

## DETERMINACION DEL PODER CALORIFICO DE 20 ESPECIES FORESTALES DE LA AMAZONIA PERUANA

Por: Manuel E. Uceda Castillo\*

### RESUMEN

Los altos costos del petróleo han obligado a muchos países a buscar sustitutos de esta fuente energética, presentándose los materiales lignocelulósicos y dentro de ellos, la madera, como un recurso de grandes perspectivas para la producción de energía.

En el presente trabajo se ha determinado el poder calorífico superior de 20 especies forestales de la Amazonía Peruana, siguiendo el método que se emplea para determinar el calor de combustión de un material orgánico en estado sólido. El poder calorífico superior promedio de las muestras estudiadas es de 4,751 cal/g.

A partir de los componentes químicos (cenizas, extractivos en alcohol-benceno, extractivos en agua, lignina y carbohidratos totales), de las maderas estudiadas y su poder calorífico determinado experimentalmente, se ha encontrado una fórmula que permite estimar el poder calorífico de cualquier madera, en base al porcentaje de sus compuestos químicos, sin necesidad de recurrir a la determinación experimental.

Se ha estudiado la correlación entre el poder calorífico, expresado en cal/g., y la densidad de la madera, así como el poder calorífico, expresado en cal/cm<sup>3</sup> y la densidad de la madera. También se ha analizado la correlación entre el poder calorífico expresado en cal/g, y los componentes químicos de la madera, hallándose que es variable según la naturaleza de los componentes.

### SUMMARY

In this paper, the superior calorific power of 20 forest species from the Peruvian Amazon has been determined, following the method employed to find the combustion heat of an organic matter in solid state. The average was found to be 4,751 cal/g.

Also a formula has been determined which estimated calorific power of any wood based in the percentage of its chemical compounds, and several correlations between calorific power and wood density have been analyzed.

### INTRODUCCION

El uso de la madera como combustible se remonta al estadio Medio de la Era Prehistórica, cuando el hombre descubre que el fuego permite hacer comestible la pesca de un modo perfecto.

A principios de la Era industrial, la fuente de energía para la producción de vapor, fue sin lugar a dudas la madera, la que después de la Segunda Guerra Mundial, fue reemplazada por la hulla y el petróleo.

A raíz de la crisis del petróleo recurso natural no renovable-muchos países han abocado sus esfuerzos a la búsqueda de sustitutos de esta fuente energética, recobrando nuevamente los

---

\*Profesor del Departamento de Industrias Forestales.

Aceptado para su publicación el 31-7-84

materiales lignocelulósicos la importancia que tuvieron en los primeros estadios de la evolución humana y en la génesis de la Era industrial.

El Perú, por contar con una extensión considerable de bosques naturales y una creciente industria forestal, deberá tomar medidas adecuadas que le permitan utilizar el potencial (energético que representan los residuos de madera de las plantas industriales, así como los que quedan en el bosque sin ser aprovechados).

El objetivo del presente trabajo es proporcionar el poder calorífico de 20 especies forestales de nuestra amazonía, y, una fórmula que permite estimar el poder calorífico de una madera a partir de su composición química, las que servirán de base al estudio de las combustiones reales para la generación de energía térmica o eléctrica.

## REVISION DE LITERATURA

### Poder Calorífico de la Madera

Kollman, F. (10), considera para la madera anhidra y sin cenizas, un p.c. promedio de 4,500 cal/g para maderas latifoliadas de climas templados, mientras que Brown H. (3) reporta para las mismas maderas un valor promedio de 4,700 cal/g.

Doat, J. (8), en su estudio efectuado con 111 especies de maderas tropicales encontró un p.c. promedio de 4,770 cal/g.

El poder calorífico es llamado poder calorífico superior (p.c.s.), cuando la combustión se efectúa a volumen constante y el agua, formada durante la combustión es condensada (2).

De los métodos de determinación del p.c.s. se considera, que el de mayor exactitud es el del calorímetro (2,3).

El funcionamiento de la bomba calorimétrica se basa en que el calor desprendido en la combustión del producto objeto de estudio es ganado por la masa del calorímetro (agua más equivalente en agua) (12).

Midiendo la elevación de temperatura y conociendo la masa de agua y el equivalente en agua del calorímetro y de la boma, puede calcularse el p.c.s. de un combustible sólido (13).

