

# Análisis de los parámetros de la calidad de carbón vegetal

Sayra Navas

## Introducción

En el artículo publicado anteriormente "Calidad del carbón vegetal: evaluación preliminar" (1), se incluyeron:

1. Aspectos generales sobre los mercados nacional e internacional del carbón vegetal.
2. Los materiales y métodos de fabricación y análisis del carbón vegetal.
3. Los resultados y conclusiones de esa evaluación.

En este artículo, como complemento del anterior, se presenta una discusión detallada de los resultados de cada uno de los parámetros de calidad obtenidos.

La importancia de esta publicación es que muestra y discute correlaciones de los parámetros de calidad del carbón vegetal con:

- La madera que le dio origen (2, 3)
- El proceso de fabricación (2, 4)

- Estándares de importación de carbón vegetal de Europa Occidental y Estados Unidos (4, 5)

## Resultados

Aparecen en esta sección los cuadros 1 y 2 relacionados con estándares de importación de carbón vegetal de Europa Occidental y Estados Unidos.

Los cuadros 3 y 4 describen los resultados del análisis químico básico de poder calorífico y de la densidad del carbón analizado.

El cuadro 5 es un resumen de los resultados de un análisis estadístico realizado con los valores obtenidos para cada una de las variables estudiadas.

Los cuadros 6 y 7 presentan resultados de otros estudios afines o similares para efectos de comparación.

Finalmente se incluyen figuras que describen el análisis estadístico y sus comparaciones con resultados de la literatura.

**Cuadro 1**  
**Estándares de importación de carbón vegetal**  
**de Europa Occidental y Estados Unidos (5)**

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Humedad   | 5-8%                      |
| Materias volátiles<br>(base seca y sin cenizas) | aprox. 20%                |
| Densidad a granel                               | 300-350 kg/m <sup>3</sup> |

**Cuadro 2**  
**Estándares de importación de carbón vegetal del Reino Unido (4)**

|                                     |         |
|-------------------------------------|---------|
| % de humedad                        | < 5,0   |
| % de materias volátiles             |         |
| base húmeda                         | < 13,0  |
| base seca                           | < 13,7  |
| % de cenizas                        |         |
| base húmeda                         | < 3,0   |
| base seca                           | < 3,2   |
| % de carbón fijo                    |         |
| bas húmeda                          | > 80,0  |
| base seca                           | > 84,2  |
| Poder calórico cal/g<br>(base seca) | > 7.200 |

**Nota:** Para efectos de comparación, los datos sobre base seca se calcularon a partir de los valores sobre base húmeda.

## Discusión de resultados

### Contenido de humedad

De acuerdo con los cuadros 3 y 5, y figuras Ia y Ib se nota que, en términos generales, el contenido de humedad de

las muestras analizadas en este estudio es más alto de lo esperado. El valor promedio de humedad del 8,2% es bastante más alto que los valores de humedad del 3,5% al 4,6% reportados por Paddon y Harker para carbón de roble producido en un horno metálico transportable (Cuadro 6), en condiciones similares a las del presente estudio

**Cuadro 3**  
**Análisis químico de carbón de roble, procedente de la**  
**zona de Villa Mills (base humedad/base seca)**

| N°<br>Muestra | BASE HUMEDAD (%) |      |     |      | BASE SECA (%) |     |      | MVSC<br>(%) |
|---------------|------------------|------|-----|------|---------------|-----|------|-------------|
|               | H                | MV   | C   | CF   | MVS           | CS  | CFS  |             |
| 1             | 6,7              | 23,5 | 0,8 | 69,0 | 25,2          | 0,9 | 74,0 | 25,4        |
| 2             | 7,4              | 16,8 | 1,3 | 74,5 | 18,1          | 1,4 | 80,5 | 18,3        |
| 3             | 6,0              | 25,3 | 0,6 | 68,1 | 26,9          | 0,6 | 72,4 | 27,0        |
| 4             | 9,3              | 13,4 | 0,9 | 76,4 | 14,8          | 1,0 | 84,2 | 14,3        |
| 5             | 7,6              | 17,6 | 0,9 | 73,8 | 19,0          | 1,0 | 79,9 | 19,7        |
| 6             | 5,7              | 17,9 | 0,8 | 75,5 | 19,0          | 0,8 | 80,1 | 19,1        |
| 7             | 8,5              | 18,0 | 0,8 | 72,6 | 19,7          | 0,9 | 79,3 | 19,3        |
| 8             | 8,5              | 16,3 | 1,1 | 74,1 | 17,8          | 1,2 | 81,0 | 18,7        |
| 9             | 7,1              | 18,8 | 0,7 | 73,4 | 20,2          | 0,8 | 79,0 | 20,3        |
| 10            | 7,5              | 18,7 | 0,8 | 73,0 | 20,2          | 0,9 | 78,9 | 20,3        |
| 11            | 7,6              | 24,4 | 0,5 | 67,5 | 26,4          | 0,5 | 73,1 | 26,5        |
| 12            | 7,7              | 18,3 | 0,7 | 73,3 | 19,8          | 0,8 | 79,4 | 19,9        |
| 13            | 9,9              | 13,4 | 0,9 | 75,7 | 14,9          | 1,0 | 84,0 | 15,1        |
| 14            | 9,7              | 13,6 | 0,8 | 75,7 | 15,3          | 0,9 | 83,8 | 15,4        |
| 15            | 9,1              | 16,6 | 0,9 | 73,4 | 18,3          | 1,0 | 80,7 | 18,4        |
| 16            | 9,8              | 14,8 | 0,9 | 74,5 | 16,4          | 1,0 | 82,6 | 16,5        |
| 17            | 8,2              | 16,5 | 0,8 | 74,6 | 18,0          | 0,9 | 81,3 | 18,4        |
| 18            | 9,4              | 14,8 | 0,8 | 75,0 | 16,3          | 0,9 | 82,8 | 16,4        |
| 19            | 8,3              | 21,3 | 0,9 | 69,6 | 23,2          | 1,0 | 75,9 | 23,4        |
| 20            | 9,6              | 14,9 | 0,8 | 74,7 | 16,5          | 0,9 | 82,6 | 16,6        |
| 21            | 8,7              | 19,8 | 0,8 | 70,7 | 21,7          | 0,9 | 77,4 | 21,8        |
| 22            | 9,9              | 11,1 | 1,0 | 78,0 | 12,3          | 1,1 | 86,6 | 12,4        |
| 23            | 8,2              | 22,6 | 0,8 | 68,4 | 24,6          | 0,9 | 74,5 | 24,6        |
| 24            | 6,5              | 35,2 | 0,8 | 57,5 | 37,6          | 0,9 | 61,5 | 37,7        |
| 25            | 6,9              | 22,6 | 1,0 | 69,3 | 24,5          | 1,1 | 74,4 | 24,5        |
| 26            | 9,7              | 14,0 | 0,9 | 75,4 | 15,5          | 1,0 | 83,5 | 15,6        |

- H:** Humedad  
**C:** Cenizas  
**CS:** Cenizas, base seca  
**CF:** Carbono fijo  
**CFS:** Carbono fino, base seca  
**MV:** Materias volátiles  
**MVS:** Materias volátiles, base seca  
**MVSC:** Materiales volátiles, base seca y sin cenizas, obtenido así:

$$MVSC = \frac{MVS \times 100\%}{100 - C}$$

**Cuadro 4**  
**Poder calórico y densidad de carbón de roble procedente de la zona de Villa Mills**  
**(base húmeda y seca para poder calórico y base seca para densidad)**

| Número muestra | Poder calórico base humedad (PCH) (cal/g) | Poder calórico base seca (PCH) (cal/g) | Densidad aparente (g/ml) | Densidad a granel (g/ml) |
|----------------|---|--|--------------------------|--------------------------|
| 1              | 6905                                      | 7449                                   | 0,59                     | 0,27                     |
| 2              | 7056                                      | 7703                                   | 0,52                     | 0,23                     |
| 3              | 6955                                      | 7439                                   | 0,50                     | 0,23                     |
| 4              | 7069                                      | 7760                                   | 0,47                     | 0,21                     |
| 5              | 6917                                      | 7576                                   | 0,46                     | 0,21                     |
| 6              | 7006                                      | 7599                                   | 0,54                     | 0,24                     |
| 7              | 7031                                      | 7701                                   | 0,50                     | 0,25                     |
| 8              | 7069                                      | 7692                                   | 0,57                     | 0,26                     |
| 9              | 6955                                      | 7576                                   | 0,58                     | 0,26                     |
| 10             | 6993                                      | 7651                                   | 0,46                     | 0,21                     |
| 11             | 6766                                      | 7386                                   | 0,61                     | 0,27                     |
| 12             | 7193                                      | 7844                                   | 0,58                     | 0,26                     |
| 13             | 7369                                      | 8152                                   | 0,66                     | 0,30                     |
| 14             | 6969                                      | 7675                                   | 0,57                     | 0,26                     |
| 15             | 6969                                      | 7641                                   | 0,58                     | 0,26                     |
| 16             | 7006                                      | 7759                                   | 0,54                     | 0,24                     |
| 17             | 7143                                      | 7781                                   | 0,56                     | 0,25                     |
| 18             | 7018                                      | 7729                                   | 0,60                     | 0,27                     |
| 19             | 6968                                      | 7566                                   | 0,52                     | 0,23                     |
| 20             | 7019                                      | 7688                                   | 0,51                     | 0,23                     |
| 21             | -   | -                                      | 0,65                     | 0,29                     |
| 22             | 7232                                      | 7965                                   | 0,54                     | 0,24                     |
| 23             | 6645                                      | 7168                                   | 0,53                     | 0,24                     |
| 24             | 6457                                      | 7003                                   | 0,57                     | 0,26                     |
| 25             | 7094                                      | 7531                                   | 0,56                     | 0,25                     |
| 26             | 7169                                      | 7869                                   | 0,60                     | 0,27                     |

MVSC (%)  
25,40  
18,34  
27,06  
14,93  
19,17  
19,15  
19,88  
18,00  
20,34  
20,38  
28,53  
19,94  
15,04  
15,42  
18,47  
16,55  
18,16  
16,43  
23,41  
16,63  
21,88  
12,42  
24,80  
37,90  
24,76  
15,64

**Cuadro 5**  
**Resumen de los resultados del análisis estadístico correspondiente a los valores del análisis proximal. Contenidos de humedad, materias volátiles, carbono fijo y cenizas, del poder calórico y de la densidad aparente**

| Estadístico         | Variables |        |         |        |         |       |        |             |             |
|---------------------|-----------|--------|---------|--------|---------|-------|--------|-------------|-------------|
|                     | H (%)     | MV (%) | MVS (%) | CF (%) | CFS (%) | C (%) | CS (%) | PCH (cal/g) | PCS (cal/g) |
| Número de muestras  | 26        | 26     | 26      | 26     | 26      | 26    | 26     | 25          | 25          |
| Promedio            | 8,2       | 18,5   | 20,0    | 72,5   | 79,0    | 0,8   | 0,9    | 6999        | 76          |
| Varianza            | 1,6       | 25,4   | 26,7    | 17,6   | 25,7    | 0,02  | 0,03   | 31840       | 553         |
| Desviación estándar | 1,3       | 5,04   | 5,16    | 4,19   | 5,08    | 0,2   | 0,2    | 178         | 2           |
| Mínimo              | 5,7       | 11,1   | 12,3    | 57,5   | 61,5    | 0,5   | 0,5    | 6457        | 70          |
| Máximo              | 9,9       | 35,2   | 37,7    | 78,0   | 86,6    | 1,3   | 1,4    | 7369        | 81          |
| Ámbito              | 4,2       | 24,1   | 25,3    | 20,5   | 25,1    | 0,8   | 0,9    | 912         | 11          |

**H:** Humedad  
**MV:** Materias volátiles, base húmeda  
**MVS:** Materias volátiles, base seca  
**CF:** Carbono fijo, base húmeda  
**CFS:** Carbono fijo, base seca  
**C:** Cenizas  
**CS:** Cenizas, base seca  
**PCH:** Poder calórico, base húmeda  
**PCS:** Poder calórico, base seca  
**D:** Densidad aparente en base seca

(4). Ni siquiera el valor mínimo de contenido de humedad del total de las muestras analizadas, alcanza los bajos valores reportados por Paddon y Har-ker (4).

Pareciera que los "altos" contenidos de humedad obtenidos en este estudio, se deben a las condiciones y tiempo de almacenamiento del carbón previos a su análisis, que permitieron la reabsorción de humedad. Antes de ser analizado, el carbón fue almacenado en sacos en un clima húmedo, en algunos casos directamente sobre el suelo, por un período de varios meses.

