

Universidad Nacional Agraria
La Molina

Escuela de Post - Grado
Especialidad de Industrias Forestales



Determinación del calor
específico y de la conductividad
térmica en dos especies
forestales

Tesis para optar el Grado de
MAGISTER SCIENTIAE

Manuel Chavesta Custodio

LIMA - PERU

1996

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Calor específico de la madera	3
2.2 Conductividad térmica de la madera	5
2.3 Especies estudiadas	13
3. MATERIALES Y METODOS	14
3.1 Lugar de ejecución	14
3.2 Materiales y equipos	14
3.2.1 Especies	14
3.2.2 Materiales	15
3.2.3 Equipos	16
3.3 Métodos y procedimientos	16
3.3.1 Preparación de probetas	16
3.3.2 Determinación de calor específico y de la conductividad térmica	17
3.3.2.1 Descripción del equipo	20
3.3.2.2 Funcionamiento del equipo ...	21
3.3.2.3 Calibración del equipo	22
3.3.2.4 Método	24
3.3.3 Determinación del Contenido de hume dad y densidad	26

	Pág.
3.3.4 Descripción anatómica de las especies.....	26
3.3.5 Análisis estadístico	26
4. RESULTADOS	27
4.1 Contenido de humedad y densidad	27
4.2 Calor específico	27
4.3 Conductividad térmica	27
4.4 Descripción anatómica de las Especies	34
5. DISCUSION DE RESULTADOS	42
5.1 Contenido de humedad y densidad	42
5.2 Calor específico	42
5.3 Conductividad térmica	43
5.4 Descripción anatómica de las especies	45
6. CONCLUSIONES	48
7 RECOMENDACIONES	49
8. RESUMEN	50
9. BIBLIOGRAFIA	52

RELACION DE FIGURAS

NO	TITULO	Pág.
1.	Dirección del flujo de calor de acuerdo a la orientación anatómica de las probetas ..	18
2.	Equipo de medición del calor específico y de la conductividad térmica.....	19
3.	Calor específico en función de la temperatura en Catahua amarilla	30
4.	Calor específico en función de la temperatura en Quinilla colorada	31
5.	Conductividad térmica en función de la temperatura en Catahua amarilla	32
6.	Conductividad térmica en función de la temperatura en Quinilla colorada	33
7.	<u>Hura crepitans</u> (corte transversal 60X)	37
8.	<u>Hura crepitans</u> (corte tangencial 60X)	37
9.	<u>Manilkara bidentata</u> (corte transversal 60X)	41
10.	<u>Manilkara bidentata</u> (corte tangencial 60X).	41

RELACION DE CUADROS

<u>NO</u>	<u>TITULO</u>	<u>Pág.</u>
1.	Valores de conductividad térmica para algunas maderas y otros materiales	7
2.	Valores de contenido de humedad y densidad en Catahua amarilla	28
3.	Valores de contenido de humedad y densidad en Quinilla colorada	29
4.	Coefficientes de correlación de los modelos lineales para Catahua amarilla y Quinilla colorada	46

1. INTRODUCCION

En nuestro país las investigaciones sobre las diversas especies forestales se han dirigido principalmente a la determinación de las propiedades físicas, mecánicas, durabilidad natural, trabajabilidad, preservación y secado; como respuesta a una utilización inmediata de éstas, pero no se han realizado estudios de otras propiedades como el calor específico y la conductividad térmica; que son importantes para su uso industrial debido a los múltiples tratamientos que usualmente se le aplica en el proceso de fabricación de productos acabados (tratamiento térmico para la obtención de láminas, secado de madera, producción de tableros), y empleada como material aislante.

Al respecto, a nivel experimental, en el país la información disponible sobre propiedades térmicas en maderas tropicales es relativamente escasa, existiendo un sólo trabajo realizado por YOZA (1992); correspondiendo la mayor parte de la información existente a maderas de coníferas especialmente de climas templados.

En el presente estudio se determinó el calor específico y la conductividad térmica de la madera de

Catahua amarilla (Hura crepitans) y Quinilla colorada (Manilkara bidentata), en función a la temperatura (-25°C a 25°C), densidad, planos de corte; así como la influencia de la estructura anatómica en las propiedades a determinar.

Dichos resultados permitirán incrementar el conocimiento de las propiedades de la madera, analizar mejor ciertos procesos industriales, y propiciar el desarrollo de programas en los procesos antes mencionados.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Calor Específico de la Madera

Con respecto a las propiedades térmicas de la madera, **WOOD AS AN ENGINEERING MATERIAL (1980)**; considera que existen cuatro propiedades de importancia como son: conductividad térmica, calor específico, difusividad térmica y el coeficiente de dilatación térmica; siendo las dos primeras motivo de este estudio.

MARTIN (1963) y WANGAARD (1969); señalan que el calor específico es la capacidad de un material para absorber calor, y está expresado en términos de la cantidad de calor absorbido por unidad de masa de material, por cada grado de cambio de temperatura (cal/g.°C).

ARROYO (1983) y WANGAARD (1969); mencionan que el calor específico de la madera es dependiente de la temperatura y del contenido de humedad, pero es prácticamente independiente de la densidad o la especie; considerando que éste no es variable para propósitos prácticos.

MARTIN (1963); al evaluar las propiedades térmicas en corteza, sostiene que la densidad no juega un rol importante en el calor específico, como sí ocurre en la conductividad térmica. El contenido de humedad es importante en el calor específico; no sólo debido al alto calor específico del agua, sino también al calor de sorción de la corteza. Agrega que el calor específico también varía con la temperatura.

KOLLMANN y COTE (1968); indican que el calor específico de la madera es bajo, lo cual es de importancia para muchos procesos técnicos, tales como la aclimatación, impregnación, destilación destructiva, hidrólisis de la madera, etc. Además, señalan que el calor específico promedio, determinado experimentalmente por **DUNLAP (1912)**, para 20 especies entre 0°C y 106°C es 0.324 cal/g.°C, siendo los valores mínimo y máximo de 0.317 y 0.337. Finalmente, mencionan que el calor específico promedio es independiente, tanto de las especies de madera como del peso específico, y estimó que el calor específico en función del contenido de humedad y la temperatura se relaciona mediante:

$$C = \frac{h + 0.266 + 0.00116 \times T}{1 + h} \quad (\text{cal/g.}^\circ\text{C}) \quad (1)$$

donde: $h = \text{en } \%$
 $T = \text{en } ^\circ\text{C}.$

Cuando la madera contiene agua, según WANGAARD (1969), su calor específico se incrementa debido a que el calor específico del agua es mayor al de la madera seca. Sin embargo, el calor específico aparente de la madera húmeda es mayor que la simple suma de los efectos separados de la madera y el agua; lo que indicaría que esto es debido a la energía térmica absorbida por los enlaces madera-agua. Si la temperatura se incrementa, el calor específico aparente aumenta, debido a la energía de absorción de la madera.

2.2 Conductividad Térmica de la Madera

Según ARROYO (1983) y WAANGARD (1969); la conductividad térmica describe la capacidad de un material para transferir calor a través de éste, y es expresado en términos de cantidad de calor que fluye a través de una unidad de sección transversal por unidad de tiempo por unidad de gradiente de temperatura. Sus unidades en el sistema C.G.S son cal/cm.s. $^\circ\text{C}$.

GORCHAKOV (1984) y ARROYO (1983); indican que la conductividad térmica es una propiedad importante, tanto para un grupo amplio de materiales de aislamiento térmico, como para los materiales empleados en la construcción de paredes exteriores y recubrimientos de los edificios, siendo estos valores muy bajos comparados con los metales. Además, **KOLLMANN (1968)**, menciona que en los materiales aislantes y de construcción, la conductividad térmica aumenta con el peso específico, debido a que en los cuerpos secos y porosos viene a ser un valor medio entre la aptitud conductora de los componentes sólidos y del aire contenido en los poros.

En el Cuadro N° 1 se presentan valores de calor específico y conductividad térmica para algunas maderas y otros materiales, en donde se puede observar que la madera es un material excepcional, pues combina una relativa baja conductividad térmica con una alta capacidad térmica en relación con otros materiales.

VENKATESWARAN (1972), DIETZ y SCHAFFER (1980), WICKE (1970) Y KOLLMANN (1968); manifiestan que la conductividad térmica de la madera depende de muchos factores como la densidad, contenido de humedad, temperatura, dirección del grano, ángulo de la fibra,

CUADRO Nº 1. Calor específico (c) y conductividad térmica (K) de algunas maderas entre 8 a 13% de Humedad y otros materiales

Material	c cal/g. °C	K 10 ⁻⁴ cal/cm.s. °C
Wood **	0.37	3.50
Balsa * (Ochroma pyramidale)	-	1.60
Spruce * (Picea sp)	-	2.60
Basswood * (Tilia americana)	-	2.50
White pine * (Pinus strobus)	-	2.60
Aspen * (Populus tremuloides)	-	2.80
Southern pine * (Pinus excelsior)	-	3.80
Sugar maple * (Acer saccharum)	-	4.80
Ladrillo **	0.19	17.20
Concreto **	0.20	22.10
Fibra de vidrio**	0.23	0.93
Vidrio **	-	25.10
Acero **	-	389.00
Aluminio **	-	4816.00

* Tomado de Wood As An Engineering Material (1980)

** Tomado de Siau (1984)

porosidad y cantidad de fibras del leño de verano y de primavera. A su vez, **WOOD AS AN ENGINEERING MATERIAL (1980)**, agrega que además está afectado por el contenido de extractivos, e irregularidades estructurales tales como grietas y nudos.

