

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN Y CALIDAD
DEL CARBÓN DE *Acacia caven* (Mol.) Mol. PRODUCIDO EN
HORNOS DE BARRO**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

GERMÁN ENRIQUE PACHECO MARÍN

Profesor Guía: Ing. Forestal, Sr. René Carmona Cerda

SANTIAGO - CHILE.
2005

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE LA MADERA**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN Y CALIDAD DEL
CARBÓN DE *Acacia caven* (Mol.) Mol. PRODUCIDO EN HORNOS DE
BARRO**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

Germán Enrique Pacheco Marín

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. René Carmona C.	6,5	
Prof. Consejero Sr. Alejandro Bozo G.	6,3	
Prof. Consejero Sr. Roberto Garfias S.	6,5	

SANTIAGO-CHILE

2005

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer de forma muy especial a mis Padres, Mario Pacheco Pino y Olga Marín Miranda, Maritom y Lulitam para mí, por toda su paciencia, cariño, consideración y esfuerzo que me han entregado durante todos mis años. También no quiero dejar de nombrar a Marcelo y Natacha Pacheco, por el constante *joteo* para el término de esta memoria y por su innegable apoyo y cariño.

A mi profesor guía, René Carmona, por su apoyo, y por su desinteresado aporte al logro de esta memoria. También las largas conversaciones y/o discusiones con respecto, principalmente a Política, Economía, Sociedad, Deporte, Razas caninas, etc, etc.

A mis profesores consejeros, Alejandro Bozo y Roberto Garfias, por sus acertadas correcciones y aportes a esta memoria.

A Rubén Marcos Catalán, al Chaba y a todos los muchachos que trabajan duramente en la producción de carbón en Alhué. No solamente fue un apoyo logístico, técnico o netamente físico, sino también compartí con ellos algún inolvidable mosto de la región.

A tod@s los que, de una u otra manera, hicieron grata mi larga estadía en ésta universidad. Trataré de no olvidarme de nadie, sé que si lo haré, pero de todas maneras acá va la lista: Marcelo Ramos, Ulises Romero, Moyita, Nica, Flaco Fuentealba, Billy, Vitolo, Magda, Jime Saavedra, Manquehue, Mario Valenzuela, Pollo, Karmelic, Katty, Patolón, Tejer, Pit, Rambo, Chico Mario, Queso, Yisus, Carola Delgado, los muchachos del Centro Tecnológico, Mauro de Fotocopias, Lucho Frías y todo el resto de la Pastelería.

A The Portens Inc., por su amistad hasta el día de hoy, Eduardo Martínez, Cristián Iribarren y Mauricio Villagrán.

Quiero agradecer, por su cariño y acogida a Cristina Jeldes, Aliro Díaz y a mis sobrinos Kanito, Nachita y Peyita.

Finalmente mis más sinceros agradecimientos a la Tanti, mi Fanita, por su incondicional amor y cariño, apoyo, comprensión y paciencia.

INDICE

RESUMEN

SUMMARY

1. Introducción	1
2.- Revisión Bibliográfica	3
2.1.- Antecedentes de la especie	3
2.2.- Distribución del Espino	3
2.3.- Usos del Espino	4
2.4.- Descripción de la madera de Espino	5
2.5.- Carbón vegetal	7
2.6.- Hornos	12
3.- Objetivos.....	16
3.1.- Objetivo general	16
3.2.- Objetivos específicos	16
4.- Material y Método	17
4.1. Material	17
4.1.1. Zona de estudio.....	17
4.1.2. Instrumental y Equipos.....	19
4.2. Método	19
4.2.1. Elección del lugar de estudio	19
4.2.2. Pesaje de madera entrante.....	19
4.2.3. Pesaje de carbón de espino saliente.....	20
4.2.4. Cálculo de rendimiento	20
4.2.5. Descripción del proceso.....	20
4.2.6. Determinación de algunas propiedades físicas y químicas	21
4.2.7. Proposición de opciones de producción para carbón de Espino	24
5.- Resultados y Discusión.....	25
5.1. Descripción del proceso.....	25
5.1.1. Etapas del proceso.....	25
5.1.2. Determinación de tiempos en el proceso	30
5.1.3. Determinación de temperaturas del horno de barro.....	31
5.2. Evaluación de rendimiento.....	31

5.3. Propiedades físicas	32
5.3.1. Contenido de humedad	33
5.3.2. Densidad	33
5.3.3. Poder calorífico	34
5.4. Propiedades químicas.....	35
5.4.1. Material volátil.....	35
5.4.2. Contenido de cenizas.....	36
5.4.3. Carbono fijo	37
5.5. Proposición de opciones de producción	37
5.5.1. Estimación de ingresos	37
6.- Conclusiones.....	42
7.- Recomendaciones	44
8.- Bibliografía.....	45
9.- Anexos.....	50

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

- Tabla 1. Tiempos en el proceso
- Tabla 2. Temperaturas en el horno de barro
- Tabla 3. Rendimientos en horno de barro. Primera hornada
- Tabla 4. Rendimientos en hornos de barro. Segunda hornada
- Tabla 5. Resultados de contenido de humedad del carbón de espino
- Tabla 6. Resultados de densidad del carbón de espino
- Tabla 7. Resultados de poder calorífico del carbón de espino
- Tabla 8. Resultados de material volátil del carbón de espino
- Tabla 9. Resultados de contenido de cenizas del carbón de espino
- Tabla 10. Resultados de contenido de carbono fijo del carbón de espino
- Tabla 11. Algunas características del horno Mark V
- Tabla 12. Valor del horno metálico Mark V
- Tabla 13. Ingresos del horno metálico Mark V. Caso1
- Tabla 14. Ingresos del horno metálico Mark V. Caso2
- Tabla 15. Ingresos del horno de barro

FIGURAS

- Figura 1. Sección transversal de Espino
- Figura 2. Corte transversal de madera de Espino. Vasos, fibras, radios y parénquima. 100X
- Figura 3. Esquema de horno metálico tipo Mark V
- Figura 4. Croquis de zona de estudio
- Figura 5. Crisoles dentro de la mufla para los análisis
- Figura 6. Madera apilada junto a los hornos
- Figura 7. Carga del horno
- Figura 8. Carga de tizón en el horno
- Figura 9. Horno en proceso de enfriamiento
- Figura 10. Descarga del horno
- Figura 11. Carbón ensacado

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo en el Fundo Quilamuta, ubicado en la Comuna de Alhué, Provincia de Melipilla, Región Metropolitana, y apunta a proporcionar información que contribuya al desarrollo del proceso de carbonización, proponiendo también opciones más eficientes que ayuden a superar la pobreza, en forma sustentable.

El objetivo general de este estudio fue evaluar el proceso de carbonización y la calidad del carbón de espino que se produce con hornos de barro. Para esto se determinó el rendimiento de hornos de barro para la producción de carbón de espino, luego se determinaron algunas propiedades fisicoquímicas del carbón producido como índice de calidad y finalmente se propuso una opción de producción para el carbón de espino.

Para evaluar el rendimiento, se consideró el peso anhidro de la madera entrante y el peso del carbón saliente, calculándose finalmente el rendimiento que fue de 23,1%.

Al analizar las propiedades físicas se obtuvo un 3,54% de contenido de humedad, densidad aparente de 0,68 g/cm³ y poder calorífico de 6,45 kcal /g. Con respecto a las propiedades químicas se obtuvo un 37,46% de material volátil, 4,53% de cenizas y 58,01% de contenido de carbono fijo.

Se propuso como opción de producción el uso de hornos metálicos transportables, más específicamente el horno Mark V, y se realizó una estimación de ingresos a obtener con los hornos de barro versus los hornos metálicos Mark V. La ganancia neta anual de los hornos de barro fue de \$798.000 para cada horno y la ganancia neta anual de los hornos metálicos varió dependiendo del espesor del material del horno y del aprovechamiento espacial del mismo.

Para el estudio se determinó que los hornos metálicos transportables son recomendados para productores intensivos de carbón de espino.

Palabras clave: Carbón de espino, rendimiento, hornos de barro, hornos metálicos.

SUMMARY

The present study was done in Quilamuta, located on the Commune of Alhué, Province of Melipilla, Metropolitan Region , and it aims at to provide information that contributes al development of the process of carbonization, proposing also more efficient options than helping to surpass the poverty, in sustainable form.

The main goal of this study was to evaluate the process of carbonization and the quality of the espino charcoal produced with mud kilns. For this the yield of mud kilns was determined for the espino charcoal production, soon some physical and chemical properties of the produced charcoal were determined as quality index and finally an option of production for the espino charcoal was proposed.

To evaluate the yield, the anhydrous weight of the incoming wood and the weight of the salient charcoal were considered, calculating finally the yield that was of 23,1%.

When analyzing the physical properties, a 3.54% of content of humidity, apparent density of 0.68 g/cm³ and able calorific of 6,45 kcal /g were obtained. With regard to the chemical properties a 37.46% of volatile material were obtained, 4.53% of ashes and 58.01% of content of fixed carbon.

It was proposed like option of production the use of transportable metallic kilns, more specifically the kiln Mark V, and an estimation of incomes was carried out to obtain with the mud kilns versus the metallic kilns Mark V. The annual net profit of the mud kilns was of \$798.000 for each kiln and the annual net profit of the metallic kilns changes depending on the thickness of the material of the kiln and of the spatial use of the same one.

For the study was determined that the transportable metallic kilns are recommended for espino intensive charcoal producers

Key words: Espino charcoal, yield, mud kilns, transportable metallic kilns.

1. Introducción

El uso de los recursos naturales ha sido clave para el desarrollo de la civilización humana. Entre esos recursos uno de los principales son los bosques, los que han sido tratados primando criterios de corto plazo, trayendo consigo problemas de erosión, mal aprovechamiento de los recursos y desertificación, además de menor productividad del suelo.

Una de las tendencias actuales en el manejo de los recursos es el desarrollo sustentable, que apela a equilibrar el aspecto económico con el ecológico a fin de seguir cosechando a tasas razonables, manteniendo el recurso para las generaciones futuras.

Desde la antigüedad una de las principales fuentes de energía para el uso humano han sido los bosques, por lo que de esto se desprende la importancia de asegurar superficies que satisfagan la demanda, mediante técnicas amigables con el medioambiente y de mayor tecnología y rendimiento.