La tasa de reabsorción de humedad del carbón vegetal es relativamente variable, entre el 3 y el 10%, y es función de su estructura. Un carbón rico en

materias volátiles tendrá reabsorción de humedad. Un análisis de los resultados (III), permite observar que la tendencia ascendente de los valores de contenido de materias volátiles, de una tendencia descendente de los valores de contenido de humedad, permite concluir que el carbón absorbió agua; en mayor medida en los casos en que el contenido de materias volátiles era bajo. Sin embargo, en algunas muestras en que no se observó correspondencia altos contenidos de materias volátiles bajo contenidos de humedad, sino que, siendo el contenido de materias volátiles alto el contenido de humedad también es alto (por ejemplo, 15, 21). Esto posiblemente

**Cuadro 6**  
**Análisis de carbón de roble fabricado con un horno metálico transportable,**  
**variando las condiciones de proceso (4)**

| Condiciones de proceso           |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| -Tiempo de carbonización (horas) | 34    | 23    | 21    |
| -Humedad de la madera (%)        | 38,0  | 27,6  | 29,4  |
| % de humedad                     | 3,50  | 4,50  | 4,61  |
| % de materias volátiles          |       |       |       |
| Base húmeda                      | 13,28 | 8,80  | 12,46 |
| Base seca*                       | 13,76 | 9,21  | 13,06 |
| % de cenizas                     |       |       |       |
| Base húmeda                      | 2,10  | 2,13  | 1,24  |
| Base seca*                       | 2,18  | 2,23  | 1,30  |
| % de carbono fijo                |       |       |       |
| Base húmeda                      | 81,12 | 84,57 | 81,69 |
| Base seca*                       | 84,06 | 88,55 | 85,64 |
| Poder calórico cal/g             |       |       |       |
| Base seca                        | 7800  | 8064  | 7736  |

\* Para efectos de comparación estos valores se calcularon a partir de los valores reportados sobre base húmeda y empleando la fórmula:

$$V_s = \frac{V_h \times 100\%}{100 - H}$$

**Cuadro 7**  
**Análisis de carbón de maderas tropicales fabricado con un**  
**horno de laboratorio a 500°C (3)**

| Variable<br>Base seca    | Ámbito de<br>variación |
|--------------------------|------------------------|
| % de materias volátiles  | 11,8 – 16,0            |
| % de cenizas             | 1,0 – 6,6              |
| % de carbono fijo        | 81,0 – 86,0            |
| Poder calórico (cal/g)   | 7710 – 8185            |
| Densidad aparente (g/ml) | 0,16 – 0,33            |
|                          | 0,50 – 0,90            |

que esas muestras tuvieron una mayor exposición a la humedad, por haber sido almacenadas directamente sobre el

suelo. Se presume que, controlando las condiciones y tiempo de almacenamiento, se podrían disminuir los valores

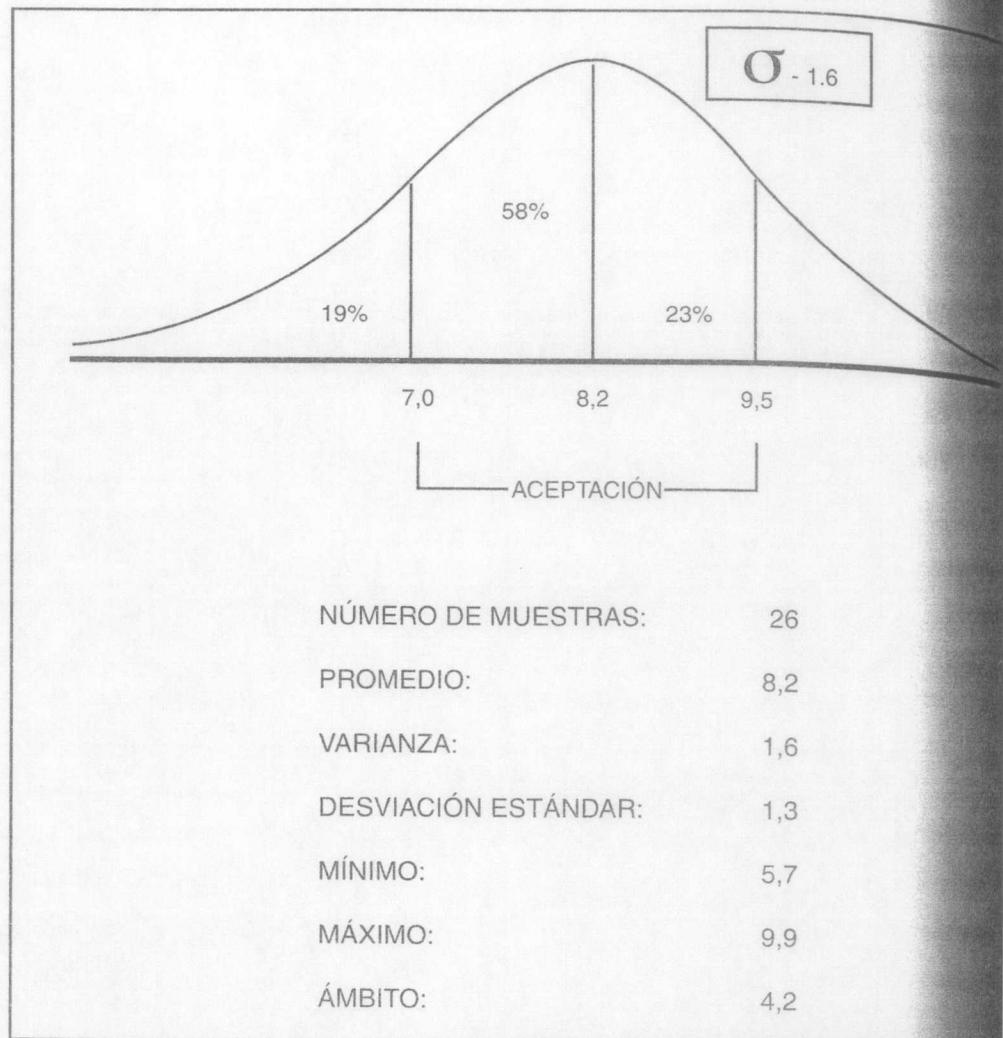


Figura I a  
Análisis estadístico de los porcentajes de humedad (H) obtenidos

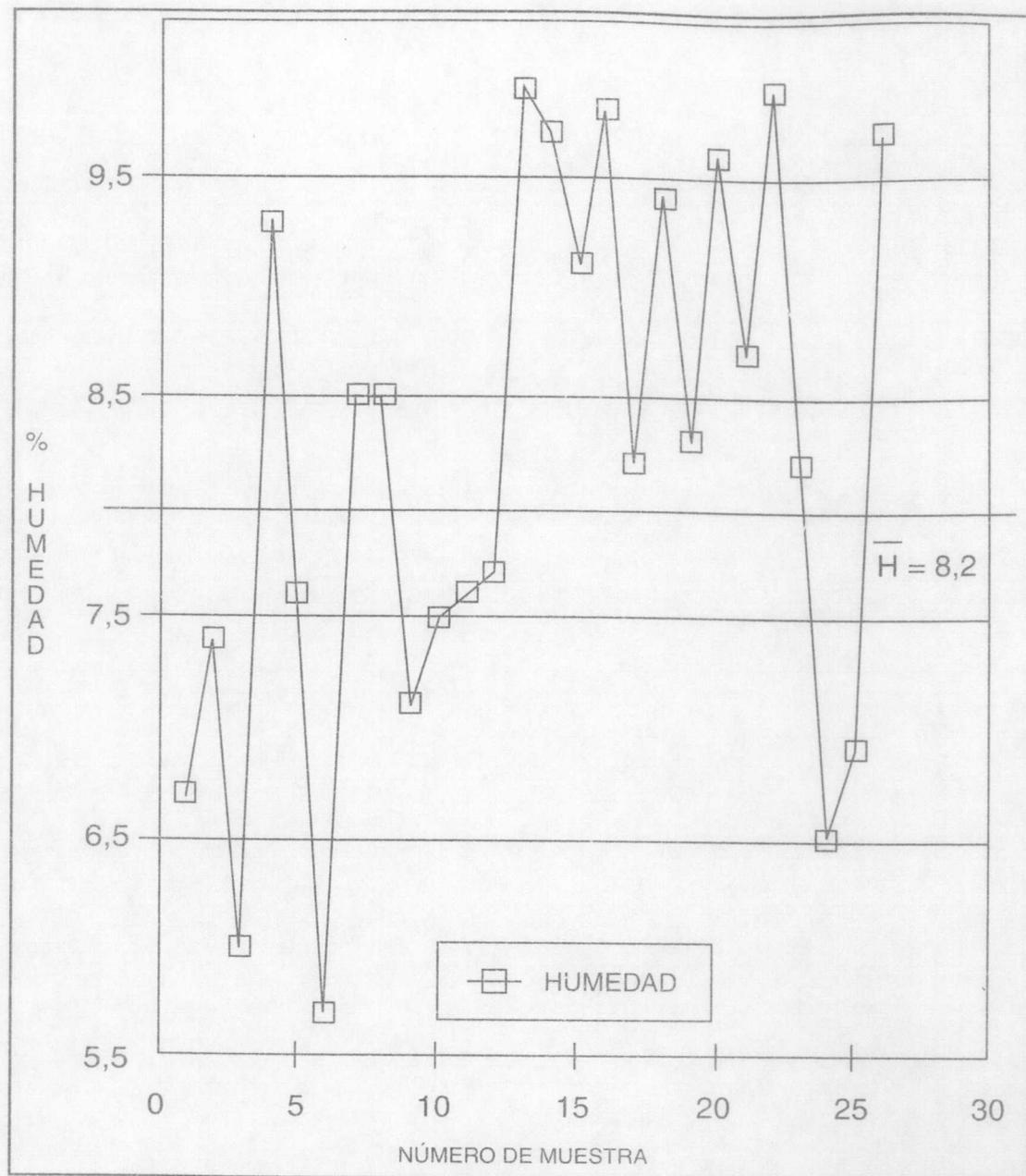
altos de contenido de humedad obtenidos en este estudio. Es recomendable realizar los análisis inmediatamente después de producido el carbón, así como también después de períodos definidos para determinar su capacidad de reabsorción de humedad.

Es importante notar que, aun bajo estas condiciones que permitieron la reabsorción de humedad, un 42% de las muestras analizadas, figura III, se encuentran dentro del ámbito 5-8% establecido por estándares de importación a Estados Unidos y Europa Occidental, cuadro 1

(5). Sin embargo, de acuerdo con los estándares de importación del Reino Unido, Cuadro 2 (4), que establece contenidos de humedad menores del 5%, alguna de las muestras analizadas del estudio exhibe valores tan bajos.

En general, el ámbito de variación presentado por las muestras analizadas es grande (mínimo 5,7; máximo 9,9) como puede verse en la figura I a. El 58% de las muestras aceptables en su porcentaje entre 7,0 y 9,5

1. En el análisis de esta y todas las demás variables estudiadas, se consideran como valores buenos aquellos que varían entre la media aritmética obtenida  $\pm$  la desviación estándar correspondiente.



**Figura 1 b**  
Porcentaje de humedad obtenido en cada muestra

## Contenido de materias volátiles

En la figura IVa, se observa que un 70% de las muestras analizadas en base seca varían entre el 15.0 y el 25.0% de contenido de materias volátiles; con un valor promedio del 20.0% y una desviación estándar del 5.2, lo que refleja una variación de la distribución de probabilidad de los resultados rela-

tivamente alta. Esto se refuerza al observar el ámbito para el 100% de las muestras, que es de 25.3.

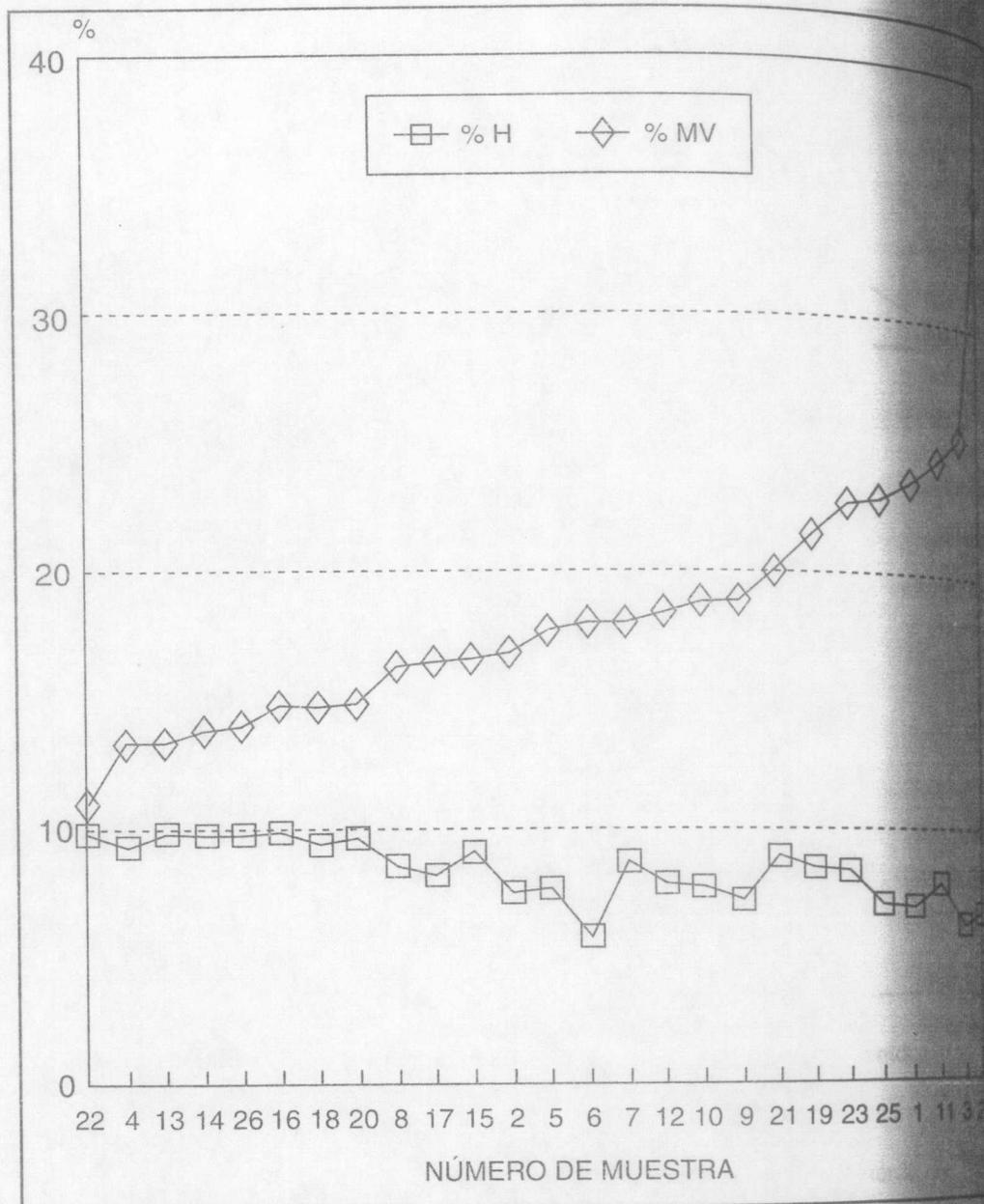
El cuadro 7 indica que el ámbito de variación para el contenido de materias volátiles de carbón vegetal, preparado bajo condiciones de laboratorio, a temperaturas típicas de carbonización (500°C), empleando maderas tropicales, es del 11.8 al 16.0% sobre base seca (3). Sólo un 19% de las muestras

dos

do con los  
el Reino Un  
olece contie  
del 5%, me  
zadas de es  
bajos.