WAANGARD (1969), KOLLMANN (1968) y ARROYO (1983); sostienen que la conductividad térmica de la madera es 2.25 a 2.75 veces mayor paralela al grano que transversal al grano (dirección radial o tangencial). **ARROYO (1983)**, con respecto a los anillos de crecimiento, agrega que, para propósitos prácticos, las conductividades en dirección radial y tangencial son aproximadamente similares en ambas direcciones. Ellos coinciden en que la conductividad térmica se incrementa conforme la densidad, contenido de humedad y el contenido de extractivos.

KOLLMANN (1968); indica que la madera y otros materiales celulosicos son malos conductores del calor, debido a la pausidad de los electrones libres, los cuales son responsables para una fácil transmisión de energía (así como en los metales), y a su porosidad. Este mismo autor y **MALMQUIST (1956)**, discutieron el efecto de la orientación de la fibra sobre la transmisión del calor en

la madera y en materiales a base de madera; concluyendo que ello se debe a dos causas:

- 1) Disposición paralela de las fibras en la dirección del flujo del calor, la que crea un máximo de "puentes de calor" debido a una mayor conducción a través de la pared celular, así como por la continuidad en la dirección de flujo de calor.

- 2) Disposición paralela de las fibras, pero perpendicular a la dirección del flujo de calor, lo que crea un mínimo de puentes de calor, por una discontinuidad en la dirección de flujo de calor.

KAMKE y ZYLKOWSKI (1989) y WANGAARD (1969); explican la variación observada en la conductividad térmica en maderas, tomando en cuenta que la madera es de naturaleza anisotrópica. Señalan que el grado de variación observado en la conductividad térmica en maderas es interpretado parcialmente por la orientación microfibrilar. El primero de ellos, hace énfasis que la dirección de flujo de calor está dado por la orientación de la célula xilemática y el espesor de la pared celular, como los de mayor efecto sobre la conductividad térmica; siendo aún mayor la influencia dada por la orientación de

las cadenas moleculares dentro de la pared celular, las cuales están dispuestas en paquetes llamados microfibrillas, que están estrechamente alineadas con el eje longitudinal de la célula; haciendo que la transmisión de la energía térmica ocurra más fácilmente a lo largo de las microfibrillas que a través de ellas.

En un estudio de conductividad térmica en corteza, **MARTIN (1963)**, reporta que la conductividad de un material es afectado por muchos factores como la densidad, contenido de humedad y la temperatura; además por la estructura molecular, tamaño de poros y la presión. Asimismo, indica que en el examen microscópico de la corteza, el tamaño de poros podría volverse importante a altas temperaturas debido a la radiación térmica a través de los lumenes celulares. Este mismo autor encuentra que la conductividad longitudinal es mayor que la conductividad radial, la que a su vez, es mayor que la conductividad tangencial; concluyendo que los valores de conductividad longitudinal a transversal son mucho menores que los encontrados para madera sólida.

Igualmente **KAMKE y ZYLKOWSKI (1989)**, en un estudio sobre los efectos de la conductividad térmica en paneles a base de madera, encuentran valores de conductividad

térmica menores que para madera sólida, para un peso específico determinado; explicando que probablemente se deba al efecto aislante de los espacios vacíos y las numerosas interfases entre los variados elementos inherentes de la madera durante el prensado de estos productos.

Según reporta **VENKATESWARAN (1974)**; maderas que tienen densidades iguales difieren en su conductividad y en su composición química. Concluye que las variaciones en sus conductividades puede ser el resultado de un número de grupos polares o segmentos moleculares asociados con numerosos elementos metálicos presentes en variadas proporciones en los diferentes componentes de la madera. Este estudio indicó que el 95% de la variación en conductividades es atribuible a la variación en el contenido de lignina; indicando que un bajo contenido de lignina deberá estar asociado con una alta conductividad térmica ya que la lignina es menos densa que la celulosa y las moléculas de lignina no son cristalinas. Concluyendo que la variación en los componentes químicos de la madera da como resultado una variación en las condiciones térmicas de las mismas.

SIAU (1984); señala que la madera es un buen aislante, especialmente en su sección perpendicular al eje de la fibra, donde hay una alta resistencia al flujo debido a la interrupción de la trayectoria por la pobre conducción de los lumenes llenos de aire. Agrega que la baja conductividad de la madera también se calcula por el intervalo de tiempo requerido para llevar a una troza de gran diámetro a una temperatura alta uniforme mediante la aplicación de calor en sus superficies externas; tal como se emplea en el tratamiento térmico de la madera.

Yoza (1992), al determinar la conductividad térmica de la Moena (Aniba amazónica), en función de la temperatura, reporta valores similares a las encontradas en maderas de Coníferas, señalando que las relaciones entre las conductividades longitudinal/radial y longitudinal/tangencial son inferiores a las encontradas en maderas de coníferas, indicando que podría explicarse por la diferencia anatómica entre ellas.

De otro lado, WAARD y SKAAR (1963), efectuando estudios en tableros de partículas, establecieron que la conductividad térmica puede relacionarse con la temperatura de la siguiente forma:

$$K = (4.26 + 0.0157 \times T) \times 10^{-4} \text{ cal/cm.s.}^{\circ}\text{C}$$

y con el calor específico:

$$C = (0.310 + 0.00202 \times T) \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$$

valores compatibles, con los encontrados por otros autores.

MAKU (1954), calculó la conductividad de la pared celular de la fibra en condición seca (1.5 g/cm^3) para la dirección longitudinal y transversal, obteniendo valores de 15.6×10^{-4} y $10.0 \times 10^{-4} \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$. respectivamente. A su vez **WAARD y SKAAR (1963)**, establecieron que la conductividad térmica depende principalmente de las zonas amorfas de las fibras, las cuales están en relación directa con la temperatura, en comparación con las cristalinas que dependen indirectamente, lo cual es confirmado por **KITTEL (1949)** en sus estudios sobre las propiedades térmicas en vidrios.

2.3 Especies estudiadas

La Hura crepitans y Manilkara bidentata en el país han sido estudiadas por **AROSTEGUI, GONZALES, SATO, VALENZUELA (1974, 1975, 1978, 1982)**; ellos presentan las características generales, macroscópicas y microscópicas; así como sus propiedades físicas, mecánicas, durabilidad natural, preservación, secado y usos de estas especies.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Lugar de ejecución

El estudio se realizó en el Laboratorio de Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera del Departamento de Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, y en el Laboratorio de Física del Departamento de Física y Meteorología, Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional Agraria "La Molina".

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Especies

Las especies maderables empleadas en el presente estudio han sido identificadas en la Sección de Anatomía de la Madera del Departamento de Industrias Forestales. Las especies son:

<u>Nombre Común</u>	<u>Nombre Científico</u>	<u>Familia</u>
Catahua amarilla	<u>Hura crepitans</u> L.	Euphorbiaceae
Quinilla colorada	<u>Manikara bidentata</u> Williams	Sapotaceae

Estas especies proceden de la ciudad de Pucallpa. De cada especie se obtuvieron tres tucos de 8" x 8" x 2' que correspondían a tres árboles diferentes, en base a la codificación con que llegan a la planta. La Catahua amarilla fue adquirida en la Triplayera "Maderas Laminadas S.A" y en el caso de la Quinilla colorada en la Parquetera "Santa Ana", carretera Federico Basadre.

3.2.2 Materiales

- Madera de Catahua amarilla (Hura crepitans) y Quinilla colorada (Manilkara bidentata).
- Termocuplas de cobre constantan.
- Plancha de tecknopor.
- Láminas de cobre.
- Alambre de cobre.
- Láminas de asbesto.
- Termómetros de precisión.
- Hielo seco.
- Porta objeto.
- Cubre objetos.
- Bálsamo de Canada.
- Acido nítrico.
- Otros.

3.2.3 Equipos

- Sistema de termocuplas.
- Fuentes de calentamiento eléctrico.
- Sistemas de control y de lectura.
- Sistema de refrigeración para muestras.
- Calorímetros.
- Balanza analítica (precisión de 0.001g).
- Estufa eléctrica.
- Desecadores de laboratorio.
- Micrótopo.
- Microscópios.
- Otros.

