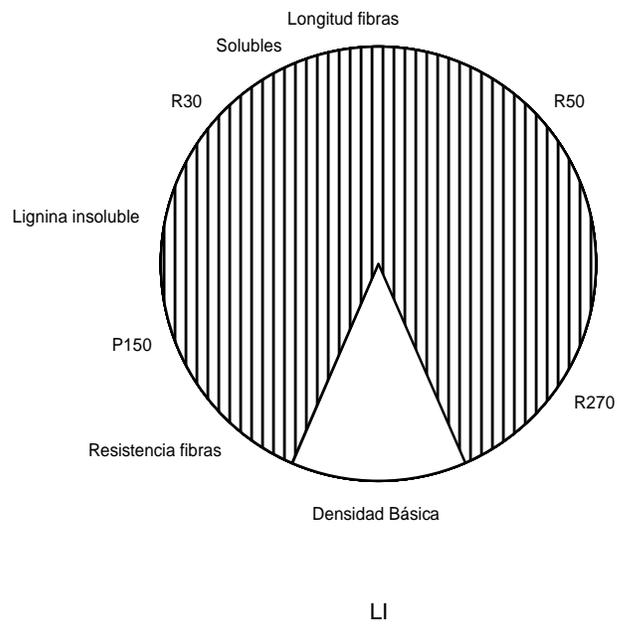
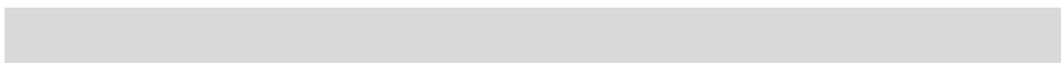


Fig. V.11. Frecuencia de aparición de las variables independientes en la Tabla V.7.

Se observa que las variables que se repiten con mayor frecuencia son la lignina insoluble, R50, y fracción de finos R270. Seguidamente, aparecen el contenido de celulosa, la densidad básica de la madera, los solubles en hidróxido de sodio, el lumen, la lignina soluble, la resistencia intrínseca de las fibras, la fracción de haces fibrosos R30 y la fracción de fibras cortadas a finos P150.



CAPÍTULO VI

ANÁLISIS MULTIVARIADO

Se realizaron estudios de análisis multivariado con el fin de detectar las variables más importantes que influyen sobre la varianza total, reducir el número de variables y establecer agrupamientos y correlaciones entre ellas.

Se utilizaron las técnicas de Agrupamiento (Clusters) y de Análisis de Componentes Principales (PCA).

1- Análisis de Agrupamiento (Clusters)

Se realizó, en primer término, un análisis con una selección de variables de madera y pulpas en conjunto para establecer la relación de las mismas.

En base a esas relaciones, se probaron diferentes conjuntos de variables de la madera y de las pulpas separadamente, para establecer agrupamientos de los clones.

1.1- Clusters completos

La figura VI.1. muestra el dendrograma con una selección de variables de madera y de pulpas.

Se observa una primera división entre variables que se asocian al rendimiento en pulpa y la opacidad, y otras relacionadas a las resistencias.

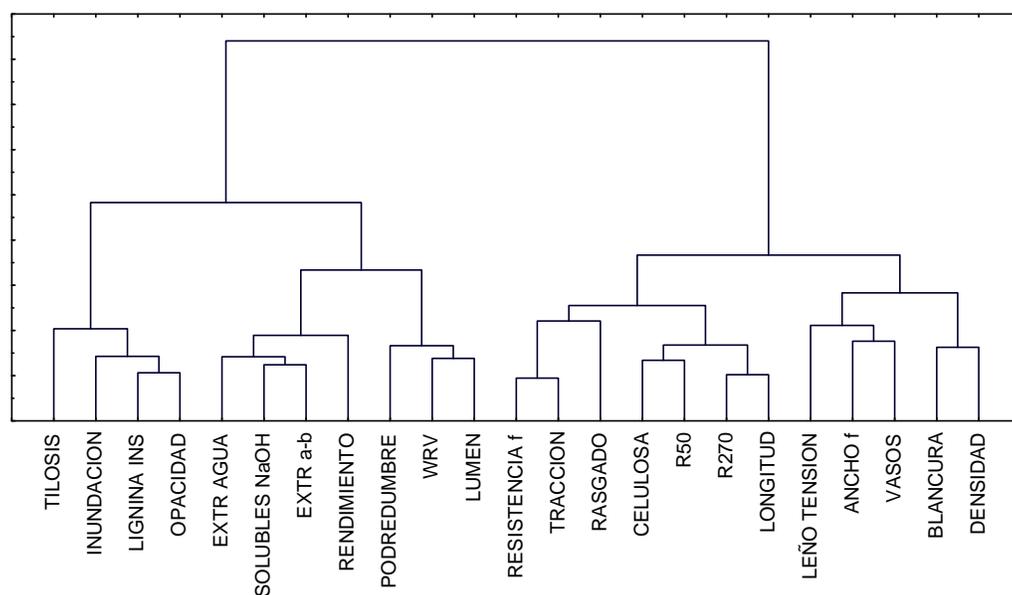


Figura VI.1. Dendrograma con una selección de variables de madera y de pulpas

Dentro de las primeras, se aprecia que la opacidad está más correlacionada con la lignina insoluble, las marcas de inundación (que indican claramente el sitio de implantación DM) y la presencia de tilosis. En cambio, el rendimiento de pulpa, se asocia con los contenidos de extractivos y solubles en NaOH y con el nivel de podredumbre.

Las resistencias a la tracción y al rasgado se correlacionan estrechamente con la resistencia intrínseca de las fibras, la cantidad de celulosa, la longitud de fibras y la proporción de fibras enteras (R50) y finos fibrilares (R270) presentes en la pulpa.

La blancura no está asociada a la composición química, ni a la granulometría del material, sino que lo hace con la densidad de la madera, y en menor proporción con la presencia de leño de tensión, ancho de fibras y cantidad de vasos.

Este tipo de asociación coincide con el presentado con otros análisis estadísticos como Correlaciones, Regresiones y PCA.

1.2- Clusters con las variables de la Madera

Se consideraron 4 agrupamientos de variables:

- a- Densidad básica y características microscópicas (longitud de fibras, ancho, espesor de pared, lumen, porcentaje de vasos, fibras y radios)
- b- Composición química completa (celulosa, lignina insoluble y soluble, extractivos en alcohol benceno y en agua caliente, solubles en hidróxido de sodio)
- c- Las variables a y b conjuntamente
- d- Selección de variables a y b (densidad, longitud, ancho, lumen, vasos) con podredumbre, mancha, tilosis, leño de tensión

En la tabla VI.1 se visualizan los grupos obtenidos con cada agrupamiento.

Tabla VI.1. Agrupamiento de los clones según 4 conjuntos de variables de la madera

Agrupamiento a	Agrupamiento b	Agrupamiento c	Agrupamiento d
Densidad Longitud Lumen Ancho Espesor Vasos Fibras Radios	Extr alcohol benceno Extr agua Solubles NaOH Lignina soluble Lignina insoluble Celulosa	Agrupamiento a + Agrupamiento b	Agrupamiento a y b (seleccción) + Podredumbre Mancha Tilosis Leño de Tensión
Americano DM Americano C 131-25 C	Americano C 131-27 DM Americano DM	Americano DM Americano C 26992 DM	Americano DM Americano C 26992 DM

131-27 C	250-33 DM	131-25 DM	131-25 DM
250-33 C	131-25 C	131-27 DM	131-27 DM
26992 C	131-27 C	250-33 Dm	250-33 Dm
250-33 DM	250-33 C	13-44 DM	13-44 DM
26992 DM	131-25 DM	131-25 C	131-25 C
131-27 DM	13-44 DM	131-27 C	131-27 C
131-25 DM	26992 C	250-33 C	250-33 C
13-44 DM	26992 DM	26992 C	26992 C
13-44 C	13-44 C	13-44 C	13-44 C

Para el agrupamiento a (densidad, longitud, ancho, espesor, lumen, vasos, fibras y radios) se presenta el dendrograma en la Fig. VI.2.

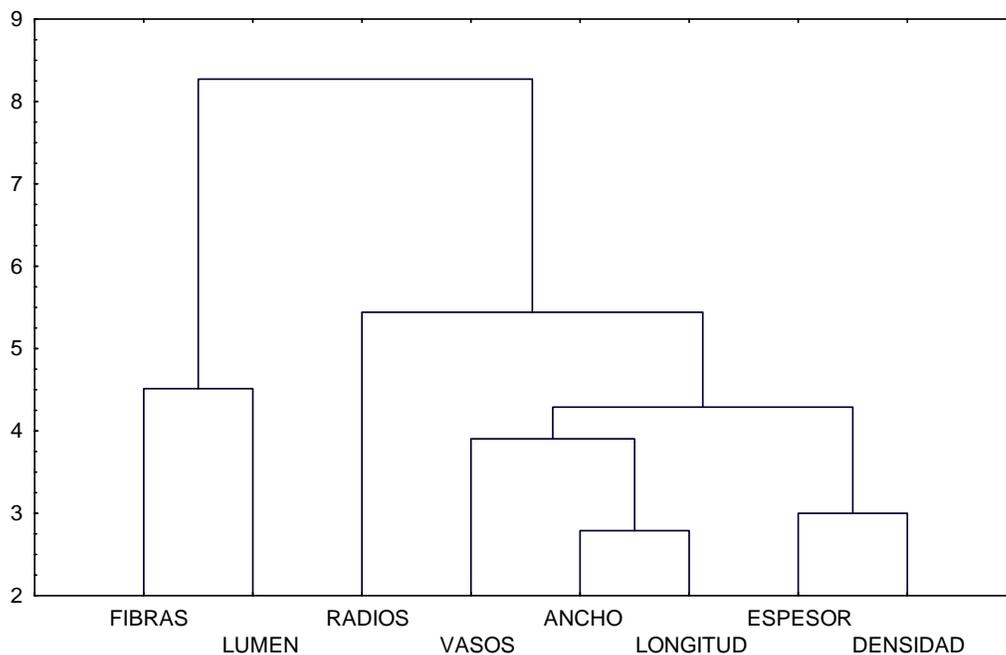


Fig. VI.2. Dendrograma que grafica las variables del agrupamiento a

El dendrograma VI.2 muestra la separación del conjunto de variables en 2 grupos. El primer grupo asoció el porcentaje de fibras con el lumen celular. El segundo grupo, relacionó el tamaño de las fibras (longitud, ancho y espesor de pared) con la cantidad de material madera presente (densidad) y el porcentaje

de espacios vacíos (vasos), y esto a su vez con el porcentaje de radios (elemento no fibroso del tejido xilemático).

En la fig. VI.3 se grafica el valor medio por cluster, de cada variable del agrupamiento a. En el cluster 1 se agruparon los sauces americanos de ambos sitios, siendo su madera la de mayor densidad y tamaño de fibras (longitud, ancho y espesor) y con un alto porcentaje de vasos. El cluster 2 caracterizado por elevada densidad y porcentaje de fibras, y un tamaño celular reducido, agrupó a los clones 13-44 de ambos sitios. El cluster 3 agrupó a los clones 131-25 C, 131-27 C, 250-33 C y DM y 26992C, y presentó valores intermedios de densidad y tamaño de fibras, con un alto porcentaje de fibras y radios. El cluster 4, representado por los clones 131-25 DM, 131-27 DM y 26992 DM, presentó densidad y dimensiones celulares inferiores a los valores medios, un elevado valor de lumen y fibras.

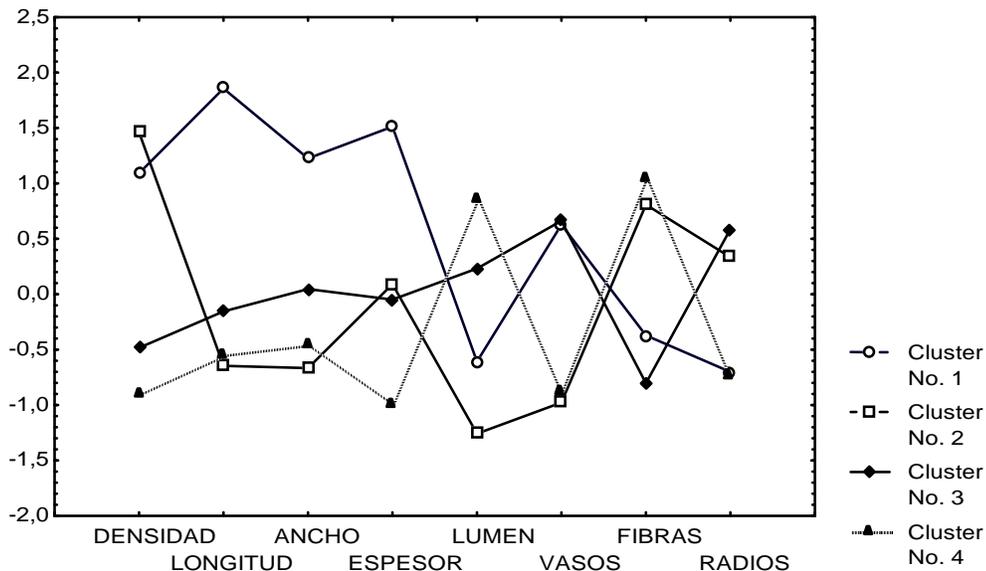


Fig. VI. 3. Valor medio por cluster para cada variable del agrupamiento a

La Fig. VI.4 presenta el dendrograma del agrupamiento b (composición química). Los extractivos y solubles en NaOH se presentaron correlacionados

entre sí. La lignina soluble se presentó aislada, mientras que la celulosa está asociada a los niveles de lignina insoluble.

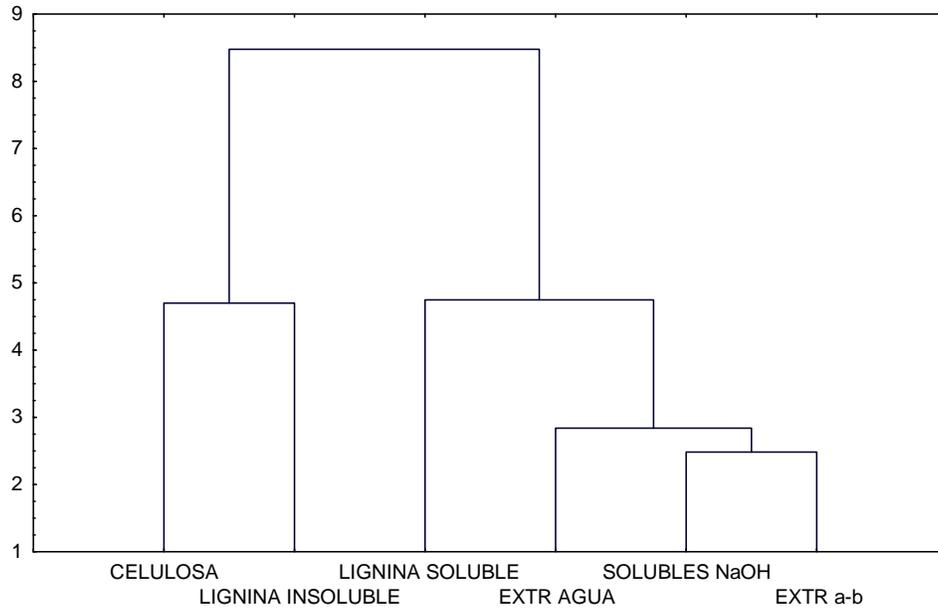


Fig. VI.4. Dendrograma que agrupa las variables de composición química

En la Fig. VI.5 se grafica el valor medio de cada variable del agrupamiento b para los diferentes clusters. En el cluster 1 se agruparon los clones 13-44 DM y C, 26992 DM y C, 131-27 C, 250-33 C y 131-25 DM y C; en el cluster 2 se agruparon los sauces americanos de ambos sitios, el clon 250-33 DM y el 131-27 DM.