### Poder Calorífico y Composición Química de la Madera

Se debe señalar que la composición química posee una fuerte influencia en el p.c.; sobre todo la presencia de lignina y los extractivos totales como taninos, grasas y aceites (1).

Doat, J. (8). encontró para la lignina aislada por el ácido sulfúrico 6,100 cal/g. y los extractivos en alcohol-benceno 6,250 a 6,800 cal/g.; valor que es inferior al reportado por otros autores (9, 11) quienes asignan 8,000 a 10,009 cal/g., pero estas cifras corresponden a maderas resinosas.

En una pulpa soluble Doat, J. (8) obtuvo 4,070 cal/g., y para una pulpa blanqueada, conteniendo principalmente celulosa y 29 % de pentosanos 4,130 cal/g., admitiendo que la celulosa y pentosanos tienen p.c.s. del mismo orden. Para una mezcla de maderas africanas encontró, aproximadamente 4,500 cal/g. para los extractivos en agua.

## Poder Calorífico y Densidad

La densidad de la madera no influye en forma directa sobre el p.c. (1,8).

Para un porcentaje de humedad igual, un volumen dado de madera densa tiene un p.c. más elevado que una madera más liviana (6).

Pero por el contrario si no se considera las materias extraíbles que puedan estar presentes, un peso dado de madera a un cierto contenido de humedad dará más o menos la misma cantidad de calor sea ésta una madera densa o liviana. La única diferencia es que las maderas duras queman más lentamente. Un mismo peso de madera no da forzosamente un mismo número de calorías en un tiempo dado (6).

## Variabilidad del Poder Calorífico dentro de una Especie de Madera.

Doat, J. (8), al determinar el p.c. en el sentido radial, encontró una escasa variabilidad, la misma que era inferior a los errores experimentales. En cambio entre árboles de la misma especie, el p.c. de un árbol a otro varió entre 2% y 7%. Esta variación, la autora la atribuye a la variabilidad de la constitución química de la madera.

## Densidad y Composición Química de las Especies Estudiadas

La densidad (Cuadro 1) y la composición química (Cuadro 2) de las especies estudiadas fueron determinadas por Bueno, J. y otros (5). Los valores de la densidad se refieren a la densidad de la madera seca al horno.

**CUADRO 1**  
**DENSIDAD DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS**

Muestra No. 1	Especies	Densidad seca al horno
1	Apacharama	0,81
2	Azufre Caspi	0,74
3	Bellaco Caspi	63
4	Carahuasea	0,48
5	Caupuri	0,45
6	Copaj	0,61
7	Cumala blanca	0,50
8	Chimicua	0,72
9	Huamansamana	0,35
10	Isma moena	0,63
11	Jarabe huayo	0,48
12	Machimango colorado	0,89
13	Marupá	0,43
14	Quillo sisa	0,36
15	Requia blanca	0,78
16	Sacha caoba	0,70
17	Sacha uvilla	0,40
18	Shiari	0,30
19	Shiringa masha	0,67
20	Tornillo	0,37

**CUADRO 2**  
**ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS**

Muestra No. Especie	Compuestos Químicos (%)					
	Cenizas	Extractivos en alcohol benceno	Extractivos	Lignina	Celulosa	Pentosanos
1 Apacharama	2,75	1,41	3,15	29,22	51,88	12,14
2 Azufre caspi	0,61	6,13	2,14	24,24	51,69	16,96
3 Bellaco caspi	0,51	3,18	5,27	24,85	50,88	15,07
4 Carahuasca	0,78	2,26	2,83	28,46	50,62	11,34
5 Caupuri	0,54	2,99	3,03	28,44	49,52	13,68
6 Copal	1,04	3,84	2,19	24,18	48,22	16,68
7 Cumala blanca	0,44	3,49	2,77	24,74	50,25	14,00
8 Chimícua	2,83	3,02	2,98	31,19	48,17	14,71
9 Huamansamana	0,67	2,12	3,64	28,72	52,98	11,78
10 Isma moena	0,25	2,52	3,72	30,37	51,89	13,87
11 Jarabe huayo	0,72	3,72	6,25	22,41	48,24	15,44
12 Machimango colorado	1,02	2,12	5,88	29,92	51,05	12,13
13 Marupá	0,72	4,67	2,90	28,32	49,90	12,58
14 Quillo sisa	1,52	3,44	5,06	26,27	52,63	17,13
15 Requia blanca	0,57	3,20	4,48	30,28	48,29	9,49
16 Sacha caoba	0,73	1,28	3,41	32,74	52,70	12,53
17 Sacha uvilla	0,41	2,59	2,22	27,78	53,89	12,64
18 Shiari	0,71	3,84	2,82	24,42	52,00	13,14
19 Shiringa masha	0,59	1,79	4,26	27,80	53,97	14,83
20 Tornillo	0,95	3,61	4,26	29,73	54,07	11,60

## MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en el Laboratorio de Bioquímica del Departamento de Nutrición del Programa Académico de Zootecnia de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Procedencia y Recolección de Muestras Las muestras fueron recolectadas por la Sección de Pulpa y Papel del Departamento de Industrias Forestales, de los Distritos de Jenaro Herrera, Nauta y Puerto Almendras, para el Convenio UNA-MIT "Estudio de Posibilidades Industriales de las Maderas Nacionales para Fabricación de Pulpa para Papel".

Las especies estudiadas en el presente trabajo se seleccionaron al azar dentro de las 53 especies estudiadas por el Convenio en referencia.

La identificación botánica de las especies estudiadas estuvo a cargo de la Sección de Dendrología del Departamento de Manejo Forestal.

En el Cuadro 3 se presenta la relación de especies estudiadas.

**CUADRO 3**  
**ESPECIES ESTUDIADAS**

<b>Nombre Común</b>	<b>Nombre Científico</b>
Apacharama	Licania elata Pilger
Azufre caspi	Symphonia globulifera L. f.
Bellaco caspi	Himatanthus sucubus (Spruce) Woodson
Carahuasca	Guatteria modesta Diels,
Caupuri	Virola elongata (Benth) Warb.
Copal	Protium llewellyni Macbr.
Cumala blanca	Virola rufula Warb.
Chimicua	Perebea chimicua Macbr.
Huarnansamana	Jacaranda copaia (Aubl.) D. Don
Isma moena	Endlicheria williamssi O.C. Schmidt
Jarabe huayo	Macoubea guianensis Aublet
Machirango colorado	Eschweilera iquitoensis Kunth
Marupá	Simarouba amara Aubl.
Guillo sisa	Vochysia lomatophylla Stand
Requia blanca	Trichilia sexanthera C. D C.
Sacha caoba	Huberodendron swietenoides (Gleason) Ducke
Sacha uvilla	Coussapoa villosa Poepp. y Endl.
Shiari	Cecropia leucocoma (Miq.) Mart.
Shiringa masha	Micrandra spruceana (Baill) R.E. Schult.
Tornillo	Cedrelinga catenaeformis Ducke

## **Determinación del poder calorífico superior**

La muestra de madera estaba constituida de tres árboles por especie, cortados en tres trozas de 1m. Con una sierra radial, se aserró transversalmente cada una de las nueve trozas que conformaban a la muestra por especie. El aserrín obtenido de cada una de las trozas fue tamizado en mallas de 40 y 60, utilizándose para el análisis, mezclas de pesos iguales de las fracciones de aserrín que pasaron la malla 40 y fueron retenidas por la malla 60 en cada una de las especies.

El p.c.s. se determinó con la ayuda de una bomba calorimétrica, colocada en un calorímetro adiabático.

El método utilizado es el mismo que se empleó para determinar el calor de combustión de un material orgánico en estado sólido.

## **ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

### **1. Regresión Lineal Simple**

Para determinar el grado de asociación entre el p.c.s. y la densidad así como con los compuestos químicos de las maderas, se utilizó el método de los cuadrados mínimos y sus respectivos coeficientes de correlación.

### **2. Regresión Lineal Múltiple**

Se empleó el programa implementado por el Centro de Estadística y Procesamiento de Datos de la Universidad Nacional Agraria. Este programa realiza el análisis de regresión lineal múltiple por el método de "Stepwise".

El programa permite determinar qué variables pueden mejorar la bondad de ajuste del modelo. Igualmente puede determinar qué variables deben ser excluidas, de acuerdo a un criterio de varianza dada.

## **RESULTADOS**

### **Poder calorífico superior**

Los resultados promedio del p.c.s. de cada una de las 20 especies estudiadas se muestra en el Cuadro 4; estos promedios se han obtenido entre resultados cuya diferencia era menor de lo/o, siendo repetidos aquellos ensayos cuya discrepancia era superior al porcentaje mencionado.