variación pr  
analizadas e  
ximo 9,9  
figura la  
otables' van  
) y 9,5%.

lores acepta  
spondiente



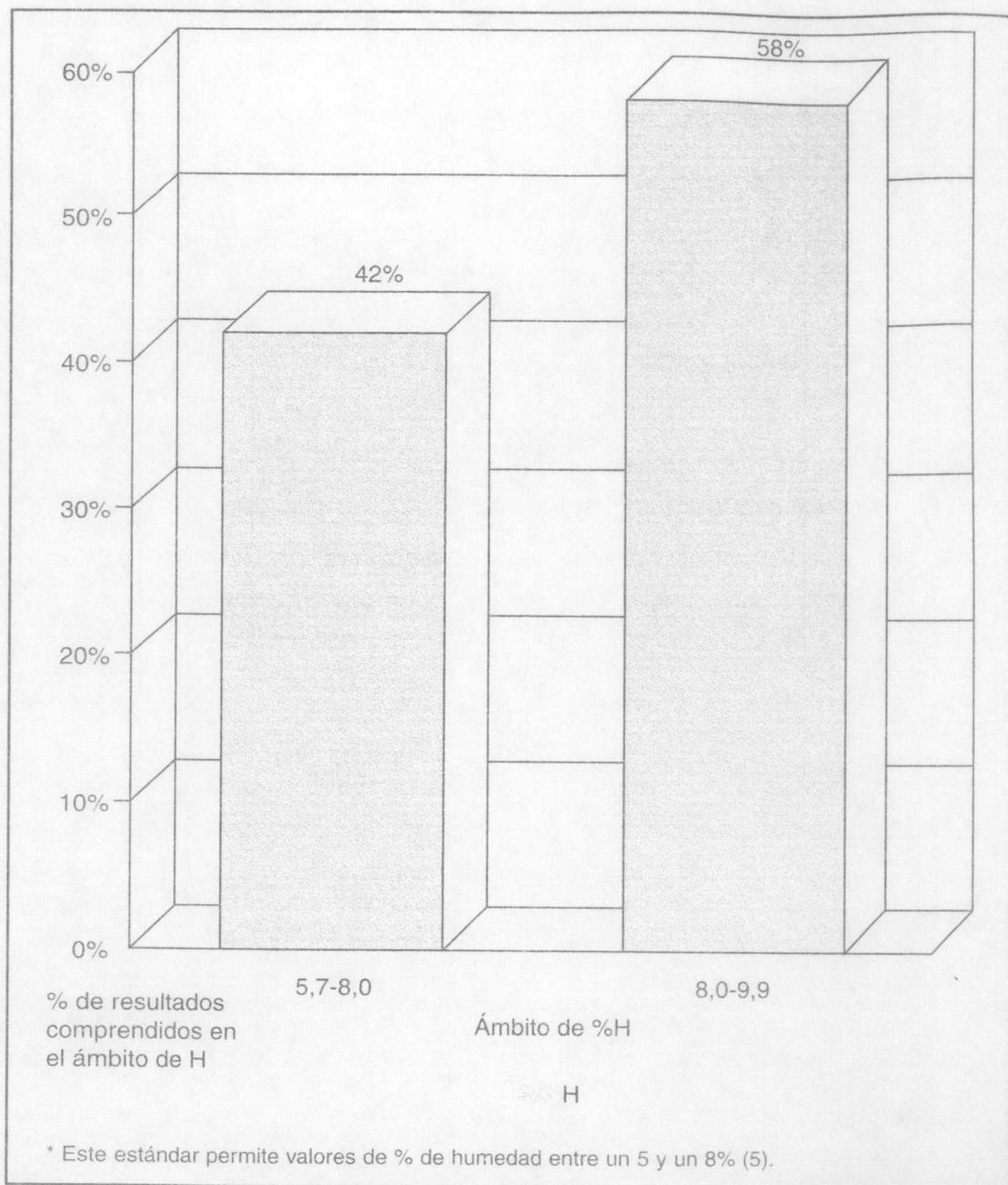
**Figura II**  
 Representación de la tendencia ascendente de los valores porcentuales de materias volátiles y la correspondiente tendencia descendente de los valores porcentuales de humedad (H) observados para las muestras analizadas

analizadas se encuentra dentro de ese ámbito (figura V), y el restante 81% exhibe valores superiores, no deseables, que van desde el 16,0 hasta el 37,7% de contenido de materias volátiles.

Comparando con valores de la literatura para el contenido de materias volátiles base seca (9,2-13,8%), de carbón de roble producido en condiciones simila-

res a las de este estudio (cuadro 6) se observa en la figura VI que sólo el 4% de las veintiséis muestras analizadas, está incluida en ese ámbito.

También, desde el punto de vista de los estándares establecidos en el Reino Unido, cuadro 2 (4), sólo una (4%) de las muestras analizadas lo cumple en el sentido de ser menor del 13,7%



**Figura III**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera de los estándares de importación\* a Estados Unidos y Europa Occidental para el contenido de humedad (H)**

En términos generales, prácticamente ninguna de las muestras analizadas alcanzó los deseables valores bajos, como los obtenidos en estudios similares.

Es posible explicar las anteriores observaciones en términos de la temperatura de carbonización. La composición del carbón vegetal depende de la tem-

peratura de carbonización. Para perder las materias volátiles es muy importante que la temperatura de carbonización aumente, lo que a su vez induce a un aumento del contenido de carbono fijo y a una disminución del rendimiento. El carbón comercial de uso doméstico es generalmente producido a temperaturas entre 400 y 500°C (2). Los relativamente altos valores de

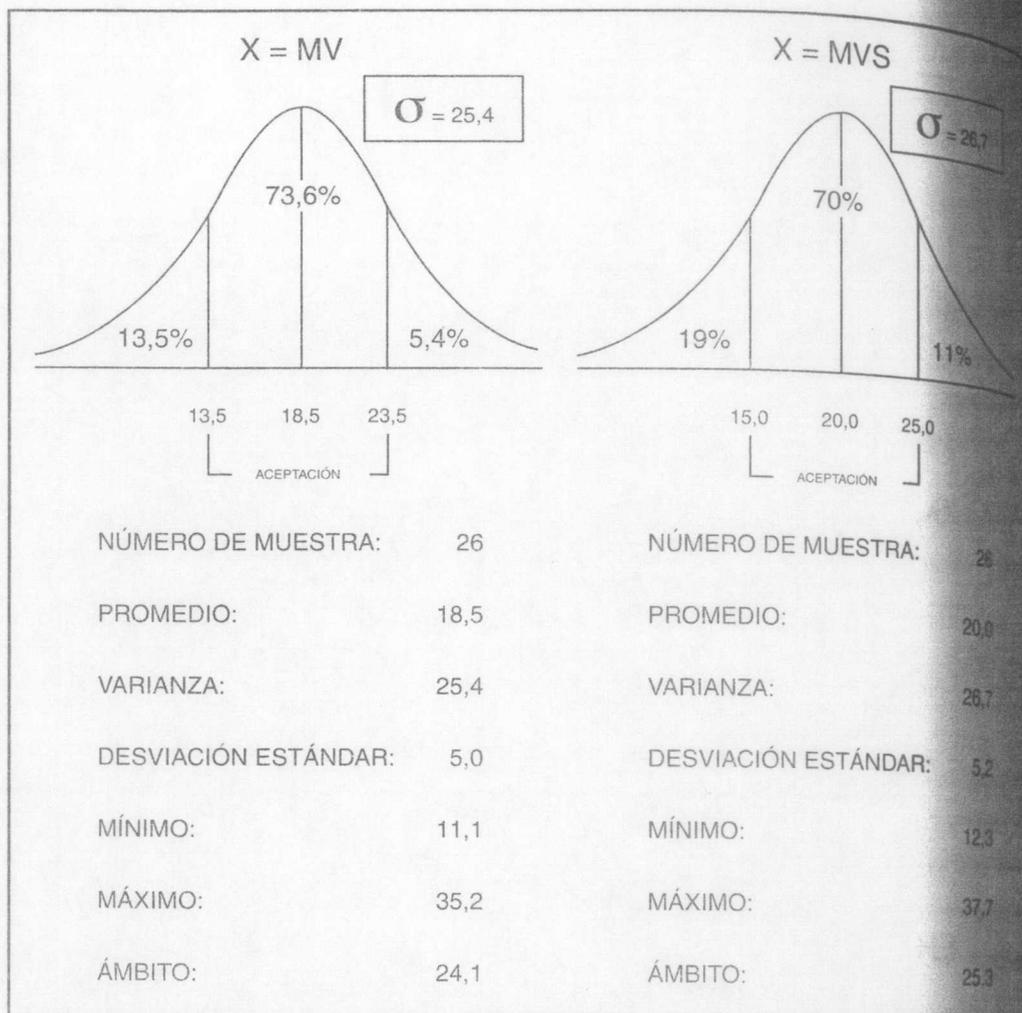


Figura IV a  
Análisis estadístico de los porcentajes de materias volátiles en base húmeda (MV) y en base seca (MVS)

contenido de materias volátiles obtenidos en este estudio, parecen sugerir que las temperaturas de carbonización alcanzadas no fueron lo suficientemente altas como para perder suficiente materia volátil. Esta hipótesis parece ser reforzada por el análisis de los resultados de carbono fijo, que se presenta en el siguiente apartado.

Finalmente, al calcular los contenidos de materias volátiles libres de humedad y de cenizas MVSC (cuadro 3), y compararlos con el estándar de importación a Estados Unidos y Europa, cuadro 1 (5), se observa que un 62% de las muestras analizadas lo cumplen, pues alcanzan valores de MVSC de aproximadamente 20%, figura VII.

Sin embargo, debido a que para obtener los valores de MVSC se comparó el valor original de MV dos veces, considerando el contenido de humedad y de cenizas, y conociendo que esos valores son en su mayoría inaceptables, la coincidencia de un 62% de los datos de MVSC con el estándar correspondiente, debe observarse con cautela.

## Contenido de carbono fijo

En la figura VIII, se observa que un 80,8% de las muestras aceptadas analizadas en base seca, varían entre un 73,4 y un 84,0% de contenido de

$\sigma = 26.7$

11%

25.0

A: 26

20.0

26.7

AR: 5.2

12.3

37.7

25.3

s en

que para obt

C se corrige

os veces, consi

e humedad y e

lo que esos ve

a inaceptable

% de los dato

dar correspon

con cautela.