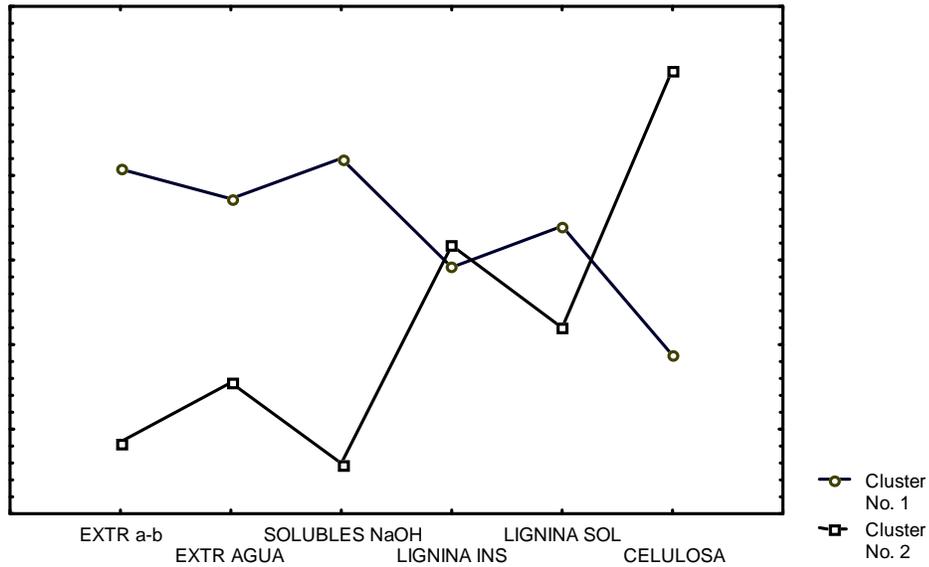


Fig. VI. 5. Valor medio por cluster para cada variable del agrupamiento b

El cluster 1 presentó altos niveles de extractivos en alcohol benceno y en agua y de solubles en NaOH, mientras que los niveles de celulosa fueron bajos.

El cluster 2, se destacó principalmente por el alto contenido de celulosa, bajo de extractivos y solubles en NaOH. Las ligninas se hallaron en valores intermedios.

Las variables del agrupamiento c (variables microscópicas y químicas) se presentan en el dendrograma VI. 5.

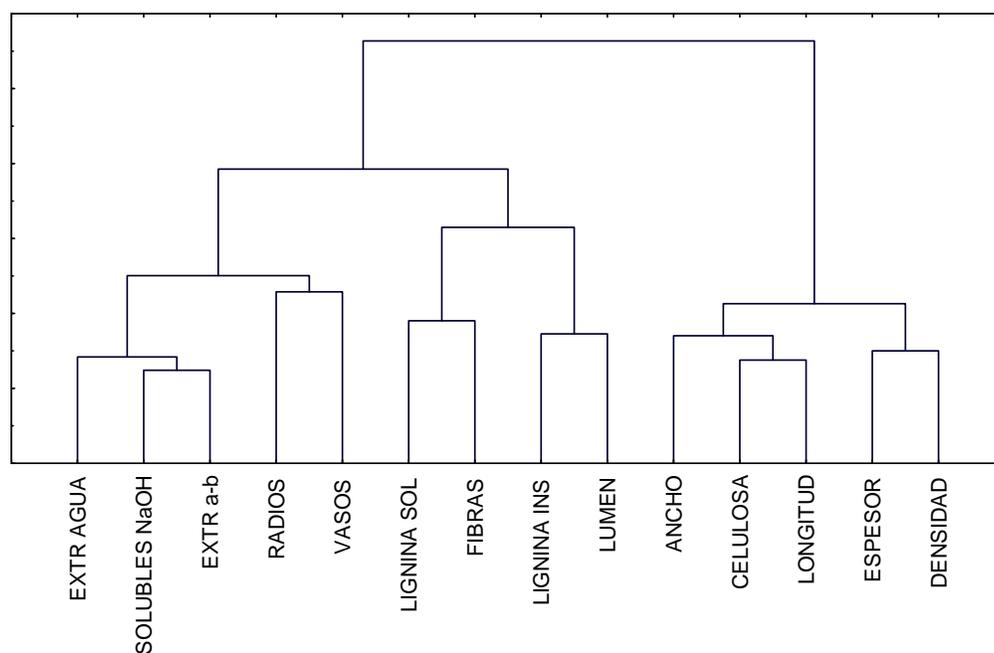


Fig. VI.5. Dendrograma del agrupamiento c (variables microscópicas y químicas)

La figura VI.5 muestra grupos claramente definidos. El primer grupo asoció las variables de extractivos y solubles en NaOH con la proporción de tejidos en términos de vasos y radios. El segundo grupo relacionó el nivel de lignina con el porcentaje de fibras (elemento de mayor espesor de pared) y la proporción de lumen celular (espacio vacío). El tercer conjunto asoció las medidas de tamaño celular como longitud, ancho y espesor de pared de las fibras, con la cantidad de material madera (densidad) sobre todo celulosa.

La separación de los clones con las variables c, presentó un comportamiento claramente influenciado por el sitio de implantación (tabla VI.1). La excepción la constituyen los sauces americanos que se separaron en un subconjunto aparte del resto. Los demás clones se aislaron según el sitio continental (C) y el sitio Delta (DM).

La Fig. VI.6 presenta el dendrograma del agrupamiento d (selección del agrupamiento c con anomalías).

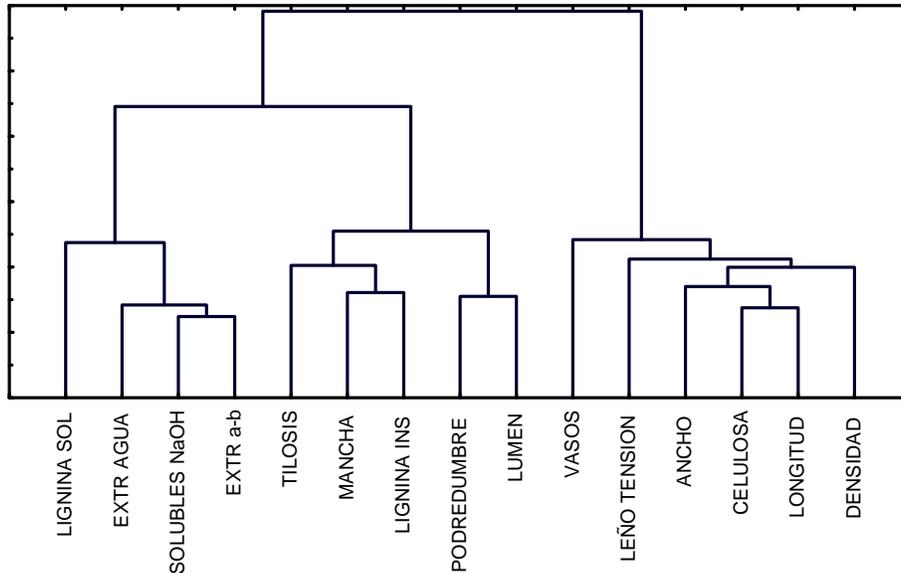


Fig. VI. 6. Dendrograma de las variables del agrupamiento d

Como lo demuestra la Fig. VI.6 el agregado de las anomalías (mancha, podredumbre, tilosis y leño de tensión) no cambió la base del agrupamiento en 3 subconjuntos hallada para el agrupamiento c, ni la separación de los clones (tabla VI.1).

2.2- Clusters con las variables de las Pulpas

Se consideraron 4 agrupamientos de variables:

- a- Fracciones de clasificación (R30, R50, R100, R150, R270, P270)
- b- Tracción, Rasgado, Explosión, Elongación, TEA, Resistencia al paso del aire, Resistencia intrínseca de fibras y WRV

- c- a y b conjuntamente
- d- Opacidad, Blancura, k y s

En la tabla VI.2 se visualizan los grupos de clones obtenidos con cada conjunto de variables.

Tabla VI.2. Agrupamiento de los clones según 4 conjuntos de variables de las pulpas

Agrupamiento a	Agrupamiento b	Agrupamiento c	Agrupamiento d
Fracciones de clasificación R30-R50 R100-R150 R270-P270	Tracción Rasgado Explosión Elongación TEA Resistencia F Resistencia aire WRV	Fracciones de clasificación Tracción Rasgado Resistencia aire WRV	Opacidad Blancura k s
Americano DM Americano C 26992 C 131-25 c 131-27 DM 250-33 C 26992 DM 250-33 DM 13-44 DM 131-25 DM 131-27 C 13-44 C	Americano DM Americano C 26992 DM 250-33 DM 131-27 DM 131-27 C 26992 C 131-25 DM 131-25 C 250-33 C 13-44 C 13-44 DM	Americano DM Americano C 26992 DM 250-33 DM 131-27 DM 131-27 C 26992 C 131-25 DM 131-25 C 250-33 C 13-44 C 13-44 DM	131-25 C Americano DM 26992 DM 131-25 DM 131-27 DM 250-33 DM 26992 C 250-33 C 13-44 DM Americano C 131-27 C 13-44 C

El dendrograma VI.7 presenta la asociación de las 6 fracciones de clasificación. Las fracciones extremas R30 y P270 no se asociaron a las otras fracciones. En cambio, la fracción de fibras enteras R50 se correlacionó con la de finos fibrilares R270, y las fracciones de fibras cortadas se asociaron entre sí R100 y R150.

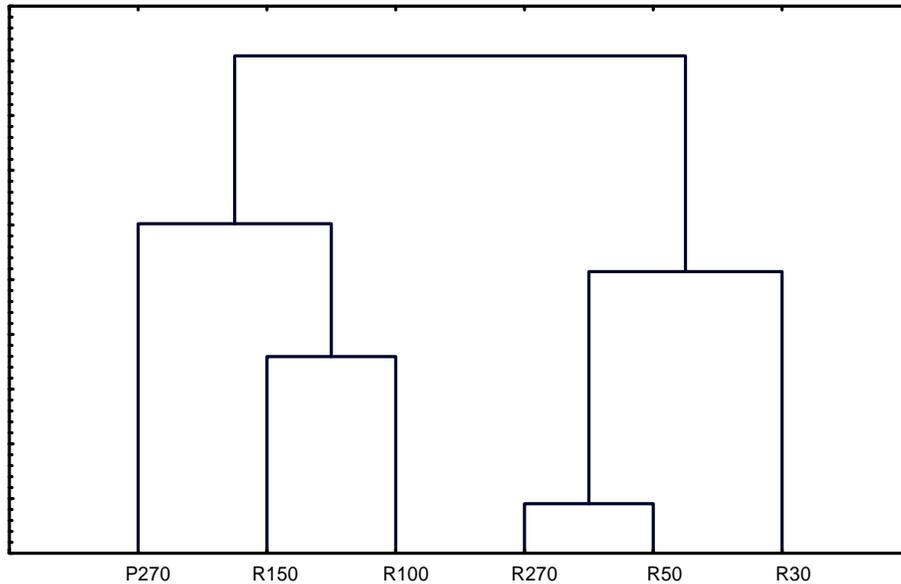


Fig. VI. 7. Dendrograma de las variables del agrupamiento a (Fracciones de clasificación)

En la figura IV.8 se visualizan los valores medios por cluster para cada variable del agrupamiento a. El cluster 1 presentó porcentajes de las fracciones mayores R30 y R50 inferiores a la media, y elevado porcentaje de los finos P270. En este cluster se ubicaron los clones 13-44 C, 131-27 C y 131-25 DM. El cluster 2 agrupó los sauces americanos con elevados porcentajes de la fracción de fibras enteras (R50) y de finos fibrilares (R270) y muy bajos valores de la fracción de fibras cortadas R100. El cluster 3 asoció los clones 26992 DM, 250-33 DM y 13-44 DM con valores muy bajos de P270, intermedios para R30 y R270, siendo los porcentajes de las fracciones intermedias R50, R100 y R150

similares entre sí. El cluster 4 se caracterizó por presentar un elevado contenido de minihacecillos (R30), pocas fibras enteras (R50) y las fracciones R100, R150, R270 y P270 en valores medios. Los clones 131-27 DM, 26992 C, 250-33 C y 131-25 C se agruparon en el cluster 4.

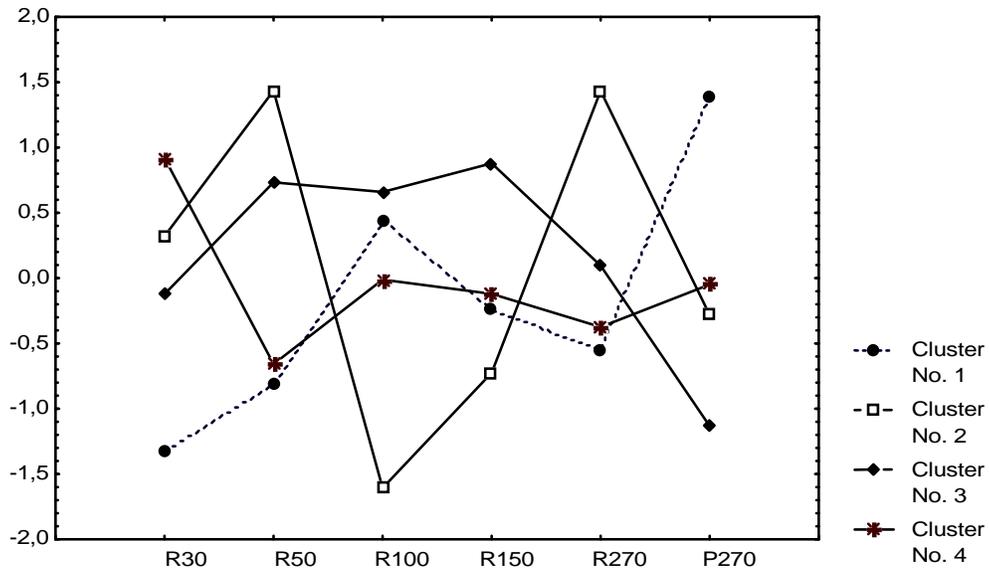


Fig. VI.8. Valor medio por cluster para cada variable del agrupamiento a

Si analizamos la separación de los clones (tabla VI.2) se observa que el agrupamiento no tiene que ver con el clon, ni con el sitio.

Para el agrupamiento b (Tracción, Rasgado, Explosión, Elongación, TEA, Resistencia al paso del aire, WRV y Resistencia intrínseca de las fibras) se presenta el dendrograma en la Fig. VI.9.

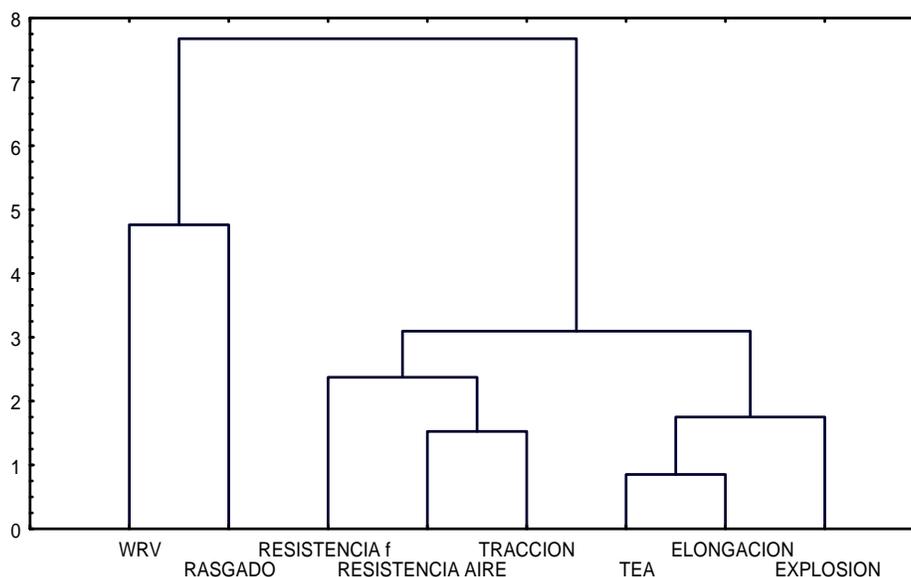


Fig. VI.9. Dendrograma de las variables del agrupamiento b

Se observó una división en dos grupos entre la resistencia al rasgado asociado al WRV, y las otras resistencias como tracción y explosión relacionadas a la resistencia de las fibras, a la trama más cerrada de la hoja de ensayo (resistencia al paso del aire) a la elongación y al TEA.

En la figura IV.10 se visualizan los valores medios de las variables para cada subconjunto. Las buenas resistencias se asociaron a la resistencia de las fibras, a la porosidad (resistencia al paso del aire) y a un bajo WRV (cluster 1).

Dentro del cluster 1 se agruparon los clones 26992 DM, 250-33 DM y los sauces americanos de ambos sitios. En el cluster 2 se ubicaron el resto de los híbridos. Este agrupamiento de clones no está relacionado con el clon ni con el sitio de implantación.