Hasta mediados del siglo XIX, la principal fuente de energía en el mundo era la madera que posteriormente fue reemplazada por el carbón mineral debido a que la oferta de madera no era capaz de satisfacer la creciente demanda de energía y a la factibilidad de producir carbón para reemplazarla. A partir de 1925 los hidrocarburos (Petróleo y Gas Natural) empiezan a reemplazar al carbón mineral, debido a sus costos más bajos, mayor facilidad de transporte y distribución y su limpieza (Duchens, 1985). Toda esta evolución energética ha afectado a los sectores urbanos de los países desarrollados y en vías de desarrollo. Sin embargo en zonas rurales de países en desarrollo se mantiene la madera, tanto leña como carbón vegetal, como la principal fuente de energía.

La zona central de Chile se ha caracterizado por la frecuente tala y destronque del bosque para habilitar terrenos agrícolas, tanto de secano como riego, obteniéndose como productos leña y carbón (Faúndez y Mieres, 1987). Esta zona central es de gran interés desde el punto de vista económico y productivo, con climas mediterráneos de características áridas y semiáridas (Novoa, 1987). El uso tradicional del recurso leñoso ha sido para la supervivencia de las familias debido a las condiciones de pobreza que afecta a la población rural en general, dejando de lado actividades más sustentables (Vita et al, 1995).

Una formación vegetal característica de la zona central es el espinal, que ha sido fuertemente afectado por la acción antrópica debido al intenso aprovechamiento del recurso lo que ha transformado gran parte de esta asociación en áreas de cultivo o

praderas (Donoso, 1982). A pesar de existir restricciones para la corta del espino sin planes de manejo, se siguen realizando actividades extractivas en forma ilegal.

En la zona central de Chile, las técnicas de carbonización empleadas por pequeños productores son antiguas, con poca o ninguna tecnología, lo que radica en un aprovechamiento del recurso poco racional, agravando las condiciones de pobreza de los pequeños propietarios.

Se suma a lo anterior la poca información cuantitativa del consumo de leña y carbón vegetal en los países en desarrollo, debido a la dificultad de medirlo porque la leña se corta y recoge en el lugar, y luego se usa, por lo que no se registra el ciclo de consumo, quedando fuera de los canales comerciales (Duchens, 1985).

El presente trabajo apunta a proporcionar información que contribuya al desarrollo del proceso de carbonización, proponiendo también opciones más eficientes que ayuden a superar la pobreza, en forma sustentable. Para mejorar en términos de rendimiento el proceso de la carbonización, se deben buscar tecnologías más eficientes de producción y también formular programas tendientes a la producción autosostenida de leña y carbón por parte de pequeñas comunidades, con mejoras en el nivel de vida de las mismas (FAO, 1987).

2.- Revisión Bibliográfica

2.1.- Antecedentes de la especie

Árbol pequeño de hasta 6m de altura, copa semiesférica, con tronco tortuoso de hasta 50 cm de diámetro, siendo el único representante nativo del género *Acacia*, y se caracteriza por adaptarse a climas secos y terrenos más o menos pobres (Rodríguez et al, 1983).

Presenta hojas caducas bipinnadas, espinas estipuladas, inflorescencias dispuestas en glomérulos densos de 1 cm de diámetro y flores hermafroditas (Rodríguez et al, 1983). Tiene como fruto una vaina subleñosa y semillas ovals (Rodríguez et al, 1983) además de raíz pivotante y rápido desarrollo inicial (Serra, 1997).

Su madera es muy dura y compacta, de color amarillo en la albura y duramen rojo, con densidad básica de la madera de duramen de 0,83 g/cm³ (Rodríguez et al, 1983; Gutiérrez et al, 1989). La alta densidad de la madera se explica porque las paredes de las fibras son muy gruesas, con un lumen muy estrecho (Wagemann, 1949).

El espinal se desarrolla en aquellos lugares donde el bosque ha sido parcial o totalmente destruido, debido al sobrepastoreo y a la tala de las especies que presentan mejores características maderables (Polzenius, 1987). La fisonomía del espinal es de rodales poco densos, coetáneos, con árboles de baja altura con uno o varios fustes, vástagos rectos y cortos, con regeneración natural principalmente a partir de rebrote de tocón (Donoso, 1982; Serra, 1997).

Olivares (1983) indica que *Acacia caven* provendría de formaciones climáticas dominadas por *Quillaja saponaria* y *Lithraea caustica*. Muy importante en este proceso sería la actividad del hombre.

Mientras Donoso (1981) ubica al espino en el subtipo espinal dentro del tipo forestal esclerófilo, Gajardo (1983) lo tiene catalogado en la región ecológica de los matorrales y bosque esclerófilo.

2.2.- Distribución del Espino

Es una especie nativa de Sudamérica cálida, común en Chile, Argentina, Uruguay, Brasil y Paraguay (Navarro, 1995)

El espino forma parte importante de la sucesión vegetal en una amplia área entre el valle del río Copiapó (27° 21' S), con pluviometría anual de 28 mm, aparece luego al sur

de La Serena con precipitación media de 104mm y llega finalmente hasta Concepción (36° 50' S) con 1338 mm de pluviometría anual (Olivares, 1983).

Polzenius (1987) afirma que Espino cubre tanto el llano central como piedmonts de ambas cordilleras. Por su gran facilidad para desarrollarse en diferentes ambientes, se le puede encontrar en terrenos desérticos, húmedos e incluso en aquellos inundados temporalmente, ocupando el llano central y en ocasiones las laderas de ambas cordilleras (Olivares, 1983).

La especie se distribuye entre la III y la VIII región de Chile, entre 60 y 1200 msnm, abundando especialmente en las provincias de Santiago y Los Andes (Rodríguez et al, 1983). Se estima que en Chile hay 3.800.000 ha de espinales (FAO, 1998).

El espinal se desarrolla fundamentalmente en clima mediterráneo, con gran oscilación térmica diaria y estacional, concentrándose las lluvias en el periodo invernal con un verano muy seco. Esta especie crece en suelos profundos, altamente degradados, pero su mejor rendimiento lo tiene en suelos planos de origen aluvial y de profundidad media a alta (Serra, 1997).

2.3.- Usos del Espino

Tradicionalmente la madera se ha empleado para la fabricación de carbón vegetal de excelente calidad, lo que ha llevado a una rápida disminución de los otrora extensos espinales (Rodríguez et al, 1983).

La especie presenta usos múltiples; su madera es pesada y dura, siendo apta para trabajos artesanales y de ebanistería por su hermoso colorido y contraste entre albura y duramen, además de tener propiedades dendroenergéticas excelentes (Olivares, 1983; Faúndez y Mieres, 1987).

Gutiérrez et al (1989) encontraron problemas en el secado de la especie, debido a sus tensiones internas, tener baja permeabilidad y fuertes gradientes de humedad, reflejando tiempos largos del proceso y en la formación de defectos como grietas y rajaduras, lo que limita su aprovechamiento en la fabricación de elementos menores tales como partes y piezas de muebles, parquetes y otros productos tales como postes de cerco y mangos de herramientas (Navas, 1976).

Además, es posible usar las flores para fines apícolas y de perfumería, mientras que los frutos y la corteza son importantes fuentes de taninos. Se usan también las

semillas, que tienen 45% de proteínas, en la alimentación de ganado y aves (Olivares, 1983; Navarro, 1995).

Con respecto al manejo silvopastoral, el espino constituye una fuente de alimento importante para los animales mediante el ramoneo, siendo importante también en la protección que le da a los animales como sombra, disminuyendo las oscilaciones térmicas. La sombra que los árboles proporcionan en verano disminuye el consumo de agua y el gasto energético para los animales (Olivares, 1989).

2.4.- Descripción de la madera de Espino

La madera de espino (figura 1) es muy dura, pesada, compacta, un tanto vidriosa, con un duramen de color rojo rodeado por la albura amarillenta, con un bello veteado y anillos poco notorios y angostos (Rodríguez, 1983; FAO, 1998).

Microscópicamente, en el corte transversal (figura 2) se describe así la madera de espino:

- Poros: generalmente solitarios, a veces múltiples formados por 2 a 4 poros dispuestos radialmente. De tamaño irregular y forma circular, distribuidos sin formar dibujos. Son pocos a numerosos, habiendo de 5 a 15 poros por mm². Los poros presentan un diámetro medio de 70 μ , con un máximo de 120 μ .
- Fibras: dispuestas irregularmente, de sección redonda. Tienen paredes muy gruesas. El diámetro medio es de 10 μ , incluyendo los 4 μ de la pared.
- Parénquima: abundante, de tipo vasicéntrico, confluyente y terminal. Origina manchas que dejan entre sí islotes de fibras.
- Radios: de trayectoria sinuosa y generalmente multiseriados. Los tabiques terminales son rectos.
- Anillos de crecimiento: son originados por una disminución del diámetro de los poros y a una capa de parénquima terminal que festonea la madera de primavera (Wagemann, 1949).

En los cortes tangencial y radial, se describe así:

- Vasos: son de trayectoria sinuosa y sus elementos son de tabiques rectos o poco inclinados. Tienen perforaciones simples y su longitud es cercana a los 130 μ . Tiene puntuaciones areoladas, en parte escaleriformes.
- Fibras: presenta pocas y pequeñas puntuaciones, variando la longitud de sus elementos entre 650 y 750 μ .
- Parénquima: abundante y va descendiendo rodeando los vasos.
- Radios: irregulares y generalmente homogéneos, con grosor cercano a los 50 μ . Su altura media es de 250 μ , siendo el máximo 650 μ . Son numerosos habiendo 8 radios por mm (Wagemann, 1949).