3.3 Métodos y procedimientos

3.3.1 Preparación de probetas

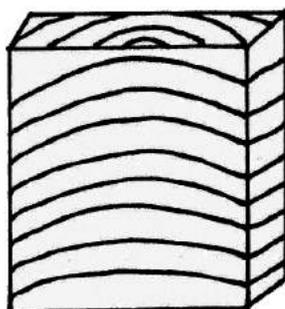
Se prepararon muestras de 0.8 cm x 15 cm x 15 cm., para la determinación del calor específico y de la conductividad térmica. Para el caso del espesor, su dimensión se decidió luego de varias pruebas preliminares. La primera dimensión corresponde al espesor en dirección del flujo del calor paralelo a la fibra y perpendicular a la fibra en dirección

radial ó tangencial. Se prepararon 18 muestras por cada árbol en cortes longitudinal, radial y tangencial; precisando que en una muestra en corte tangencial el flujo de calor es radial y en una muestra en corte radial el flujo de calor es tangencial a los radios, conforme se indica en la Fig. N° 1. El número total de probetas por especie fue de 54.

3.3.2 Determinación del Calor Específico y de la Conductividad Térmica

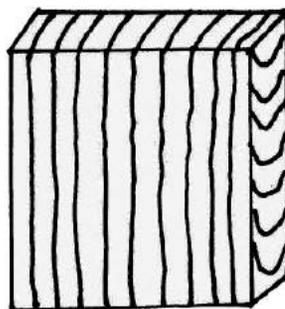
Se determinó en un equipo diseñado y construido en el Departamento de Física y Meteorología de la UNALM (1992), y empleado por Yoza (1992), que permite cuantificar el calor específico y la conductividad térmica de las muestras en forma simultánea en condiciones estacionarias, de acuerdo con las normas ASTM C 177-76 y con las variaciones propuestas por Waard y Skaar (1963). La forma en que estuvieron dispuestas las muestras, así como el equipo empleado para las mediciones correspondientes se muestra en la Figura N° 2.

Flujo de
calor
(Longitudinal)



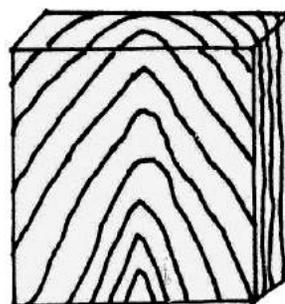
Paralelo a la
fibra
Corte longitudinal

Flujo de
calor
(Tangencial)



Perpendicular a
la fibra
Corte Radial

Flujo de
calor
(Radial)



Perpendicular a
la fibra
Corte Tangencial

Fig. N°1. DIRECCION DEL FLUJO DE CALOR DE ACUERDO A LA ORIENTACION ANATOMICA DE LAS PROBETAS

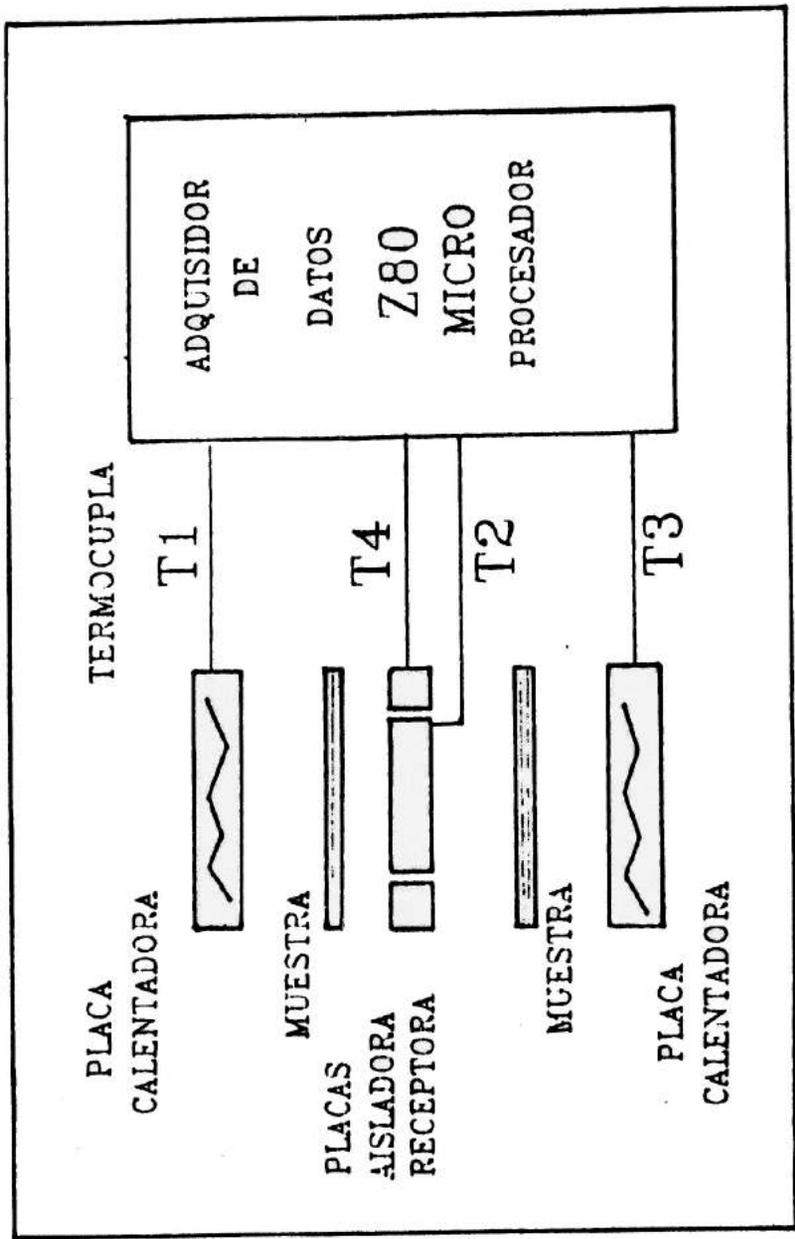


FIGURA 2. EQUIPO DE MEDICION DEL CALOR ESPECIFICO Y CONDUCTIVIDAD TERMICA

De las tres pruebas por cada dirección, efectuadas para la determinación de la conductividad longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T), se obtuvieron datos que fueron promediados por árbol, representando cada uno de ellos el promedio para seis muestras por dirección, debido a que cada ensayo se realiza en un par de muestras.

3.3.2.1 Descripción del Equipo

Este método, denominado también de la placa caliente, consiste en colocar una placa de cobre de gran pureza cuyas dimensiones se estimaron en 0.29 cm. de espesor y 9 cm. de diámetro (placa receptora del calor), que es colocada entre dos muestras de madera, y que a su vez se disponen entre dos placas de aluminio de 11 cm. de diámetro (placas calentadoras), formando una especie de "sandwich". La placa receptora tiene un diámetro de 2 cm. menor que la calentadora, para dar lugar a un aro metálico (placa aisladora) concéntrico de aislamiento de 2 cm. de ancho y 0.29 cm. de espesor; todo el sistema se presiona con una fuerza mayor de 5 kg. para evitar cualquier

bolsa de aire entre las placas y luego se coloca dentro de una caja aislante. Las placas calentadoras y la placa aisladora llevan conectadas dos termocuplas de cobre constantan y una resistencia de calentamiento; mientras que la placa receptora lleva solamente dos termocuplas. Todo este sistema está conectado a un sistema de control y adquisición de datos, controlado por un programa en el microprocesador del tipo Z80; tal como lo muestra la figura N° 2.

3.3.2.2 Funcionamiento del Equipo

Antes del inicio de cada prueba se baja la temperatura del sistema de placas hasta aproximadamente -30°C , usando gas carbónico (hielo seco); luego, se da inicio al programa activando el sistema de control y el adquisidor de datos, así como las lecturas de las temperaturas de todas las placas y el calentamiento de las mismas.

Las placas de aluminio (temperaturas T_1 , T_3) son calentadas manteniendo constante la

gradiente de temperatura entre ambas caras de la muestra a un valor prefijado de 6°C (valor sustituido en los cálculos finales por el promedio de la diferencia de las temperaturas (T_1-T_2)). Esto hace que las muestras y la placa receptora (temperatura T_2) aumenten continuamente sus temperaturas, obligando a las placas calentadoras a seguir manteniendo la diferencia prefijada, permitiendo que todo el sistema aumente su temperatura coordinadamente. De otro lado, la placa aisladora (temperatura T_4) es calentada manteniendo siempre la misma temperatura que la placa receptora, evitando así fugas laterales. El microprocesador promedia 10 mediciones por minuto y registra el promedio por minuto de estas temperaturas (T_1 y T_2) durante toda la prueba, cuya duración es aproximadamente 150 minutos para la Catahua amarilla y 100 minutos para la Quinilla colorada.

3.3.2.3 Calibración de Equipo

Se utilizaron dos termocuplas de cobre constantan por cada elemento de medición,

siendo sus señales amplificadas y luego enviadas a un circuito conversor A/D (analógico/digital) que el microprocesador las registra. (Huisacaina, 1992).

El equipo usa un convertidor A/D de 8 bit para el rango de trabajo de -25 a 50°C , que permite una precisión de conversión de 0.3°C . Igualmente, se determinó la estabilidad del amplificador en $1.3^{\circ}\text{C}/50$ minutos y la variación de la referencia del 0°C (agua + hielo) durante la prueba en un valor máximo de $+1^{\circ}\text{C}$. Luego de analizar los errores de medición, se estimó en 11% el posible error sistemático (instrumental) en la medición de la conductividad térmica durante las pruebas, valor compatible con el tipo de muestreo efectuado. Además se efectuaron durante las pruebas lecturas directas de las termocuplas con el fin de conocer la estabilidad de los amplificadores, permitiendo realizar las correcciones respectivas.