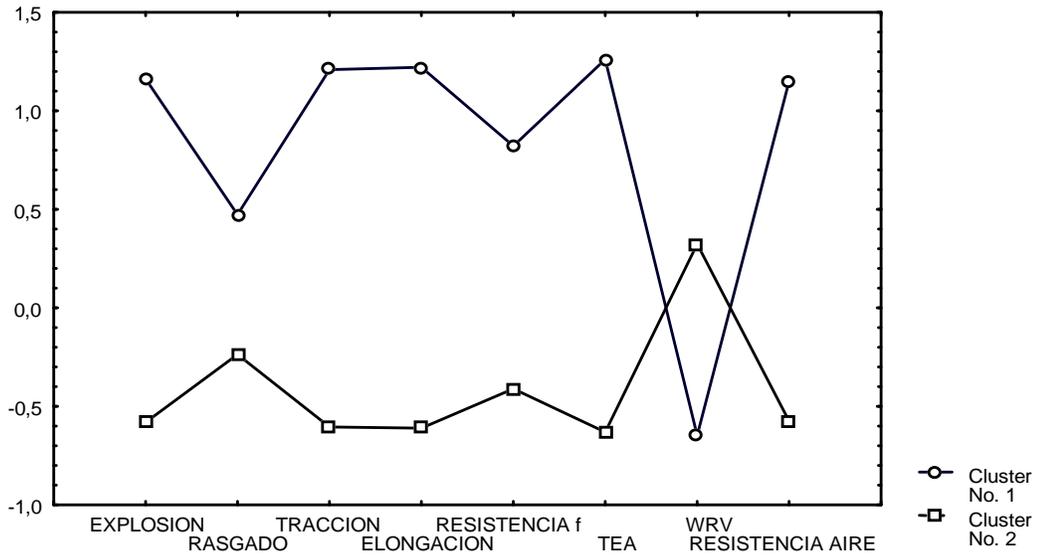


Fig. VI.10. Valor medio por cluster para cada variable del agrupamiento b

El agrupamiento c (combinación de variables de a y b) nos determina el dendrograma VI.11.

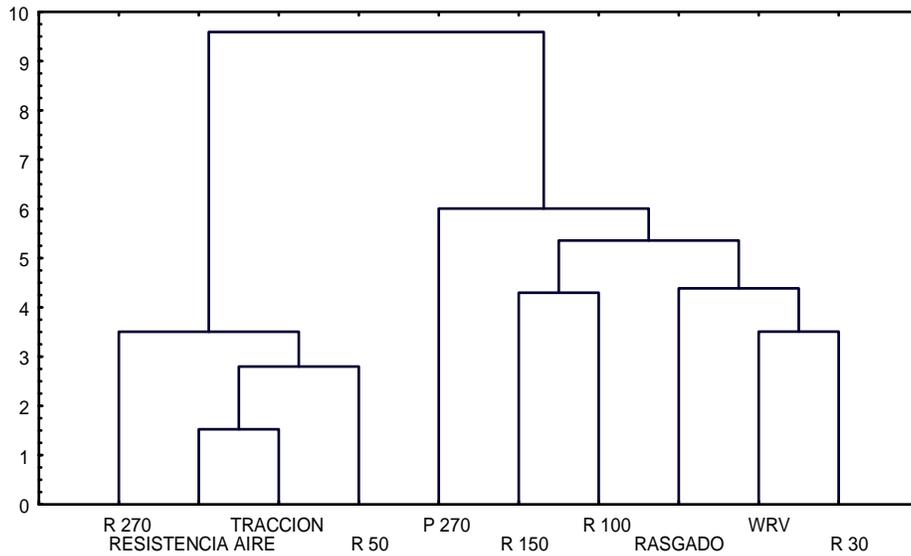


Fig. VI.11. Dendrograma con las variables a y b conjuntamente (agrupamiento c)

La resistencia a la tracción fue la variable que se relacionó con la trama de la hoja y con las fracciones R50 y R270 (Fig. VI.11). En cambio, el rasgado no se asoció claramente con ninguna fracción.

La Fig. VI.10 muestra el gráfico de medias por cluster para cada variable. El primer grupo de clones formado (tabla VI.2) fue el de mayor tracción (cluster 1, 4 clones), y el segundo grupo (cluster 2), el de resistencias intermedias a bajas.

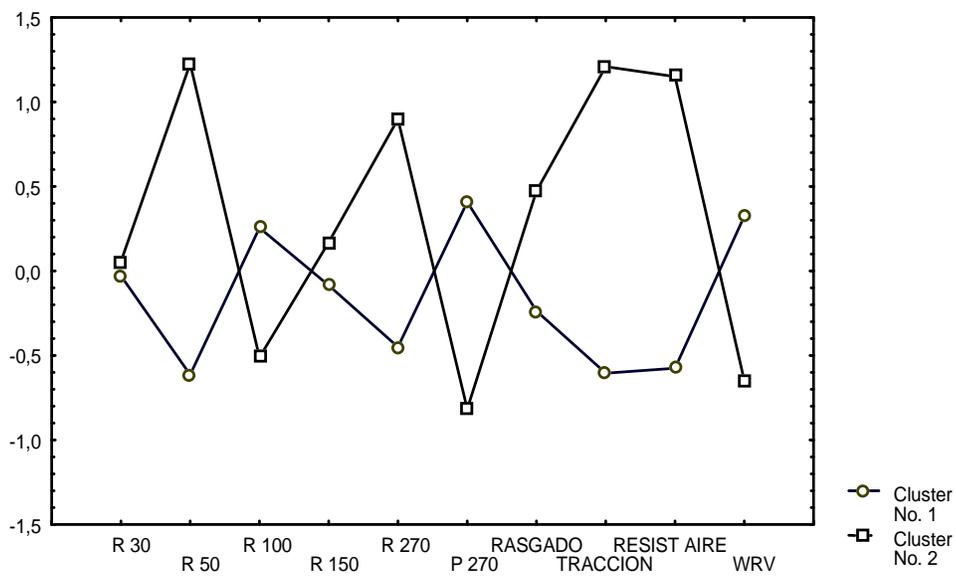


Fig. VI.10. Valor medio por cluster para cada variable del agrupamiento c

Puede observarse en la tabla VI.2 que la separación de los clones coincidió con la separación lograda con las variables b.

Para el agrupamiento d (propiedades ópticas) se presenta el dendrograma en la Fig. VI. 11.

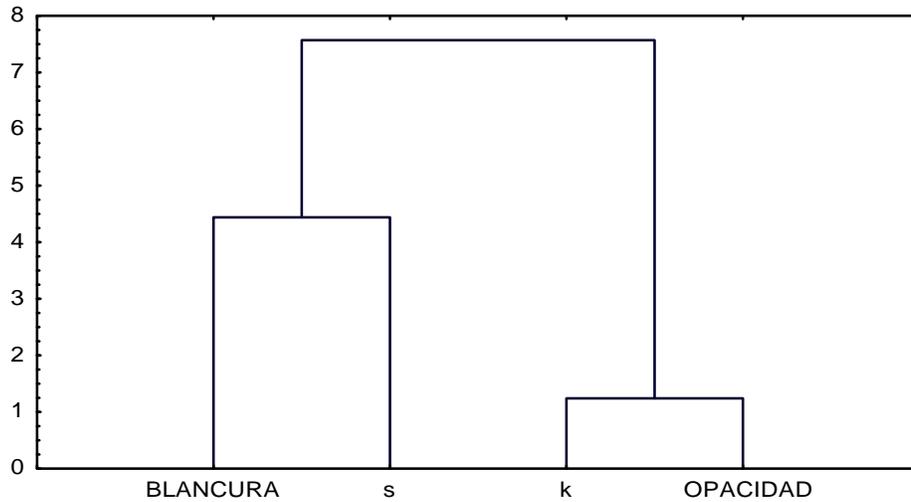


Fig. VI.11. Dendrograma de las variables opacidad, blancura, k y s

La opacidad se relaciona con el coeficiente de absorción de luz (k). El coeficiente de dispersión de la luz (s) y la blancura son independientes.

La Fig. VI.12 muestra los valores medios por cluster para las propiedades ópticas.

Los clones se agrupan en 2 conjuntos, uno de buena opacidad y alto coeficiente de absorción (cluster 2) y otro de buen blanco (cluster 1). El coeficiente de dispersión presentó valores cercanos a la media en ambos clusters.

La separación de los clones (tabla VI.2) está muy influenciada por el sitio para este conjunto de variables (propiedades ópticas).

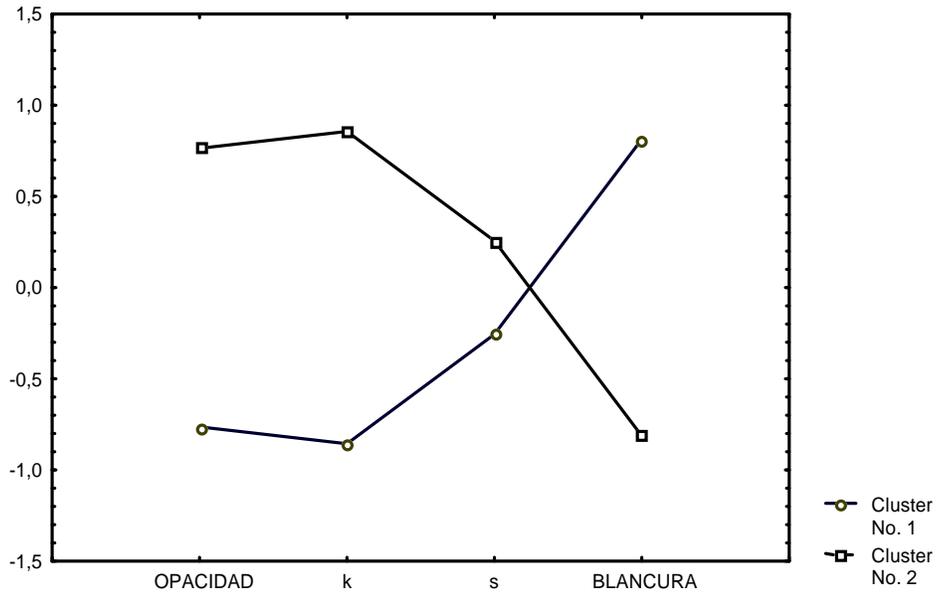


Fig. VI.12. Valor medio por cluster para las variables del agrupamiento d (propiedades ópticas)

2- Análisis de Componentes Principales (PCA)

Se realizó la extracción de componentes principales con el objetivo de reducir la cantidad de variables de la madera y de las pulpas que se incluyen en los análisis.

Las extracciones se dividieron en PCA de madera, PCA de pulpa y PCA completos, dependiendo del conjunto de variables involucradas en el análisis.

2.1- PCA de Madera

En un primer análisis, se tomaron algunas variables medidas en madera incluyendo la composición química. Las 9 variables se redujeron a 2

componentes principales (PCAm1) que explican el 70% de la varianza (tabla VI.3).

Tabla VI.3. PCAm1 con propiedades de la madera

	Factor 1M	Factor 2M
Densidad básica	-0,50	-0,65
Longitud de fibras	-0,83	0,05
Lumen	0,26	0,86
Extractivos alcohol benceno	0,96	0,00
Extractivos agua	0,72	-0,08
Solubles en hidróxido de sodio	0,79	-0,26
Lignina insoluble	-0,16	0,77
Lignina soluble	0,41	-0,63
Celulosa	-0,92	-0,14

El factor 1 explicó el 45% de la varianza y está ligado a las variables que miden características en las maderas que tienen que ver con la capacidad de tracción de las fibras como longitud de fibras y celulosa, y además, con la cantidad de extractivos.

El factor 2 explicó el 25% de la variación y se asoció a la cantidad de lignina insoluble y soluble, y dentro de las características celulares se relacionó con la densidad de la madera y el lumen celular. Este factor mide, de forma indirecta, la rigidez de las fibras.

En la figura VI. 13 se observa como se distribuyen las variables con relación a los dos factores. Las variables que se agrupan en un sector se encuentran muy correlacionadas entre sí. Así, por ejemplo, se aprecia que los extractivos en agua, alcohol benceno y solubles en hidróxido de sodio, se encuentran altamente correlacionados entre sí, y participan en el extremo positivo del factor

1. Las variables que también se relacionan con el factor 1, pero en el extremo opuesto son: celulosa y longitud de fibras. El factor 2 está ligado al contenido de lignina soluble e insoluble, a la densidad de la madera y al lumen de las fibras.

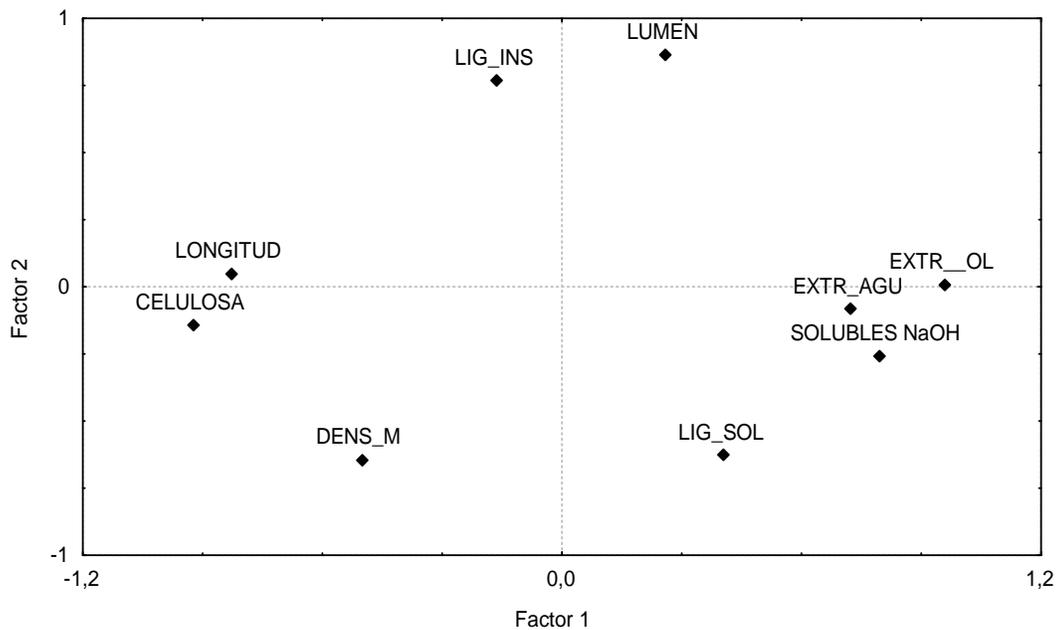


Fig. VI.13. Factor 1 vs. Factor 2 de PCAm1 con propiedades de la madera

En un segundo análisis (PCAm2), se agregaron variables que indican el estado de deterioro de la madera (podredumbre y marcas de inundación) y tilosis. Con una extracción de 3 componentes se explica el 81% de la varianza. La tabla VI.4 muestra la relación de los factores con las variables originales.

Tabla VI.4. PCAm2 con propiedades de la madera

	Factor 1M	Factor 2M	Factor 3M
Densidad básica	0,45	0,62	0,52
Longitud de fibras	0,69	0,41	-0,46
Lumen	-0,23	-0,61	-0,60
Extractivos alcohol benceno	-0,93	-0,17	0,05

Extractivos agua	-0,84	0,32	-0,13
Solubles en hidróxido de sodio	-0,77	0,01	0,53
Lignina insoluble	0,19	-0,62	0,01
Celulosa	0,94	0,09	0,01
Vasos	-0,30	0,68	-0,56
Podredumbre	-0,08	-0,51	-0,65
Inundación	0,58	-0,77	0,19
Tilosis	-0,07	-0,69	0,48

El componente 1 (factor 1) explicó el 36% de la varianza y está ligado positivamente a la longitud de fibras y celulosa, y negativamente a los extractivos y solubles en NaOH. Las anomalías no se asociaron a este factor.

El factor 2 explicó el 27% de la variación total y, como en el PCAm1, se asoció con las características que miden la rigidez de las fibras como densidad, lumen celular y lignina insoluble. Las variables tilosis y marcas de inundación se asociaron negativamente con este factor y estarían contrarrestando el efecto de las otras variables.

El componente 3 absorbió el 18% de la varianza y se correlacionó en forma negativa con la podredumbre y el lumen celular y en cierto grado con el porcentaje de vasos.