### **Poder calorífico y densidad de la madera**

En el Cuadro 5, se muestra la densidad de las especies estudiadas, así como el p.c.s. expresado en calorías por peso y en calorías por volumen de madera, este último se ha obtenido multiplicando la densidad de las muestras por su correspondiente p.c. expresado en calorías por peso.

El coeficiente de correlación entre el p.c.s. expresado en cal/g. y la densidad de la madera, corresponde a un valor de 0.03 y el coeficiente de correlación entre el p.c. expresado en cal/cm<sup>3</sup> y la densidad es de 0.99.

**CUADRO 4**

**PODER CALORIFICO SUPERIOR PROMEDIO**

Muestra No.	Especies	p. c. s. cal/g.
1	Apacharama	4670
2	Azufre caspi	4770
3	Bellaco caspi	4700
4	Carahuasca	4780
5	Caupuri	4768
6	Copal	4721
7	Cumala blanca	4735
8	Chimicua	4810
9	Huamansamana	4730
10	Isma moena	4798
11	Jarabe huayo	4677
12	Machimango colorado	4745
13	Marupá	4883
14	Quillo sisa	4690
15	Requia blanca	4885
16	Sacha caoba	4763
17	Sacha uvilla	4754
18	Shiari	4719
19	Shiringa masha	4621
20	Tornilfo	4798

**CUADRO 5**

**PODER CALORIFICO SUPERIOR EXPRESADO EN CALORIAS  
POR PESO Y VOLUMEN**

Muestra No.	Especies	Densidad	p.c.s. cal/g.	p.c.s. cal/cm3
1	Apacharama	0,81	4670	3783
2	Azufre caspi	0,74	4770	3530
3	Bellaco ca spi	0,63	4700	2961
4	Carahuasca	0,48	4780	2294
5	Caupurí	0,45	4768	2146
6	Copal	0,61	4721	2880
7	Cumala blanca	0,50	4735	2368
8	Chimicua	0,72	4810	3463
9	Huamansamana	0,35	4730	1656
10	Isma moena	0,63	4798	3023
11	Jarabe huayo	0,48	5677	2245
12	Machimango colorado	0,89	4745	4223
13	Marupá	0,43	4883	2100
14	Guillo sisa	0,36	4690	1688
15	Requia blanca	0,78	4885	3810
16	Sacha caoba	0,70	4763	3334
17	Sacha uvilla	0,40	4754	1902
18	Shiari	0,30	4719	1416
19	Shiringa masha	0,67	4621	3096
20	Tornillo	0,37	4789	1775

## Poder calorífico superior y composición química.

### Correlaciones simples

Con los valores de los componentes químicos de la madera y sus p.c.s. se determinó los siguientes coeficientes de correlación:

- Poder calorífico y extractivos en alcohol
- Poder calorífico y extractivos en alcohol benceno: 0.30
- Poder calorífico y extractivos en agua caliente: -0.26.
- Poder calorífico y lignina: 0.47.
- Poder calorífico y carbohidratos totales: -0.57

### Regresión y correlación múltiple

Se encontró un coeficiente de correlación múltiple de 0.97 y un coeficiente de determinación de 0.94 para una ecuación de regresión múltiple de la fórmula siguiente:

$$Y = 5266 - 16.36C_T + 0.23L.C_T - 5.73C_e.E_a + 1.76E_{AB}.L$$

Donde:

y Poder calorífico superior estimado, cal/g.

$C_e$  Contenido de cenizas, %.

$C_t$  Contenido de carbohidratos totales, %

$E_{AB}$  Contenido de extractivos en alcohol benceno %.

$E_a$  Contenido de extractivos en agua caliente, %.

L Contenido de lignina, %.

### Análisis de Varianza

En los Cuadros 6, 7, 8, 9 se presenta el análisis de varianza y la prueba de significación de cada una de las variables y combinación de éstas que conforman la ecuación.

### Poder calorífico superior estimado

Con los valores de los componentes químicos y la fórmula de regresión múltiple se encontró los valores estimados del p.c.s., los que se muestran en el Cuadro 10.

### Error absoluto y relativo

Los valores de los errores absolutos o residuales y los errores relativos expresados en por ciento de residuo entre valores encontrados con la fórmula se presenta en el Cuadro 11.