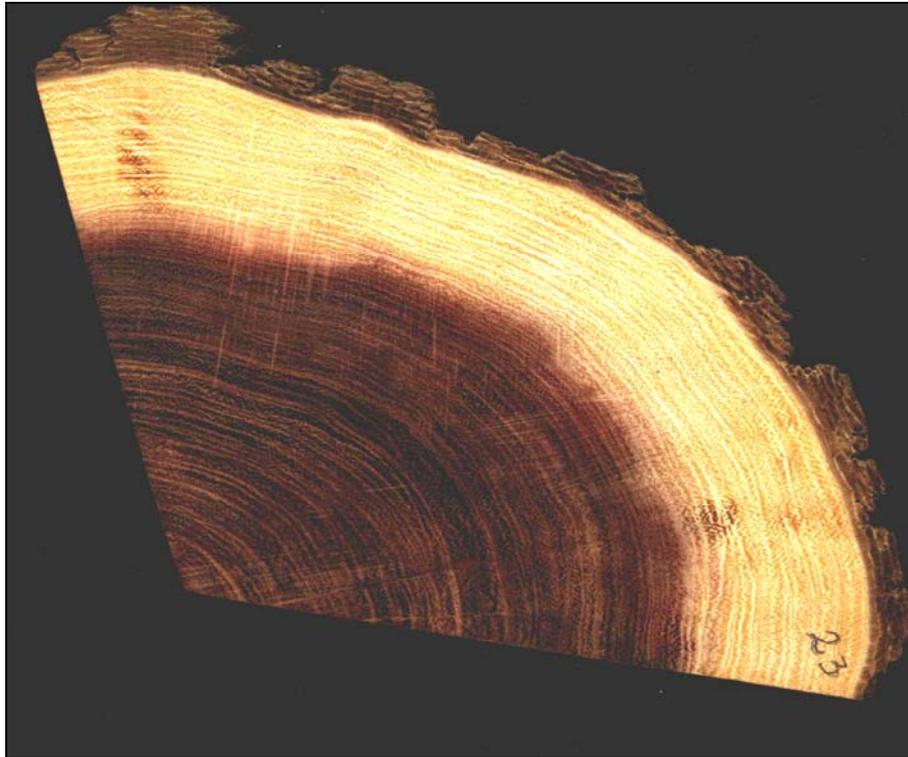


Figura 7. Sección transversal de Espino

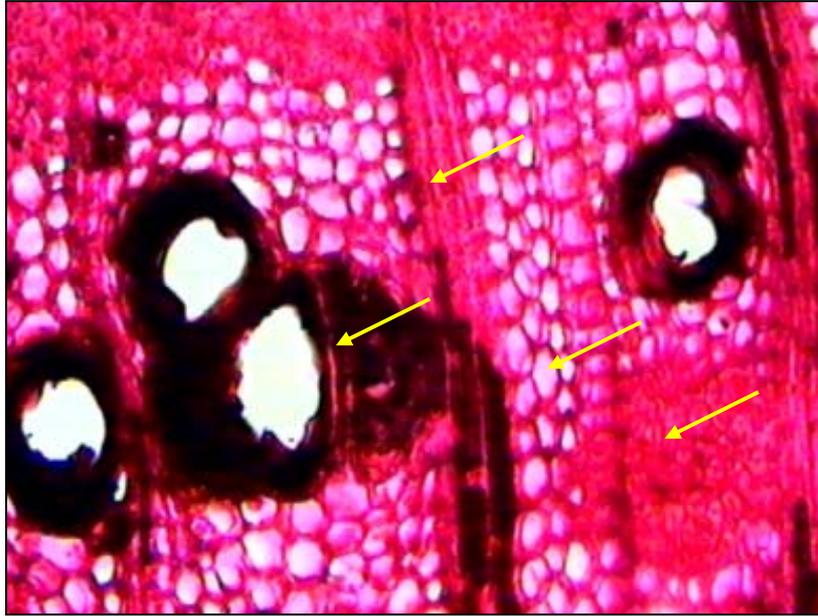


Figura 8. Corte transversal de madera de Espino. Vasos, fibras, radios y parénquima. 100X

2.5.- Carbón vegetal

Carbón vegetal se define como el residuo sólido que queda de carbonizar la madera, en condiciones controladas, en un espacio cerrado (FAO, 1983). El carbón vegetal se obtiene de la combustión incompleta de la madera y sus características físicas y químicas dependen del tipo de madera usada y de las características del proceso de carbonización (SERCOTEC, 1986).

La carbonización de la madera consiste en la transformación de dicha madera en carbón, bajo la sola influencia de la temperatura, siendo entonces, una descomposición térmica en ausencia de aire también llamada pirólisis (Massai, 1986).

El control del proceso de la carbonización, se hace sobre la entrada de aire, para que la madera no se queme simplemente en cenizas, sino que se descomponga químicamente para formar el carbón vegetal (FAO, 1983).

Los métodos modernos de producción de carbón no permiten entradas de aire, favoreciendo el rendimiento, pues así no se quema excesiva madera, mejorando la calidad (FAO, 1983).

El proceso de la carbonización, en definitiva produce carbón vegetal además de residuos alquitranados, cenizas, gases de combustión, alquitranes, productos químicos y una gran cantidad de agua originada del secado y de la descomposición pirolítica de la madera, que se libera en forma de vapor (FAO, 1983). La recuperación de subproductos por condensación de los destilados produce 2 fases: el ácido piroleñoso, que contiene las sustancias líquidas a temperatura ambiente y que son solubles en agua, y el alquitrán que contiene aquellos productos insolubles en agua, de naturaleza orgánica, aromáticos, principalmente fenoles (Massai, 1986).

El carbón vegetal tiene diversas aplicaciones, ya sea como combustible o como insumo industrial. En Chile, la actividad del carbón mueve una gran cantidad de personas que lo producen, comercializan y consumen (Gajardo y Verdugo, 1979; Olivares, 1983; SERCOTEC, 1986).

Entre los usos domésticos del carbón vegetal están los usos culinarios y de calefacción y la utilización al aire libre en parrillas y barbacoas, mientras que el uso industrial se ve en actividades tales como el secado directo o indirecto de otros productos y en la utilización como combustible interno en la fabricación de cal y de cemento (Earl, 1975). Este mismo autor señala que otros usos industriales son la separación de metales y trabajos de fundición entre otros y que además el carbón vegetal es usado en pigmentación de tintas de imprenta y pinturas, para fuegos artificiales, plásticos, producción de caucho, etcétera.

Se calcula que la producción en Chile de carbón vegetal en 1999 fue de 243.000 toneladas (Abalos, 2002). Massai (1986) afirma que ésta producción está destinada fundamentalmente al uso doméstico, principalmente en zonas rurales y en grupos familiares de escasos recursos.

Estudios recientes (Cifag, 2003), mencionan que 1 millón de metros cúbicos anuales de leña se destinarían a la producción de carbón vegetal en el país estimando también que 44.000 ha de bosque nativo se intervienen anualmente para producir leña y carbón vegetal, aunque cualquier intervención requiere de planes de manejo, ya sean éstos para recuperación de terrenos agrícolas o para la explotación de áreas con especies forestales (Galaz, 2004). Al ser el Espino perteneciente al Bosque esclerófilo, está regulado por el Decreto Ley N° 701 de 1974 de Fomento Forestal y la Ley de Bosques N° 4363 de 1931 y las instituciones encargadas de regular y fiscalizar la extracción de Espino son CONAF y SAG (Galaz, 2004).

Con respecto a la producción, algunas evaluaciones silviculturales (Trucco, 1985) proponen que al eliminar el 80% de cobertura se producen 18 toneladas de carbón por hectárea, mientras que al eliminar el 30%, se producen 6,8 Ton/ha de carbón, en espinales densos en ambiente natural.

En experiencias con hornos de barro en el país, el rendimiento está entre 18 y 20%, mientras que en Brasil, donde mejoró el manejo, y la leña entró más seca, el rendimiento fue de 26% (SERCOTEC, 1986). Respecto a lo anterior, Gajardo y Verdugo (1979) determinaron que la relación existente entre producción de leña verde y rendimiento de carbón está en proporción directa, perdiéndose cerca de un 70% del peso en el proceso de carbonización de espino. Alvarado (1989) determinó un rendimiento de 20,3% para la carbonización de espino en hornos de ladrillo tapizados de barro y paja, a través de una combustión incompleta, mientras que Galaz (2004) determinó el rendimiento en 24,1. En hornos portátiles de acero Mark V, en la zona de Chillán, se obtuvo 25% de rendimiento en peso para carbón vegetal de latifoliadas de mediana densidad (Earl, 1976).

El empleo de carbón vegetal se debe al hecho de ser un combustible proveniente de un recurso renovable, liviano, fácil de manipular y con valores caloríficos comparables con el carbón mineral (CONICYT, 1974).

Según Earl (1975) las principales características del carbón vegetal son:

a) Rendimiento en peso	Del 20 al 30% del peso seco de la madera
b) Rendimiento en volumen	50% del volumen de la madera
c) Peso específico real	0,2-0,5 g/cm ³
d) Peso específico aparente	1,3-1,5 g/cm ³
e) Dureza	Variable según densidad de la madera
f) Humedad	Del 1 al 16%
g) Hidrocarburos	Del 7 al 30%
h) Contenido fijo de carbono	Del 80 al 90%
i) Poder calórico	7,1 kcal por gramo
j) Cenizas	Del 0,5 al 10%

En el proceso de carbonización se distinguen 4 fases:

1. Combustión (solo en hornos): la temperatura aumenta rápidamente llegando hasta 600° C y en ese momento disminuye la cantidad de aire y la temperatura baja a 100-150° C. De esta etapa se libera agua y dióxido de carbono.
2. Deshidratación: es de duración variable según la humedad de la madera y el tipo de horno usado. La temperatura sube hasta 270° C antes que empiece la reacción exotérmica. Esta etapa puede durar de días a horas.
3. Reacción exotérmica: una vez eliminada el agua, sube fuertemente la temperatura pues empieza la descomposición de la madera, y algunas sustancias tales como ácido acético, alcohol metílico y alquitrán, se eliminan con el humo.
4. Enfriamiento: esta etapa se produce cuando la carga llega a temperatura ambiente, y la velocidad a que disminuye la temperatura depende de la técnica de carbonización utilizada y del espesor y capacidad radiante de las paredes del aparato (Earl, 1975).

Las variables que influyen en el proceso de carbonización se pueden dividir en 2 tipos: las propias de la materia prima y las propias del proceso.

Entre las de materia prima tenemos la dureza, la densidad, el tamaño y la humedad de la madera (propiedades físicas), y la composición química de la madera.

Entre las variables propias del proceso tenemos la temperatura del horno, la velocidad de calentamiento y el oxígeno libre (Marcos, 1989). A mayor temperatura mejora la calidad del carbón pero disminuye el rendimiento, siendo la temperatura óptima entre 400 y 450° C, mientras que a mayor velocidad de calentamiento baja la producción, induciéndose la conversión del combustible en productos volátiles y a mayor presencia de oxígeno (en el ambiente o al interior de la madera) puede bajar el rendimiento y la calidad de la carbonización (Marcos, 1989).