3.3.2.4 Método

De acuerdo con la relación de un flujo estacionario, que se deposita en la placa receptora de cobre y el calor que retienen las muestras, se puede encontrar la relación que rige este proceso:

$$k = \frac{dT_2}{dt} \frac{L (D.c.L + D'.c'.L')}{2 (T_1 - T_2)} \quad (2)$$

Donde:

- $\frac{dT_2}{dt}$: Es la derivada de la temperatura de la placa receptora en función del tiempo ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)
- T_1 : Temperatura de la placa calentadora en $^{\circ}\text{C}$
- T_2 : Temperatura de la placa receptora en $^{\circ}\text{C}$
- L : Espesor de la muestra en (cm)
- L' : Espesor de la placa receptora en (cm)
- c : Calor específico de la madera (ecuación 1)
- c' : Calor específico de la placa receptora en ($\text{cal}/\text{g}.\text{^{\circ}\text{C}}$)
- D : Densidad de la muestra (g/cm^3)

D' : Densidad de la placa de cobre (g/cm³)

Debido a que el equipo fue diseñado para efectuar la determinación simultánea del calor específico y de la conductividad térmica, en el presente trabajo se usa la ecuación obtenida por Dulanp para el calor específico de la madera:

$$c = \frac{h + 0.266 + 0.00116 \times T}{1 + h} \quad (\text{cal/g.}^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Por otro lado, el espesor de la muestra debe ser lo más uniforme y constante posible.

La placa receptora es de un espesor constante (0.29 cm.) y su calor específico fue determinado por el método calorimétrico en 0.0092 ± 0.00004 cal/g.^oC, siendo su densidad 8.9 g/cm³. Con las mediciones obtenidas se efectuó una correlación cuadrática de la cual se obtiene la derivada de la temperatura de la placa receptora en función del tiempo; valores que nos permiten calcular finalmente la conductividad térmica "K" en función de la temperatura promedio de la muestra.

3.3.3 Determinación del Contenido de Humedad y de la Densidad

Antes de iniciar la prueba de calor específico y conductividad térmica, las muestras fueron pesadas y, a la finalización de la prueba, llevadas a estufa hasta peso seco al horno; que permitió determinar el contenido de humedad y la densidad de las muestras.

3.3.4 Descripción Anatómica de las Especies

Se realizó la descripción macro y microscópicas de las especies en estudio. La observación macroscópica se efectuó con una lupa de 10x y para el estudio microscópico se prepararon láminas microtómicas de 22 micras de espesor, las cuales fueron coloreadas y montadas en porta objetos. Para la preparación de láminas se siguió la metodología utilizada en la Sección de Anatomía de la Madera.

3.3.5 Análisis Estadístico

Los resultados determinados son el promedio y los coeficientes de correlación de la regresión lineal simple para las dos especies en estudio.

4. RESULTADOS

4.1 Contenido de Humedad y Densidad

En los Cuadros N° 2 y N° 3 se presentan los resultados de contenido de humedad y densidad para las muestras de las dos especies estudiadas en sus tres direcciones.

4.2 Calor Específico

En las Figuras N° 3 y N° 4, se han ploteado los valores de calor específico promedio para las dos especies, en función de la temperatura. Sólo se presenta el promedio para la especie, pues los valores de calor específico en las tres direcciones son similares; dichos valores fueron calculados con la ecuación de Dunlap.

4.3 Conductividad Térmica

De igual forma, en las Figuras N° 5 y N° 6, se han ploteado los valores de conductividad térmica promedio para las dos especies en sus tres direcciones de corte.

CUADRO Nº 2. Contenido de Humedad y Densidad de la Catahua

CATAHUA	L (cm)	C.H (%)	DENSIDAD
ARBOL 1			
1	0.80	11.3	0.37
2	0.80	11.4	0.38
3	0.80	11.2	0.36
4	0.75	11.4	0.37
5	0.80	11.5	0.35
6	0.80	11.5	0.36
7	0.80	11.0	0.36
8	0.80	11.6	0.39
9	0.80	11.0	0.38
ARBOL 2			
1	0.81	11.0	0.36
2	0.80	11.0	0.36
3	0.80	11.0	0.37
4	0.75	11.4	0.37
5	0.78	11.0	0.37
6	0.78	11.6	0.36
7	0.79	11.4	0.36
8	0.78	11.3	0.35
9	0.77	11.5	0.35
ARBOL 3			
1	0.80	10.6	0.37
2	0.80	10.5	0.37
3	0.80	10.6	0.38
4	0.80	10.3	0.38
5	0.80	10.2	0.35
6	0.80	10.2	0.35
7	0.80	10.5	0.38
8	0.80	10.3	0.38
9	0.80	10.3	0.37

CUADRO Nº 3. Contenido de Humedad y Densidad de la Quinilla

QUINILLA COLORADA	L (cm)	C.H (%)	DENSIDAD
ARBOL 1			
1	0.80	11.8	1.06
2	0.80	11.8	0.98
3	0.80	12.2	1.03
4	0.75	10.5	0.98
5	0.80	10.7	0.98
6	0.75	10.9	1.01
7	0.80	11.8	1.04
8	0.80	12.2	0.98
9	0.80	12.0	0.98
ARBOL 2			
1	0.80	12.6	1.00
2	0.80	12.5	1.01
3	0.80	12.6	1.02
4	0.80	12.0	0.97
5	0.75	12.2	0.98
6	0.75	12.3	0.98
7	0.80	12.4	0.98
8	0.80	12.3	0.97
9	0.80	12.4	0.97
ARBOL 3			
1	0.80	12.4	1.00
2	0.80	12.5	0.97
3	0.81	12.6	1.00
4	0.80	11.0	1.00
5	0.80	11.7	0.99
6	0.80	11.0	0.97
7	0.75	12.3	0.98
8	0.74	12.1	0.96
9	0.78	12.6	0.97