observa que e

as aceptable

a, varían con

contenido de

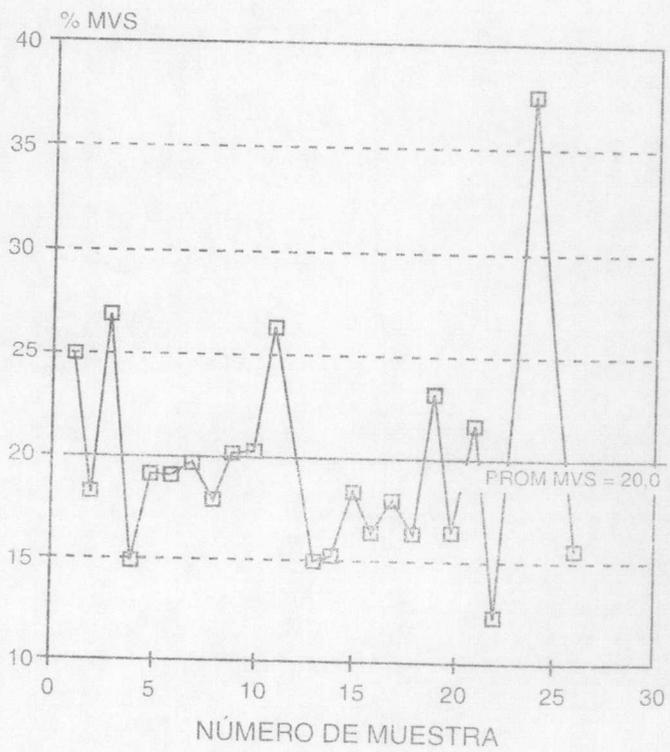
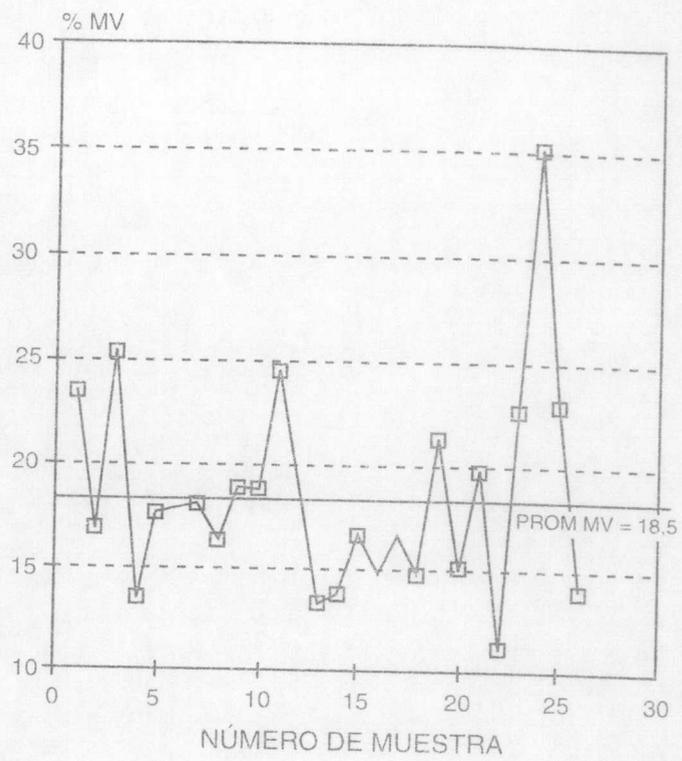
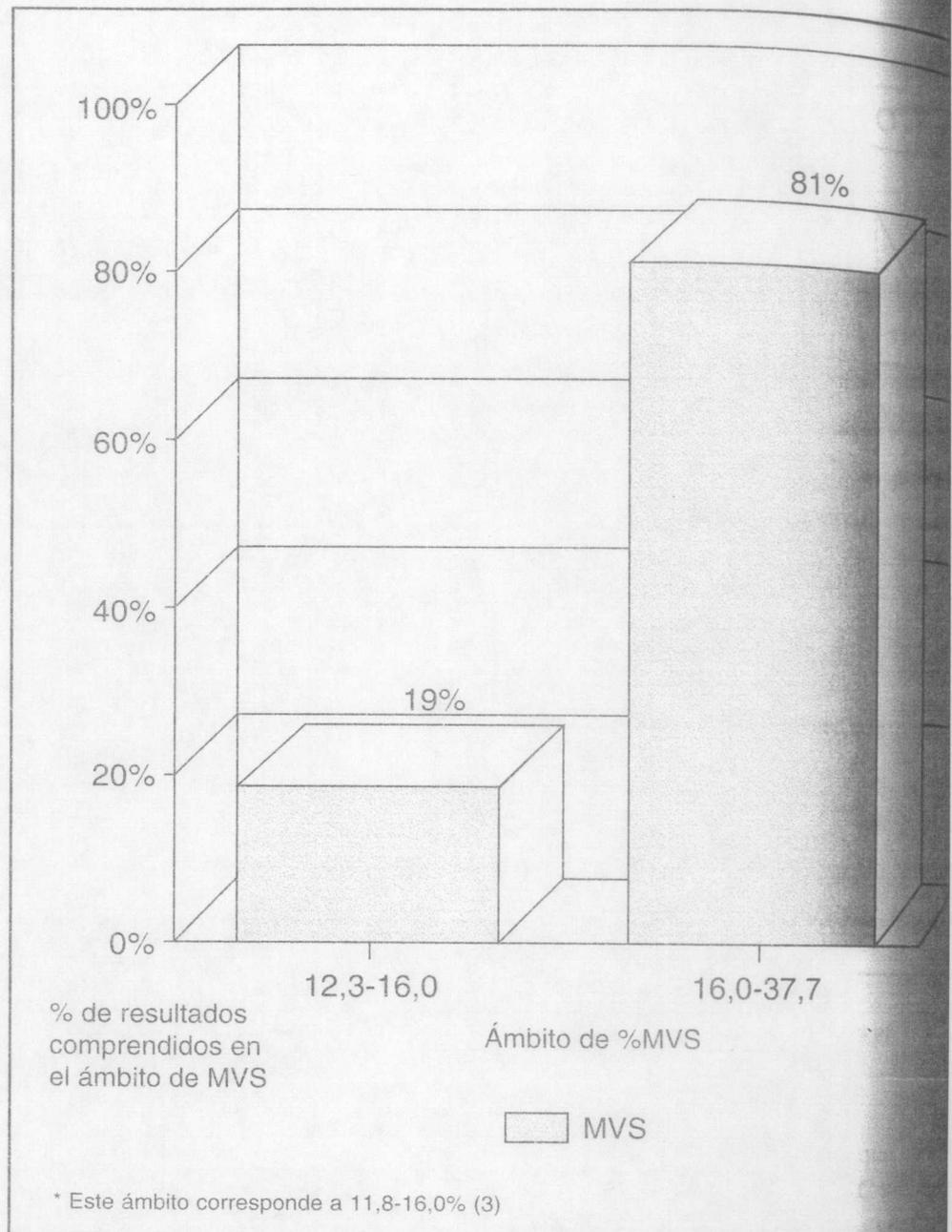


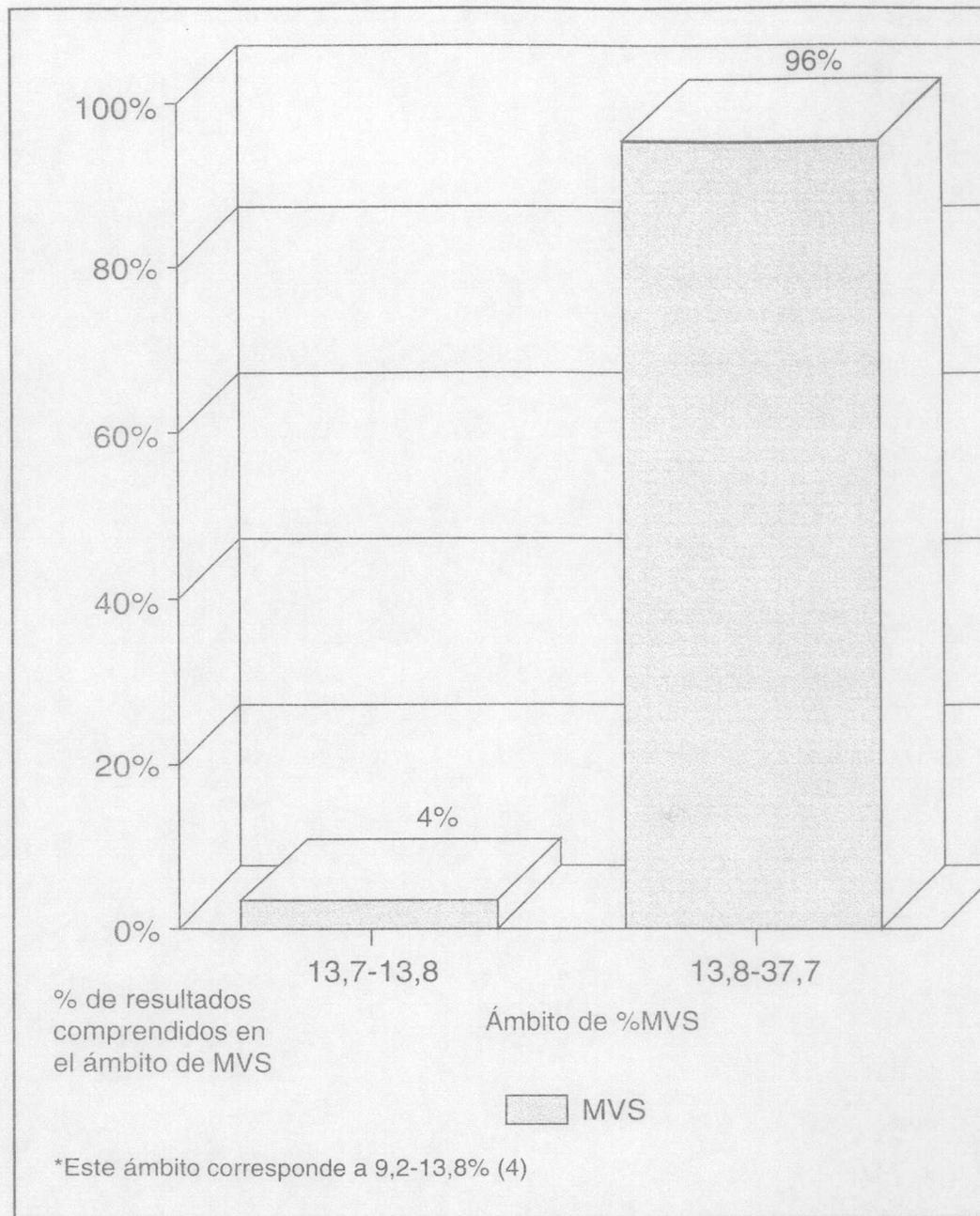
Figura IV b  
 Porcentajes de materias volátiles obtenidas en cada muestra en base húmeda (MV) y en base seca (MVS)



**Figura V**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera del ámbito de valores encontrados en la literatura para carbón estándar de maderas tropicales\* para contenido de materias volátiles en base seca (MVS)**

carbono fijo. Con un valor promedio del 79,0% y una desviación estándar de  $\pm 5,0$ , lo cual, en contraste con el caso del contenido de materias volátiles, refleja una variación de los resultados relativamente pequeña. Sin embargo, el ámbito para las veintiséis muestras analizadas es relativamente grande: 25,1.

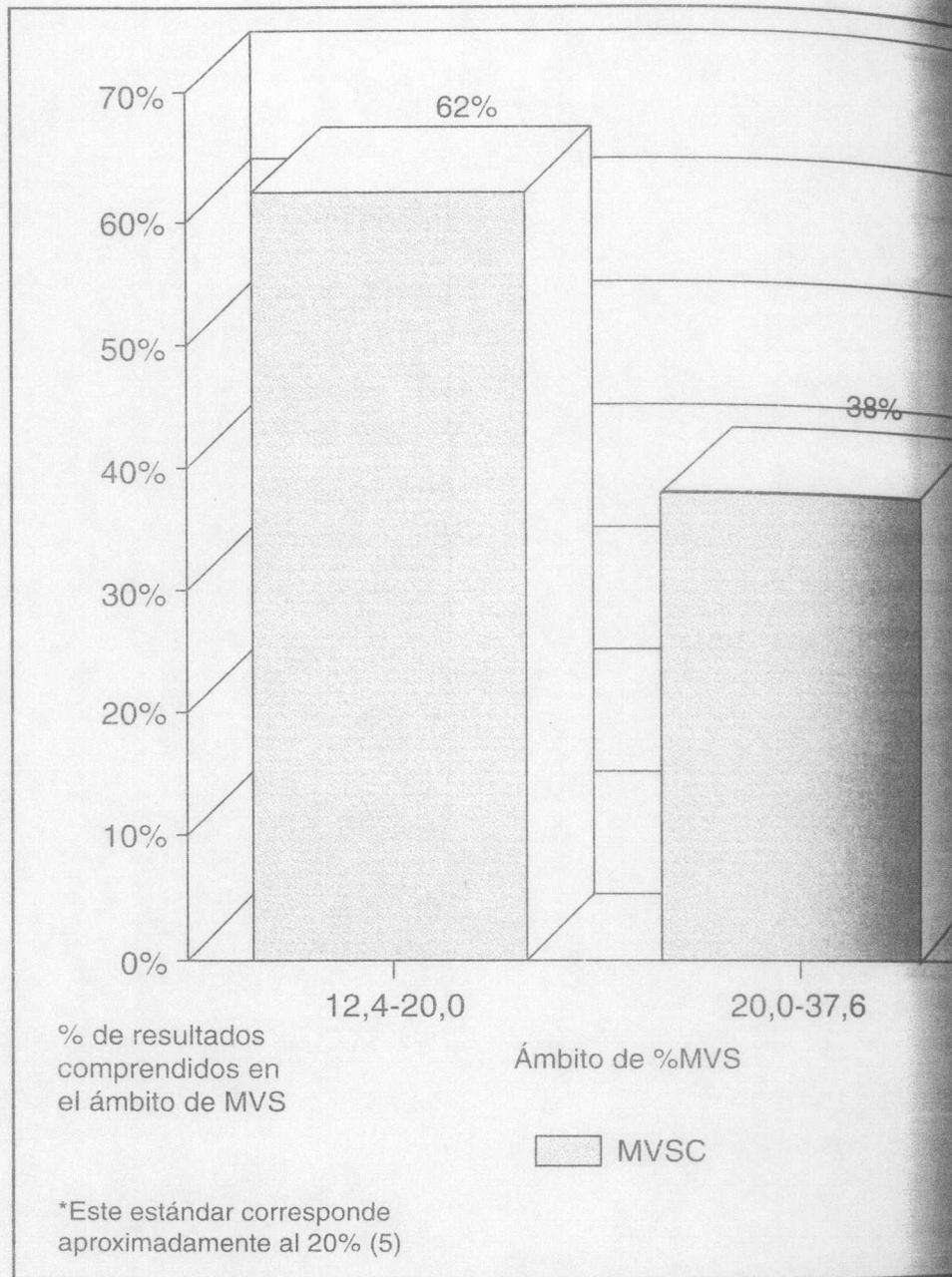
Se señalan valores para el contenido de carbono fijo de carbón doméstico estándar de maderas tropicales que varían entre 81,0-86,0% (cuando se analiza sobre base seca), alcanzados sólo un 35% de las muestras analizadas sobre base seca, alcanzados en los contenidos de carbono fijo en ese ámbito.



**Figura VI**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera del ámbito de valores encontrados en la literatura para carbón de roble para el contenido de materias volátiles en base seca (MVS)**

En la literatura se informa también de contenidos de carbono fijo para carbón de roble preparado en condiciones similares a las del presente estudio, que oscilan entre un 84,0 y un 88,6% (4). En la figura X se observa que sólo un 11% (tres de veintiséis) alcanzaron valores suficientemente altos de carbono fijo.

Como se mencionó, la calidad que ca del carbón que se mide en términos de su contenido de carbono fijo aumenta con la temperatura, en consecuencia del rendimiento. La temperatura de carbonización es, sin lugar a dudas, el factor más importante que condiciona las propiedades fisicoquímicas del carbón de madera (2).



**Figura VII**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que cumplen el estándar de impurezas a Estados Unidos y Europa\* para contenido de materiales volátiles base seca y libre de cenizas (MVSC)**

Pareciera que en el proceso de carbonización del presente estudio, nos alcanzaron temperaturas suficientemente altas y por eso, no se obtuvieron los deseables valores altos de contenido de carbono fijo en las muestras de carbón analizadas.

Es conocido que en el transcurso de una carbonización se pasa por dife-

rentes fases, que se diferencian en función de la temperatura. El cuadro 8 describe los ámbitos de contenido de carbono fijo en cada una de las fases de la pirólisis, durante la carbonización (2). Además, el presente estudio, cuyos resultados muestran un porcentaje de carbono fijo que no se encuentran en esos ámbitos.