La calidad del carbón vegetal se define según algunas de sus propiedades, entre las cuales están:

1. Contenido de humedad: la humedad es un adulterante que baja el valor calorífico del carbón, y las especificaciones de calidad limitan al contenido de humedad a un 15% máximo del peso bruto
2. Material volátil: comprende los residuos líquidos y alquitranosos que no fueron eliminados completamente en la carbonización. Un buen carbón vegetal tiene cerca de un 30% de sustancias volátiles. Un carbón con mucha materia volátil se enciende fácilmente pero al quemar produce humo. Uno con poca materia volátil es difícil de encender, con una combustión muy limpia, pero más quebradizo. El porcentaje varía entre un 10 y un 40%.
3. Contenido de carbono fijo: varía entre 50 y 95%. Con alto contenido de carbono fijo, el carbón es más quebradizo, con menos sustancias volátiles.
4. Contenido de cenizas: Las cenizas corresponden al residuo inorgánico que resta después de la combustión completa del carbón. Son sustancias minerales presentes en la madera original, recogidos como contaminantes del suelo. Este contenido varía entre 0,5 a más del 5% dependiendo de la madera, la cantidad de corteza y los contaminantes de tierra y arena. Un buen carbón tiene aproximadamente un 3% de cenizas.
5. Propiedades físicas: Las propiedades físicas más importantes para evaluar la calidad son la densidad, la higroscopicidad y el poder calorífico. Respecto a este último, un carbón con muchas sustancias volátiles presenta menor poder calorífico que uno con menos sustancias volátiles y alto contenido fijo de carbono (FAO, 1983; Massai, 1986).

El poder calorífico de un cuerpo se define como la medida de calor liberado por la combustión completa y total de la unidad de peso de dicho cuerpo (Covacevich, 1979).

Los factores que afectan dicho poder calorífico son el contenido de humedad y la composición química de la madera (CONAF, 1984).

Covacevich (1979) afirma que las coníferas tienen poder calorífico más alto que latifoliadas, debido principalmente al mayor contenido de resina y lignina. CONAF (1984) determinó el poder calorífico del carbón de espino en 7,2 kcal/g, mientras que Gajardo y Verdugo (1979) calculó un poder calorífico superior de 7,4 kcal/g.

2.6.- Hornos

Existen varias formas de producir carbón. Todas las tecnologías empleadas tienen como principio común crear una barrera física que aísla la madera del exterior, para evitar que el oxígeno del aire incendie la madera (Marcos, 1989).

Las más primitivas son en base a fosas de tierra (FAO, 1983). Con este mecanismo se obtienen bajos rendimientos, además de carbón de mala calidad, pero es un método muy usado en países subdesarrollados, principalmente por su bajo costo. Según Marcos (1989) las fosas de tierra producen un carbón vegetal irregular, más quemado, con mayor material volátil y con más posibilidad de convertirse en cenizas. Este mismo autor afirma que es mayor la posibilidad de formación de tizones, es decir, trozos de carbón mal carbonizados, que cuando vuelven al proceso contienen alquitranes.

Igualmente antiguos, pero más eficientes son los hornos de barro. La madera se encierra dentro de una cámara, impermeable al aire, hecha con tierra. Es especialmente útil en terrenos agrícolas (FAO, 1983). A diferencia de las fosas, que se pueden usar pocas veces, los hornos de barro pueden ser usados reiteradas veces (FAO, 1983).

Según FAO (1983) la producción con estos hornos se adapta tanto a producciones esporádicas como producción a gran escala. Una ventaja de estos hornos es el bajo costo de producción, pero presenta rendimientos inciertos, además de una alta probabilidad de que el carbón se contamine con piedras y tierra (Massai, 1986).

Estos hornos tienen agujeros que permiten la entrada de aire y sirven para controlar el proceso, siendo tapados con barro a medida que se carboniza la madera.

Cuando la carga ya se ha carbonizado se tapan todos los huecos, evitando la entrada del aire para enfriar el carbón y detener el proceso. Hay dos formas de encender estos hornos: quemar madera en algunos huecos inferiores o bien introducir carbón de madera ardiendo en estos huecos o bien, meter carbón o madera ardiendo por el agujero superior del horno (Marcos, 1989).

Un ciclo de producción dura entre 8 y 15 días dependiendo de la humedad de la madera y las dimensiones del horno (Carbonización Industrial, 2004). Según Marcos (1989) este ciclo depende de muchos factores entre los que cabe destacar la climatología (temperatura, humedad y pluviosidad), tamaño del horno, humedad y dureza de la madera, tamaño de la madera, compactación de la carga, forma del horno y, lo más importante, el correcto control del proceso.

El horno debe asentarse en un terreno de preferencia llano y en algunos casos puede realizarse una pequeña nivelación del mismo. También es importante que el terreno debe ser lo más compacto posible, con buen drenaje (Marcos, 1989). Reyes (1997) caracterizó hornos y hornillas, que se diferencian en que partes de las hornillas se pueden establecer bajo el nivel del suelo, lo que provoca una mayor protección contra la acción del viento pues se evitan pérdidas por incineración de la carga.

Otro método de hacer carbón son los hornos de ladrillo. Junto a los metálicos transportables, pertenecen según Marcos (1989), a la categoría de hornos semi-industriales y su proceso de carbonización es más rápido que los artesanales (fosas y hornos de barro). Si son construidos y mantenidos correctamente, son el método más efectivo para producir carbón (FAO, 1983). Han demostrado ser de inversión moderada, requerir poca mano de obra y tener buenos rendimientos (FAO, 1983). Su construcción es sencilla, pero ligeramente más compleja que los metálicos y si se construyen de buena manera, dan buenos resultados con una vida útil de cinco a diez años (Marcos, 1989).

Uno de los problemas de éstos hornos semi-industriales, es que si se colocan varios juntos, los humos expulsados pueden dañar el medioambiente (Marcos, 1989).

Finalmente, otro método que sirve para producir carbón son los hornos metálicos transportables. Navas (1992) los define como cualquier dispositivo de carbonización cilíndrico, que disponga de entradas y salidas de aire en la base y dividido en secciones que permitan su transportabilidad.

El horno metálico consta de varias piezas llamadas virolas, de forma variada, que se superponen y que son tapadas con otra pieza llamada tapadera, también metálica (Marcos, 1989), con una capacidad según Carbonización industrial (2004) que varía de 4 a 9m³ en estos hornos.

Con su uso se acorta la distancia de transporte de la madera y también facilita el control del proceso, la rapidez de carbonización y por ende mejor rendimiento (Navas, 1992). Los hornos metálicos transportables tienen como ventaja la optimización del proceso de carbonización por el mayor control que hay sobre la entrada de aire, la menor supervisión que se debe tener en el proceso, la mayor independencia de los factores ambientales presentes, mayor variedad de materias primas que pueden ser carbonizadas, y por último el personal inexperto puede ser entrenado en poco tiempo para realizar la actividad (FAO, 1983).

El tiempo de carbonización en estos hornos va de 4 a 10 días, y existen los siguientes factores que lo afectan:

1. La habilidad y experiencia de los carboneros
2. La humedad de la madera
3. El tamaño del horno
4. La humedad y temperatura ambiental

(Marcos, 1989).

Entre las desventajas de éste método esta el costo inicial, el traslado del horno en terrenos adversos, los requerimientos del tipo de madera entrante y la vida útil del horno que es de sólo 2 a 3 años (FAO, 1983). Con respecto a este último punto, Marcos (1989) afirma que para alargar la vida útil de estos hornos se debe mejorar la calidad del metal empleado y aumentar el espesor del mismo, aunque esto encarezca los costos.

Massai (1986) afirma que estos hornos son baratos y relativamente fáciles de construir, se obtienen mejores rendimientos que en los hornos de barro, con un producto más limpio pero que dependen fuertemente de la habilidad del operador para su buen funcionamiento.

Entre estos hornos metálicos transportables está el horno Mark V, que es el resultado de la experiencia adquirida en Uganda con hornos de acero transportables. Está basado en el principio de carbonización por corriente ascendente (Earl, 1975). Algunas de sus características fundamentales son la solidez de su construcción, la eliminación de partes subterráneas, ser completamente transportable y poder ser manipulado por dos personas. Su precio neto es de 3700 dólares (Earl, 1975).

Es de los que se considera barato y práctico con una depreciación de 3 años y una producción total de 72 ton/año de carbón (Earl, 1975).

Navas (1992) lo describe como un sistema de carbonización, compuesto de un contenedor metálico cilíndrico generalmente, constituido por dos o más cilindros empotrados, con un techo cónico con tiro invertido y que tiene ocho entradas de aire-salidas de humo dispuestas en la base del horno. Estas ocho entradas o tubos, son cuatro para la entrada y cuatro para la salida y durante la carbonización los tubos de salida van acompañados de 4 chimeneas cilíndricas de 250 cm de altura y 100 mm de diámetro (Marcos, 1989; Miralles, 1989).

Su capacidad varía entre 4 y 12 m³, la hermeticidad del ensamble es asegurada con arena, tierra o arcilla y el líquido piroleñoso no se recupera (Navas, 1992).

Este horno ha sido diseñado para soportar un uso rudo y temperaturas extremas, siendo las partes principales de acero resistente a la oxidación y al calor y las chimeneas de tubos de acero galvanizado (Earl, 1976).

El horno Mark V (figura 3), también llamado TPI (Tropical Products Institute) es un horno de 232 cm de diámetro y 216 cm de altura y esta constituido por tres secciones:

- Sección cilíndrica o anular inferior de 90 cm de altura y 232 cm de diámetro
- Sección cilíndrica o anular superior de 80 cm de altura y 229 cm de diámetro, colocada encima de la anterior
- Sección cónica de 46 cm de altura y diámetro ligeramente inferior al anterior. En la misma hay cuatro asas y cuatro bocas de salida de humo (Marcos, 1989).

El material del horno es de acero de 15 mm de espesor y los ductos, chimeneas y canales están hechos de planchas de 4mm de espesor (Miralles, 1989).