En la Fig. VI.14 a 16 se grafica la distribución de las variables con relación a los 3 factores.

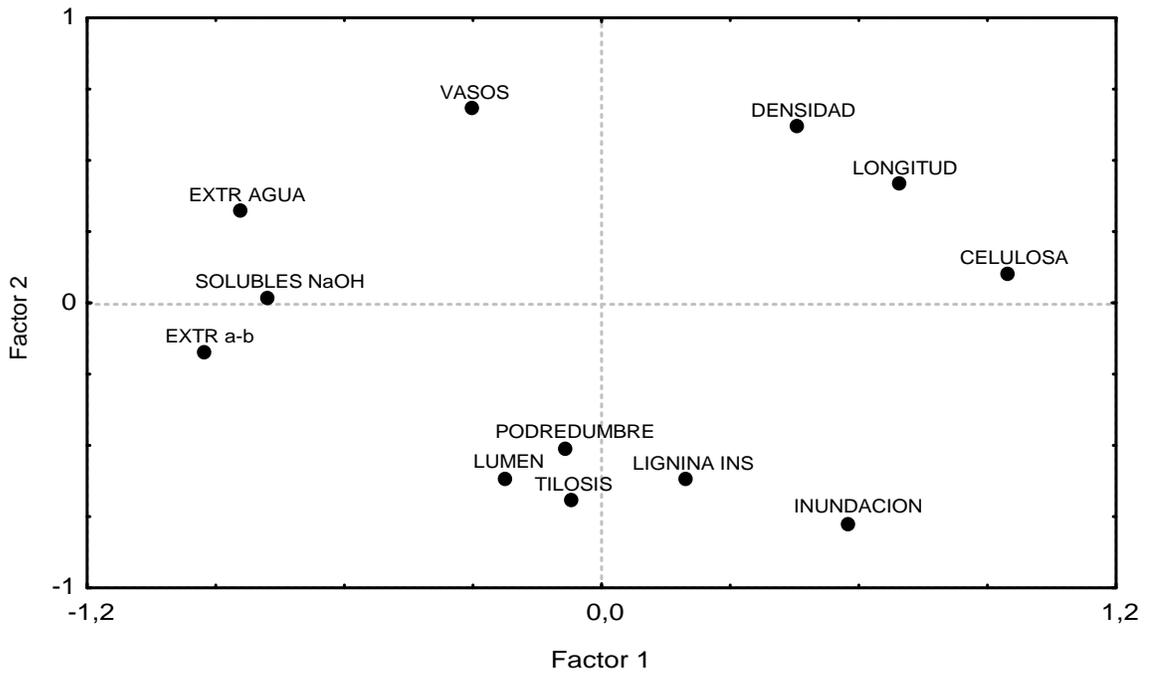


Fig. VI.14. Factor 1 vs. Factor 2 de PCAm2 con propiedades de la madera

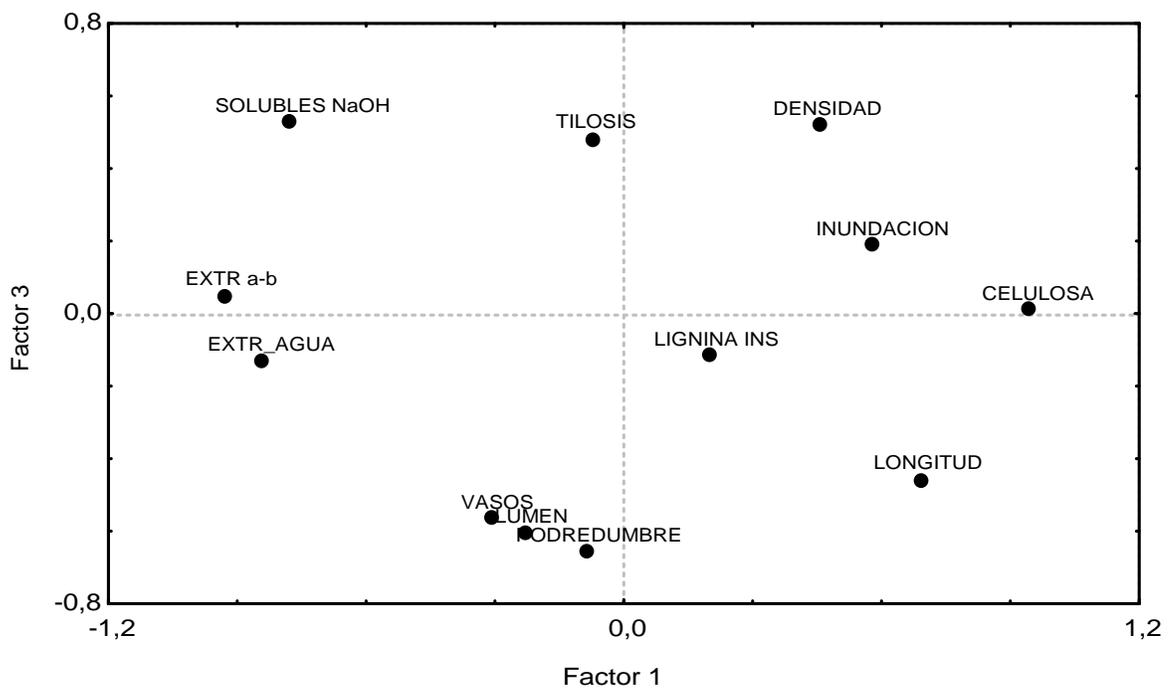


Fig. VI.15. Factor 1 vs. Factor 3 de PCAm2 con propiedades de la madera

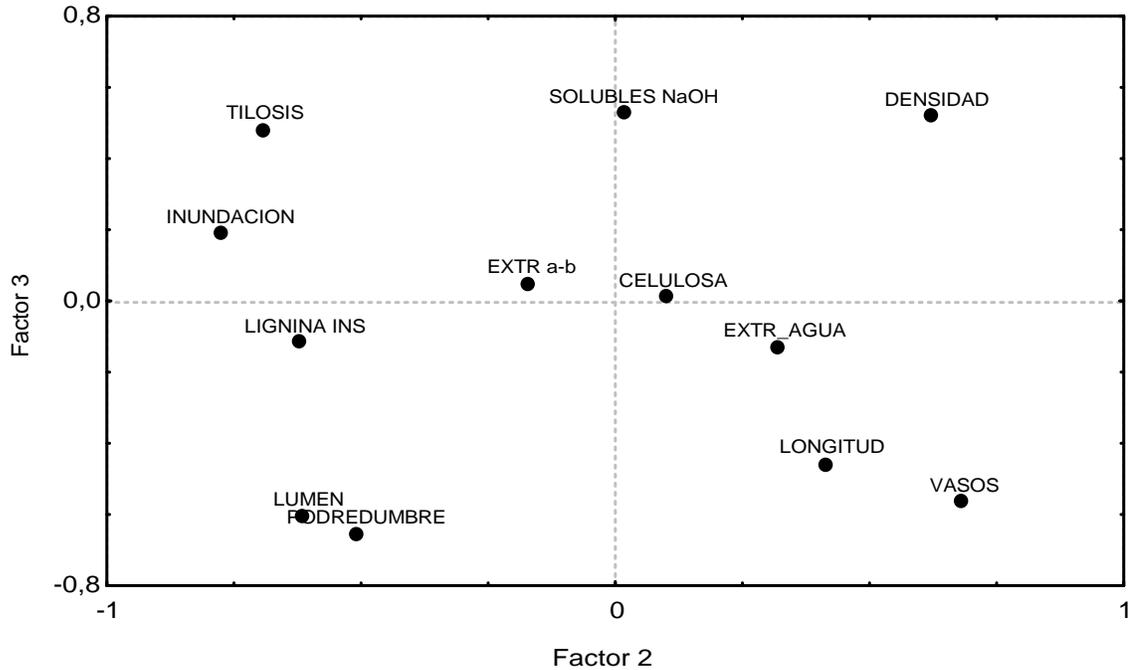


Fig. VI.16. Factor 2 vs. Factor 3 de PCAm2 con propiedades de la madera

2. 2- PCA de Pulpa

Realizando una primera extracción de 3 factores (PCAp1) al conjunto de variables de la pulpa, obtenemos que un porcentaje de varianza explicada del 86% (tabla VI. 5).

Tabla VI.5. PCAp1 con propiedades de las pulpas

	Factor 1P	Factor 2P	Factor 3P
Densidad aparente	-0,88	0,30	-0,02
I. Explosión	-0,82	0,42	0,06
I. Tracción	-0,93	0,16	-0,09
Resistencia intrínseca fibras	-0,80	0,28	-0,33
Opacidad	-0,44	-0,77	-0,41
k	-0,44	-0,89	-0,08
s	-0,46	0,12	-0,64

Blancura	0,39	0,85	-0,12
R50	-0,79	0,41	0,21
R100	0,40	0,10	-0,80
R270	-0,80	-0,33	0,39

El factor 1 explicó el 46% de la variación y está asociado con la tracción, explosión, densidad aparente, resistencia intrínseca de las fibras y con la fracción de fibras enteras R50 y de finos R270 (Fig.VI.17 y 18).

El factor 2 explicó el 25% de la variación y está asociado con las propiedades ópticas, como opacidad, blancura y k (Fig. VI.17 y 19).

El factor 3 asumió el 14% de la variabilidad y está asociado con la fracción de clasificación que representa las fibras cortadas (R100) y con coeficiente de dispersión s (Fig. VI. 18 y 19).

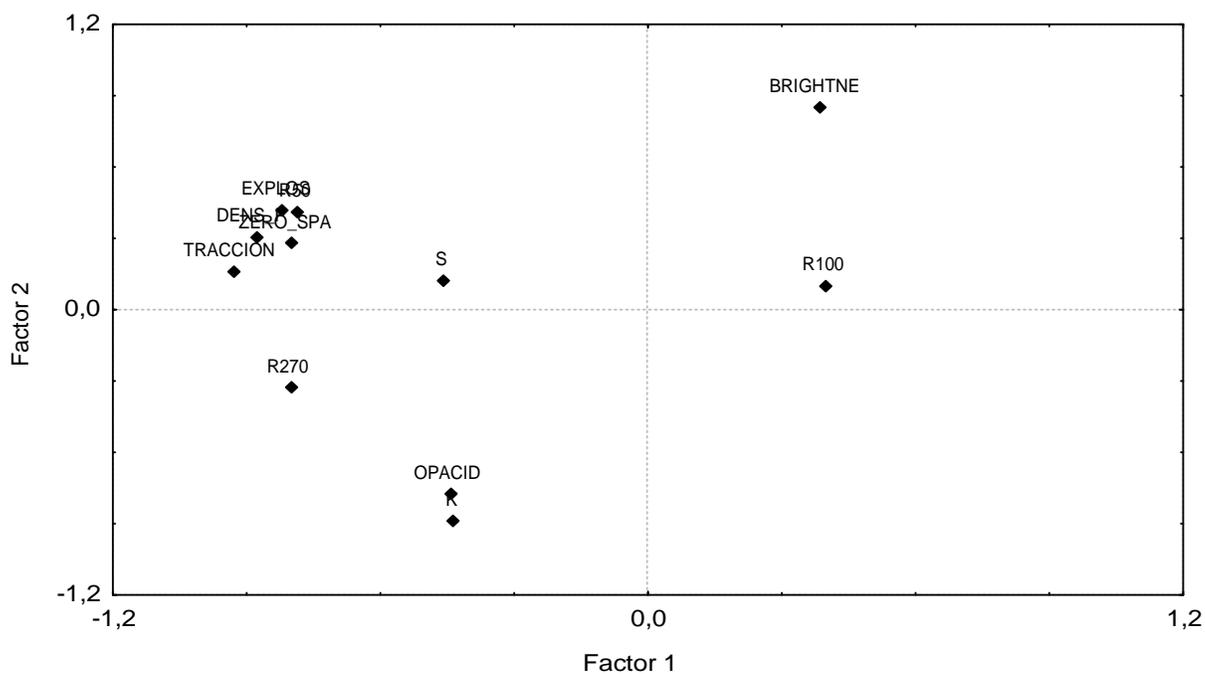


Fig. VI.17. Factor 1 vs. Factor 2 de PCA con propiedades de las pulpas

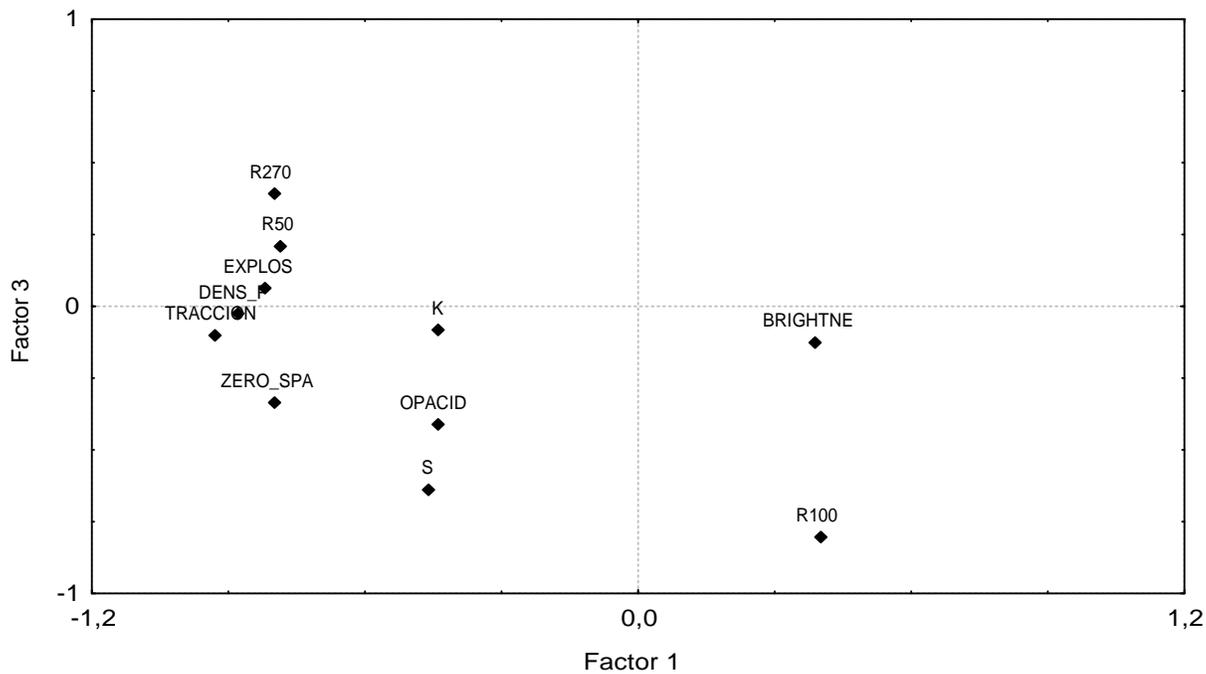


Fig. VI.18. Factor 1 vs. Factor 3 de PCA con propiedades de las pulpas

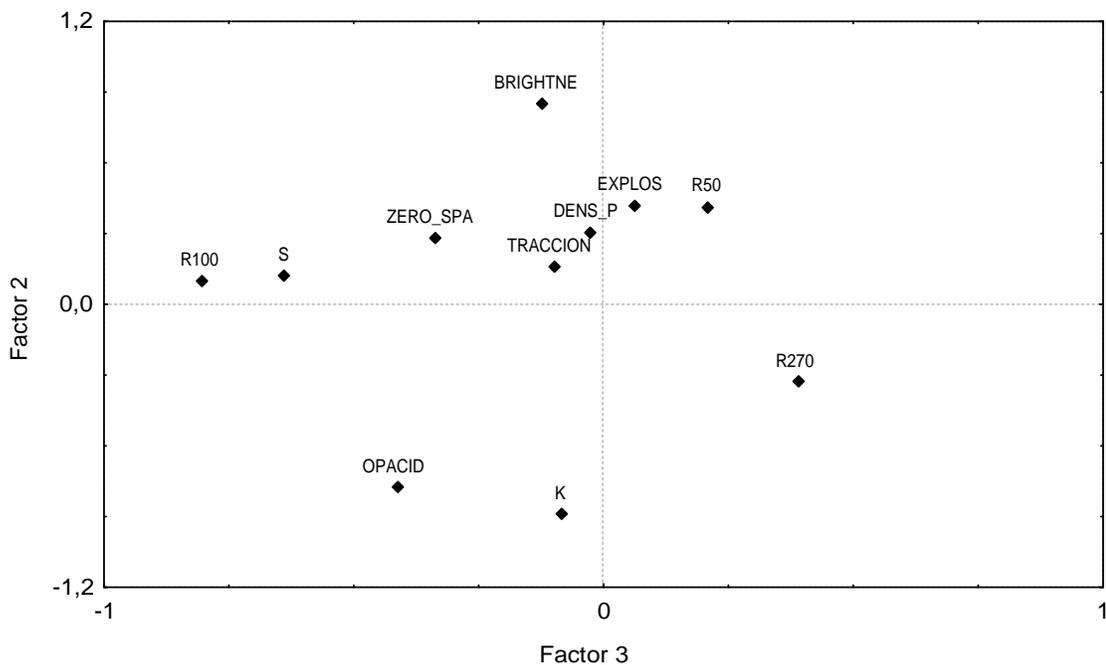


Fig. VI.19. Factor 3 vs. Factor 2 de PCA con propiedades de las pulpas

Realizando una segunda extracción de 3 factores (PCAp2) al conjunto de variables de la pulpa junto a las anomalías (podredumbre, inundación y tilosis), obtenemos un porcentaje de varianza explicada del 74% (tabla VI. 6).