**CUADRO 6**  
**ANALISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE X 5 (\*)**

Fuente de variabilidad	G.I.	Sume de cuadrados	Cuadrado medio	Fc	F t	
					0,05	0,01
Promedios	1	$0.45138 \times 10^9$	$0.45138 \times 10^9$			
Regresión	1	$0.27147 \times 10^5$	$0.27147 \times 10^5$	9.00**	4,41	8,28
Error	18	$,0.54261 \times 10^4$				

(\*) x5 = Contenido de carbohidratos totales

**CUADRO 7**  
**ANALISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE X2 x 4 (\*)**

Fuente de variabilidad	G.I.	Sume de cuadrados	Cuadrado medio	Fc	F t	
					0,05	0,01
Promedios	1	$0.45138 \times 10^9$	$0.45138 \times 10^9$			
Regresión	2	$0.50988 \times 10^5$	$0.25494 \times 10^5$	13.33**	4,45	8,40
Error	17	$0.30420 \times 10^5$	$0.17894 \times 10^4$			

x 2: Contenido de extractivos en Alcohol - Benceno

x 4: Contenido de Lignina

**CUADRO 8**  
**ANALISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE X<sub>4</sub> X<sub>5</sub> \***

Fuente de variabilidad	G.I.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Fc	F t	
					0,05	0,01
Promedio	1	$0.45138 \times 10^9$	$0.45138 \times 10^9$			
Regresión	3	$0.74042 \times 10^5$	$0.24681 \times 10^5$	50.07**	4,49	8,53
Error	6	$0.73658 \times 10^4$	$0.46036 \times 10^3$			

(\*) X 1 :Contenido de lignina  
 X 3 : Contenido de carbohidratos totales

**CUADRO 9**  
**ANALISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE X<sub>1</sub> X<sub>3</sub>**

Fuente de variabilidad	G.I.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Fc	F t	
					0,05	0,01
Promedio	1	$0.45138 \times 10^9$	$0.45138 \times 10^9$			
Regresión	4	$0.77568 \times 10^5$	$0.19392 \times 10^5$	13.77**	454	8,68
Error	5	$0.38397 \times 10^4$	$0,25598 \times 10^3$			

(\*) X4 Contenido de cenizas  
 X5 Contenido de extractivos en agua.

**CUADRO 10**  
**PODER CALORICO SUPERIOR ESTIMADO**

No. Especie	Composición Química %					P.C.S. Estimado cal/g.
	Cenizas	Extractivos alcohol-benceno	Extractivos en agua	Lignina	Carbohidratos totales	
1 Apacharama	2,75	1,41	3,15	29,22	64,02	4677
2 Azufre caspi	0,61	6,13	2,14	2,424	68,65	4783
3 Bellaco caspi	0,51	3,18	5,27	2,485	65,95	4692
4 Carahuasca	0,78	2,26	2,83	28,46	61,96	4763
5 Caupuri	0,54	2,99	3,03	2,844	63,20	4791
6 Copaj	1,04	3,84	2,19	24,18	64,90	4720
7 Cumala blanca	0,44	3,49	2,77	24,74	64,25	4730
8 Chemicua	2,83	3,02	2,98	31,19	62,88	4811
9 Huamansarnana	0,67	2,12	3,64	28,72	64,76	4732
10 Isma moena	0,25	2,52	3,72	30,37	65,76	4784
11 Jarabe huayo	0,72	3,72	6,25	22,41	63,68	4677
12 Michímango colorado	1,02	2,12	5,88	29,92	63,18	4749
13 Marupá	0,71	4,76	2,90	28,32	63,48	4867
14 Quito sisa	1,52	3,44	5,06	26,27	69,76	4666
15 Requia blanca	0,57	3,20	4,48	30,68	57,78	4891
16 Sacha caoba	0,73	1,28	3,41	32,74	65,25	4754
17 Sacha uvilla	0,41	2,59	2,22	2,778	65,53	4729
18 Shiari	0,71	3,84	2,82	24,42	65,14	4724
19 Shiringa masha	0,59	1,79	4,26	27,80	68,80	4658
20 Tornillo	0,95	3,61	4,26	29,73	65,67	4812