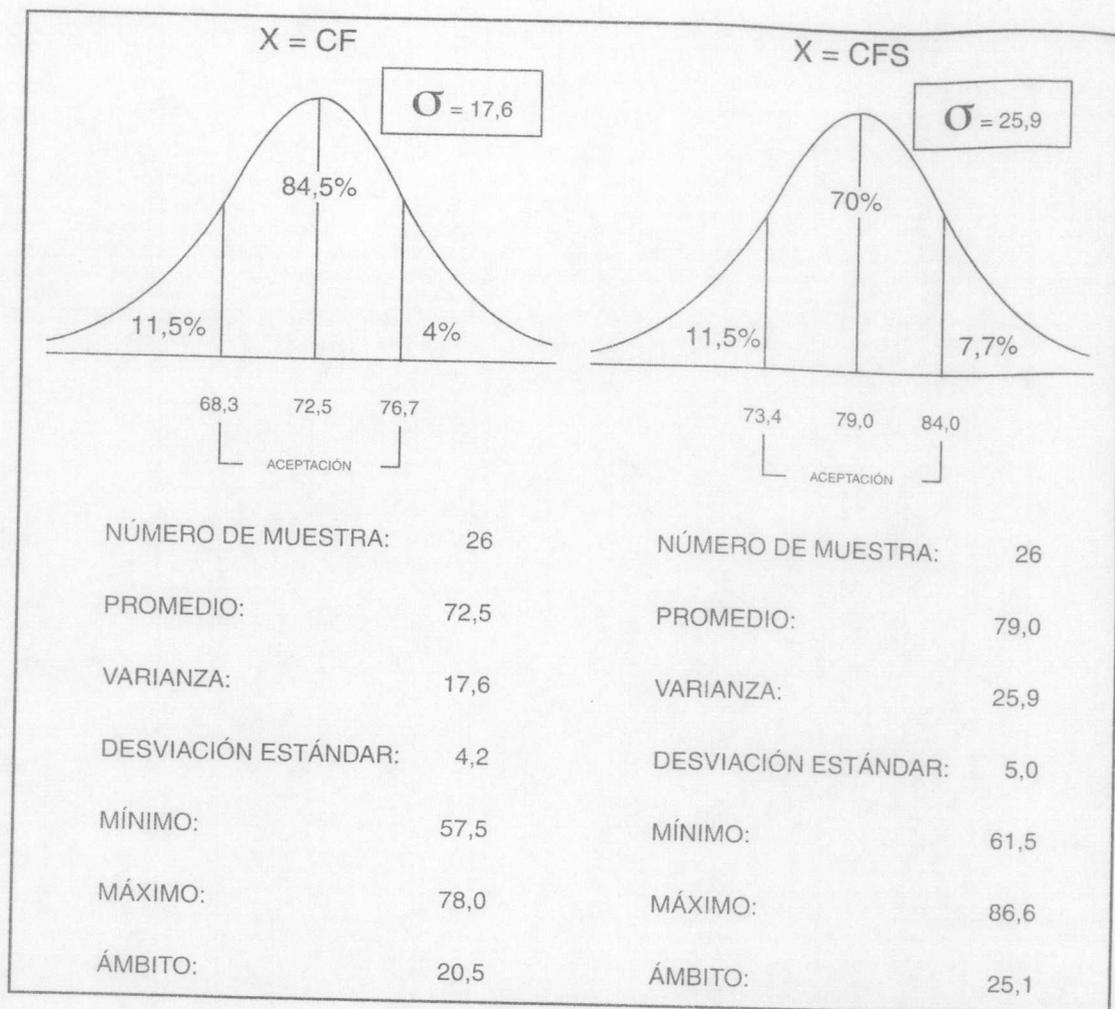


Figura VIII  
Análisis estadístico de los porcentajes de carbono fijo en base húmeda (CF) y en base seca (CFS)

Cuadro 8  
Fases de la pirólisis, durante la carbonización (2)

| Fase de la carbonización   | Pérdida de agua | Pérdida de gas oxígeno | Inicio de pérdida de hidrocarburos | Fase a hidrocarburos | Disociación | Fase a hidrógeno |
|--|-----------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|------------------|
| Temperatura (°C)   | 150-200         | 200-280                | 280-380                            | 380-500              | 500-700     | 700-900          |
| Contenido de carbono fijo (%)  | 50-60           | 60-70                  | 70-78                              | 78-85                | 85-90       | 90-95            |
| % de valores obtenidos en este estudio en el ámbito de % de carbono fijo | 0               | 4                      | 27                                 | 65                   | 4           | 0                |

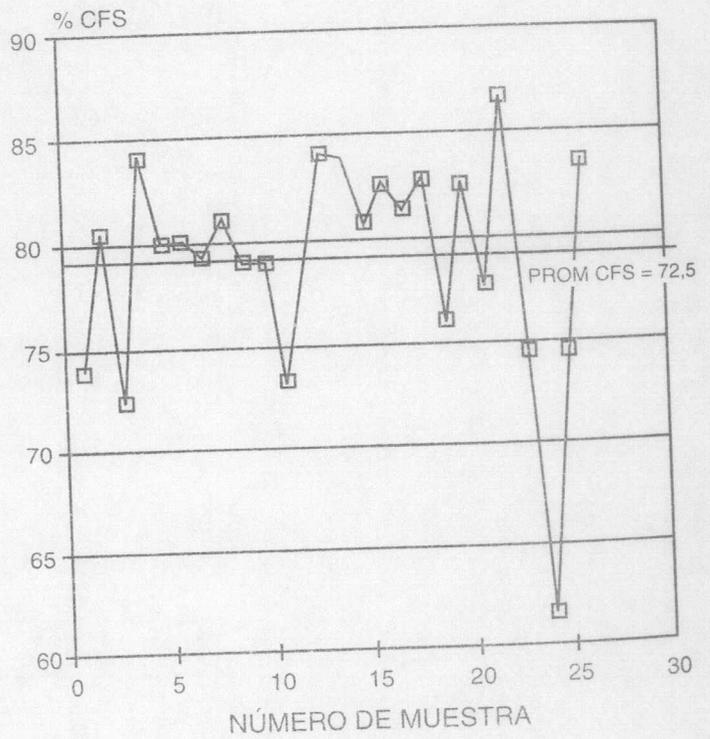
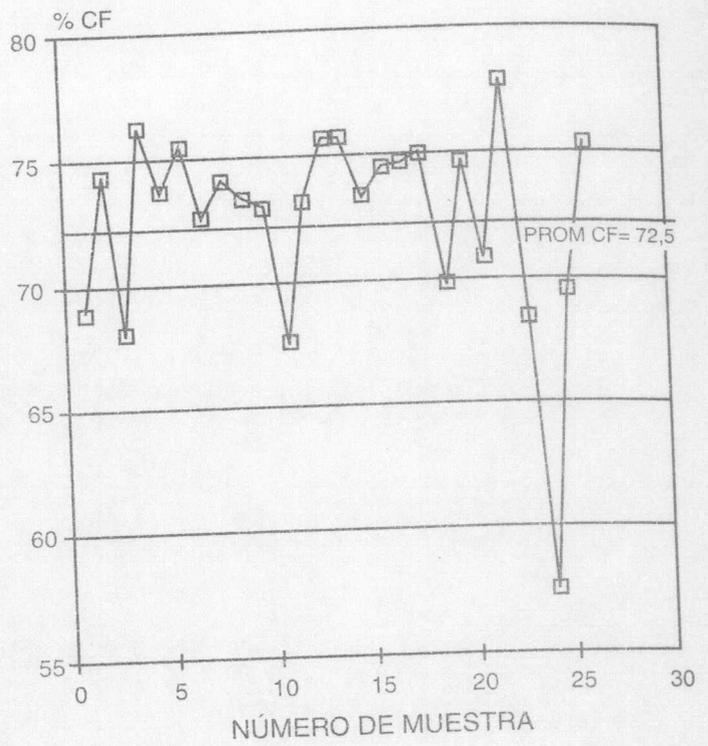
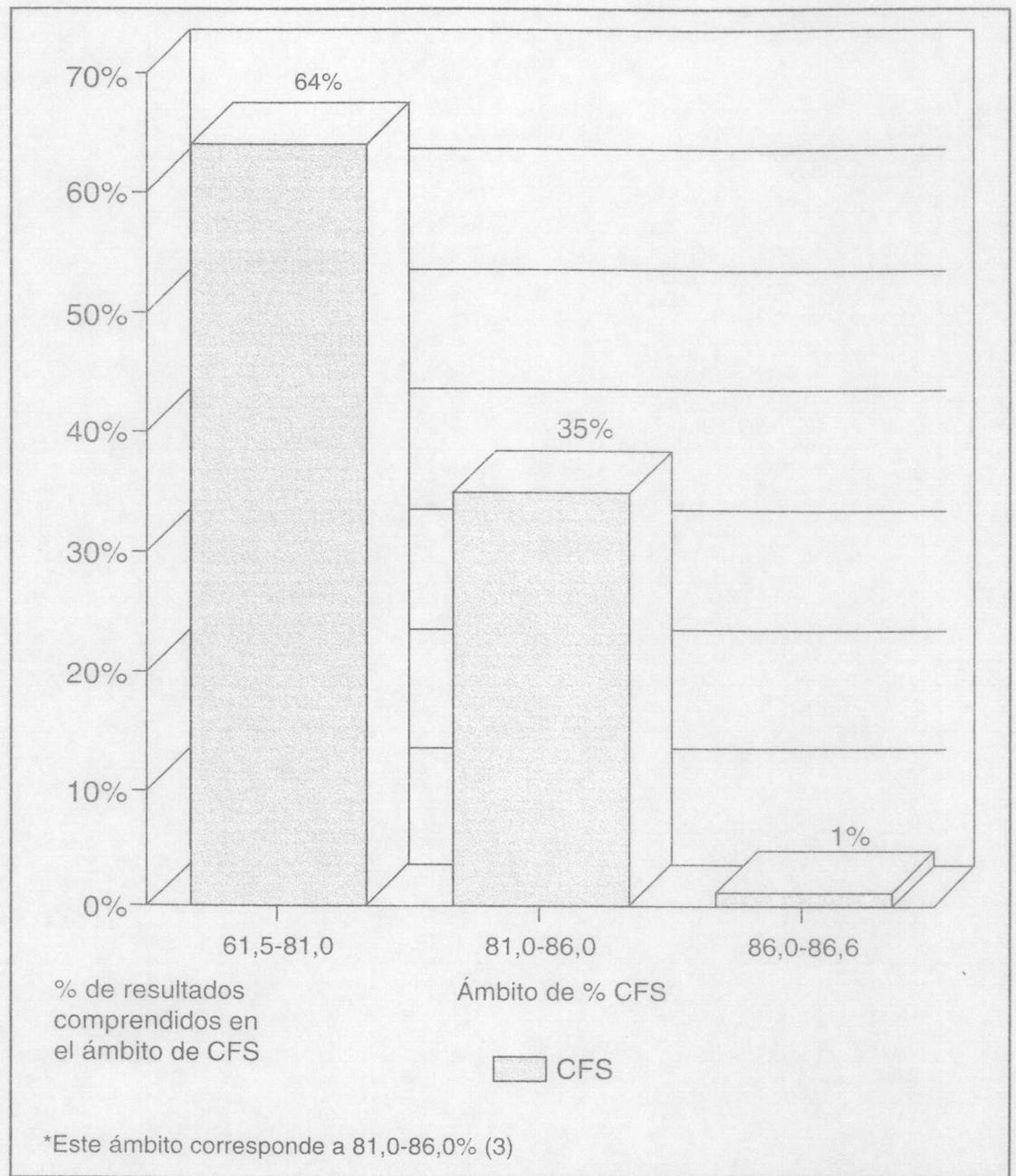


Figura VIIIb  
 Porcentajes de carbono fijo obtenidos en cada muestra  
 en base húmeda (CF) y en base seca (CFS)

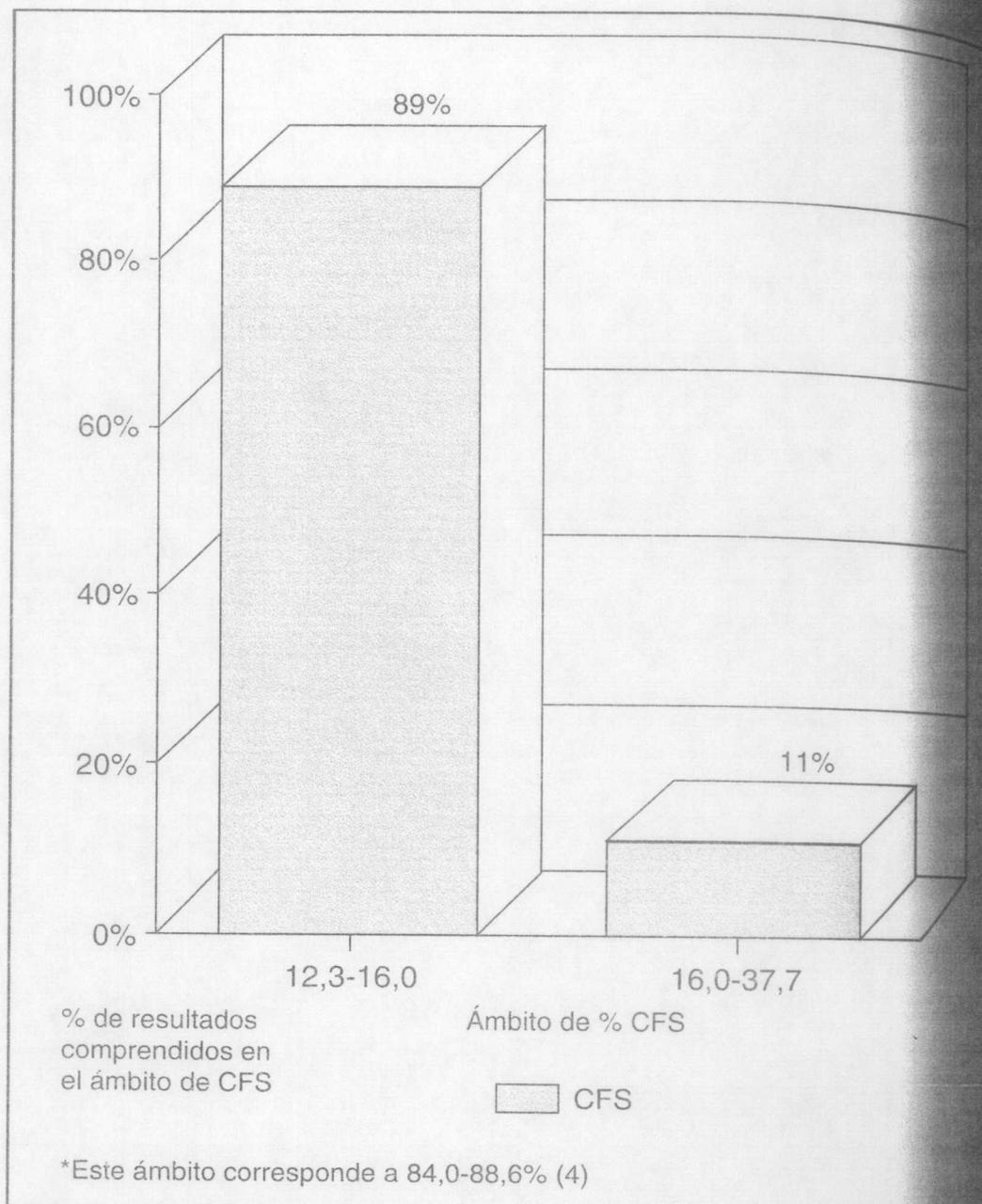


**Figura IX**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera del ámbito\* de valores encontrados en la literatura para carbón estándar de maderas tropicales para contenido de carbono fijo, en base seca (CFS)**