Tabla VI.6. PCAp2 con propiedades de las pulpas

	Factor 1P	Factor 2P	Factor 3P
Rasgado	-0,37	-0,43	-0,68
Tracción	-0,92	-0,18	0,01
Resistencia intrínseca fibras	-0,77	-0,21	-0,06
Opacidad	-0,43	0,78	0,18
Blancura	0,42	-0,80	0,07
WRV	0,29	0,52	-0,66
R50	-0,80	-0,46	0,12
R270	-0,76	0,22	0,44
P150	0,40	0,26	0,74
Podredumbre	-0,29	0,53	-0,53
Inundación	-0,52	0,55	0,08
Tilosis	0,30	0,57	-0,11

El factor 1 explicó el 32% de la variación y está asociado con la tracción, resistencia intrínseca de las fibras y fracciones de fibras enteras R50 y de finos R270 (Fig.VI. 20 y 21).

El factor 2 explicó el 25% de la variación y está asociado con las propiedades ópticas (opacidad y blancura) y con las anomalías (podredumbre, tilosis y marcas de inundación), (Fig. VI.20 y 22).

El factor 3 asumió el 17% de la variabilidad y está asociado con el rasgado, con la fracción de fibras cortadas y finos (P150), con el WRV y con el nivel de podredumbre (Fig. VI. 21 y 22).

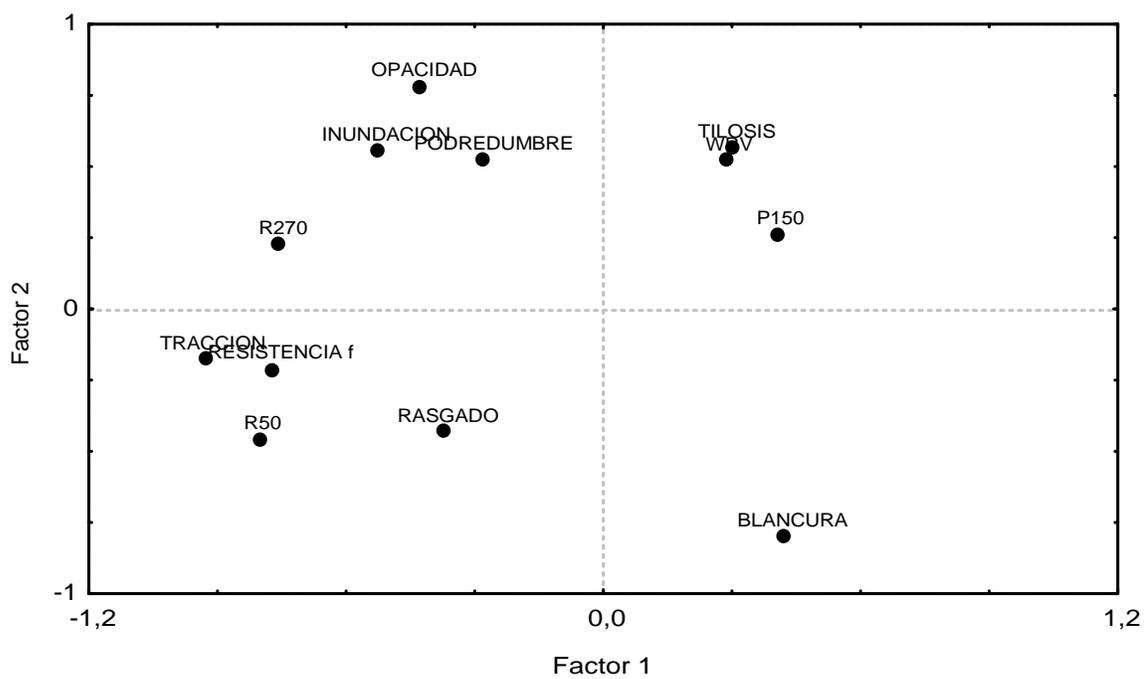


Fig. VI.20. Factor 1 vs. Factor 2 de PCAp2 con propiedades de las pulpas

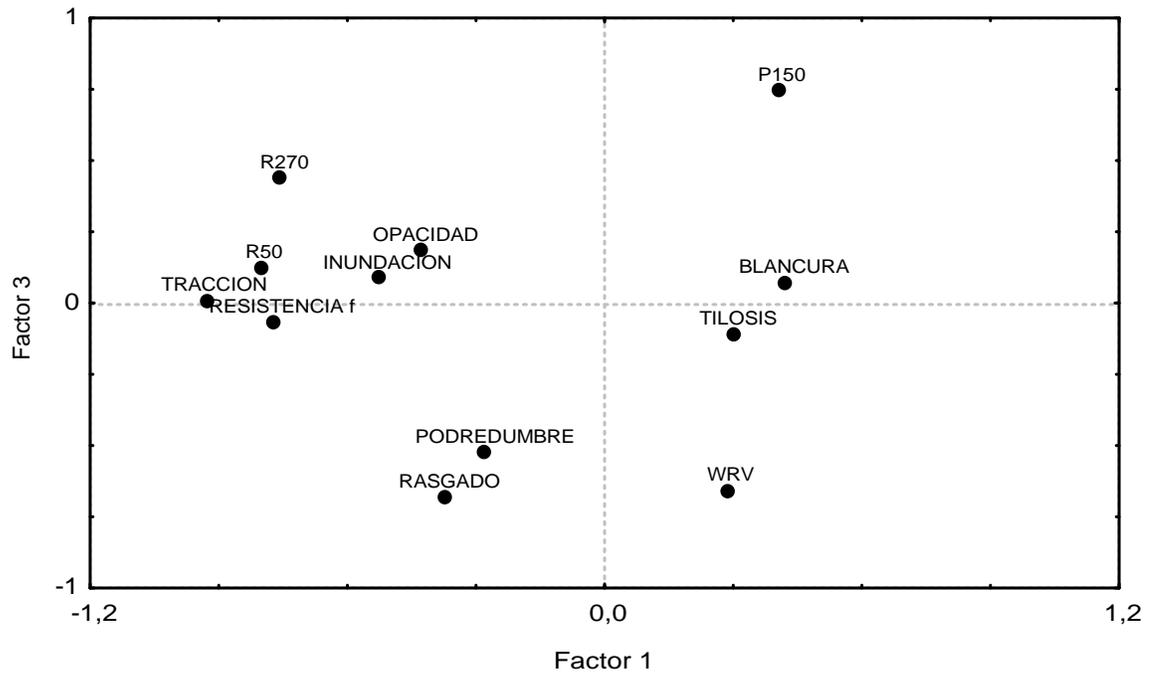


Fig. VI.21. Factor 1 vs. Factor 3 de PCAp2 con propiedades de las pulpas

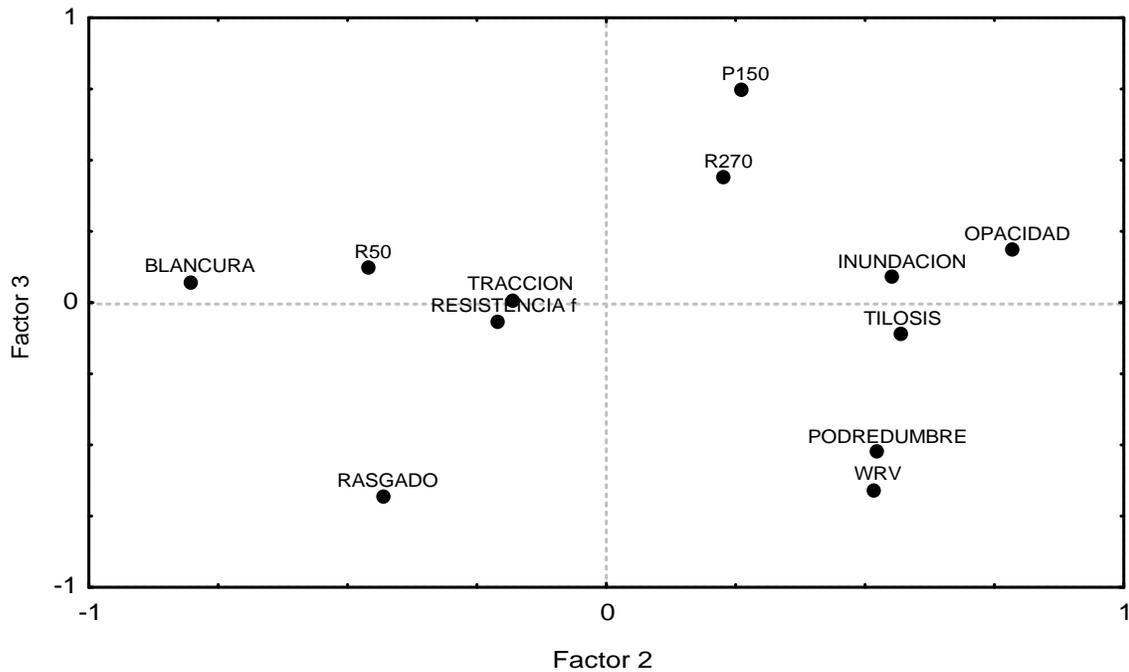


Fig. VI.22. Factor 3 vs. Factor 2 de PCAp2 con propiedades de las pulpas

2. 3- PCA completo

Un nuevo análisis de componentes principales con las variables de madera y de pulpas (PCAc) más significativas (según los PCA anteriores,) presentó las siguientes cargas en 3 factores (tabla VI.7).

Con la extracción de 3 factores explicamos el 78 % de la variación hallada. El primer factor explicó el 41% y está asociado con la longitud de fibras, la celulosa y los solubles en NaOH, dentro de las características de la madera, y con tracción, resistencia intrínseca de las fibras, y fracciones R50 y R270, considerando las propiedades de la pulpa.

Tabla VI.7. PCAc con propiedades de la madera y de las pulpas

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Rasgado	-0,32	-0,75	0,27
Tracción	-0,87	-0,08	0,31
Resistencia intrínseca fibras	-0,73	-0,20	0,39
Opacidad	-0,22	0,68	0,57
R50	-0,85	-0,22	-0,15
R270	-0,78	0,51	-0,09
P150	0,31	0,71	-0,34
Densidad	-0,29	-0,10	-0,79
Longitud de fibras	-0,76	0,22	-0,47
Solubles en hidróxido de sodio	0,81	-0,18	-0,05
Lignina insoluble	-0,04	0,88	0,20
Celulosa	-0,87	-0,00	-0,17

El segundo factor asumió el 23 % de la variabilidad, y está relacionado con la cantidad de lignina insoluble dentro de las variables de la madera y con el rasgado, opacidad y fracción P150 dentro de las pulpas.

El factor 3 está asociado con la densidad de la madera, y explicó el 14% de la variación.

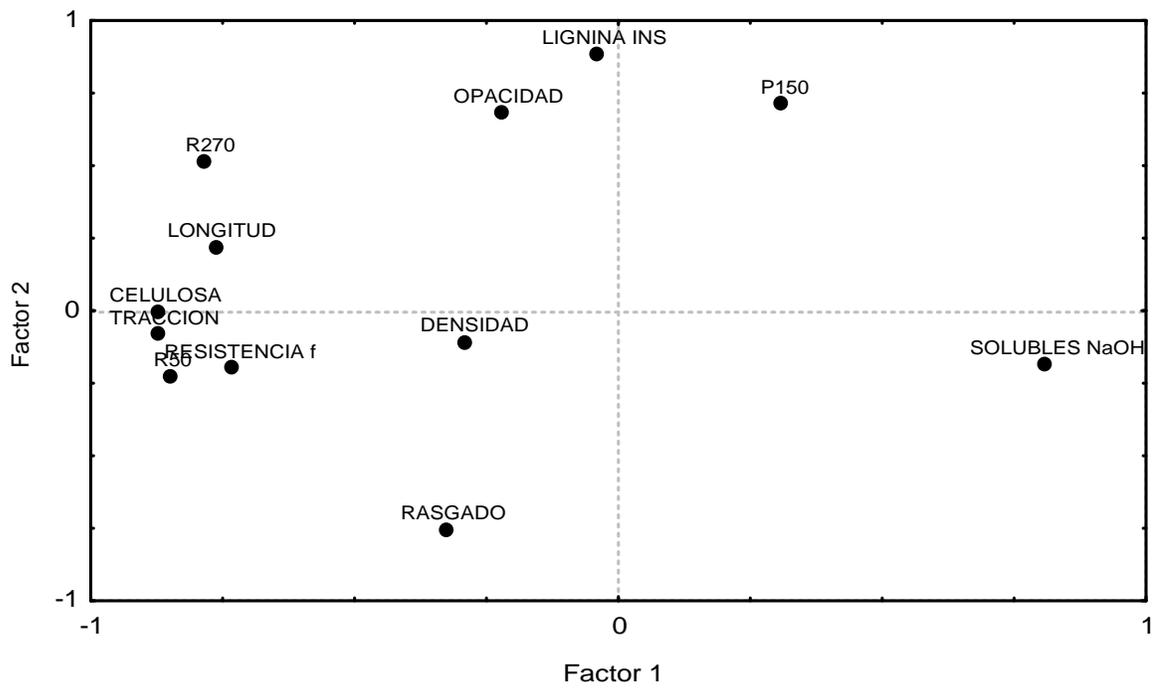


Fig. VI.23. Factor 1 vs. Factor 2 de PCA con propiedades de la madera y de las pulpas

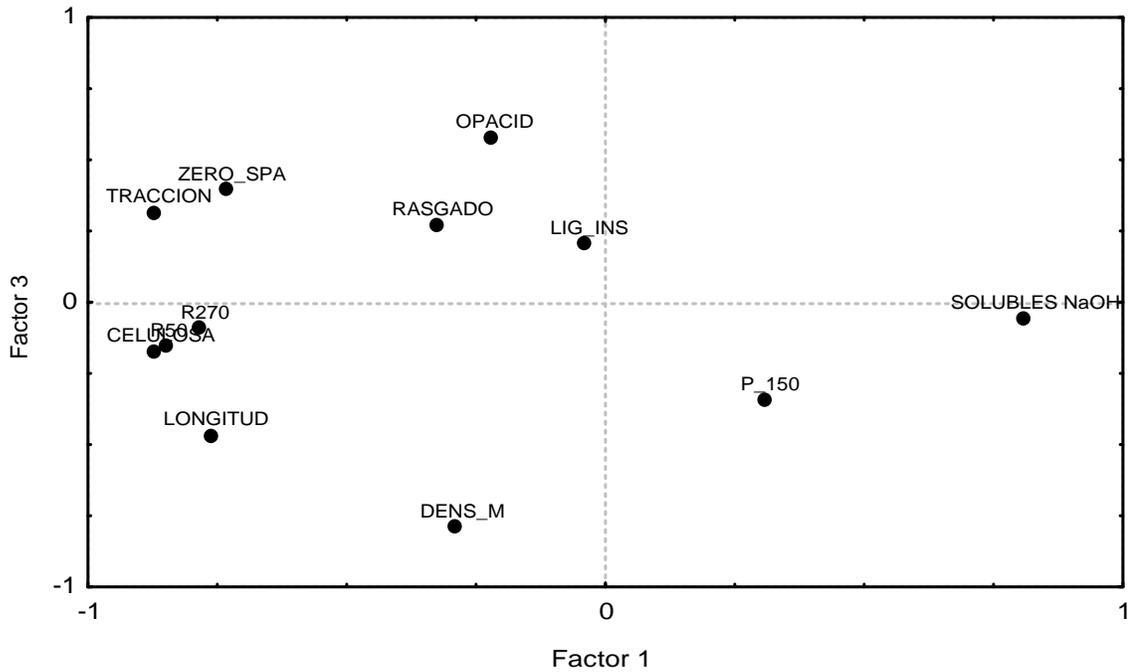


Fig. VI.24. Factor 1 vs. Factor 3 de PCA con propiedades de la madera y de las pulpas