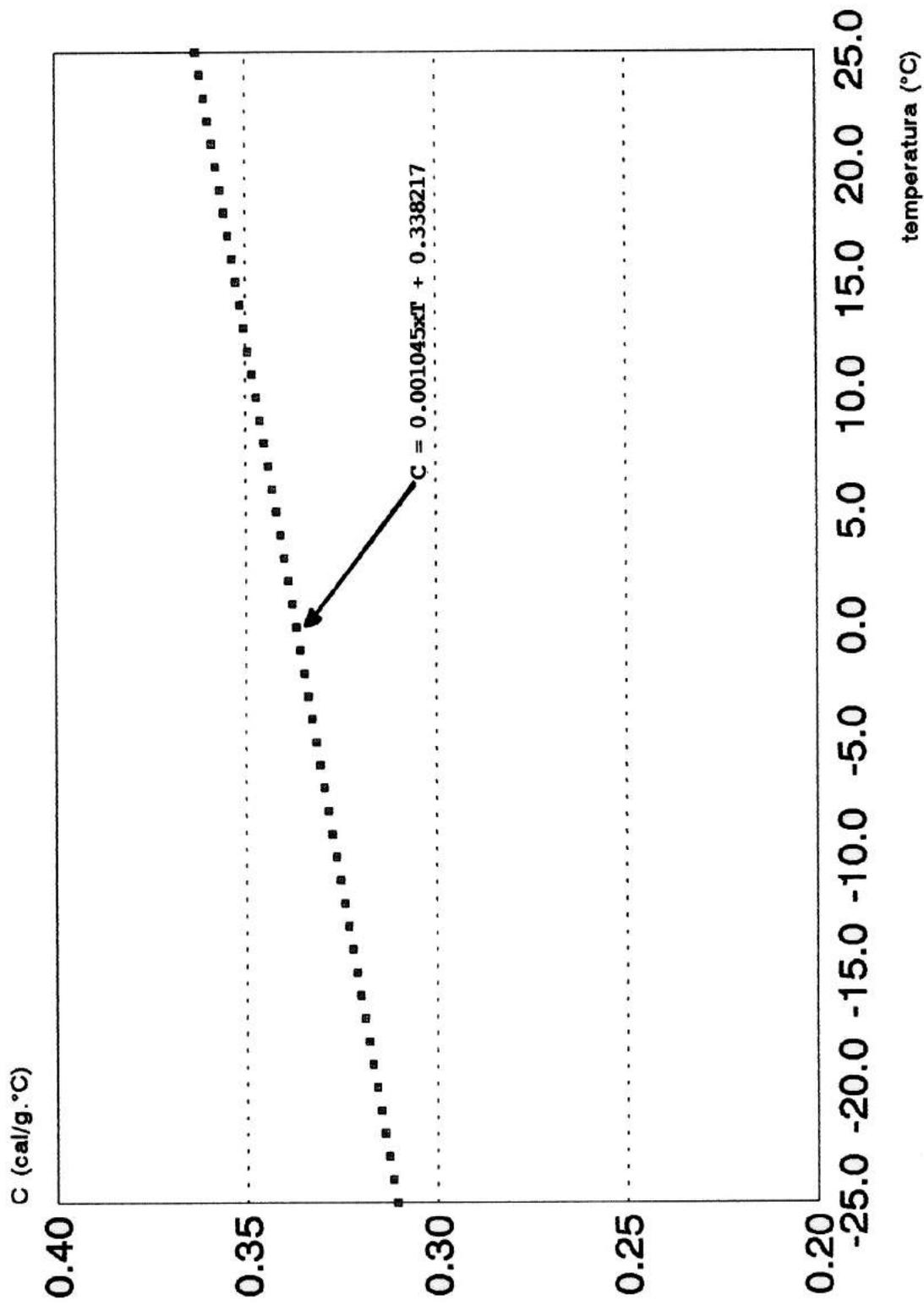


FIGURA 3. CALOR ESPECIFICO EN CATAHUA AMARILLA

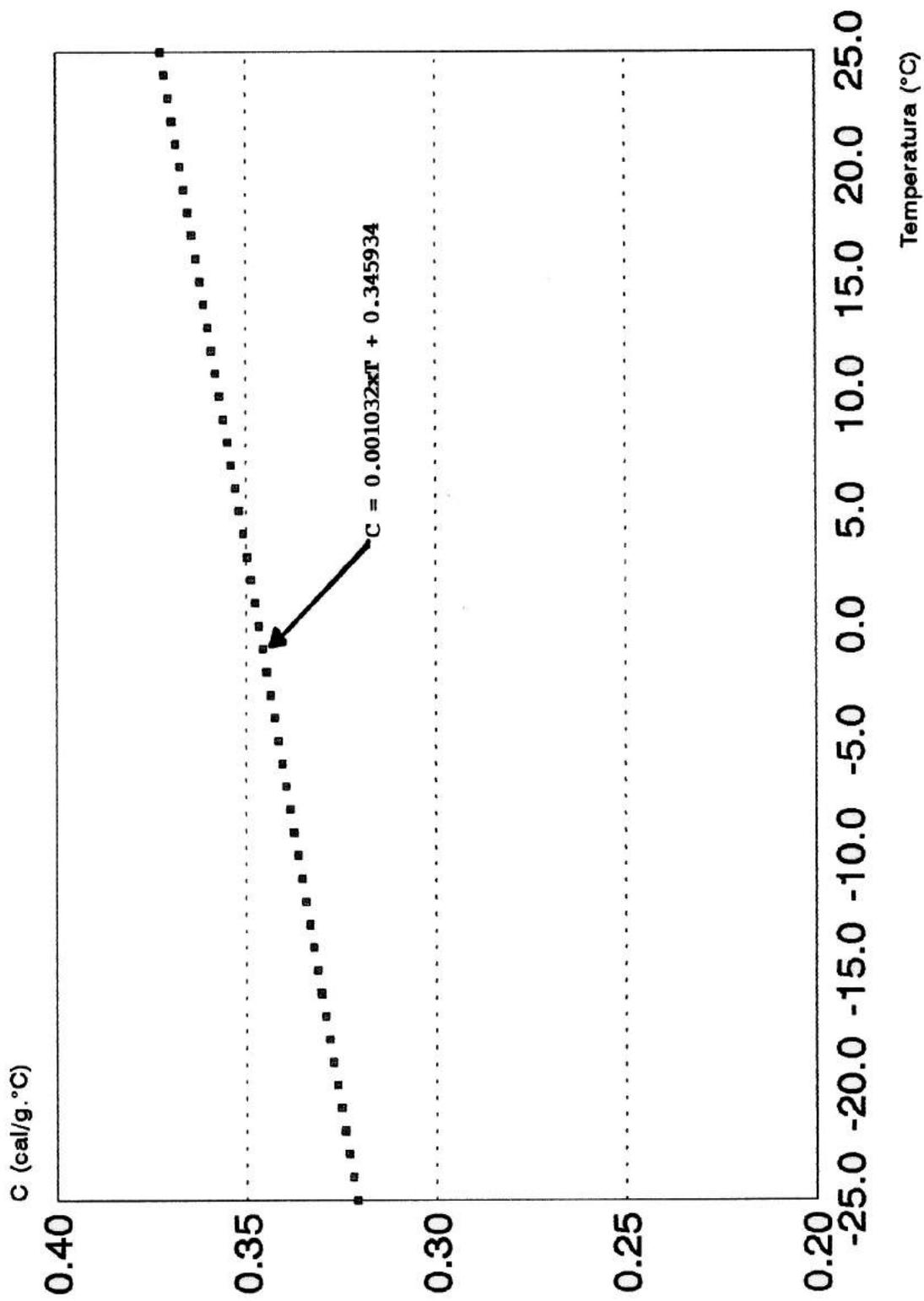


FIGURA 4. CALOR ESPECIFICO EN QUINILLA COLORADA

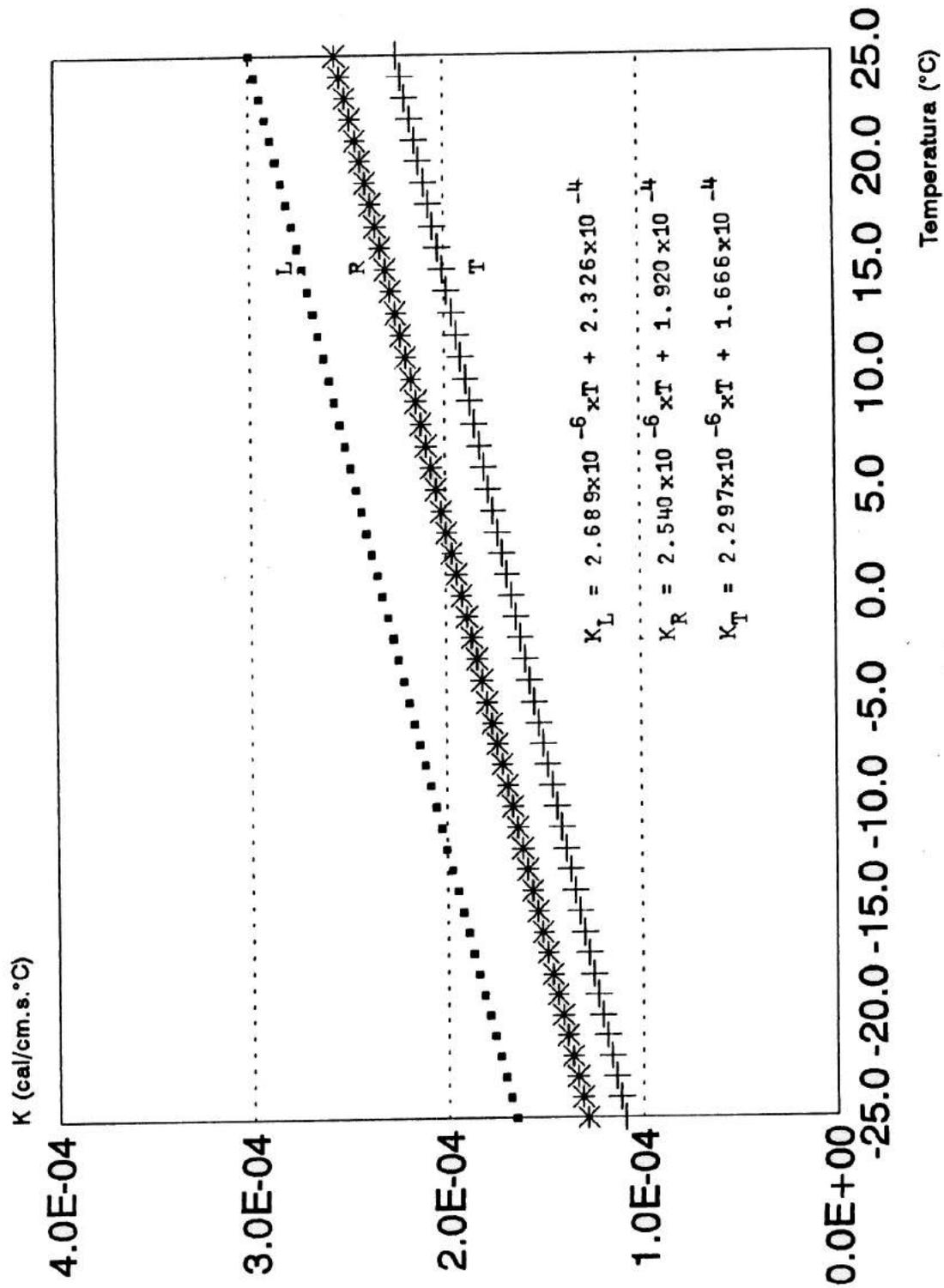


FIGURA 5. CONDUCTIVIDAD TERMICA EN CATAHUA AMARILLA

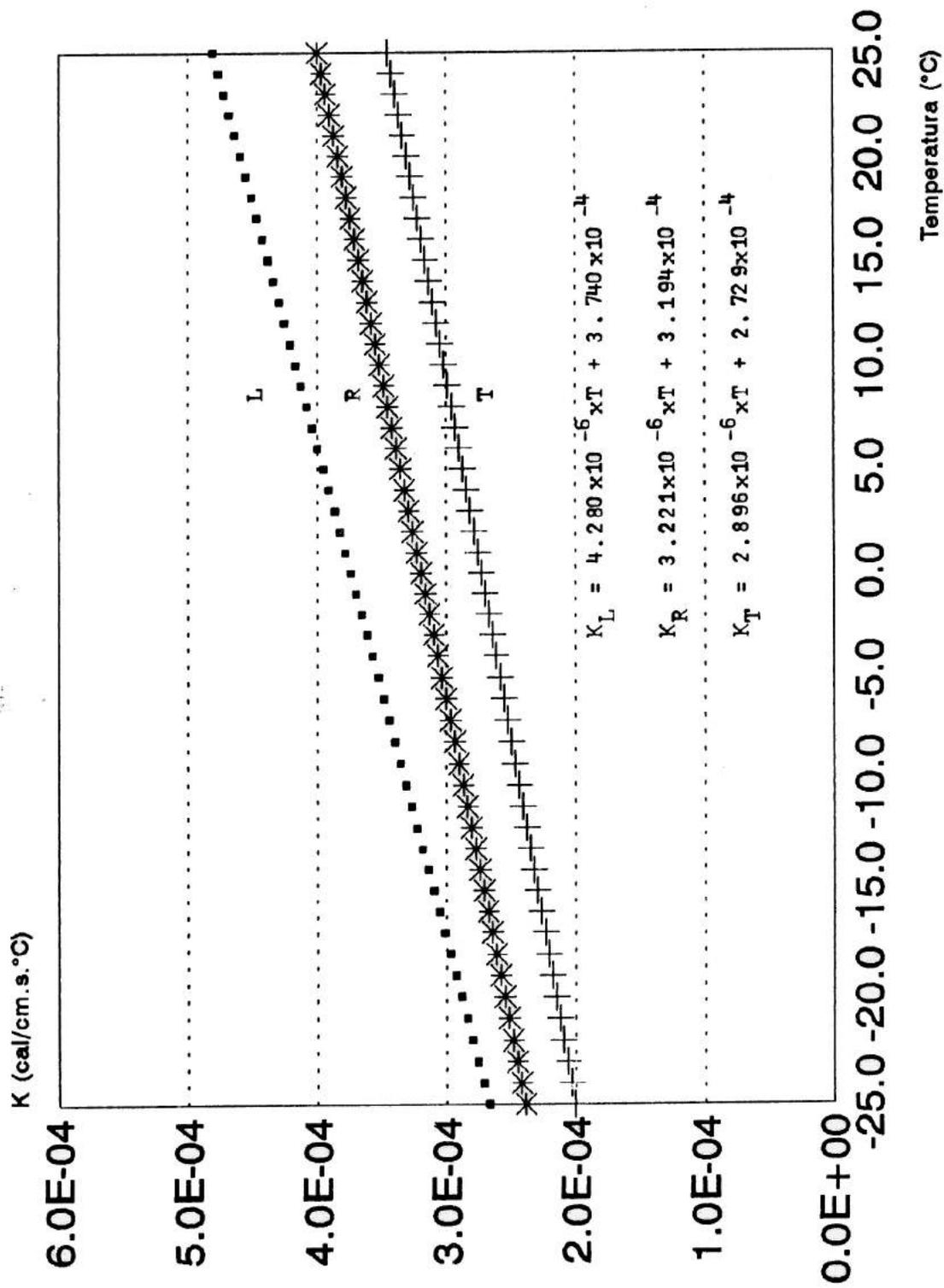


FIGURA 6. CONDUCTIVIDAD TERMICA EN QUINILLA COLORADA

4.4 Descripción Anatómica de las Especies

Comprende la descripción de las características generales, macroscópicas y microscópicas de las especies. La descripción microscópica se complementa con una microfotografía de la estructura anatómica de la madera a 60X. La descripción de las dos especies es la siguiente:

Hura crepitans L.

EUPHORBIACEAE

"CATAHUA AMARILLA"

Características Generales

En condición seca al aire, la albura es de color blanco cremoso y el duramen blanco amarillento; olor y sabor no distintivo; brillo medio; veteado en bandas paralelas y satinado; grano entrecruzado; textura media y heterogénea. Los anillos de crecimiento son muy poco diferenciados por bandas claras de forma irregular.

Descripción Macroscópica.

Poros. Visibles a simple vista, difusos, solitarios y escasos múltiples. Líneas vasculares en la sección tangencial visibles a simple vista, angostas con

prolongaciones cortas a más o menos largas.

Parénquima. Visible con lupa, apotraqueal difuso.

Radios. En la sección transversal, visible con lupa; en la sección tangencial son no estratificados; en la radial, poco contrastados y visibles a simple vista.