**CUADRO 11  
ERRORES ABSOLUTOS Y RELATIVOS**

<b>Muestra No.</b>	<b>Especies</b>	<b>p.c.s. experimental cal/g.</b>	<b>p.c.s. calculado cal/g.</b>	<b>Error absoluto</b>	<b>Error relativo</b>
1	Apacharama	4670	4677	-77	-0,15
2	Azufre caspi	4770	4783	-13	-0,27
3	Bellaco caspi	4700	4692	7	0,15
4	Carahuasca	4780	4763	17	0,36
5	Caupuri	4768	4791	-23	-0,48
6	Copal	4721	4720	1	0,02
7	Cumala blanca	4735	4730	5	0,10
8	Chimicua	4810	4811	-1	-0,02
9	Huamansamana	4730	4732	-2	-0,04
10	Isma moena	4790	4784	14	0,29
11	Jarabehuayo	4677	4677	0	0,00
12	Machimango colorado	4745	4749	-4	-0,08
13	Marupá	4883	4867	16	0,33
14	Quillo sisa	4690	4666	24	0,51
15	Requia blanca	4885	4891	-6	-0,12
16	Sacha caoba	4763	4754	9	t 0,19
17	Sacha uvilla	4754	4729	25	52
18	Shiari	4719	4724	-5	-0,1
19	Shiringa masha	4621	4658	-37	-0,8
20	Tornillo	4798	4812	-14	-0,29

## DISCUSION DE RESULTADOS

### Poder Calorífico Superior

El p.c.s. de las especies estudiadas (Cuadro 4) representa el promedio de dos ensayos realizados en la bomba calorimétrica. Estos poderes caloríficos hallados arrojan un valor medio de 4,751 cal/g. para las especies tomadas como muestras de estudio, valor similar al reportado por Doat J. (8) que es de 4,770 cal/g y ligeramente superior al poder calorífico de las maderas latifoliadas de climas templados reportadas por Kollman F. (10) y Brown H. (3).

Los valores extremos de los p.c.s. han sido dados por la “shiringa masha” con 4.621 cal/g y la “requia blanca” con 4,885 cal/g., presentando una desviación standard de 73.41 y un coeficiente de variación de 1.54.

### Poder Calorífico y Densidad

Las especies estudiadas presentan densidades que oscilan entre 0.30 y 0.89 en el límite inferior y superior respectivamente.

Con el objeto de ver si existe correlación entre la densidad y el p.c. se calculó el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación entre la densidad de la madera y el p.c. por peso (cal.), así como entre el p.c. por volumen (cal/cm<sup>3</sup>), también llamado poder calorífico específico. Los coeficientes de correlación y determinación para ambos casos son los siguientes:  $r = 0.03$ ,  $d = 0.0009$  y  $r = 0.99$ ,  $d = 0.99$ , estos valores nos indican de que no existe correlación entre el p.c. de una madera y su densidad. En cambio, si el poder calorífico está expresado en base al volumen de madera cal/cm<sup>3</sup> (Cuadro 5), se encuentra una excelente correlación 0.99.

## **Poder Calorífico Superior y Composición Química**

### **1. Correlaciones Simples**

Con el fin de ver la incidencia de los compuestos químicos de la madera sobre el p.c., se calculó su correspondiente coeficiente de correlación; así, observamos que, particularmente las cenizas y los extractivos en agua tienen poco o nada de incidencia sobre el p.c.s. lo cual es normal, toda vez que se sabe que las materias minerales no tienen prácticamente p.c. y por el contrario absorben calor (2); y que en los extractivos en agua se encuentra parte de cenizas, ciertos azúcares, un poco de lignina, almidón, etc.

El coeficiente de correlación de los extractivos en alcohol-benceno y el p.c.s. es un poco más elevado que los dos anteriores, pero todavía no es significativo; se puede explicar aquello por los contenidos bastante bajos de los extractivos en la madera, siendo el valor más alto 6.13 % que corresponde al azufre caspi, los demás se sitúan en un rango de 1 a 4 %.

La correlación se mejora cuando se considera la lignina y el p.c.s., siendo el coeficiente de 0.47.

Aún cuando no es posible predecir con precisión el p.c.s. en función del porcentaje de lignina, se puede admitir que una madera rica en lignina tendrá generalmente, siendo los otros componentes iguales, un poder calorífico superior al de una madera poco lignificada.

La correlación carbohidratos y p.c.s. se sitúa a un nivel más favorable, siendo el coeficiente de correlación de -0.57, lo que nos indica que, sin negar la influencia de otros constituyentes, una especie rica en carbohidratos (celulosa y pentosanos) podrá tener un p.c. más bajo que el promedio de las otras maderas. Esta constatación es por otra parte la misma que la anterior teniendo en cuenta que una madera rica en carbohidratos es a menudo pobre en lignina.