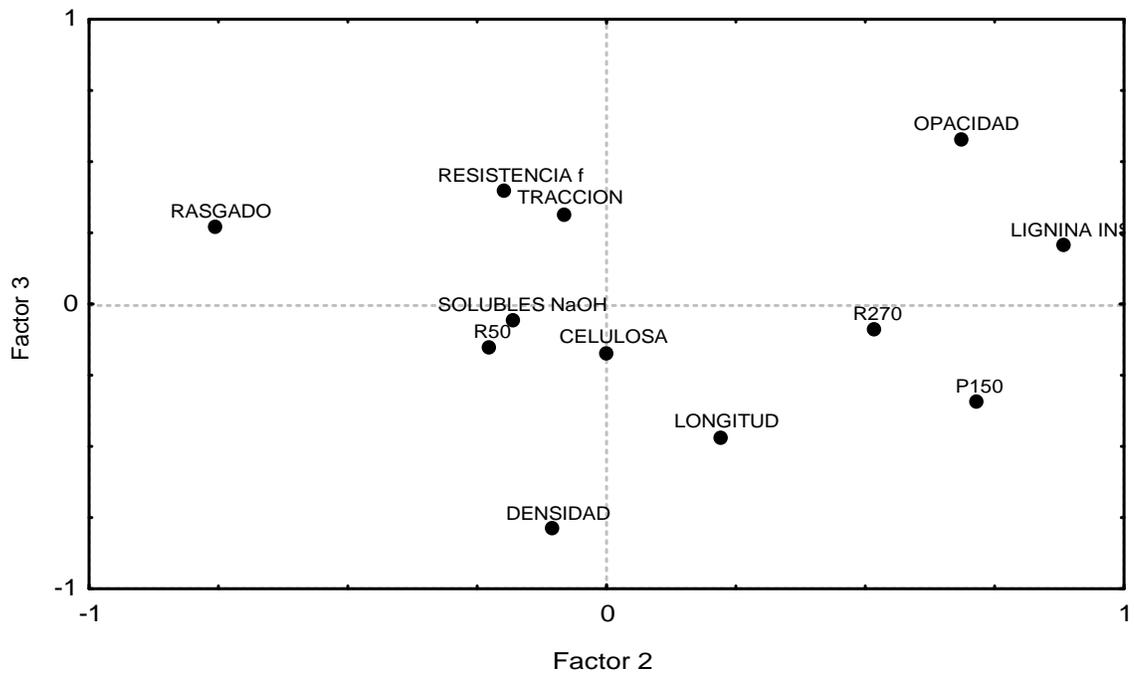


Fig. VI.25. Factor 3 vs. Factor 2 de PCA con propiedades de la madera y de las pulpas

2.4- Correlaciones

Se establecieron correlaciones entre los factores del PCA de madera y las propiedades de las pulpas.

Realizando una correlación entre las propiedades de las pulpas y los factores 1 y 2 del PCAm1 de madera (a través de los valores de posición de cada clon en los ejes o “factors scores”), obtenemos las correlaciones que se presentan en la tabla VI.5.

Las correlaciones indicaron que, las características que miden las propiedades físicas, resistencia y granulometría de las pulpas, (densidad, Índices de Tracción y Explosión, R50, R100 y R270), se asociaron al factor 1M₁. En cambio, las características ópticas de las pulpas (opacidad, k y blancura), se asociaron al factor 2M₁.

Tabla VI.5. Matriz de correlación entre Factores 1M₁ y 2M₁ del PCAm1 y propiedades de las pulpas.

	Densidad	Explosión	Tracción	Opacidad	k	Blancura	R50	R100	R270
Factor 1M ₁	-0,52*	-0,58*	-0,59*	-0,12	-0,16	0,01	-0,67*	0,55*	-0,74*
Factor 2M ₁	0,06	0,26	-0,12	-0,73*	-0,85*	0,84*	0,11	0,30	-0,42

* significativo p<0,05

Factor 1M: longitud de fibras, celulosa, extractivos y solubles en NaOH

Factor 2M: lignina insoluble y soluble, lumen y densidad

El Índice de Rasgado y el coeficiente s no presentaron correlaciones significativas con ninguno de los factores. Tampoco lo hicieron las fracciones R30, R150 y P150.

Una segunda prueba de correlación entre los factores 1 y 2 del PCAm2 de madera (que incluye a las anomalías) y las propiedades de las pulpas, se presenta en la tabla VI.6.

Tabla VI.6. Matriz de correlación entre Factores 1M₂ y 2M₂ del PCAm2 de madera y propiedades de las pulpas.

	Densidad	Explosión	Tracción	Opacidad	k	Blancura	R50	R100	R270
Factor 1M ₂	0,51*	0,58*	0,55*	0,27	0,47	-0,04	0,68*	-0,39	0,71*
Factor 2M ₂	0,19	0,20	0,06	-0,70*	-0,72*	0,63*	0,23	-0,16	-0,08
Factor 3M ₂	-0,13	-0,14	-0,43	-0,06	-0,31	0,54	-0,13	0,63*	-0,42

* significativo p< 0,05

Factor 1M: longitud de fibras, celulosa, extractivos y solubles en NaOH

Factor 2M: lignina insoluble, lumen, densidad, vasos, inundación y tilosis

Factor 3M: podredumbre y lumen

Las correlaciones indican que al factor 1M₂ se asociaron las características que miden las propiedades físicas y de resistencia de las pulpas y las que miden la granulometría, como son, densidad, Índices de Tracción y Explosión, R50 y R270. En cambio, al factor 2M₂ se asociaron las características ópticas de las pulpas: opacidad, k y blancura. El factor 3M₂ correlacionó con la fracción de fibras cortadas R100.

Rasgado y s no presentaron correlaciones significativas con ninguno de los factores. Tampoco lo hicieron las fracciones R30, R150 y P150.

La incorporación de las anomalías (podredumbre, marcas de inundación y tilosis) a las características de la madera, no ayudaron a elevar las correlaciones. Por el contrario, los coeficientes fueron inferiores en la mayoría de los casos.

Por primera vez, surgen correlaciones significativas entre variables que incluyen las propiedades de la madera y las propiedades de las pulpas. Este tipo de correlaciones, en donde las variables de la madera están consideradas como un conjunto dentro de los factores de los PCA, incorpora en su análisis la estructura y relación de los datos, lo cual permite encontrar relaciones significativas.

2.5- Regresiones

Se establecieron regresiones entre los factores de los PCA de maderas y las variables de las pulpas, para hallar modelos de predicción de las propiedades de estas últimas. De esta manera, obtenemos ecuaciones de ajuste considerando múltiples variables independientes dentro de la estructura de las nuevas variables que nos brinda el PCA (Factores). Es una forma de solucionar los problemas de colinealidad de las variables independientes, surgido en el capítulo V con las regresiones múltiples.

Realizando regresiones lineales y cuadráticas entre los factores del PCA_{m1} de madera y las propiedades de las pulpas, obtenemos las ecuaciones de la tabla VI.7.

Tabla IV.7. Ecuaciones de regresión lineales y cuadráticas entre los factores 1 y 2 del PCAm1 de maderas (F1₁ y F2₁) y propiedades físicas de las pulpas

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	$- 0,32 F1_1^2 + 0,46 F2_1^2$	50	-
IR	Ns	-	-
IT	$- 0,68 F1_1$	56	Sin fila 10
IE	$- 0,68 F1_1$	54	Sin fila 10
Blancura	$- 0,27 F1_1 - 0,27 F1_1^2 - 0,86 F2_1$	90	Sin fila 5
Opacidad	$- 0,38 F1_1 + 0,53 F2_1$	72	Sin fila 11
s	Ns	-	-
k	$- 0,43 F1_1^2 + 0,78 F2_1$	84	Sin fila 12

Ns: no significativa

Los R² fueron más bajos que los obtenidos con las regresiones múltiples (capítulo V). Solo las propiedades ópticas tuvieron R² mayores de 70.

Con rasgado y s no se consiguieron ecuaciones significativas.

Si realizamos un tercer PCA de madera (PCAm3) agregando a las variables anteriores la resistencia individual de las fibras, obtenemos los factores F1₃ y F2₃. Realizando nuevas regresiones entre estos factores y las propiedades de las pulpas obtenemos las ecuaciones de la tabla VI.9.

Algunas de las propiedades (tracción y opacidad) aumentaron sus R² con la incorporación de la resistencia individual de las fibras. Esto refuerza los resultados hallados en el capítulo V de regresiones múltiples, donde esta variable, considerada en estos análisis como “independiente”, se presentó en la mayoría de los ajustes hallados.

Tabla IV.9. Ecuaciones de regresión, lineales y cuadráticas, entre los factores 1 y 2 del PCAm3 de maderas y resistencia individual de las fibras (F_{1_3} y F_{2_3}) con las propiedades físicas de las pulpas

Propiedad	Ecuación	R ²	Nota
Vol. Esp.	Ns	-	-
IR	Ns	-	-
IT	- 0,69 F_{1_3}	59	Sin fila 10
IE	- 0,60 $F_{1_3} + 0,32 F_{2_2} - 0,22 F_{2_3}^2$	78	Sin fila 10
Blancura	+ 0,78 F_{2_3}	61	-
Opacidad	- 0,43 $F_{1_3} - 0,57 F_{2_2} + 0,22 F_{2_3}^2$	81	Sin fila 11
s	Ns	-	-
k	+ 0,21 $F_{1_3}^2 - 0,68 F_{2_3}$	77	Sin fila 11

Ns: no significativa



CONCLUSIONES

Análisis descriptivos – ANOVAS

Los análisis de la varianza realizados para todas las variables (variables de crecimiento, de madera y de pulpas), demostraron la existencia de diferencias significativas entre sitios y entre clones.

Las condiciones del sitio Delta fueron claramente superiores para el cultivo de sauces.

Las curvas de los incrementos corrientes anuales (ICA) en área basimétrica indicaron que el sitio de implantación y el clon juegan un rol preponderante en el año de culminación de crecimiento. Las curvas del sitio Delta presentaron su máximo crecimiento a menor edad, comparadas con el sitio continental. El único clon que exhibió curvas similares en ambos sitios fue el sauce americano. Este retardo en el crecimiento inicial, puede ser conveniente para la calidad de madera. Algunas características de importancia tecnológica (como longitud de fibras y densidad de la madera) incrementan su magnitud con la edad de la planta. Por lo tanto, los clones que presenten la mayor producción de madera a edades mayores, proporcionarán madera de mejor calidad.

En el caso del sitio Delta, el sauce americano y el híbrido 26992 fueron los únicos que presentaron estas características.

Lo anterior es un indicativo de que, pese a ser genomas derivados de cruzamientos con iguales progenitores, los caracteres de crecimiento y de la madera no se heredan de la misma forma. Se demuestra, entonces, la importancia de realizar selecciones de tipo múltiple que incorporen variables de crecimiento y de calidad de la madera.

La ausencia de correlaciones significativas entre crecimiento y propiedades de la madera, como longitud de fibras y densidad básica, indicaron que es posible la selección de estos caracteres en forma independiente. Los clones de sauces pueden seleccionarse por vigor, sin desmejorar la calidad del leño.

La densidad básica de la madera presentó modelos de variación axial y radial dentro del árbol que dependen del clon estudiado. Pese a esto, la determinación de la densidad a la altura del pecho (1,3m) fue representativa del árbol completo.

La longitud de fibras presentó modelos de variación axial y radial uniformes en todos los clones. Los modelos indicaron un descenso de la longitud de fibras de poca magnitud, desde la base hacia el ápice; y un aumento marcado de médula a corteza. La longitud de fibras, tomada a la altura del pecho en varias posiciones radiales (1,3m) fue representativa del árbol completo.

La morfología de fibras competa indicó que el sauce americano es el clon que presenta las fibras más grandes, de mayor longitud, ancho y espesor de pared. En cambio, el clon 26992 presentó características contrarias. El híbrido 13-44 exhibió la peor combinación de caracteres: longitud de fibras, diámetros de fibra y lumen bajos, y elevado espesor de pared.

Las fibras del sitio Continental fueron, en general, más rígidas (menor índice de flexibilidad y mayor índice de runkel). El sauce americano, de ambos sitios, presentó la menor flexibilidad, seguido por el híbrido 13-44. Esto podría marcar una diferencia en las propiedades de las pulpas químicas, pero no en pulpas quimimecánicas, en que las fibras no colapsan por deslignificación.

Comparativamente con otras latifoliadas, los sauces poseen una alta proporción de fibras, debido principalmente a la ausencia de parénquima axial que limita este tejido sólo a los radios uniseriados. El factor sitio afectó claramente el porcentaje de tejidos, siendo el sitio Delta más favorable para la industria papelera por su elevado porcentaje de fibras.

Si consideramos la composición química, los clones del sitio Delta presentaron los menores contenidos de extractivos totales y elevado porcentaje de celulosa. Dentro de este sitio, se destacó el sauce americano con muy bajo contenido de extractivos y solubles, y alta proporción de celulosa.

En general, puede decirse que el deterioro sufrido por hongos es más pronunciado en el sitio Delta. En la madera de ambos sitios, y en todos los clones, se detectó la presencia de pudrición blanca selectiva y simultánea. En ningún caso el ataque fue severo. Aunque no fue debidamente cuantificado, no parece existir relación entre podredumbre y resistencia de las pulpas.

Los clones del sitio Delta se destacaron por sus resistencias, pero las blancuras de las pulpas fueron en general más bajas que en los clones del sitio Continental.

Las pulpas de sauce americano mostraron mayores resistencias que las de otros clones. Sin embargo, no se destacaron en sus propiedades ópticas. La excepción fue la blancura medida en los árboles del sitio Continental, de menor estacionamiento.

Considerando las resistencias, podrían seleccionarse los clones 250-33 y 26992 del sitio Delta y el sauce americano de ambos sitios. En cambio, analizando las propiedades ópticas, los clones 13-44 y 131-27 del sitio Delta presentaron la mejor combinación de blancura y opacidad.

Correlaciones

Las correlaciones entre variables dendrométricas indicaron que pueden seleccionarse clones con buena altura, buen DAP y bajo contenido de corteza.

De acuerdo con las correlaciones halladas, las maderas con mayor densidad básica tendrían mayor longitud de fibras, espesor de pared y menor lumen. Por lo tanto serían más rígidas y se colapsarían menos.

Existe una elevada correlación juvenil-adulto entre los caracteres de crecimiento y algunas propiedades de la madera (longitud de fibras y densidad). Esto hace posible evaluar precozmente la calidad de los clones, para seleccionar en forma temprana aquellos individuos con características deseadas para su uso final.

En el caso de los clones estudiados, se podría realizar una selección por vigor, densidad básica de la madera y longitud de fibras a los 2 años.

Las relaciones halladas entre morfología fibrosa e índices papeleros fueron las esperadas, y estarían indicando la poca capacidad de colapso de las fibras. Pese a esto, en ningún caso se evidenció una relación clara entre las propiedades de resistencia de las pulpas quimimecánicas y los índices papeleros calculados.

La lignina insoluble correlacionó negativamente con la blancura y positivamente con la opacidad de las pulpas. Los extractivos, en cambio, no se relacionaron significativamente con las propiedades ópticas. El contenido de celulosa influyó significativamente en la resistencia a la tracción, a la explosión, elongación, TEA y resistencia intrínseca de las fibras. Estas relaciones no se establecieron con los otros componentes de la pared celular.

Modelos predictivos - Regresiones

Ninguna característica de la madera explicó por sí sola el comportamiento de las pulpas quimimecánicas de *Salix*.

La fracción retenida en 50 mesh presentó mejor ajuste que la suma de las fracciones R30 y R50. La resistencia intrínseca de las fibras fue un factor preponderante en las ecuaciones de regresión, seguido de la fracción de finos retenida en 270 mesh.