Descripción Microscópica

Poros/Vasos.

Poros difusos y ovalados. Diámetro tangencial promedio 186 micras, clasificados como medianos (rango: 145 a 263). En promedio 2 poros/mm² clasificados como muy pocos (rango: 1-4). Solitarios y múltiple radiales de dos a cuatro. Longitud promedio de los elementos vasculares 473 micras, clasificados en medianos (rango: 409 a 537). Platina de perforación simple, horizontales. Puntuaciones intervasculares de 14 micras de diámetro, clasificadas como grandes, alternas, poligonales, abertura inclusa de forma redonda.

Parénquima.

Apotraqueal difuso. En las secciones longitudinales de una a dos células por hilera, no estratificado, alargadas

verticalmente.

Radios

En la sección tangencial extremadamente cortos, de altura promedio 384 micras, de 8 a 13 células de altura; uniseriados y escasos biseriados. En la sección radial homocelulares formados por células procumbentes. De 8 radios/mm en promedio, clasificados como numerosos (rango: 6 a 10). Puntuaciones radiovasculares similares a las intervasculares.

Fibras

Libriformes, longitud promedio 1485 micras, clasificadas como medianas (rango: 1209 a 1761); espesor de pared muy delgada (4 micras), no estratificadas. Puntuaciones simples.

Inclusiones

Presencia de cristales libres romboidales en células del parénquima longitudinal (1 a 2 cristales por célula), escasa presencia de gomas en células de los radios.

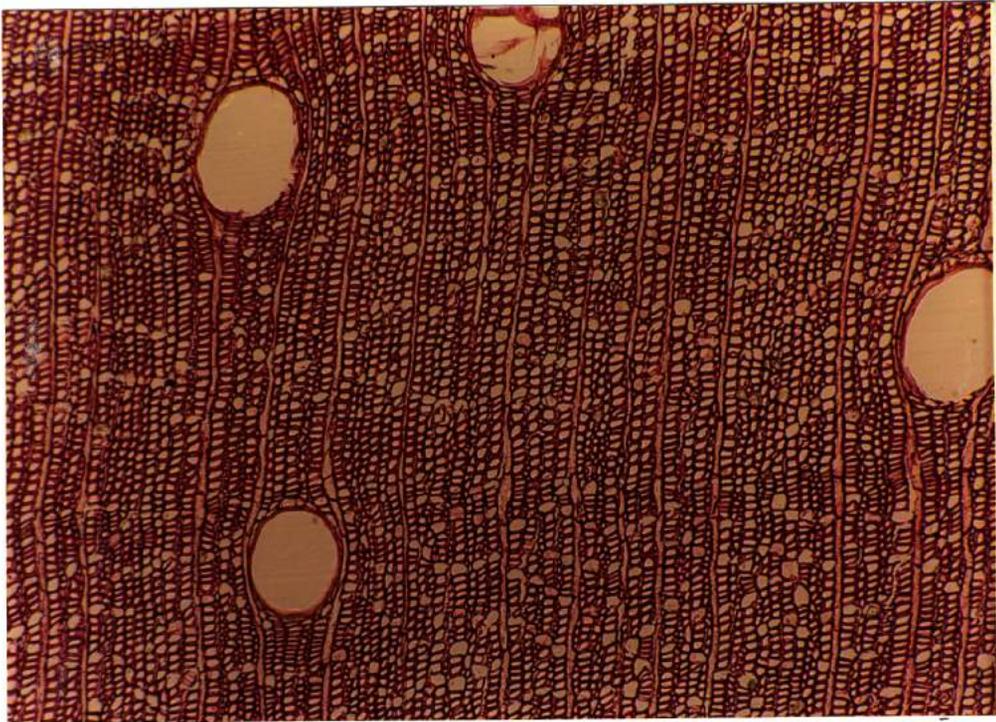


Fig. 7: Catahua amarilla (corte transversal 60X)