Si observamos los Cuadros 2 y 4, se nota que les corresponde poderes caloríficos más elevados a las maderas que contienen los mayores porcentajes de productos extraíbles en alcohol-benceno y lignina a la vez, lo que concuerda con la literatura consultada (1, 2, 8, 9, 11).

### **2. Regresión y Correlación Múltiple**

En el análisis de varianza de la regresión por pasos de las variables que conforman la ecuación para estimar el p.c. se obtuvo valores de F calculados altamente significativos tal como se observa en los Cuadros 6, 7, 8 y 9.

El coeficiente de correlación múltiple y el coeficiente de determinación son elevados, lo que indica que la predicción del p.c.s. de la madera puede ser hecha con una precisión satisfactoria a partir de su composición química, utilizando la fórmula citada.

Los poderes caloríficos estimados, son muy similares a los poderes caloríficos experimentales (Cuadros 10 y 11); siendo el error máximo de -37 cal/g lo que traducido en error relativo, representa el -0.80 por ciento; porcentaje inferior al que se había considerado como porcentaje de precisión en la determinación experimental del p.c.

Lo dicho anteriormente refuerza la validez de la fórmula hallada para ser utilizada en la determinación del p.c. de una madera a partir de su composición química.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El poder calorífico de las maderas tropicales es ligeramente superior al de las maderas latifoliadas de climas templados.
2. La correlación entre la densidad de la madera y el poder calorífico expresado en cal/g es prácticamente nula ( $r = 0.03$ ), pero existe una excelente correlación cuando el poder calorífico es expresado en cal/cm<sup>3</sup> ( $r = 0.99$ ).
3. Las maderas ricas en lignina y en extractivos en solventes orgánicos como la mezcla alcohol-benceno tienen un poder calorífico más elevado, mientras que las maderas ricas en celulosa pentosanos tienen un poder calorífico bajo.
4. El poder calorífico de la madera, puede estimarse con una aproximación satisfactoria a partir de sus componentes químicos, con la ayuda de correlaciones múltiples.

## BIBLIOGRAFIA

1. AMY, L. Les bases physico-chimiques de la cellulose et des maté riaux ligneux. Cahier du Centre Technique du Bois. Cahier No. 45. Mai France. 1961.30pp.
2. BAILLY, M. Thermodynamique Technique Edit. Bordas. París, Francia. 1971. 464 pp.
3. BROWN, H., PANSHIN, A. -and FORSAITH ' C. Texbook of Wood Technology, Mc Grow-Hill Book Company. Inc.. New York. 1952. 783pp.
4. BROWSTER, A. Combustión y Combustibles. Editorial Glemm Buenos Aires.. 1947. 320 pp.
5. BUENO, J. Estudio de Posibilidades Industriales de las Maderas Nacionales para Fabricación de Pulpa para Papel. Departamento de Industrias Forestales UNA-MIT, Lima. 1978. 223 PP.
6. CAHIERS DU CENTRE TECHNIQUE DU BOIS. Le Comportement du bois au Feu. Cahier No. 74-3me. edition Mai. París. 1973. 46 pp.
7. CALZADA, J. Métodos Estadísticos para la Investigación. Editorial Jurídica S.A. Tercera Edición. Lima. 1970. 644 pp.
8. DOAT, J. Le Pouvoir Calorifique des Bois Tropicaux. Bois et Forêts des Tropiques. Centre Technique Forestier Tropical No. 172. France '1977. pp. 33-44.
- 9 - - - - - et PETROF, G. La Carbonisation des bois Tropicaux. Bois et Forêts des Tropiques No. 159. Janvier Fevrier, France 1975.pp.5572.
10. KOLLMAN, F. Tecnología de la Madera. Madrid. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera Vol. 1. Madrid. 1959. 675 pp.
11. N I E RAT, J. Le bois de feu et le Carbon de au Service du Chauffage domestique. Cahier du Centre Tecnique du Bois, Cahier No. 16. Septembre 1966. France.
12. RODRIGUEZ J. Los Controles en la Fabricación del Papel Editorial Blume.. Madrid. 1970. 359 pp.

13. SEARS, F. y ZEMANSKY, M. Física General. Editorial Aguilar. Madrid 1973. 850 pp.

14. STEEL, R. and TORRES, S. Principle and Procedures of Statistics. Mc Graw Hill - Book Company Inc. New York, 1960. 481 pp.