Se observa que en un 65% de los casos de las muestras analizadas en este estudio, en apariencia, se alcanzaron temperaturas entre 380 y 500°C. Sin embargo, hay también un 27% de casos donde la temperatura de carbonización parece haber variado entre 280 y 380°C. Se producen también extremos de temperaturas de carbonización

correspondientes a 200-280°C y 500-700°C.

Finalmente, sólo una de las muestras analizadas cumple con el estándar de importación del Reino Unido (4), que establece valores superiores de 84,2% base seca de contenido de carbono fijo.



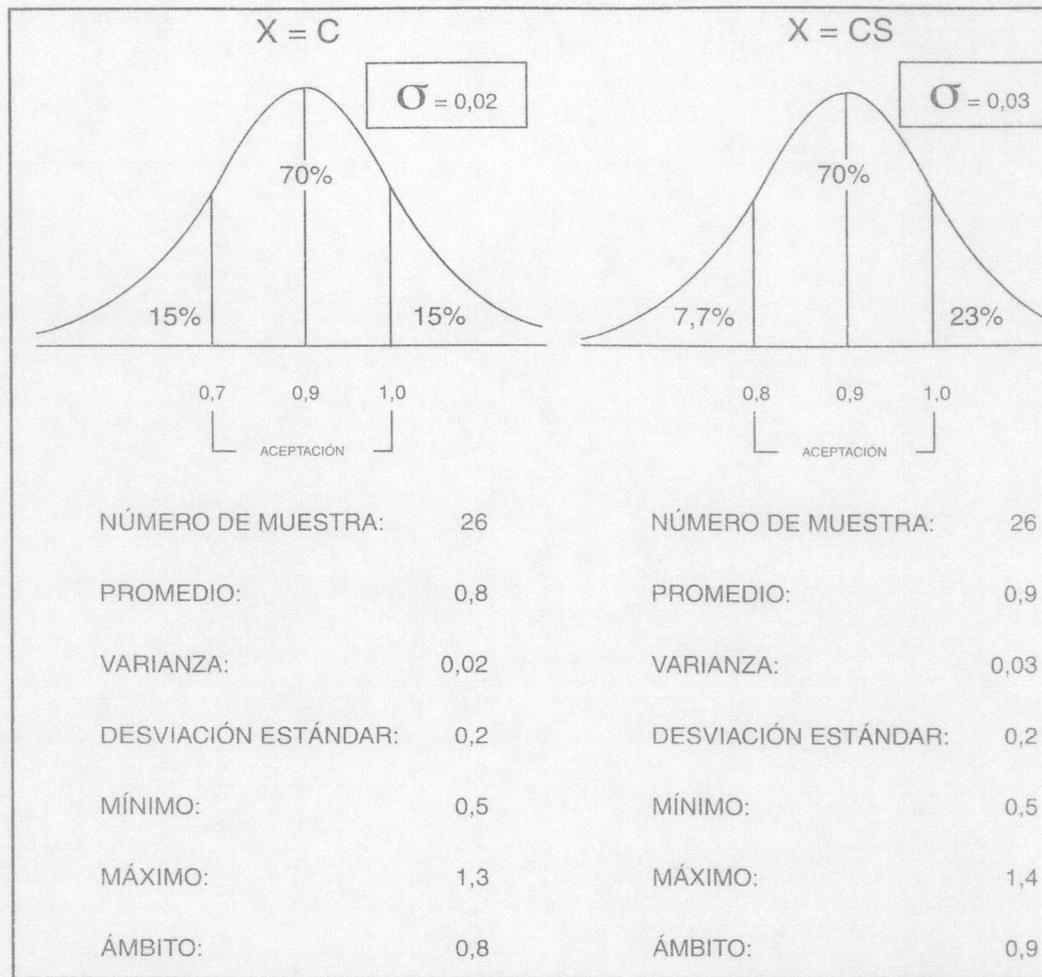
**Figura X**  
 Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera del ámbito\* de valores encontrados en la literatura para carbón de roble, para contenido de carbono fijo, en base seca (CFS)

## Contenido de cenizas

En la figura XIa se observa que el 69,3% de los valores aceptables de contenido de ceniza en base seca, obtenidos en este estudio, varían entre 0,8 y 1,0%. El valor promedio es del 0,9% y la desviación estándar es 0,2. El ámbito de variación para el 100%

de las muestras analizadas es de 0,9. Al igual que en los casos anteriores la dispersión de los datos es relativamente alta.

Para muestras típicas de carbón doméstico de maderas tropicales se esperan contenidos de cenizas que varían entre 1,0 y 6,6% sobre base seca.



**Figura XI a**  
**Análisis estadístico de los porcentajes de cenizas en base húmeda (C) y en base seca (CS)**

(cuadro 7) (3). La figura XII muestra cómo un 42% de las muestras analizadas presenta valores dentro de ese ámbito, predominando los cercanos al límite inferior, pues el valor máximo corresponde al 1,4%.

Para muestras de carbón de roble obtenido en condiciones similares a las del estudio, se esperan valores entre 1,3 y 2,2% sobre base seca (cuadro 6) (4). Al comparar los resultados con este ámbito, se comprueba que apenas una de las veintiséis muestras analizadas, el 4% del total, cae dentro del mismo; el 96% restante presenta valores por debajo del 1,3%, límite inferior del ámbito.

La observación de contenidos de cenizas más bien bajos, parece indicar que la carbonización no se efectuó a totalidad, o sea, que vuelve a aparecer evidencia de que la temperatura de carbonización no fue lo suficientemente alta. Lo anterior debido a que las materias minerales del carbón que se miden como cenizas, son las mismas que contenía la madera originalmente (el contenido de cenizas de maderas tropicales, base seca, varía entre 0,3 y 2,7% (3)), pero debido al ritmo de la carbonización (20% dependiendo del proceso (2)), el porcentaje de cenizas del carbón es cuatro veces el porcentaje de cenizas de la madera (2).

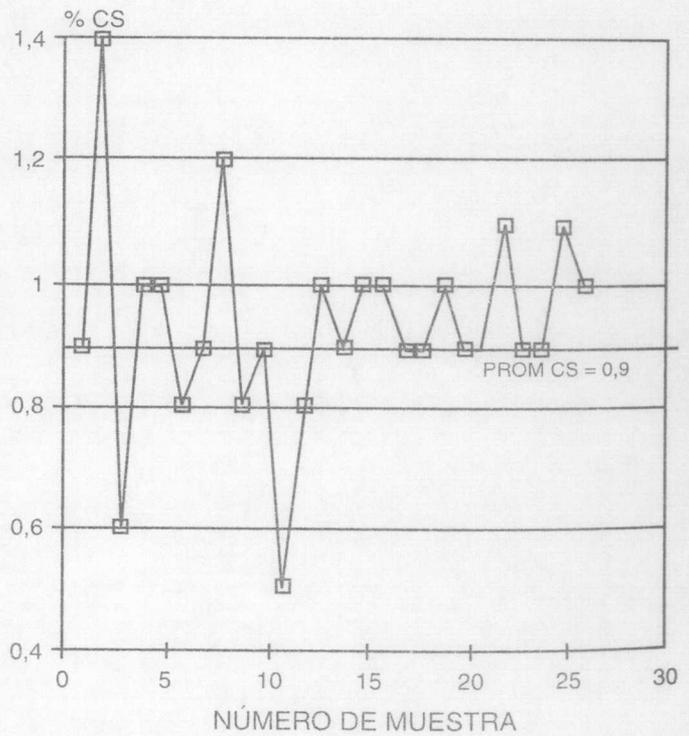
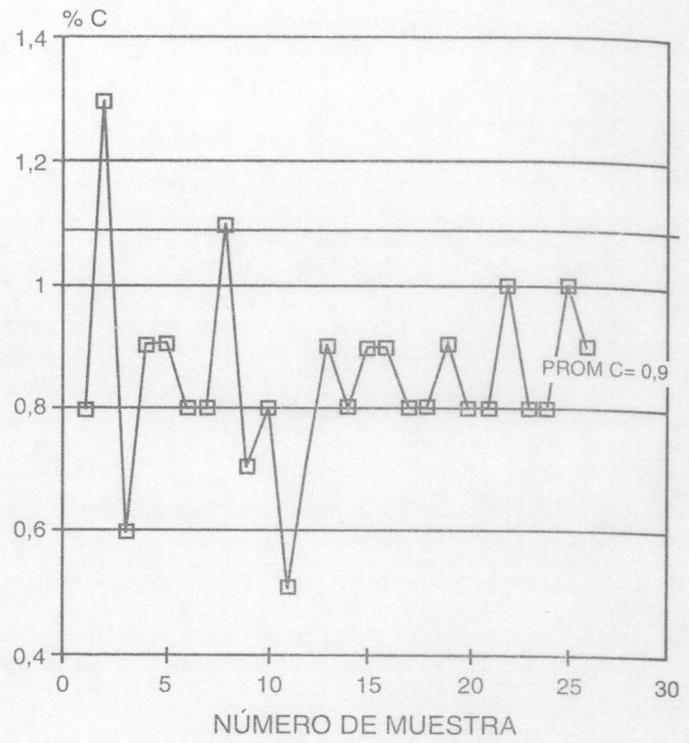
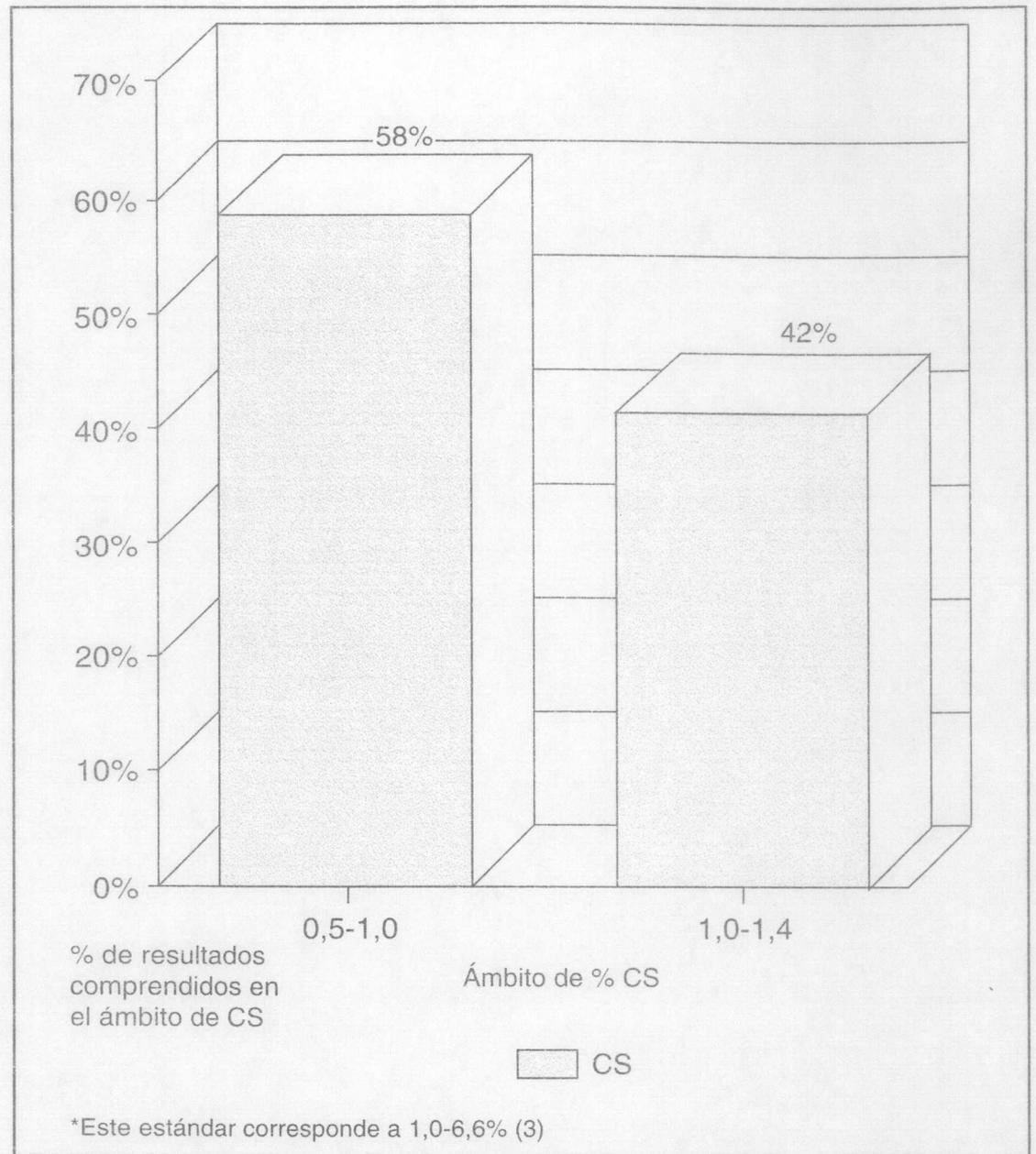