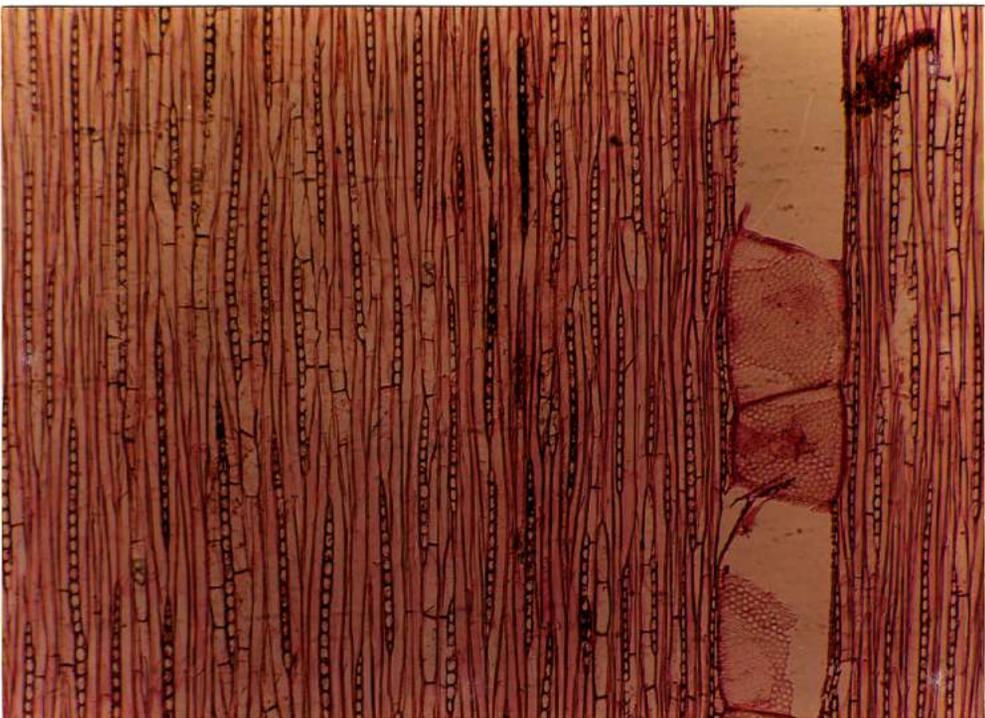


Fig. 8: Catahua amarilla (corte tangencial 60X)

Manilkara bidentata Williams**SAPOTACEAE****"QUINILLA COLORADA"****Características Generales**

En condición seca al aire, la albura es crema rojizo y el duramen de color rojo oscuro; olor y sabor no distintivo; brillo ausente; veteado en arcos superpuestos ligeramente diferenciados; grano entrecruzado; textura fina y homogénea. Anillos de crecimiento diferenciados por bandas oscuras de forma irregular.

Descripción Macroscópica.

Poros. Visibles con lupa, difusos, múltiples radiales; presencia de abundante gomas que taponan parcial o totalmente los vasos; también presencia de tilosis. Líneas vasculares en la sección tangencial visibles a simple vista, muy angostas con prolongaciones cortas.

Parénquima. Visible con lupa, del tipo en bandas delgadas.

Radios. En la sección transversal visibles con lupa; en la sección tangencial son no estratificados; en la fase radial poco contrastados, visibles a simple vista.

Descripción Microscópica

Poros/Vasos

Poros difusos, ovalados. Diámetro tangencial promedio 117 micras, clasificados como medianos (rango: 105 a 158). En promedio 16 poros/mm² clasificados como numerosos (rango: 12 a 24). Múltiples radiales de dos a ocho, con presencia de gomas en los vasos. Longitud promedio de los elementos vasculares 662 micras, clasificados como medianos (rango: 576 a 845). Platina de perforación simple, horizontales. Puntuaciones intervasculares de 5 micras de diámetro, clasificadas como pequeñas, alternas, hexagonales y abertura inclusa de forma redonda.

Parénquima

En bandas delgadas. En las secciones longitudinales de 1-2 células por hilera, no estratificadas, alargadas verticalmente.

Radios

En la sección tangencial extremadamente cortos, de altura promedio 443 micras, de 10 a 22 células de altura;

biseriados y triseriados. En la sección radial son heterocelulares, conformados por células procumbentes con una a dos líneas marginales de células erectas. De 11 radios/mm en promedio, clasificados como muy numerosos (rango: 8 a 13), heterogéneos tipo II. Puntuaciones radiovasculares grandes alargadas horizontalmente.

Fibras

Libriformes, longitud promedio 1525 micras clasificadas como medianas (rango: 1344 a 1766), espesor de pared muy gruesa (9 micras), no estratificadas. Puntuaciones simples.

Inclusiones

Cristales romboidales en las células del parénquima longitudinal (2 a 4 cristales por célula), gomas en forma abundante en las células del parénquima longitudinal y radial.

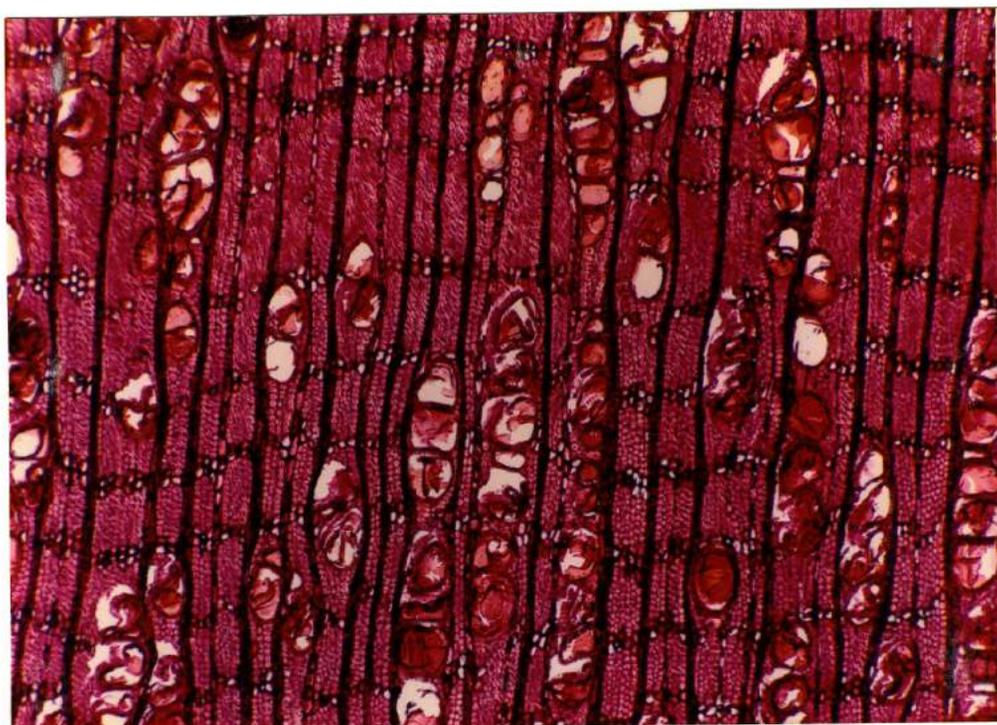


Fig. 9: Quinilla colorada (corte transversal 60X)



Fig. 10: Quinilla colorada (corte tangencial 60X)

5. DISCUSION

5.1 Contenido de Humedad y Densidad

Los resultados obtenidos (Cuadro N° 1 y N° 2) muestran que el contenido de humedad y densidad promedio para la Catahua amarilla es 11% y 0.37 g/cm³, y para la Quinilla colorada de 12% y 0.99 g/cm³ respectivamente, siendo ésta última de mayor densidad, debido a su mayor espesor de pared en relación a la Catahua amarilla.

5.2 Calor Específico

En las Figuras N° 3 y N° 4 se observa que el calor específico en ambas especies son similares en función a la temperatura; la pequeña variación existente se debe al 1% más de contenido de humedad de la Quinilla colorada. Igualmente, al no haberse encontrado diferencias en el sentido paralelo a la fibra, ni transversal a ella, sólo se presenta el promedio para la especie; que confirma resultados obtenidos por diferentes autores (**Arroyo, Wangaard, Kollmann y Dunlap**), quienes consideran que el calor específico es independiente, tanto de la especie de madera como de su peso específico, y siendo únicamente dependiente de la temperatura y del contenido de humedad.

5.3 Conductividad Térmica

Al observar las Figuras N° 5 y N° 6 y en base a los resultados obtenidos de densidades de la Catahua amarilla y Quinilla colorada, se puede afirmar que a mayor densidad, mayor conductividad térmica; explicable por el mayor espesor de pared de la Quinilla colorada (11 micras), así como por el mayor número de células por unidad de área; lo que está en relación con el menor volumen de espacios vacíos.

Igualmente, muestran diferentes valores de conductividad térmica según la dirección de flujo de calor, que está en relación con el carácter anisotrópico de la madera. Se observa mayores valores cuando el flujo de calor es paralelo a la fibra, seguido de cuando lo es en sentido transversal a ellas: radial y tangencial; información que confirma trabajos realizados por otros autores (**Wangaard, Dietz y Schaffer, Wicke y Kollmann**).