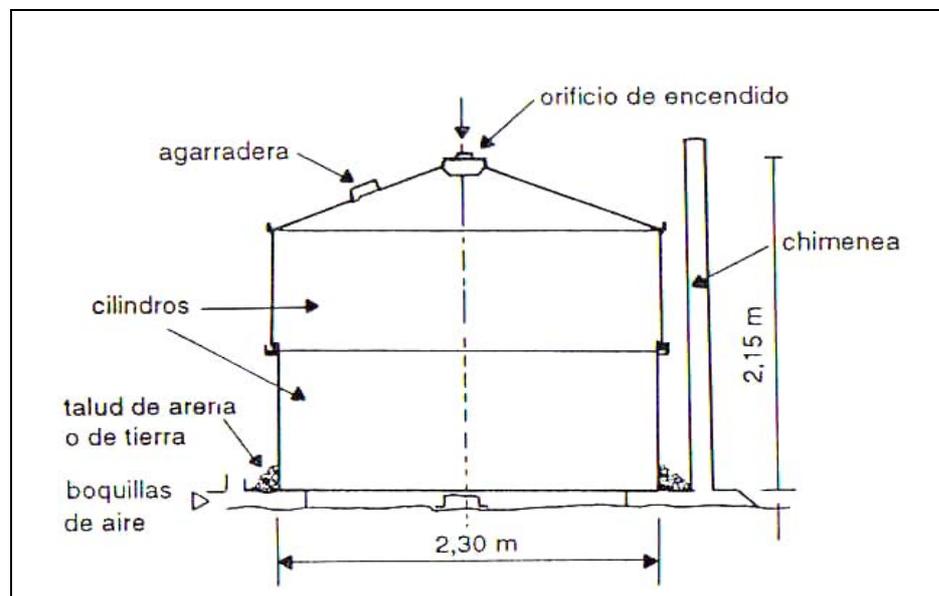


Figura 9. Esquema de horno metálico tipo Mark V

3.- Objetivos

3.1.- Objetivo general

Evaluar el proceso de carbonización y calidad del carbón de espino en hornos de barro en la zona de Quilamuta, Alhué, Región Metropolitana

3.2.- Objetivos específicos

- Determinar el rendimiento de hornos de barro para la producción de carbón de espino
- Determinar algunas propiedades fisicoquímicas del carbón producido como índice de calidad del mismo
- Proponer una alternativa de producción para el carbón de espino

4.- Material y Método

4.1. Material

4.1.1. Zona de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en el fundo Quilamuta, ubicado en la Comuna de Alhué, provincia de Melipilla, Región Metropolitana (figura 4).

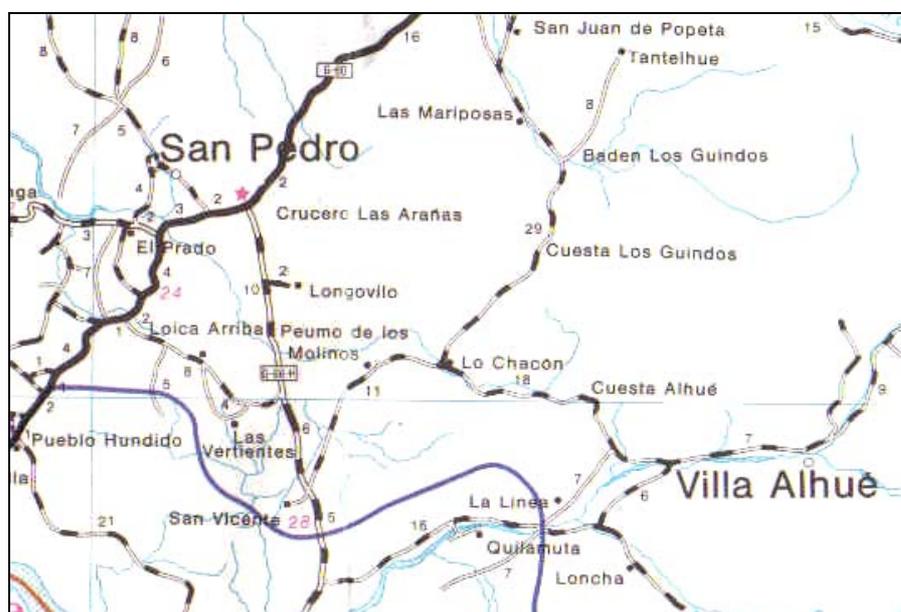


Figura 10. Croquis de zona de estudio

La Comuna de Alhué, situada a 34°01' de latitud sur y 71°10' de longitud oeste, pertenece a la Provincia de Melipilla y está ubicada a 150 kilómetros de la capital del país, constituyendo una comuna rural de 84.000 ha, mediterránea y terminal (Fundación nacional para la superación de la pobreza, 1999). Localizada en el extremo sur poniente de la Región Metropolitana, limita al norte con las comunas de Melipilla y Paine, al sur con Las Cabras y Doñihue (VI Región), al este con la Cordillera de la Costa y al oeste con las comunas de Melipilla y San Pedro (Fundación nacional para la superación de la pobreza, 1999).

La población total de Alhué, suma un total de 4.435 habitantes, de los cuales el 52,8 % son hombres y el 47,2 % mujeres con una densidad de ocupación del territorio de

sólo 5 háb./ km² (Fundacional nacional para la superación de la pobreza, 1999; INE, 2002).

Alhué presenta un clima templado, mediterráneo semiárido con 454 mm de precipitación anual con 8 meses de período seco, temperatura máxima en Enero de 27,7°C y mínima en Julio de 4,7°C con período libre de heladas de 245 días y 7 heladas al año de promedio (Santibáñez y Uribe, 1993). La temperatura media es de 14,2°C (Comisión nacional de riego, 1981).

En términos del tipo de suelos, el lugar de estudio corresponde a la Serie Quilamuta (Comisión nacional de riego, 1981). Son suelos de origen aluvial, estratificados y profundos, que se presentan ocupando tanto la posición de abanicos aluviales, como terrazas aluviales en los sectores de Alhué y Rapel, de color pardo oscuro y con textura franco arenosa muy fina (Comisión nacional de riego, 1981).

Estos suelos son de origen granítico (Peralta, 1976), tienen buen drenaje, permeabilidad moderadamente rápida a rápida y lento escurrimiento superficial, de aptitud agrícola (Comisión nacional de riego, 1981).

El área de estudio presenta vegetación esclerófila, donde la formación más representativa son espinales, producto de la actividad antrópica, preferentemente el pastoreo. Presenta baja densidad de árboles, de poca altura y varios fustes, provenientes principalmente de rebrotes de tocón. Bajo la cobertura dominante de espino, se observan ejemplares de Litre, Tevo y pastos y hierbas anuales. La madera usada en este estudio, es de los espinales con estas características.

No existe información sobre la cantidad de carbón vegetal que se produce en la comuna, pero sí se estimó la producción en la vecina comuna de San Pedro, comuna con características muy similares a Alhué en términos de producción, llegando a 2.990 toneladas al año (Vargas, 1998).

El predio fue arrendado por su dueño, por un período de 25 años a una empresa agrícola. Esta tiene como objetivo principal, tras un plan de manejo, la habilitación de terrenos agrícolas. La empresa busca habilitar terrenos para parronales y otros cultivos frutales. La madera, que con posterioridad será usada para la fabricación del carbón vegetal, es vendida por la empresa al productor de carbón quién cubre los costos de material (motosierras, hachas, palas, etcétera) además de la fabricación de los hornos de barro y la empresa agrícola paga el plan de manejo y facilita la maquinaria pesada, principalmente la retroexcavadora que se usa en el destronque.

La producción de carbón en el fundo consta de varias etapas, las que son: Destronque, desrame y trozado, transporte de la madera, cargado del horno, encendido del horno, apagado y enfriamiento del horno, descarga del carbón y ensacado.

4.1.2. Instrumental y Equipos

El presente estudio necesitó equipos para el análisis de las muestras de madera y de carbón vegetal de espino. Entre estos están:

- Estufa de secado
- Balanza analítica
- Mufla
- Desecador
- Bomba de vacío
- Termocupla
- Bomba calorimétrica Parr
- Romana
- Material de laboratorio como: mortero, tamiz, crisoles, reloj comparador, tenazas, tijeras, espátulas, guantes, etcétera.

4.2. Método

4.2.1. Elección del lugar de estudio

Se eligió el fundo Quilamuta porque se está produciendo carbón prácticamente todo el año, lo que facilita el proceso de la toma de datos. Se seleccionaron también los 2 hornos dónde se tomaron las muestras. En el momento de la elección se tuvo en cuenta la representatividad del lugar, con respecto a los otros productores, considerando el tipo de producción y características de los hornos.

4.2.2. Pesaje de madera entrante

Para pesar la madera de espino que entra al horno de barro se usó una romana facilitada por el fundo. Esta operación se realizó en 2 hornos de diferente tamaño. Al

mismo tiempo se tomaron 5 muestras de madera para determinar su contenido de humedad en el laboratorio.

4.2.3. Pesaje de carbón de espino saliente

Con la misma romana se pesó el material saliente. El carbón fue envasado en sacos de aproximadamente 40 kilos, y fue pesado en las mismas bolsas. Paralelamente se extrajeron 3 muestras de aproximadamente 1 kilogramo de cada una de las 2 hornadas evaluadas, para los análisis de laboratorio. Estas muestras fueron tomadas al azar en distintos momentos de la descarga, sin importar el tamaño ni las características del carbón escogido.

4.2.4. Cálculo de rendimiento

Considerando el peso seco de la madera entrante y del carbón saliente, se calculó el rendimiento. Cabe decir que en este paso es importante tener la información sobre el contenido de humedad de la madera que entra al horno. Se tomaron muestras de madera, y se determinó su contenido de humedad con el equipo facilitado por el Laboratorio de Química de la Madera del Departamento de Ingeniería de la Madera. Al llevar las muestras a peso anhidro, se calculó finalmente el rendimiento de la producción. Estas muestras fueron tomadas de 2 hornos de diferente tamaño.

4.2.5. Descripción del proceso

Paralelamente a la toma de datos, se documentó el proceso, con todos sus pasos. En el caso particular del fundo, este proceso consta de las siguientes etapas:

- a) Destronque
- b) Desrame y trozado
- c) Transporte
- d) Carga de la madera en el horno
- e) Encendido del horno
- f) Apagado y enfriamiento del horno
- g) Descarga del carbón

h) Ensacado del carbón

Estos procesos fueron descritos, además de registrados con archivos fotográficos.

También fueron determinados los tiempos.

Junto a lo anterior, se evaluaron las características de la madera entrante. Se determinó el diámetro mínimo requerido y la longitud de los trozos.

Se midió además, la temperatura del horno de barro en diversas etapas del proceso de carbonización con una termocupla.

Finalmente cabe decir, que en la etapa de la carga del horno, los trabajadores distribuyen junto a la madera, el material que no se carboniza completamente, llamado tizón. Este tizón ayuda a mejorar, y a hacer más uniforme la carbonización.

4.2.6. Determinación de algunas propiedades físicas y químicas

Como se dijo con anterioridad la calidad del carbón vegetal se determina con el análisis de algunas propiedades físicas y químicas, pero ésta determinación de calidad se enfoca, por las exigencias mayores que se requieren, más al carbón vegetal destinado a fines industriales que al carbón vegetal para usos domésticos.

Para determinar la calidad del carbón vegetal se extrajeron 3 muestras tomadas en una diagonal desde el piso al techo en cada una de las hornadas de cada uno de los 2 hornos estudiados.