Las resistencias y propiedades ópticas de las pulpas quimimecánicas de latifoliadas no respondieron a los mismos parámetros de granulometría que las pulpas mecánicas puras de coníferas (Factor L de Forgacs).

El lumen, la longitud de fibras, la densidad básica, la lignina insoluble y el contenido de celulosa y solubles en hidróxido de sodio fueron las cualidades de la madera que mejor predicen la calidad de las pulpas quimimecánicas de sauces.

Análisis multivariado

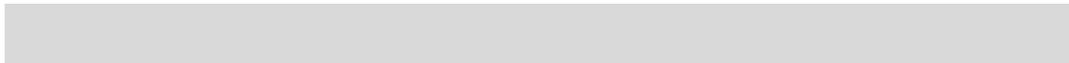
Las asociaciones encontradas con diferentes técnicas de análisis multivariado confirman las relaciones halladas a partir de otras metodologías estadísticas.

Ciertas propiedades de la madera se asociaron, en todos los casos, con determinadas características de las pulpas. Así la lignina insoluble y el lumen celular se relacionan siempre con la opacidad, mientras que los extractivos, solubles en NaOH y densidad de la madera se asocian con el rendimiento en pulpa; y las propiedades de resistencia mecánica, como tracción y rasgado, lo hacen con longitud de fibras, contenido de celulosa, resistencia intrínseca de las fibras y fracciones de clasificación R50 y R270.

General

El sitio de implantación ha demostrado tener gran incidencia en la mayoría de las propiedades de las maderas y de las pulpas en Salix. Dentro de un mismo sitio, genomas emparentados presentan respuestas diferentes de crecimiento y propiedades. Los diferentes clones de sauces no pueden considerarse una materia prima uniforme para la industria de la pulpa y papel. Las estrategias para un buen aprovechamiento del recurso deben sustentarse en selecciones múltiples que incluyan determinaciones a varios niveles (crecimiento y madera).

A diferencia de las pulpas mecánicas puras, la utilización de ciertas características físicas, químicas y anatómicas de la madera permiten predecir, en forma razonable, muchas de las propiedades de las pulpas quimimecánicas. Por este motivo, pueden utilizarse como un primer criterio de selección para obtener materias primas con mejores propiedades mecánicas y ópticas.



CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

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

Alonzo A. E. 1980. Salix nigra: un interesante productor de madera y de pasta celulósica. AFOA 34 : 53-62

Amidon T. E. 1981. Effects of the wood properties of hardwoods on kraft paper properties. Tappi Journal 64 :123-126.

Area M. C. 1990. Dimensiones transversales de traqueidas ¿Qué se mide?. 26º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p.455-467.

Area M. C. 2002. Procesos de pulpado y pulpas de alto rendimiento. Apuntes de la Maestría en Madera Celulosa y Papel (inédito), 78pp.

Area M. C., G. B. Gavazo. 1990. Caracterización y propiedades de pulpas de alto rendimiento. 26º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p.469-483.

Arreghini R. y T. Cerrillo. 1996. Los sauces en la República Argentina. Proceedings 20th Session of International Poplar Comisión, vol II, p.742-768.

Baraño J. J., A. M. Garau y R. E. Ayarza. 1983. Crecimiento comparado entre Salix babylonica x Salix alba cv 131-25 y Populus x euroamericana cv Conti

12 en el Partido de Luján-Prov. De Bs. As. 1º Congreso Forestal Argentino, La Pampa, p. 1109-1115.

Barnett J. R. y G. Jeronimidis. 2003. Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing and CRC Press. 226pp.

Bonavía de Guth E. y A. Ragonese. 1980. Evaluación de las características del leño en relación a la calidad del papel de algunos híbridos de sauces obtenidos en Castelar (INTA). IDIA septiembre-octubre 1980, p. 25-30.

Bonavía de Guth E. 1981. Características del leño de varias especies e híbridos de *Salix* en apoyo a la obtención de buenos clones papeleros. 17º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Tomo 1, p.F25-F32.

Bonavía de Guth E. 1982. Evaluación de varios híbridos obtenidos por cruzamiento de *Salix alba* x *S. matsudana*. 18º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p.19-30.

Bonavía de Guth E. 1984. *Salix nigra*: características del leño según zonas de implantación en el Delta del Paraná. 20º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p.17-86.

Bonavía de Guth E. 1987. Obtención y evaluación de nuevos clones de sauces y álamos en relación a su uso celulósico. 23º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p. 43-60.

Bonavía de Guth E. y C. M. Piussan. 1987. Variación de las características del leño del individuo en *Salix nigra* cultivado en el Delta del Paraná. Simposio

sobre Silvicultura y Mejoramiento Genético de especies forestales. CIEF Tomo IV, p.219-235.

Bonavía de Guth E. 1991. Variación radial de la densidad y morfología celular en Populus. 27° Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, p.491-509.

Braun R. V. y J. W. Davis. 1969. Printability and strength quality of refiner groundwood as related to wood species. Tappi Journal 52 (2) :282-288.

Bunse G. y L. Sparnochia. 1989. Asociación de características morfológicas y tecnológicas en progenies de híbridos de sauces. Primeras Jornadas sobre Silvicultura y Mejoramiento Genético del género Salix. Actas CIEF. p.44-54.

Carrasco F., B. V. Kokta, A. Ahmed y J. J. Garceau. 1991. Ultra-High-Yield Pulping: Relation Between Pulp Properties and Fiber Characteristics by Multiple Linear Regression. TAPPI Pulping Conf. (Orlando) (Book 1): 407-418.

Celulosa Argentina SA. 1968/69. Nuevos Híbridos de sauces. IDIA Suplemento Forestal, p.116-120.

Cerrillo T., G. Bunse y L. Saparnochia. 1992. Productividad de nuevos clones de sauces en el Delta Argentino. 19° Sesión de la Comisión Internacional del Alamo, Zaragoza 22 al 25/9/92. Vol.1, p.515-529.

Cerrillo T. y M. Di Meo. 1997. Nuevos híbridos de sauces – Resultados preliminares. II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Misiones. Trabajos Técnicos, Bosque Cultivado. 7pp.

- Cellini J., E. Wabo y E. Casaubon. 2001. Modelos de perfil de fuste para *Populus deltoides* cv catfish 2 y *Salix babylonica* x *Salix alba* cv. 131-27. XVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Actas en CD.
- Cortizo S. C. , E. A. Casaubon y L. B. Gurini. 1993. Análisis del comportamiento del *Salix nigra* 4 en una plantación comercial en el Delta del Paraná. I Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Entre Ríos, p.51-60
- Deka G. C., B. M. Wong y D. N. Roy. 1992. Suitability of hybrid willow as a source of pulp. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 12 :197-211.
- Deka G. C., B. M. Wong y D. N. Roy. 1994. Variation of specific gravity, fibre length and cell wall thickness in young *Salix* clones. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 14 (1) :147-158.
- Delfederico L. E. y M. C. Area. 1986. Correlación entre características microscópicas y propiedades físicas en pastas termomecánicas de *Pinus elliottii*. 22º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, tomo 2, p. 51-54.
- Downes G. M., I. Hudson, C. Raymond. 1997a. Variation in vessel size and frequency in plantation Eucalypts. In: *Sampling Plantation Eucalypts for wood and fibre properties*. Downes et al., Ed. CSIRO Publishing, Appendix 3, p.110-112.
- Downes G. M., I. L. Hudson, C. A. Raymond, G. H. Dean, A. J. Michell, L. R. Schimleck, R. Evans y A. Muneri. 1997b. *Sampling Plantation Eucalypts for wood and fibre properties*. Ed. CSIRO Publishing, Australia. 132pp.
- Eskelinen E., R. Marton. 1978. Dependence of pulp properties on wood characteristics and process variables – A correlation study of TMP And

- RMP. Empire State Paper Research Institute, Syracuse, New York. Research Report N°69, p.67-88.
- Evans R., S. Stringer y P. Kibblewhite. 2000. Variation of microfibril angle, density and fibre orientation in twenty-nine *Eucalyptus nitens* trees. *Appita Journal* 53 (5) :450-456.
- FAO. 1980. Pulping and Paper making properties of fast-growing plantation wood species. Vol 2. FAO Forestry Paper 19/2.
- French J., A. B. Conn, W. J. Batchelor y I. H. Parker. 2000. The effect of fibril angle on some handsheet mechanical properties. *Appita Journal* 53 (3) :210-215.
- Ferreira M. 1972. Variação da densidade básica da madeira de povamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. *IPEF* 4: 65-89.
- Fiaño E. 1975 a. Sauces híbridos. Pastas de alto rendimiento. *ATIPCA* 14 (2) :22-53.
- Fiaño E . 1975 b. Pastas Kraft a partir de Salicáceas. XI Convención de ATIPCA, trabajos Técnicos D2, p.439-479.
- Fiaño E.1976. Pastas de alto rendimiento de salicáceas del delta del paraná. B. Sauce americano. CICEIPA publicación n°3, 37pp.
- Fiaño E. y colaboradores. 1976. Sauces híbridos. Pastas de alto rendimiento. *Congr. Te. Lat. Am. Celulosa Papel*, p.471-493.

- Foelkel C. 1998. Eucalypt wood and pulp quality requirements oriented to the manufacture of tissue and printing & writing papers. 52° Annual General Conference, APPITA. Brisbane, Australia. 6pp.
- Forgacs O. L. 1963. The characterization of mechanical pulps. Pulp and Paper Magazine of Canada. :T89-T118.
- Franklin H. 1945. En Jane (1956).
- Garau A. M., J. J. Barañao y R. E. Ayarza. 1983. Crecimiento de dos clones del género Salix en suelos arcillosos del Partid de Luján-Prov de Bs. As. 1º Congreso Forestal Argentino, La Pampa, p.1116-1121.
- García Volonté R. y E. Suárez. 1989. Características de algunos sauces para la producción del papel para diarios. Jornadas sobre Silvicultura y Mejoramiento Genético del Género Salix. CIEF Actas, p.139-144.
- Hatton J. V. y J. Cook. 1992. Kraft pulps from second-growth Douglas-fir: relationships between wood, fiber, pulp and handsheet properties. Tappi Journal (January) :137-144.
- Heikkurinen A. y L. Leskela. 1999. The character and properties of mechanical pulps. In: Papermaking Science and Technology, Book 5: Mechanical Pulping, Series Editors J. Gullichsen & H. Paulapuro. Printed by Gummerus Printing, Jy Vaskyla, Finland.
- Hillis W. E. y M. Sumimoto. 1989. Effect of extractives on pulping. In: Natural Products of woody Plants II. Ed. J W Rowe. Springer Verlag, Berlin :880-920.

Jayne B. A. 1959. Mechanical properties of wood fibers. Tappi Journal 42 (6) :461-466.

Jane F. W. 1956. The structure of wood. Ed. Adam and Charles Black. 478 pp.

Jayne G. 1958. Properties of wood celluloses. II. Determination and significance of water retention value. Tappi Journal 41 (11) :180A-183A.

Johansson M. y G. Gellerstedt. 2000. Chromophoric content in wood and mechanical pulps. Nordic Pulp and Paper Research Journal 15 (4) :282-286.

Jones T. y J. Richardson. 1999. Relationships Between Wood and Chemimechanical Pulping Properties of New Zealand-Grown Eucalyptus nitens Trees. Appita Journal 52 (1) :51-56.

Klasnja B., S. Kopitovic, P. Poljakovic. 1997. Characteristics of kraft pulp obtained from microbiologically degraded poplar and willow wood. 3rd International Conference on the Development of Forestry, Wood Science and Technology, (ICFWS), Beograd-Goc, Proceedings vol II :517-525.

Kellogg R. M. y E. Thykeson. 1975. Predicting kraft mill paper strength from fiber properties. Tappi Journal 58 (4) :131-135.

Kim S. Y. y A. P. Singh. 2000. Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: a review. IAWA Journal 21 :135-155.

Leitch M. A., R. A. Savidge, G. M. Downes y I.L. Hudson. 1999. Induction of tyloses in Eucalyptus glubulus "chips". IAWA Journal 20 :193-201.

- Levin L. y M. A. Castro. 1988. Anatomical study of the decay caused by the white-rot fungus *Trametes trogii* (Aphyllophorales) in wood of *Salix* and *Populus*. *IAWA Journal* 19 :169-180.
- Lindholm C. A. 1980 a. Comparision of some papermaking properties of groudwood, pressure groundwood and termomechanical pulp by means of artificial blends of pulps fractions. Part. 1, Primary results. *Paperi ja Puu* 10 :593-606.
- Lindholm C. A. 1980 b. Comparision of some papermaking properties of groudwood, pressure groundwood and termomechanical pulp by means of artificial blends of pulps fractions. Part. 2, The fines fractions. *Paperi ja Puu* 12 :803-806.
- Lonnberg B. 1975. Short rotation hardwood species as whole-tree raw material for pulpa and paper. 2. Wood raw material. *Paperi ja Puu* 8 :507-516.
- Long J. M., A. B. Conn, W. J. Batchelor y R. Evans. 2000. Comparision of methods to measure fibril angle in wood fibres. *Appita Journal* 53 (3) :206-209.
- Losada O. A., A. I. Baisi, L. G. Kuhl, R. Lambardi, R. C. Kleiman y M. F. Yriart. 1973. Salicáceas: una experiencia argentina para la industria del papel de diario. *ATIPCA* 12 (5) :24-47.
- Matolcsy G. H. 1975. Correlation of fiber dimensions and wood properties with the physical properties of kraft pulp of *Abies balsamea* L. (Mill). *Tappi Journal* 58 (4) :136-141.

- Marklund A., J. B. Hauksson, U. Edlund y M. Sjostrom. 1998. Prediction of strength parameters for softwood kraft pulps. Multivariate data analysis based. Nordic Pulp and Paper Research Journal 13 :211-219.
- Mohlin U. B. 1989. Fibre bonding ability – a key pulp quality parameter for mechanical pulps to be used in printing papers. International Mechanical Pulping Conference, Helsinki. Preprints vol. 1, p.49-57.
- Monteoliva S. E., M. G. Senisterra, J. L. Marquina, R. M. Marlats y G. Ciocchini. 2002. Clones de sauce: longitud de fibras en su madera. Rev. FCA UNCuyo Tomo XXXIV N°2 :49-56.
- Monteoliva S. E., M. G. Senisterra, J. L. Marquina, R. M. Marlats y M. S. Villegas. 2002. Estudio de la variación de la densidad básica de ocho clones de sauces (*Salix* spp). Rev. Fac. Agr. La Plata 105 (1) :29-34.
- Monteoliva, S; Marquina, J; Senisterra, G; Marlats, R. 2006. Variación axial y radial de la longitud de fibras en seis clones de *Salix*. Revista Facultad Agronomía La Plata 106 (1) :13-19.
- Morseburg K. y B. Lonnberg. 1999. The physiochemical properties of PGW fibres as determined by the process intensity and wood fibre morphology. International Mechanical Pulping Conference, USA. p.35-46.
- Novaresi M. P., F. Delorenzi, G.P. De Rosa, P. Cervantes y C. Rozas. 1997. Aptitud de Salicáceas para la industria del papel. CICELPA. Informe Técnico n° OT 18-2927, 19pp.
- Olander K., U. Gren y M. Htun. 1991. Specific surface area. An important property of mechanical pulps. TAPPI, Proceedings International Mechanical Pulping Conference. p.81-86.

- Ona T., T. Sonoda, K. Ito, M. Shibata, Y. Tamai, Y. Kojima, J. Ohshima, S. Yokota y N. Yoshizawa. 2001. Investigation of relationship between cell and pulp properties in Eucalyptus by examination of within-tree property variation. *Wood Science and Tech* 35 :229-243.
- Ottestam C., P. Engstrand, M. Htun, B. Sjogren y K. Olander. 1991. A modified WRV method for measuring the swelling properties of mechanical pulps. *International Mechanical Pulping Conference*, p.87-89.
- Panshin A. J. y C. De Zeeuw. 1980. *Textbook of wood technology*. Mc Graw-Hill, 4th Edition, 722pp.
- Peszlen I. 1995. Gelatinous fibres in *Populus x euroamericana* clones. *Recent Advance in wood anatomy* 18 :327-333.
- Pipan C. 1989. El rol de las fibras en el papel. 25^o Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p. 55-92.
- Piussan C.M., R. Repetti y E. Fontana. 1990. Estudio comparativo de las propiedades papeleras de *Salix nigra* N°4, del híbrido A-131/27 y del sauce americano. 26^o Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p. 485-504.
- Popson S.J., D. D. Malthouse y P. C. Robertson. 1997. Applying brightness, whiteness, and color measurements to color removal. *Tappi Journal* vol 80 (9) :137-147.
- Reme P. A. y T. Helle. 1998. Fibre characteristics of some mechanical pulp grades. *Nordic Pulp and Paper Research Journal* 13 (4) :263-268.