Figura XI b  
 Porcentajes de cenizas obtenidos en cada muestra en base húmeda (C) y en base seca (CS)



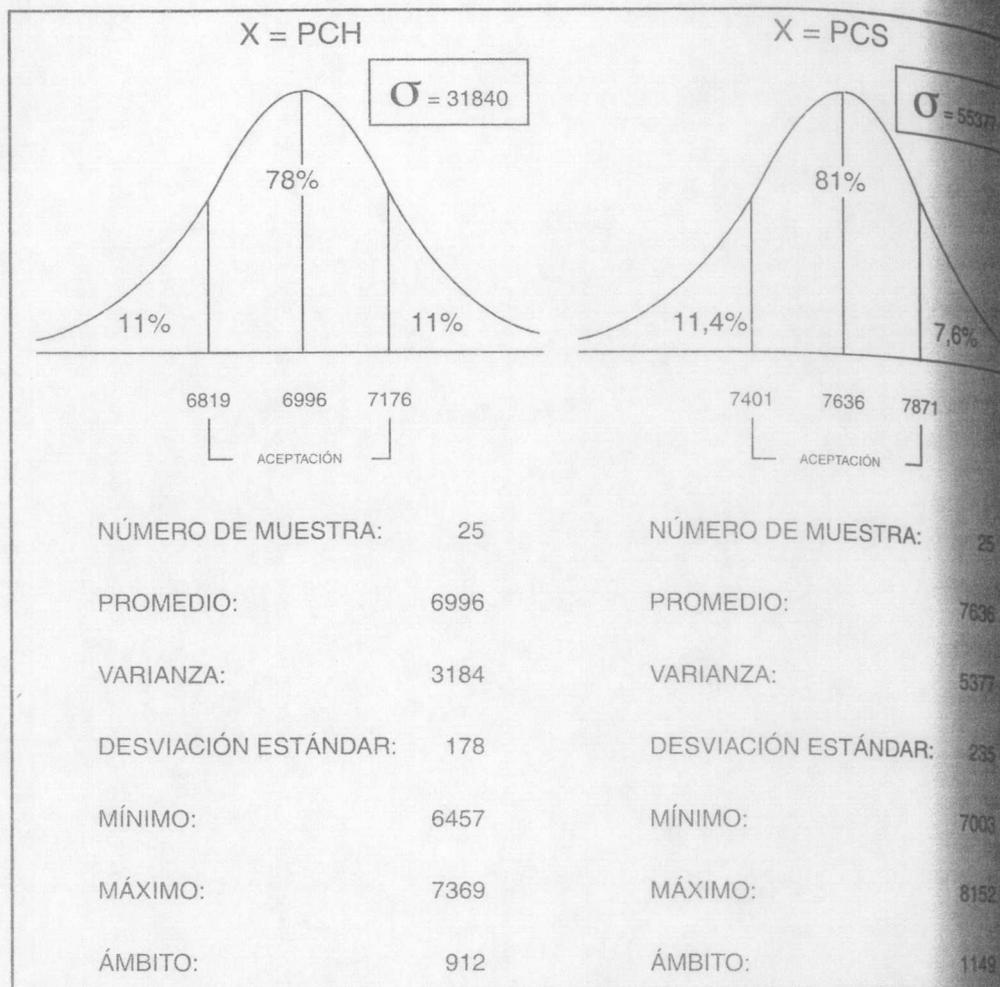
**Figura XII**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera del ámbito\* de valores para carbón estándar de maderas tropicales, para contenido de ceniza en base seca (CS)**

Finalmente desde el punto de vista del estándar establecido en el Reino Unido (cuadro 2) (4), que establece valores de contenido de cenizas menores que el 3,2% base seca, todas las muestras analizadas lo cumplen.

### Poder calórico

El poder calórico del carbón de madera está asociado con el contenido de

carbono fijo y depende en gran medida de la temperatura de carbonización. En términos generales, puede variar entre 6.500 y 8.000 cal/g sobre base seca (2). Como puede observarse en el cuadro 4 y en la figura XIIIa todas las muestras analizadas caen dentro de ese ámbito, valor mínimo obtenido 7.003 cal/g y valor máximo 8.152 cal/g sobre base seca.



**Figura XIII a**  
Análisis estadístico de los valores de poder calórico en base húmeda (PCH) y en base seca (PCS)

Una referencia más específica para muestras de carbón de maderas tropicales (cuadro 7) (3) indica un ámbito de variación para el poder calórico base seca de 7.710-8.185 cal/g. Observando la figura XIV, se nota que sólo un 32% de las muestras analizadas se encuentra en ese ámbito, correspondiendo el restante 68% a valores inferiores.

Para carbones de roble fabricados bajo condiciones similares a las del presente estudio, se indican valores que varían entre 7.736 y 8.064 cal/g (cuadro 6) (4) y de nuevo, sólo un 32% de las muestras analizadas coincide con ese ámbito.

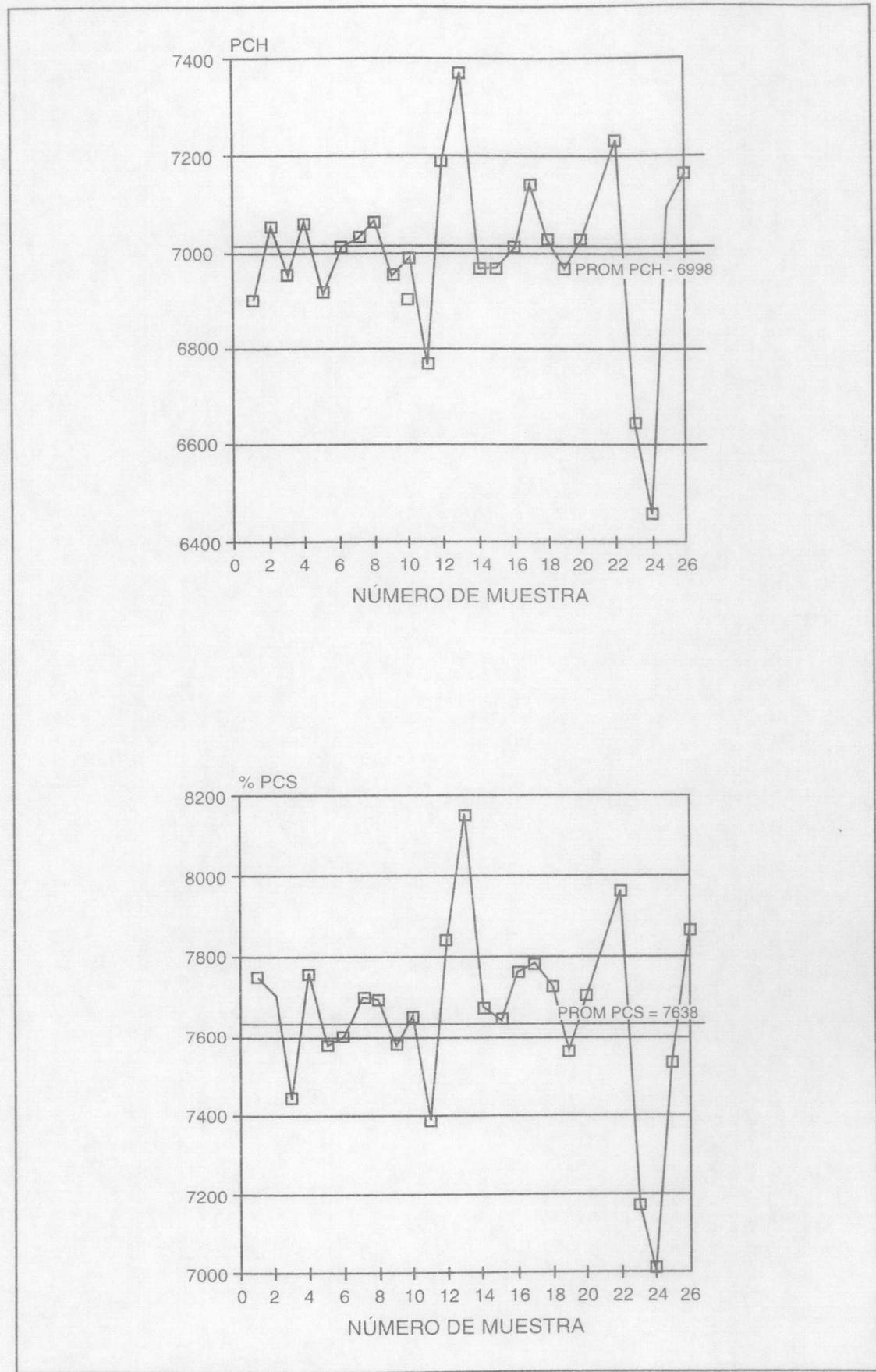
El valor promedio de poder calórico en base seca, obtenido en este estudio,

7.636 cal/g, cuadro 5, ni siquiera alcanza el límite inferior de los ámbitos anteriores, 7.710 y 7.736 cal/g respectivamente. En la figura XIIIa, se observa que un 81% de los valores que encuentran en niveles de aceptación ( $7.636 \pm 236$  cal/g) varían entre 7.401 y 7.871 cal/g, o sea que apenas parte del 76% de las muestras analizadas caen en los ámbitos anteriores (7.710-8.185 cal/g (3) y 7.736-8.064 cal/g (4)).

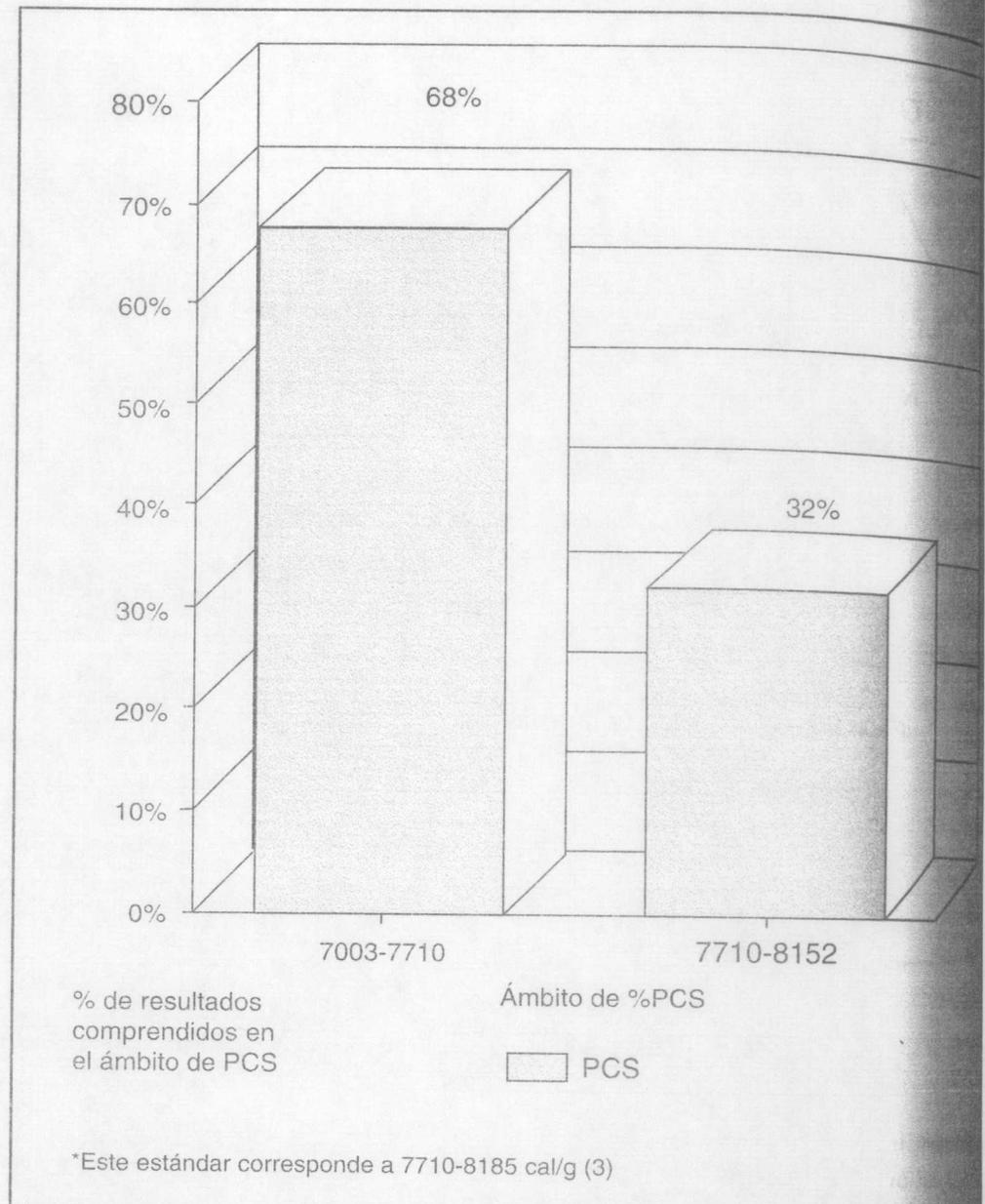
En su estudio sobre carbón de maderas tropicales, Petroff y Doat (3) no encontraron correlación entre el poder calórico de los carbones y el de las maderas empleadas en su producción, pero bien encontraron que el poder calórico