Las propiedades físicas analizadas fueron el contenido de humedad, la densidad y el poder calorífico. Las propiedades químicas que se determinaron fueron el porcentaje de carbono fijo, el de material volátil y el de cenizas.

El carbón se molió en un mortero y posteriormente se paso por un tamiz con malla de 1mm. Se usó para los análisis el carbón de diámetro menor a 1mm.

Todos los análisis de las propiedades físicas y químicas se realizaron en el Laboratorio de Química de la Madera del Departamento de Ingeniería de la Madera, excepto la determinación del poder calorífico.

Para cada una de las propiedades el procedimiento fue el siguiente:

- Contenido de humedad: Se tomó aproximadamente 1,5 g del carbón molido, disponiéndolo en 3 crisoles de porcelana. Posteriormente entraron a la estufa por 24 hrs. a 105°C para después calcular, por diferencia de

peso, el contenido de humedad, después de pasar por el desecador. Es importante considerar el tiempo que transcurre desde la toma de las muestras hasta el análisis, debido a la absorción de humedad que puede realizar el carbón. En este caso el tiempo que transcurrió fue un mes.

- Material volátil: Los mismos crisoles anteriores (figura 5), con el mismo carbón, se introducen a la mufla a 950°C. Los crisoles permanecen, con la puerta de la mufla abierta dos minutos en la entrada de la mufla (300°C), tres minutos en el borde (500°C) y finalmente, con la puerta cerrada, seis minutos dentro de la mufla. El porcentaje de volátiles se obtuvo por diferencia de peso del secado a 950°C versus el secado a 105°C. Las muestras pasaron al desecador, para su enfriamiento a temperatura ambiente, antes de ser pesadas.
- Contenido de cenizas: Para determinar el porcentaje de cenizas se introdujeron los mismos crisoles iniciales, por 6 horas a 750°C. Se pasan las muestras al desecador y se pesan, para después calcular el porcentaje, versus el carbón secado a 105°C.

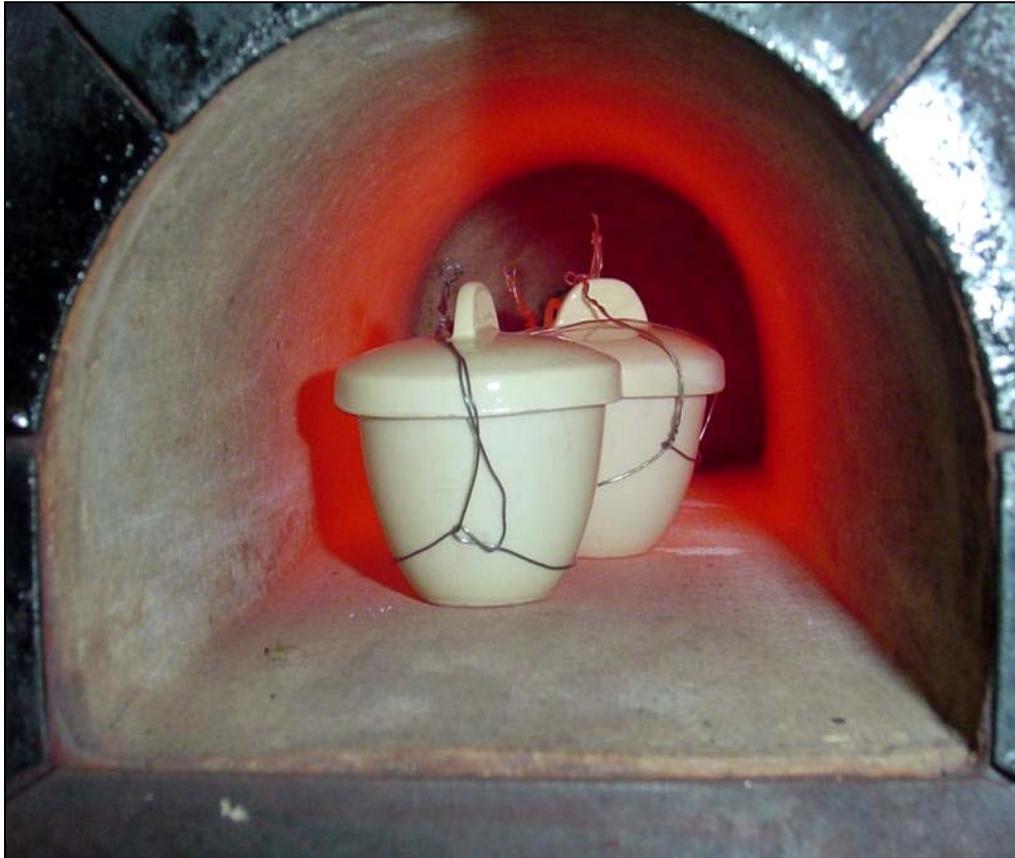


Figura 11. Crisoles dentro de la mufla para los análisis

- Carbono fijo: Para calcular el porcentaje de carbono fijo, se usó la siguiente fórmula: $\text{Carbono Fijo (\%)} = 100 - [\text{Cenizas (\%)} + \text{Volátiles (\%)}]$
- Poder calorífico: Para obtener el poder calorífico del carbón, se enviaron muestras del carbón molido al Departamento de Producción Animal de la Facultad de Ciencias Agrarias, donde se realizó la determinación mediante una bomba calorimétrica. También se hizo el análisis en el Laboratorio Físico-Químico de la Facultad de Química de la Universidad de la República de Uruguay.
- Densidad: Para calcular la densidad aparente se tomaron trozos de carbón y se cortaron con el fin de obtener muestras fáciles de trabajar. Se trató de obtener muestras lo más lisas posibles, sin grietas. Posteriormente se midieron las longitudes con un reloj comparador, para así calcular el volumen de dichas muestras. Finalmente, después de pesar en la balanza las muestras, se obtuvo la densidad aparente del carbón vegetal.

Para los cálculos del contenido de humedad, del porcentaje de material volátil y del contenido de cenizas y del contenido de carbono fijo se usó la Norma ASTM D1762 "Standard Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal" reprobada en 1990.

4.2.7. Proposición de opciones de producción para carbón de Espino

Se propuso usar un horno metálico transportable Mark V, también llamado TPI, para la producción de carbón de espino. La proposición de este horno en particular, se debió a la mayor información que se tiene sobre él.

Para analizar la conveniencia de dicha aplicación, se pidió una cotización a la empresa Metalúrgica Antahuara Ltda. La información usada para evaluar la propuesta es fruto de la bibliografía consultada.

Se realizó una estimación de ingresos que analizó la conveniencia o no del uso de hornos metálicos transportables para producir carbón vegetal, enfrentando los ingresos totales de la producción de carbón en hornos de barro versus hornos metálicos.

Se consideró que el aprovechamiento del espacio con un horno de barro es de un 60%. Al evaluar el rendimiento del horno metálico se consideraron 2 escenarios: uno realista donde el aprovechamiento del espacio es de 60% y uno optimista donde ese aprovechamiento es de un 80%. Este mayor aprovechamiento se debe a que el horno metálico, al ser desmontable, favorece la mejor disposición de la madera.

5.- Resultados y Discusión

5.1. Descripción del proceso

5.1.1. Etapas del proceso

Para la mayor comprensión del proceso de carbonización, es necesario describir en forma detallada las actividades que se realizan en el mismo. El proceso de carbonización en hornos de barro dura 7 días, desde la carga de la madera hasta el ensacado del carbón.

La carbonización consta de las siguientes etapas:

- Destronque: Se usan retroexcavadoras con el objeto de arrancar los árboles del suelo.
- Desrame y trozado: Motoserristas y hacheros trozan y desrraman la madera respectivamente, para facilitar el transporte y la posterior carga del horno.
- Transporte: La madera se transporta en coloso hasta la zona de los hornos. Se apila la madera al lado del horno (figura 6). Estos colosos son facilitados por el fundo a los productores de carbón. En el estudio de Araya (2003) el transporte de la madera es con bueyes, pero esto se debe al mayor tamaño de las trozas.



Figura 12. Madera apilada junto a los hornos

- Carga de la madera en el horno: Esta etapa la cumplen 2 trabajadores (figura 7). Uno de ellos está dentro del horno ordenando la madera, tratando de ocupar de manera óptima el espacio, y ubicando los trozos gruesos más al centro para así incrementar la temperatura del horno. El otro trabajador le pasa la madera al que está dentro del horno, y tiene una motosierra y un hacha por si es necesario cortar los trozos. En algunas ocasiones toda la carga la hace sólo un trabajador, pero no es lo más común. La longitud de estos trozos depende del tamaño y la altura del horno. Las trozas no sobrepasan el metro de largo. Con respecto al diámetro mínimo, los trabajadores no son tan estrictos, entrando al horno toda la madera de más de 4 cm de diámetro. No existen limitantes para el diámetro máximo de las trozas, y si éstas no se carbonizan, vuelven a entrar al proceso en la próxima hornada. Al terminar de cargar el horno se sella la entrada con la mitad de un tambor aceitero además de barro, piedras y paja.



Figura 13. Carga del horno



Figura 14. Carga de tizón en el horno

- Encendido del horno: Una vez cargado, el horno se debe encender. El horno está totalmente sellado a excepción de la abertura superior y los agujeros de entrada y salida de aire. Para encender el horno se introducen por la abertura

superior trozos de madera o carbón ardiendo, además de hojas y ramillas secas y luego se sella la abertura superior con tierra. Cabe recordar la importancia que tiene el tizón para mejorar y a hacer más uniforme la combustión (figura 8). El horno permanece encendido de 3 a 4 días, mientras que Galaz (2004) afirma que son entre 4 y 5. En el estudio de Araya (2003) se afirma que son 5 días de carbonización en temporada favorable y 7 días en temporada desfavorable, debido a las características de la materia prima, que es principalmente del género *Nothofagus*.

- Apagado y Enfriamiento del horno: Después del tiempo necesario para carbonizar la carga se procede al apagado del horno. Para esto se cierran todos los agujeros laterales, con el fin de evitar la entrada de aire hacia el horno. Finalmente se deja enfriar a temperatura ambiente hasta poder manipular el carbón (figura 9). Mientras el estudio de Araya (2003) coincide con el presente trabajo en determinar de 2 a 3 días el tiempo de enfriamiento, Galaz (2004) indica que el enfriamiento demora entre 6 y 8 días. Esto se puede deber al mayor tamaño de los hornos evaluados en dicho trabajo.



Figura 15. Horno en proceso de enfriamiento

- Descarga del carbón: Cuando ya se enfrió el horno completamente, se abre la puerta del horno. Un trabajador entra y saca el carbón (figura 10), dejándolo listo para el posterior ensacado.