- Repetti R., R. Tacconi, O. F. Casal y A. Casabona. 1981. Pastas de alto rendimiento de sauces de corta duración. 17º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p. FP 51-85.
- Repetti R. 1983. Pastas de alto rendimiento de sauces, incidencia de la morfología de las fibras en las propiedades del papel. 19º Congreso Técnico sobre Celulosa y Papel, ATIPCA, Buenos Aires, Trabajos Técnicos, p.25-31.
- Ruzinsky F., M. Tomasec, B. Kokta y J. J. Garceau. 1996. Relationship between ultra-high yield aspen pulp properties and fiber characteristics by multiple lineal regresion. Cellulose Chem. Technol. 30 :267-279.
- Sakamoto Y. y Y. Sano. 2000. Inhibition of water conductivity caused by watermark disease in *Salix sachalinensis*. IAWA Journal 21 :49-60.
- Sakamoto Y. y A. Kato. 2002. Some properties of the bacterial wetwood (watermark) in *Salix sachalinensis* caused by *Erwinia salicis*. IAWA Journal 23 :179-190.
- Seifert K. 1965. New Method for Rapid Determination of Pure Cellulose. Papier 10 (13/14) :301.
- Senisterra M. G., S. E. Monteoliva, J. L. Marquina, R. M. Marlats y G. Ciocchini. 2000. Propiedades del leño en clones del género *Salix* utilizados en programas de mejoramiento genético con aplicación a la industria papelera. Yvyrareta 10 :93-95.
- Steel R. y J. H. Torrie. 1985. Bioestadística: Principios y procedimientos. Mc Graw- Hill, 2a Edición: 622pp.

- Sucatte S. y R. Repetti. 1975. Estudio de pastas de alto rendimiento de las salicáceas del delta del paraná y de los sauces híbridos desarrollados en Argentina. Informe interno CICELPA, 4pp.
- Taylor F. W. 1975. Wood property difference between two stands of sycamore and black willow. *Wood and Fiber* 7 (3) : 187-191.
- Tyrvainen J. 1995. Wood and fiber properties of Norway Spruce and its suitability for temomechanical pulping. PhD Tesis. *Acta Forestalia Fennica* 249 :14-153.
- Valade J., K.N. Law, M. Labrecque y C. Z. Hong. 1996. Utilization du saule a courte rotation dans la production de pate a cartón ondule. Conference Tenhnologique estivale, Québec, Canadá. p. 43-60.
- Valente C. A., A. Mendes de Sousa, F. P. Furtado y A. P. de Carvalho. 1992. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at PORTUCEL: Technological component. *Appita Journal* 45 (6): 403-407
- Vaschetto J. 1995. Papel Prensa SA. Laboratorio Central. Informe interno, 27pp.
- Villegas M. S., J. L. Marquina, R. M. Marlats. 2002. *Salix babylonica* x *Salix alba* cv. "A-131-25". Variaciones axial y radial de la densidad básica de su madera. IX Jornadas Técnicas . Eldorado, Misiones, 15 a 17 de mayo de 2002. (En CD).
- Villegas M. S., J. L. Marquina, S. E. Monteoliva, M. G. Senisterra y R. M. Marlats 2002. *Salix babylonica* var. *sacramenta* (sauced americano). Variaciones axial y radial de la densidad básica de su madera. II Congreso Forestal Latinoamericano (CONFLAT) "Bienes y servicios del bosque, fuente de desarrollo sostenible". Guatemala, Centro América, 31 de julio a 2

de agosto de 2002. (En CD).

Villegas M. S. y R. M. Marlats. 2003. Densidad de la madera: variación axial y radial en dos clones de *Salix* sp. X Jornadas Técnicas Forestales Ambientales FCF-INTA. Eldorado, Misiones, 25 a 26 de setiembre de 2003. (En CD).

Wang H. H., J. G. Drummond, S. M. Reath, K. Hunt y P. A. Watson. 2001. An improved fibril angle measurement method for wood fibres. *Wood Science and Technology* 34 :493-503.

Wangaard F. F. y D. L. Williams. 1970. Fiber length and fiber strength in relation to tearing resistance of hardwood pulps. *Tappi Journal* 53 (11) :2153-2154.

Wangaard F. F. 1962. Contribution of hardwood fibres to the properties of kraft pulps. *Tappi Journal* 45 (7) :548-556.

Whiteman P. H., J. N. Cameron y A. Farrington. 1996. Breeding trees for improved pulp and paper production – a review. *Appita Journal* 49 (1):50-53.

Wood J. R. y A. Karnis. 1991. Future furnish requirements for newsprint and mechanical printing papers. *Pulp And Paper Canada* 92 (1) :T21-T25.

Zilli N. y J. Vaschetto. 1975. Aptitud y versatilidad de las salicáceas para su uso en la industria del papel. XI Convención de ATIPCA, trabajos técnicos D7, p.647-669.

Zobel B. y J. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Editorial Limusa: 545 pp.

RESUMEN

La aptitud papelera de una especie representa su capacidad para formar una hoja de papel con características y rendimientos aceptables. Esta capacidad depende de las particularidades físicas y químicas, intrínsecas de la materia prima y de las condiciones operativas de pulpado. Para cada grado de papel, existe una serie de requisitos que pueden cumplirse solo con determinados procesos de obtención de pulpa y con determinadas especies, o por medio de mezclas de pulpas obtenidas a partir de diferentes especies y procesos. En esta Tesis, se hará referencia al pulpado quimimecánico (CMP) de latifoliadas (angiospermas dicotiledóneas) para papel de diario.

Desde los años 1980, los clones de sauces han sido estudiados de una u otra forma. Sin embargo, estos estudios no fueron sistemáticos, ni abarcaron la totalidad de las características que definen la aptitud papelera de un recurso fibroso. Se presenta en el capítulo II de Antecedentes Bibliográficos la situación actual del conocimiento de la madera de sauces en Argentina y en el mundo.

El objetivo principal de la tesis fue desarrollar modelos de predicción de las propiedades de pulpas quimimecánicas del género *Salix*, a partir de la determinación de las características intrínsecas de la madera de 6 clones y su variabilidad.

Se trabajó sobre 6 clones de *Salix*: *Salix babylonica* var. *sacramenta* (sauce americano), híbridos interespecíficos cv 131-25, cv. 131-27, cv. 13-44, cv. 250-33, NZ 26992. Este material fue muestreado en dos sitios de implantación. Sitio DM: Delta medio del Río Paraná en Villa Paranacito, Entre Ríos (33° 45' LS;

59° 05' W). 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. Sitio C: Zona continental de la Provincia de Buenos Aires, Los Hornos, en la Estación Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de La Universidad Nacional de La Plata (34° 55' SL; 57° 57' WL; 5 m snm). Los suelos son argiudol típico, fino, ilítico, térmico; de relieve normal. La temperatura media máxima es de 22,6°C, la mínima media de 10,2°C, la temperatura máxima absoluta de 42,7°C (diciembre) y la mínima absoluta de -5,7°C (junio). Los valores de precipitación media anual son de 1100 mm con régimen isohídrico.

La edad de las plantaciones muestreadas fue de 13 años. Se tomaron muestras destructivas del fuste a 3 alturas: 1,30 m, 4,3 m y 6,5 m, en 5 árboles por clon.

Los pulpados de tipo quimimecánico al sulfito alcalino se realizaron a nivel de Planta Piloto. Los chips fueron prevaporizados durante 40 minutos, luego se impregnaron en un Digestor M/K de 7 litros de capacidad, con recirculación, durante 40 min a 80°C, con una relación licor/madera de 5,5/1, los reactivos de impregnación fueron hidróxido de sodio y sulfito de sodio al 2,6% sobre madera seca. La desfibración-refinación se realizó en un molino refinador Bauer de 8 pulgadas de diámetro de discos.

Se midieron las siguientes variables: Dendrométricas: Altura total, Diámetro a la altura de pecho (DAP) con corteza y sin corteza, Porcentaje de corteza, Ancho

de anillos de crecimiento; De la madera: Contenido de humedad, Densidad básica, Morfología de Fibras (longitud, ancho, lumen y espesor de la pared de las fibras), Porcentaje de tejidos, Índice de Afieltramiento, Índice de Flexibilidad, Índice de runkel, Angulo Microfibrillar, Composición química (extractivos en agua caliente, extractivos en alcohol benceno, extractivos totales, solubles en hidróxido de sodio, lignina insoluble, lignina soluble, lignina total, celulosa, hemicelulosa y cenizas), Nudos, Podredumbre, Manchas, Marcas de Inundación, Madera de Reacción y Tilosis; De la pulpa: Clasificación de Fibras, Longitud de Fibras de las fracciones, Longitud ponderada por peso de fibra en las fracciones, Longitud promedio de fibras ponderada total, Factor L y Factor S, Grados Schopper ($^{\circ}$ SR), Valor de agua retenida (WRV), Densidad Aparente, Volumen Específico, Índice de tracción, Rasgado y Explosión, Resistencia al aire, Energía absorbida a la Tracción, Elongación, Resistencia Individual de las Fibras, Opacidad, Coeficiente de dispersión (s) y de absorción (k), Blancura y Color.

Los valores obtenidos fueron analizados y contrastados mediante análisis de la varianza y test de comparaciones múltiples (Tuckey). Se tomaron como fuentes de variabilidad el tipo de clon y el sitio. Se analizaron las matrices de correlación múltiple de todas las variables. Se buscaron ecuaciones de regresión múltiples para definir modelos que expliquen las relaciones entre las propiedades de la madera y las propiedades de las pulpas.

Los análisis de la varianza realizados para todas las variables (variables de crecimiento, de madera y de pulpas), demostraron la existencia de diferencias significativas entre sitios y entre clones. Las condiciones del sitio DM fueron

claramente superiores para el cultivo de sauces. Las curvas de los incrementos corrientes anuales (ICA) en área basimétrica indicaron que el sitio de implantación y el clon juegan un rol preponderante en el año de culminación de crecimiento. Las curvas del sitio DM presentaron su máximo crecimiento a menor edad, comparadas con el sitio C. En el caso del sitio Delta, el sauce americano y el híbrido 26992 fueron los únicos que presentaron estas características.

La densidad básica de la madera presentó modelos de variación axial y radial dentro del árbol que dependen del clon estudiado. La longitud de fibras presentó modelos de variación axial y radial uniformes para todos los clones. Los modelos indicaron un descenso de la longitud de fibras de poca magnitud, desde la base hacia el ápice; y un aumento marcado de médula a corteza. Las fibras del sitio Continental fueron, en general, más rígidas (menor índice de flexibilidad y mayor índice de runkel). Comparativamente con otras latifoliadas, los sauces poseen una alta proporción de fibras. El factor sitio afectó claramente el porcentaje de tejidos, siendo el sitio DM más favorable para la industria papelera por su elevado porcentaje de fibras. Si consideramos la composición química, el sitio DM presentó los menores contenidos de extractivos totales y elevado porcentaje de celulosa. Se destacó el americano con muy bajo contenido de extractivos y solubles, y alta proporción de celulosa. El deterioro sufrido por hongos fue más pronunciado en el sitio Delta, aunque, en ambos sitios se detectó la presencia de pudrición blanca selectiva y simultánea.

Tabla de ANOVAS de variables de la madera

	Densidad	Longitud	Morfología	Vasos	Radios	Fibras	Angulo	Extractivos _T	Solubles S	Lignina T	Celulosa
Sitio	**	ns	**	**	ns	**	**	**	**	**	**
Clon	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
SxC	**	**	**	ns	**	ns	ns	**	**	**	**
PR	ns	**	**	**	ns	**	-	-	-	-	-

** Significativo

ns no significativo

SxC: interacción clon x sitio

PR: posición radial de muestreo (edades)

Tabla comparativa de variables de la madera por sitio

Sitio	Densidad	Longitud	Lumen	Espesor pared	Vasos	Fibras	Angulo	Extractivos _T	Solubles S	Lignina T	Celulosa	Biodeterioro
DM	-	=	+	-	-	+	-	-	-	+	+	+
C	+	=	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-

DM: sitio Delta Medio

C: sitio Continental

+ o - : magnitudes de los valores medios de cada variable en forma comparada para cada sitio

Los clones del sitio Delta se destacaron por sus resistencias, pero las blancuras de las pulpas fueron más bajas que en los clones del sitio Continental. Las pulpas realizadas con sauce americano superaron a las pulpas de los otros clones en todas las resistencias medidas. Sin embargo, no se destacaron en sus propiedades ópticas. Sobre la base de las resistencias, podrían seleccionarse los clones 250-33 y 26992 del sitio Delta y americano de

ambos sitios. En cambio, analizando las propiedades ópticas, los clones 13-44 y 131-27 del sitio Delta presentaron la mejor combinación de blancura y opacidad.

Tabla de ANOVAS de variables de la pulpa

	Fracciones	Tracción	Rasgado	Elongación	Resistencia individual	Resistencia aire	Opacidad	Blancura	k	s
Sitio	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Clon	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**
SxC	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

** Significativo

ns no significativo

SxC: interacción clon x sitio

Tabla comparativa de variables de las pulpas por sitio

Sitio	Densidad aparente	Tracción	Resistencia individual	Elongación	Resistencia aire	Opacidad	Blancura	k	s
DM	+	+	+	+	+	+	-	+	+
C	-	-	-	-	-	-	+	-	-

DM: sitio Delta Medio

C: sitio Continental

+ o - : magnitudes de los valores medios de cada variable en forma comparada para cada sitio

Las correlaciones entre variables dendrométricas indicaron que pueden seleccionarse clones con buena altura, buen DAP y bajo contenido de corteza.

Las maderas con mayor densidad básica tendrían mayor longitud de fibras,

espesor de pared y menor lumen. Existe una elevada correlación juvenil-adulto entre los caracteres de crecimiento y algunas propiedades de la madera (longitud de fibras y densidad). Esto hace posible evaluar precozmente la calidad de los clones, para seleccionar en forma temprana aquellos individuos con características deseadas para su uso final. Los niveles de los índices papeleros estarían indicando la poca capacidad de colapso de las fibras, aunque no se evidenció una relación clara entre éstos y las resistencias de las pulpas.

Las propiedades ópticas de las pulpas fueron principalmente afectadas por la lignina insoluble. Los extractivos en cambio, no se relacionaron significativamente con estas propiedades. El contenido de celulosa influyó significativamente en las resistencias.

Ninguna característica de la madera explicó por sí sola el comportamiento de las pulpas quimimecánicas de *Salix*. La fracción R50, la resistencia intrínseca de las fibras fueron factores preponderantes en las ecuaciones de regresión, seguidos de la fracción de finos retenida en 270 mesh. El lumen, la longitud de fibras, la densidad básica, la lignina insoluble y el contenido de celulosa y solubles fueron las cualidades de la madera que mejor predicen la calidad de las pulpas quimimecánicas de sauces.

Las asociaciones encontradas con diferentes técnicas de análisis multivariado confirman las relaciones halladas a partir de otras metodologías estadísticas. Ciertas propiedades de la madera se asociaron, en todos los casos, con determinadas características de las pulpas. Así la lignina insoluble y el lumen celular se relacionan con la opacidad; los extractivos, solubles y densidad de la

madera con el rendimiento en pulpa; y las propiedades de resistencia como tracción y rasgado, con la longitud de fibras, el contenido de celulosa, la resistencia intrínseca de las fibras y las fracciones R50 y R270.

El sitio de implantación ha demostrado tener gran incidencia en la mayoría de las propiedades de las maderas y de las pulpas en *Salix*. Dentro de un mismo sitio, genomas emparentados presentan respuestas diferentes de crecimiento y en sus propiedades. Los diferentes clones de sauces no pueden considerarse una materia prima uniforme para la industria de la pulpa y papel. Las estrategias para un buen aprovechamiento del recurso deben sustentarse en selecciones múltiples que incluyan determinaciones a varios niveles (crecimiento y madera).