55377  
6%  
25  
7636  
5377  
235  
7003  
8152  
1149

quiera a  
os ámbi  
l/g respec  
a, se obser  
res que se  
aceptación  
entre 7.40  
penas un  
ras acepta  
anteriores  
736-8.06  
de madera  
) no obser  
oder caló  
las made  
cción. Más  
er calórico



**Figura XIII b**  
Valores de poder calórico obtenidos en cada muestra en base húmeda (PCH) y en base seca (PCS)



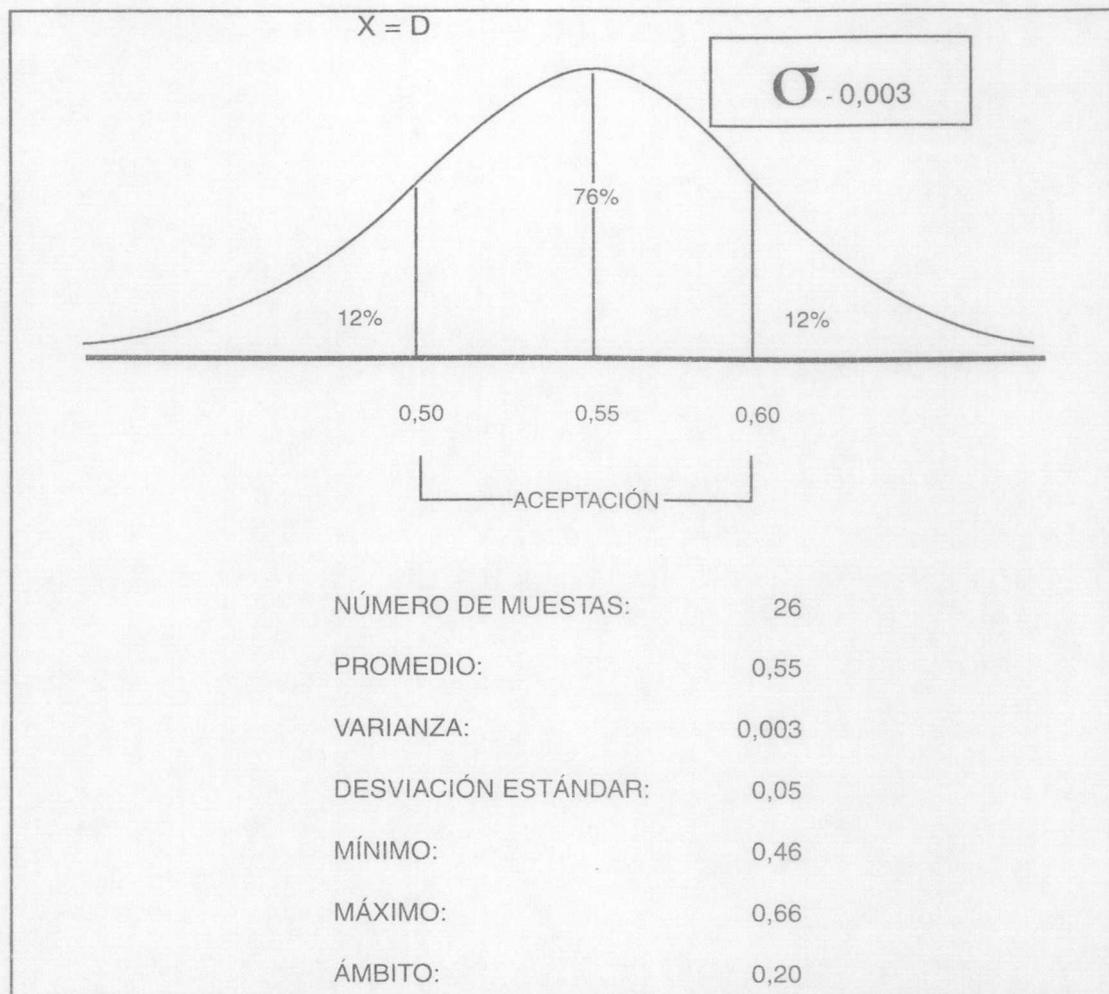
**Figura XIV**  
**Porcentaje de las muestras analizadas que se encuentran dentro y fuera del ámbito de valores para carbón estándar de maderas tropicales,\* para poder calórico en base seca (PCS)**

del carbón depende de su composición química final, o sea, de sus contenidos de materias volátiles, cenizas y carbono fijo, siendo este último el que determina directamente el poder calórico del carbón (2,3).

Al igual que en el análisis de los resultados del contenido de carbono fijo, el hecho de que una significativa proporción de las muestras analizadas no ten-

ga valores lo suficientemente altos hace necesario reforzar la hipótesis anterior de que la temperatura de carbonización alcanzada en este estudio no fue lo suficientemente alta.

En la figura XIII, se nota que la dispersión del 81% de los valores de poder calórico en base seca aceptados es de 235 cal/g, valor que es relativamente pequeño, si se considera que para



**Figura XV a**  
Análisis estadístico de los valores de densidad aparente obtenidos en base seca

análisis de una misma muestra de carbón, se permiten variaciones de  $\pm 72$  cal/g (7); y también si se considera que el ámbito para el 100% de las muestras analizadas es de 1.149 cal/g (valor mínimo 7.003 cal/g y valor máximo 8.152 cal/g) (cuadro 5).

Prácticamente un 100% de las muestras cumpliría con los estándares de importación al Reino Unido, para los cuales los valores deben ser mayores de 7.200 cal/g (cuadro 2) (4).

## Densidad

En la figura XVa se nota que un 76% de los valores de densidad aparente de

las muestras analizadas, que corresponde a los valores aceptables, varía entre 0,50 y 0,60 (promedio 0,55; desviación estándar 0,05).

De acuerdo con estudios encontrados en la literatura, existe una fuerte correlación entre la densidad de la madera empleada y la densidad del carbón producido (2,3,8).

Desde el punto de vista de densidad, los robles costarricenses se clasifican en categorías que van desde excesivamente "pesados" hasta "pesados". Así, el *Quercus aata*, gravedad específica 0,64-0,75 base seca, se clasifica como una madera de muy "pesada" a excesivamente "pesada": el *Quercus euge-*

del ámbito

e altos p  
nterior, de  
onización  
fue lo su

que la dis  
res de po  
ptados, es  
ativamente  
ue para el

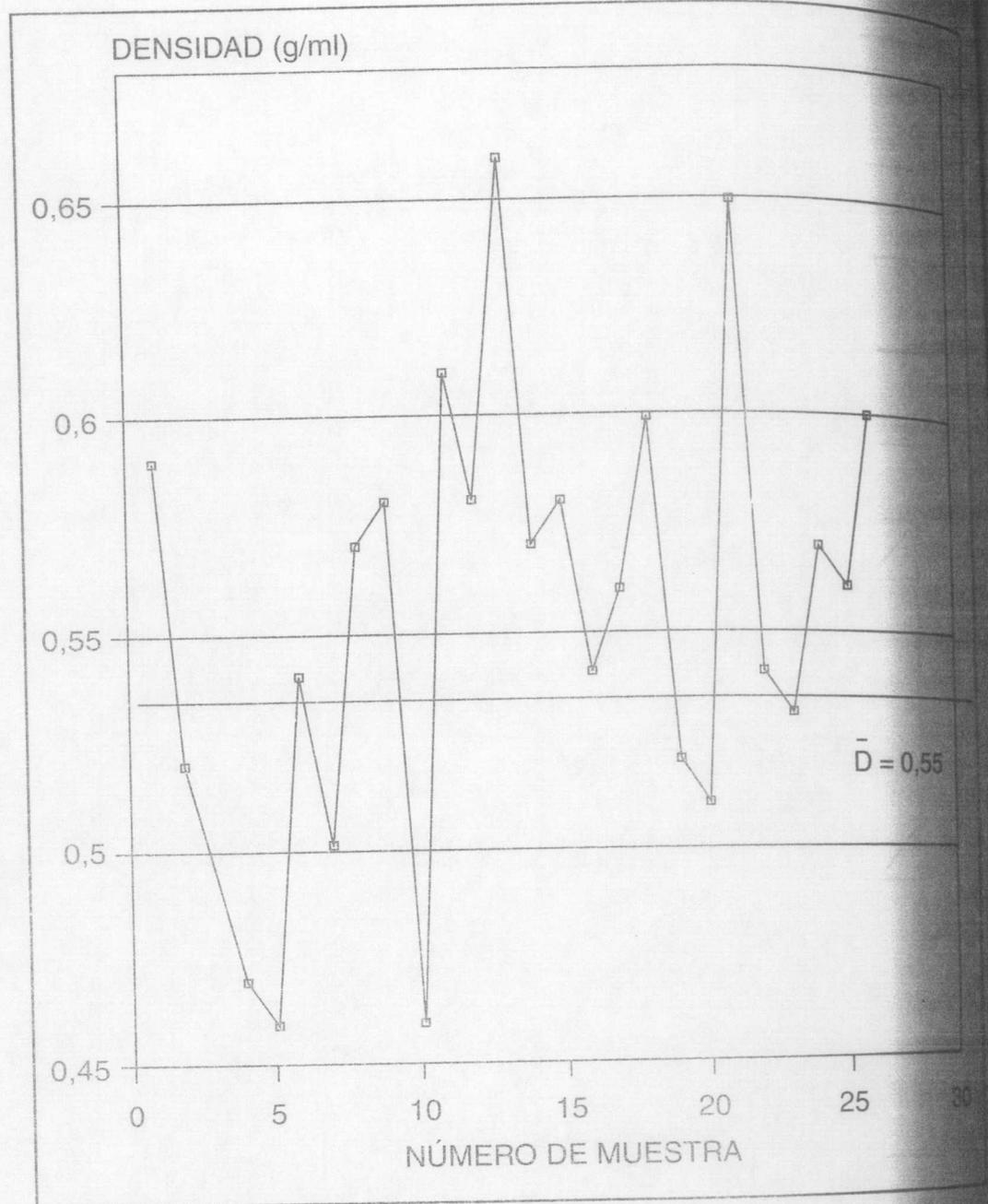


Figura XV b  
Valores de densidad aparente en base seca (D) obtenidos en cada muestra

*niaefolia*, gravedad específica 0,67, se clasifica como una madera muy pesada (9). También aparece publicado (10) el dato de gravedad específica de 1,16 base seca para roble, sin ninguna especificación de nombre científico, y que correspondería a una clasificación de excesivamente pesada.

Se espera que una madera densa produzca un carbón también denso (2,3,9). Valores de la literatura (2,3) para la densidad aparente de carbón de maderas tropicales, varían entre 0,70 y 0,90 g/ml. Si bien es cierto el promedio de densidad obtenido en el presente estudio (0,55 g/ml), que está dentro de ese ámbito, corresponde

bien a un valor intermedio del mismo. Era de esperarse que siendo el roble una madera pesada, el carbón producido fuese también pesado.

Los estándares de importación de carbón vegetal a Estados Unidos y Europa Occidental (cuadro 1) (5), establecen valores de densidad a granel de 0,30-0,35 g/ml. Si el valor promedio de densidad aparente obtenido en este estudio (0,55 g/mol) se convierte en densidad a granel, a efecto de comprar con este estándar, se obtendría un valor de 0,25 g/ml. Es claro que el carbón analizado, en promedio, tendría un valor ligeramente menor al establecido por el estándar. Sólo el valor máximo de densidad a granel obtenido en este estudio cumpliría con el estándar (0,30 g/ml, densidad a granel, cuadro 4, de resultados); los restantes valores serían menores.

El hecho de que la densidad promedio del carbón analizado corresponda a un valor bajo o intermedio, podría deberse a que, si bien es cierto el roble es una madera densa, una parte de la madera que se carbonizó se encontraba en avanzado estado de descomposición tal y como se describió previamente.

## Bibliografía

1. Navas Ocampo, S. *Calidad del carbón vegetal: Evaluación Preliminar*. Tecnología en Marcha. Vol. 12, N° 1, 1993.
2. Briane, D.; Doat, J. "Guide Technique de la Carbonisation: La Fabrication du Charbon de Bois", Paris (Francia), EDISUD, 1985.
3. Petroff, G.; Doat, J. "Pyrolyse des Bois Tropicaux, Influence de la Composition Chimique des Bois sur les Produits de Distillation". *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, N° 177, Janvier-Fevrier, 1978.
4. Paddon, A.R.; Harker, A.P. "The Production of Charcoal in Portable Metal Kiln". Tropical Products Institute G119, 1979.
5. World Bank/UNDP/Bilateral AID/Energy Sector Management Assistance Program: "Costa Rica Forest Residues Utilization Study", Volumen I – Technical Report, Household Energy Unit, Industry and Energy Department, Washington D.C., USA 20 433, 1989.
6. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. "Carvão Vegetal. Destilação, Carvoejamento, Propiedades, Controle de Qualidade". Serie de Publicações Técnicas/SPT-006, issn-0100-9540, 1982.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, NBR-6923-BI; NBR-7402-82; NBR-7416-84; NBR-9112-83; NBR-8740-85. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC.
8. Doat, J.; Petroff, G. "La Carbonización des Bois Tropicaux: Esseais de Laboratoire et Perspectives Industrielles". *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, N° 159, Janvier-Febrier, 1975.
9. Laboratorio de Tecnología de la Madera del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). "Informe sobre un Programa de Ensayo de Maderas, realizado para el Proyecto UNDP 192, Investigación y Desarrollo de Zonas Forestales Selectas de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, 1968.
10. Camacho, P.; Canet, G.; Hernández, A. "Determinación y Uniformación de los Principales Coeficientes de Cálculos Dendroenergéticos". Dirección Sectorial de Energía - Proyecto de Árboles de Uso Múltiple, San José, Octubre 1989.