Figura 16. Descarga del horno

- **Ensacado del carbón:** Se embolsa el carbón en sacos de 40 kilos aproximadamente (figura 11). Esta etapa se realiza en el mismo lugar donde se fabricaron los hornos. Se pone el saco en una trípode de 3 varas dónde se llena con el carbón. Una vez llenos los sacos se cosen, para facilitar el traslado. Al respecto, Araya (2003) afirma que esta operación se puede realizar en el mismo lugar, o bien puede llevarse el carbón al galpón de ensacado, con los mayores gastos que dicha actividad requiere.



Figura 17. Carbón ensacado

5.1.2. Determinación de tiempos en el proceso

Es importante considerar los tiempos que se ocupan en cada una de las etapas del proceso de carbonización. El proceso completo es de 7 días. En la tabla 1 se definen esos tiempos.

Tabla 16. Tiempos en el proceso de carbonización

Día	Actividad
1	Carga del horno-Encendido del horno
2	Carbonización
3	Carbonización
4	Carbonización
5	Apagado y Enfriado del horno
6	Enfriado del horno
7	Descarga del horno-Ensacado del carbón

5.1.3. Determinación de temperaturas del horno de barro

La temperatura de carbonización es una variable muy importante en la determinación de algunas propiedades físicas y químicas del carbón, es decir de la calidad del carbón producido. Se realizaron mediciones con una termocupla de 1m de largo en algunos estados del proceso. Los resultados se detallan en la tabla 2.

Tabla 17. Temperaturas en el horno de barro

Día	Actividad	Temperatura del horno (° C)
1	Carga del horno-Encendido del horno	Ambiente
2	Carbonización	237-257
3	Carbonización	301-312
4	Carbonización	313-319
5	Apagado y Enfriado del horno	-
6	Enfriado del horno	-
7	Descarga del horno-Ensacado del carbón	-

5.2. Evaluación de rendimiento

Se realizaron las mediciones en 2 hornos distintos.

En la primera hornada los resultados fueron los siguientes:

Tabla 18. Rendimientos en horno de barro. Primera hornada

Madera Entrante (kg)	Carbón Saliente (kg)	Contenido de humedad (%)	Rendimiento (%)
3331	499	52	22,8

Con estos datos, el rendimiento del horno de barro, para la producción de carbón de espino fue de 22,8%. Se contabilizaron 214 kg de tizón, los cuales no fueron considerados en el cálculo del rendimiento.

En la segunda hornada los resultados fueron los siguientes:

Tabla 19. Rendimientos en hornos de barro. Segunda hornada

Madera Entrante (kg)	Carbón Saliente (kg)	Contenido de humedad (%)	Rendimiento (%)
3580	579	45	23,4

Con estos datos, el rendimiento del horno de barro, para la producción de carbón de espino fue de 23,4%. Se contabilizaron 254 kg de tizón, los cuales, al igual que en la primera hornada, no fueron considerados en el cálculo del rendimiento.

El promedio final para el rendimiento del horno de barro para la producción de carbón a base de madera de espino fue de un **23,1%**.

Algunos estudios citados en la bibliografía, como el de Alvarado (1989) tuvieron como resultado rendimientos menores para hornos de barro (20,3%). En el presente estudio el rendimiento obtenido (23,1% sobre materia seca) pudo ser producto de la baja temperatura de carbonización que se controló en los hornos estudiados. El estudio realizado por Gajardo y Verdugo (1979) afirma que el rendimiento alcanza al 30%, pero esto es debido a que el análisis se hizo con madera en verde. Es posible que si la madera entre al horno con menor contenido de humedad, mejore el rendimiento y disminuya el tiempo en el ciclo de carbonización significando menores costos. Para lo anterior se debería mantener la madera apilada durante un período mayor, pero esto se ve complicado por la demanda y el cumplimiento de plazos que tienen los productores.

5.3. Propiedades físicas

Las propiedades físicas analizadas fueron el contenido de humedad, la densidad, y el poder calorífico.

5.3.1. Contenido de humedad

A continuación se presenta un resumen con los datos que se obtuvieron. Los análisis se realizaron hasta que los resultados se hayan hecho equivalentes.

El carbón de espino, finalmente presentó un 3,54% de contenido de humedad promedio (tabla 5), con desviación estándar de 0,16.

Tabla 20. Resultados de contenido de humedad del carbón de espino

Muestra	Contenido Humedad (%)
1	3,36
2	3,33
3	3,59
4	3,57
5	3,69
6	3,71
Promedio	3,54

Los estudios de FAO (1983) limitan a 15% el máximo de contenido de humedad en el carbón. A mayor humedad disminuye el poder calorífico del carbón, por lo que el resultado obtenido, **3,54%**, clasifica como un carbón de buena calidad. Cabe hacer notar que éste resultado puede variar dependiendo del tiempo que transcurre desde la salida del carbón del horno hasta la medición, debido a que el carbón puede absorber humedad.

5.3.2. Densidad

Se realizaron 6 repeticiones para calcular la densidad aparente del carbón. De las repeticiones se desprende que el carbón estudiado presenta una densidad aparente de **0,68 g/cm³**, con desviación estándar de 0,007. Para detallar lo anterior se presenta la tabla 6.

Tabla 21. Resultados de densidad del carbón de espino

Muestra	Densidad del carbón (g/cm³)
1	0,682
2	0,694
3	0,688
4	0,681
5	0,696
6	0,679
Promedio	0,68

Se esperaban cifras menores con respecto a la densidad, pero cabe decir que los estudios citados en la bibliografía apuntan a que un horno de barro con temperaturas bajas produce un carbón vegetal más denso, debido a la disminución progresiva del material volátil.

5.3.3. Poder calorífico

En la determinación del Poder Calorífico realizado en el Departamento de Producción Animal de la Facultad de Ciencias Agronómicas, se hicieron 6 repeticiones en la bomba calorimétrica con el carbón de espino molido. De las repeticiones se desprende que el carbón estudiado presenta un Poder Calorífico Superior de **6,7 kcal/ g**, con desviación estándar de 0,39. Los resultados se detallan en la tabla 7.

Tabla 22. Resultados de poder calorífico del carbón de espino

Repetición	Poder calorífico (kcal /g)
1	6,478
2	7,369
3	6,837
4	6,186
5	6,659
6	6,668
Promedio	6,7

Los resultados de los estudios realizados en el Laboratorio Físico-Químico de la Facultad de Química de la Universidad de la República de Uruguay arrojó un resultado de

6,21 kcal /g. En este análisis se usó una bomba calorimétrica Parr por lo que dicho resultado es de Poder Calorífico Superior.

De lo anterior se desprende que el carbón de espino estudiado presentó un Poder Calorífico Superior de **6,45 kcal /g.**

En la bibliografía consultada se verificaron resultados mayores, pues mientras Earl (1975) afirma que el Poder Calorífico es de 7,1 kcal /g, CONAF (1984) determinó 7,2 kcal /g. El alto contenido de volátiles que se determinó, puede explicar esta disminución en el Poder Calorífico estudiado.

5.4. Propiedades químicas

Las propiedades químicas que se analizaron son el material volátil, contenido de cenizas y carbono fijo.

5.4.1. Material volátil

Se presenta una tabla con los datos que se obtuvieron. Los análisis se realizaron hasta que los resultados se hayan hecho equivalentes.

El carbón de espino, finalmente presentó un **37,46%** de material volátil (tabla 8), con desviación estándar de 1,61.

Tabla 23. Resultados de material volátil del carbón de espino

Muestra	Material Volátil (%)
1	38,47
2	37,63
3	35,67
4	38,54
5	37,15
6	38,23
7	33,98
8	39,51
9	38,44
10	37,06
Promedio	37,46

Según FAO (1983), un buen carbón vegetal posee un 30% de sustancias volátiles, con rangos que van de 10 a 40%. Es posible que el alto contenido de material volátil que se obtuvo en el estudio (37,46%) sea producto de la baja temperatura del horno, o de un insuficiente periodo de carbonización. Supuestamente, un alto contenido de volátiles hace disminuir el poder calorífico del carbón, lo que en este caso en particular se vio reflejado en los resultados. Queda claro también, que el carbón vegetal estudiado tendrá mayor facilidad para ser prendido y será menos quebradizo pero producirá mas humo.

5.4.2. Contenido de cenizas

Se presenta un resumen con los datos más representativos que se obtuvieron. Las determinaciones se realizaron hasta que los resultados se hayan hecho equivalentes.

El carbón de espino, finalmente presentó un **4,53%** de contenido de cenizas con desviación estándar de 0,17.

A continuación se detallan los resultados en la tabla 9.

Tabla 24. Resultados de contenido de cenizas del carbón de espino

Muestra	Cenizas (%)
1	4,69
2	4,32
3	4,29
4	4,61
5	4,71
6	4,71
7	4,44
8	4,51
Promedio	4,53

Estudios citados en la bibliografía (FAO, 1983), afirman que un buen carbón vegetal presenta un 3% de cenizas, con un rango que va de 0,5 a 5%. El resultado obtenido está dentro de lo esperado, aunque podría obtenerse un carbón con menos cenizas si se descortezara la madera antes de carbonizarla.

5.4.3. Carbono fijo

El resultado de los análisis de contenido de cenizas y porcentaje de volátiles tienen implicancia en el cálculo del porcentaje de carbono fijo. El carbón de espino analizado presentó un **58,01%** de carbono fijo, detallándose en la tabla 10.

Tabla 25. Resultados de contenido de carbono fijo del carbón de espino

Cenizas (%)	Volátiles (%)	Cenizas + Volátiles (%)	Porcentaje de Carbono fijo
4,53	37,46	41,99	58,01

Los estudios citados en la bibliografía afirman que el porcentaje de carbono fijo varía entre 50 y 95%, por lo que el carbón estudiado califica como un buen carbón, poco quebradizo y consistente, aunque con alto contenido de volátiles. El porcentaje obtenido de carbono fijo fue menor al esperado, debido fundamentalmente al alto porcentaje de material volátil.

5.5. Proposición de opciones de producción

5.5.1. Estimación de ingresos

En el caso del horno de barro se sabe que el proceso de carbonización dura 7 días, por lo que se realizan 4,5 hornadas al mes equivalente a 45 hornadas al año.

Los resultados de evaluar el rendimiento de los hornos de barro concluyeron que en cada hornada se producen cerca de 540kg de carbón vegetal. De lo anterior se concluye que con un horno de barro se obtienen 24,3 ton/año.