Por lo expuesto, la explicación de las diferencias se debe conforme lo señala Malmquist, que cuando la dirección del flujo de calor es paralelo a la fibra se crea un máximo de puentes de calor, siendo éste mínimo cuando la dirección del flujo es perpendicular a la

fibra. También, debido a que la transmisión de la energía térmica ocurre más fácilmente a lo largo de la longitud de una microfibrilla que a través de una serie de ellas, mientras que perpendicularmente al eje de la fibra ocurre una alta resistencia al flujo, debido a la interrupción de la trayectoria por la pobre conducción de los lumenes llenos de aire; tal como lo indican **Kamke y Zylkowski (1989)** y **Siau (1984)**.

En relación a los valores encontrados, con la finalidad de comparar las relaciones entre los promedios de las conductividades longitudinal/radial y longitudinal/tangencial, se encuentran los siguientes valores: Catahua amarilla (1.2 - 1.4) y Quinilla colorada (1.1 - 1.4). Dichos valores son mucho menores a los reportados para maderas de coníferas (2.25 - 2.75) y ligeramente menores a los encontrados por Yoza (1992) para la Moena amarilla (1.9 - 2.1), lo que permite afirmar que la estructura heterogénea de las latifoliadas, especialmente la presencia de poros, disminuye la conductividad térmica, además de otras inclusiones propias de cada especie.

De otro lado, en las Figuras N° 5 y N° 6 se puede observar una pequeña predominancia de los valores

promedios de la conductividad térmica radial en comparación con la tangencial. Específicamente, en Quinilla Colorada éste se ve favorecido por el mayor tamaño de los radios, tanto en ancho como en altura, así como por la mayor densidad de radios (11 radios/mm).

Finalmente, se han encontrado valores de coeficientes de correlación de la regresión lineal simple para las dos especies, siendo éstas positivas con un alto valor, indicando un alto grado de mutua relación lineal entre las dos variables tomadas (temperatura y conductividad térmica), bajo las tres direcciones de corte; tal como se detalla en el Cuadro N° 4.

5.4 Descripción Anatómica de las Especies

En base a la descripción realizada, se encuentra que a mayor espesor de pared, mayor densidad y viceversa. Ello favorece la conductividad térmica, conforme lo señalan Dietz y Schaffer (1980), Wicke (1970) y Kollmann (1968). Es preciso señalar que la Quinilla colorada, a pesar de tener una mayor densidad de poros/mm², presenta mayor volumen de pared celular y por lo tanto menor porosidad; en comparación con la Catahua amarilla.

**CUADRO N° 4 COEFICIENTES DE CORRELACION DE LOS MODELOS
LINEALES PARA CATAHUA AMARILLA Y QUINILLA COLORADA**

Conductividad térmica	r= coeficiente de correlación	r ²
Catahua amarilla		
K Longitudinal	0.988	97.6%
K Radial	0.979	95.8%
K Tangencial	0.994	98.8%
Quinilla colorada		
K Longitudinal	0.987	97.4%
K Radial	0.980	96.0%
K Tangencial	0.999	98.8%

Igualmente, la abundancia de extractivos en la Quinilla colorada, especialmente gomas, que se encuentran obturando la totalidad de vasos, así como en los radios, permite que halla menos espacios vacíos que contienen aire, proporcionando una mayor compactividad, facilitando con ello la conducción de calor a través de la pared, tal como lo señalan Wangaard (1969), Kollmann (1968) y Arroyo (1983). Igualmente, en esta misma especie, la abundancia de cristales cuya composición es carbonato de calcio u oxalato de calcio, podrían tener injerencia para facilitar una mayor conducción de calor.

6. CONCLUSIONES

- 6.1 Los valores de calor específico son similares en ambas especies, lo cual indica que esta propiedad es independiente de la especie y del peso específico. Igualmente, no existe diferencia anisotrópica para esta propiedad.
- 6.2 La conductividad térmica en la madera depende directamente de la temperatura y de su densidad, siendo la conductividad mayor en maderas de mayor densidad y viceversa.
- 6.3 Es notorio el comportamiento anisotrópico para la conductividad térmica en las dos especies estudiadas; siendo la dirección longitudinal la que tiene mayores valores en relación a las otras dos direcciones y sus proporciones son inferiores a las encontradas para maderas de coníferas.
- 6.4 La mayor conductividad térmica en la Quinilla Colorada está en relación directa con el mayor volumen de su pared celular, que redundaría en un menor volumen de espacio vacío.

7. RECOMENDACIONES

- 7.1 Efectuar estudios de conductividad térmica en otras especies tropicales, y así poder desarrollar modelos de conductividad térmica que nos permita establecer con mayor precisión la relación entre la conductividad térmica a lo largo de la fibra y transversal a ella, en base a los datos experimentales obtenidos de la conductividad térmica longitudinal y transversal de la muestra.

- 7.2 Efectuar estudios sobre la influencia de la composición química de la madera en la conducción de calor.

RESUMEN

En el presente trabajo se efectuó el estudio del calor específico y conductividad térmica en función de la temperatura, densidad, planos de corte (longitudinal, radial y tangencial), en las maderas de Catahua amarilla (Hura crepitans L.) y Quinilla colorada (Manilkara bidentata Williams). Asimismo, se ha estudiado la influencia que, sobre las propiedades medidas, produce la estructura anatómica en estas especies.

En relación al calor específico, los valores son similares en ambas especies, demostrándose que la especie y la densidad no tienen ninguna influencia, pero sí es dependiente de la temperatura y del contenido de humedad.

Los resultados de conductividad térmica en función de la temperatura (-25°C a 25°C) y densidad son mayores a mayor densidad de la madera; obteniéndose comportamientos similares a las especies de coníferas; es decir, mayor cuando el flujo de calor es longitudinal seguido del radial y tangencial; pero con las relaciones entre las conductividades longitudinal/radial y longitudinal/tangencial inferiores a los encontrados para

coníferas, explicable por la estructura heterogénea de las latifoliadas, especialmente por la presencia de poros.

Los valores de coeficientes de correlación de la regresión lineal simple aplicados al conjunto de datos para conductividad térmica, según la dirección de flujo de calor, establece que los cambios en las magnitudes dependen directamente de los cambios de temperatura dentro del rango de trabajo establecido.

9. BIBLIOGRAFIA

1. AROSTEGUI, A; et al. 1974. Características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país. Lima. Universidad Nacional Agraria. 483 p.
2. ----- . 1975. Características tecnológicas y usos de la madera de 40 especies del Bosque Nacional Alexander Von Humbolt. Lima, Perú. Ministerio de Agricultura - Universidad Nacional Agraria. 184 p.
3. ----- . 1978. Estudio integral de la madera para construcción. Lima, Perú. Ministerio de Agricultura - Universidad Nacional Agraria. 184 p.
4. AROSTEGUI, A. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas. Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002. Documento de trabajo N° 2. Lima, Perú. 57 p.
5. ARROYO, J. 1983. Propiedades físico-mecánicas de la madera. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 197 p.

6. DIETZ, A; SCHAFFER, E and GROMALA, D. 1980. Wood as a structural material. Clark, C. Heritage Memorial Series on Wood. Vol II. 282 p.
7. DULANP, F. 1912. Heat trasmissivity of Wood. Forest Service Bulletin N° 110.
8. GORCHAKOV, G. 1984. Materiales de construcción. Ed. MIR. Moscú (URSS). 340 p.
9. HUISACAINA, H. 1992. Diseño y construcción de un equipo para determinar la conductividad térmica. Cuadernos de Física. UNALM.
- 10 KAMKE, F. and ZYLKOWSKI, S. 1989. Effects of wood based panel characteristics on thermal conductivity. Forest Products Journal. 39 (5):19-24.
- 11 KITTEL, C. 1949. Interpretation of thermal conductivity of glasses. Physical Review 75 (6).
- 12 KOLLMAN, F. and COTE, W. 1968. Principles of wood science and technology. Tomo I. New York. 592 p.

- 13 MAKU, T. 1954. Studes on Heat Conduction in Wood. Wood Res. Bulletin Institute, Kyoto University.
- 14 MARTIN, R. 1963. Thermal properties of Bark. Forest Products Journal. Vol 8 (10): 419 - 426.
- 15 SIAU, J. 1984. Transport Processes in Wood. Alemania. 245 p.
- 16 VENKATESWARAN, A. 1972. A note on densities and conductivities of wood. Wood Science. Vol 5 (1): 60-62.
- 17 VENKATESWARAN, A. 1974. A note on the relationship between Electrical Properties and Thermal Conductivity of Woods. Wood Science and Technology. Vol 8. 50 - 55p.
- 18 WAARD, R and SKAAR, CH. 1963. Specific heat and conductivity of particleboard as functions of temperature. Forest Products Journal. 1 (6): 31- 38.
- 19 WANGAARD, F. 1979. Wood. Its Structure and properties. Vol I. Memorial Series on Wood. 465p.

- 20 WICKE, A. 1970. Investigaciones sobre la conductividad del calor a través de tableros de pajilla de madera y cemento. Venezuela. 20 p.
- 21 Wood as an Engineering Material. 1980. The Encyclopedia of Wood. Sterling Publishing Co, Inc. New York. 375 p.
- 22 YOZA, L. 1993. Conductividad térmica en madera de Moena (Aniba amazónica Meiz). En Revista Forestal del Perú. 20 (2): 71-77.