La información básica del horno metálico Mark V se detalla en la tabla 11.

Tabla 261. Algunas características del horno Mark V

Valor	Varía por espesor del material
Vida útil	3 años
Volumen	7 m ³
Rendimiento	26% sobre materia seca
Tiempo de carbonización	4 días

La temporada de producción de carbón es de Marzo a Diciembre, es decir 10 meses. Del cuadro anterior se desprende que se realizan 7,5 hornadas al mes, por lo que con Mark V se harían 75 hornadas al año.

Si el horno metálico analizado tiene 7 m³ de capacidad, y el aprovechamiento del espacio es similar al horno de barro (0,6), la madera que entra en cada hornada es de 3486 kg, considerando que la madera entrante presentó un 50% de contenido de humedad al horno, y que el horno metálico tiene un rendimiento de 26% sobre materia seca, se concluye finalmente que en cada hornada se obtienen 604 kg de carbón de espino. De lo anterior se concluye que con un horno metálico transportable Mark V se obtienen 45 ton/año.

En un escenario más optimista, dónde el aprovechamiento del espacio dentro del horno sea de 0,8 y 7 m³ de capacidad, la madera que entra en cada hornada es de 4648 kg, considerando además que la madera entra con un 50% de contenido de humedad al horno, y que éste tiene un rendimiento de 26% sobre materia seca, se concluye finalmente que en cada hornada se obtienen 806 kg de carbón de espino. De lo anterior se concluye que con un horno metálico transportable Mark V se obtienen 60 ton/año.

Para el carbón producido en la zona de estudio el precio alcanza los \$/kg110, por lo que los ingresos para el horno de barro son \$2.673.000 y para el horno metálico transportable \$4.950.000 en el escenario similar al aprovechamiento con el horno de barro y \$6.600.000 en un escenario más optimista.

Para la evaluación requerida se necesitó el precio de fabricar un horno metálico transportable del tipo Mark V. Para esto se pidió un presupuesto a la empresa Metalúrgica Antahuara Ltda, obteniéndose los valores que se detallan en la tabla 12, que varían dependiendo del espesor del material. Cabe recordar que en la bibliografía este espesor es de 15 mm.

Tabla 127. Valor del horno metálico Mark V

Espesor del material (mm)	Valor del horno (\$)
15	4.913.600
12	3.685.200
10	3.071.000

Además del costo de fabricación del horno, se deben considerar los costos de mano de obra y depreciación.

El sueldo de los operarios de los hornos es de \$125.000, por lo que el gasto total de mano de obra en la temporada es de \$1.250.000. Este valor se consideró como el costo operacional.

La depreciación al cabo de 3 años es de \$1.630.000, \$1.228.000 y \$1.020.000, dependiendo del espesor del material.

Se consideró además que, dependiendo del espesor del material, el valor residual del equipo es de \$220.000, \$140.000 y \$110.000.

El factor de recuperación del capital (Frc) se consideró con una tasa de actualización $\alpha=10\%$, lo que significó que el Frc sea 0,4.

Las fórmulas que se usaron fueron las siguientes:

$$CAE=(V_{eq}-V_{res}) * Frc + Cop$$

$$Frc= (\alpha*(1+\alpha)^n)/((1+\alpha)^n-1)$$

CAE: Costo anual equivalente
 Veq: Valor del equipo
 Vres: Valor residual del equipo
 Frc: Factor de recuperación del capital
 Cop: Costo operacional
 α : Tasa de actualización
 N: Vida útil

Finalmente las utilidades anuales resultaron de la resta de los ingresos anuales menos los CAE y la Depreciación.

Horno metálico Mark V. 1° Caso. Aprovechamiento del espacio del horno de 0,6.

Tabla 128. Ingresos del horno metálico Mark V. Caso1

Espesor(mm)	CAE(\$)+Depreciación(\$)	Ingresos anuales(\$)	Utilidades anuales(\$)
15	4.757.440	4.950.000	192.560
12	3.896.080	4.950.000	1.053.920
10	3.454.400	4.950.000	1.495.600

Horno metálico Mark V. 2° Caso. Aprovechamiento del espacio del horno de 0,8.

Tabla 129. Ingresos del horno metálico Mark V. Caso2

Espesor(mm)	CAE(\$)+Depreciación(\$)	Ingresos anuales(\$)	Utilidades anuales(\$)
15	4.757.440	6.600.000	1.842.560
12	3.896.080	6.600.000	2.703.920
10	3.454.400	6.600.000	3.145.600

Horno de barro. Aprovechamiento del espacio del horno de 0,6

Tabla 130. Ingresos del horno de barro

Valor del horno (\$)	Cop (\$)	Ingresos anuales (\$)	Utilidad anual (\$)
Despreciable	1.875.000	2.673.000	798.000

Cabe notar que se consideró que el horno requiere 1,5 trabajadores para su funcionamiento.

Se asume también que otros costos tales como el transporte son similares para hornos de barro y hornos metálicos.

Enfrentando la utilidad anual de los hornos de barro versus los hornos metálicos, se recomienda el uso de los hornos metálicos, sólo con espesores de 10 mm y 12 mm, para el aprovechamiento espacial del 60% del horno. Para el caso más optimista, dónde

el aprovechamiento es de un 80% se recomienda el uso de hornos Mark V para todos los espesores.

6.- Conclusiones

- La carbonización con hornos de barro es una actividad de baja eficiencia y baja productividad, con escasa tecnología, y uso poco racional de los recursos, que no contribuyen al desarrollo sustentable de dicha actividad, de lo que se desprende la importancia de mejorar las condiciones de dicha actividad con nuevas y más eficientes tecnologías.
- El rendimiento de la producción de carbón en los hornos de barro que se estudiaron fue de 23,1% sobre materia seca
- Con el análisis de las propiedades físicas del carbón producido se obtuvo un 3,54% de contenido de humedad, densidad aparente de 0,68 g/cm³ y un poder calorífico de 6,45 kcal/g. La baja temperatura que se midió en los hornos puede explicar la alta densidad del carbón.
- Las propiedades químicas del carbón producido, 37,46% de sustancias volátiles, 4,53% de contenido de cenizas y 58,01% de contenido de carbono fijo, permiten clasificar al carbón producido como un carbón con aptitud para ser empleado domésticamente, pero con limitaciones para usos industriales.
- Las características de la madera de espino, principalmente la alta densidad determinada explican la buena calidad del carbón de espino para usos domésticos.
- Se estima que si se alarga el tiempo que la madera está apilada, bajaría el contenido de humedad, aumentando el rendimiento de los hornos. El problema de lo anterior es que la alta demanda de carbón que tienen éstos productores no le permiten alargar los tiempos de secado natural.
- El proceso de la carbonización abarca 7 días desde la carga del horno con la madera de espino hasta el ensacado del carbón. El destronque, el trozado y desramado y el transporte varían dependiendo de los requerimientos, ya sea de demanda o mano de obra.

- Los hornos de barro estudiados presentaron bajas temperaturas durante el proceso de carbonización. Estas temperaturas no superaron los 320° C lo que determina las características del carbón producido, es decir un alto porcentaje de material volátil y un bajo contenido de carbono fijo.

7.- Recomendaciones

- Al evaluar el horno metálico transportable Mark V como opción de producción de carbón vegetal, teniendo en cuenta que la utilidad anual de un horno de barro es de \$798.000, y considerando el aprovechamiento del espacio de 0,6, se recomienda el uso de hornos metálicos transportables Mark V, sólo con espesores de 10 y 12 mm.
- Al evaluar el horno metálico transportable Mark V como opción de producción de carbón vegetal, teniendo en cuenta que la utilidad anual de un horno de barro es de \$798.000, y considerando el aprovechamiento del espacio de 0,8, se recomienda el uso de hornos metálicos transportables Mark V, con los 3 espesores analizados.
- En un escenario realista, dónde el aprovechamiento del espacio del horno sea de 0,6 no se aconseja el uso del horno metálico con el espesor de 15 mm recomendado en la bibliografía, debido a las bajas utilidades anuales.
- El uso de los hornos metálicos transportables se considera más recomendable para productores de carbón a nivel intensivo que para pequeños propietarios.

8.- Bibliografía

ABALOS, M. 2002. Estado actual de la información sobre madera para energía. FAO. Estado de la información forestal en Chile.

ALVARADO, W. 1989. Relación entre el hábito del espino (*Acacia caven* (Mol.) Mol.) con el rendimiento de carbón y leña. Tesis Ingeniero Forestal Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 90 p.

ARAYA, F. 2003. Caracterización de la producción de carbón en pequeños propietarios del sector fundo Riquelme, provincia de Linares, VII región. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. 71 p.

CARBONIZACION INDUSTRIAL, 2004. [en línea].

http://users.skynet.be/mariela.tadla/carbonizacion/es/carb_esp.html[consulta:11ago 2004].

CIFAG, 2003. [en línea].

[http://www.cifag.cl/Acrobat/POSICION%20DEL%20CIF%20\(3\).doc](http://www.cifag.cl/Acrobat/POSICION%20DEL%20CIF%20(3).doc) [consulta:02 diciembre 2003].

COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO, 1981. Estudio de suelos del Proyecto Maipo. Agrológ Chile Limitada, Santiago, Chile. 10 volúmenes.

CONAF, 1984. Capacidad Calórica. Comparación entre leña de Eucalipto, leña de espino, leña de especies forestales nativas existentes en la R.M., carbón mineral, carbón blanco y petróleo.

CONICYT, 1974. Seminario sobre los recursos energéticos de Chile. Universidad de Austral de Chile. 11 p.

COVACEVICH, R. 1979. Poder Calorífico de Pino Insigne (*Pinus radiata* D. Don) y de otras especies forestales chilenas. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 85 p.

- DONOSO, C. 1981. Tipos Forestales de los Bosques Nativos de Chile. CONAF/FAO. Documento de Trabajo N° 38. 82 p.
- DONOSO, C. 1982. Reseña Ecológica de los Bosques Mediterráneos de Chile. Bosque 4 (2): 117-146.
- DUCHENS, L. 1985. Factibilidad económica de producir energía a partir de leña de *Eucalyptus globulus* (Lab.) Tesis Ingeniero Forestal Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 154 p.
- EARL, D. E. 1975. Informe sobre el carbón vegetal. FAO. Roma. 53 p.
- EARL, D. E. 1976. Informe sobre el carbón vegetal. Informe técnico n° 15. Corporación Nacional Forestal. Proyecto PNUD/FAO. Santiago, Chile. 65 p.
- FAO. 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Roma. 157 p.
- FAO. 1987. La Madera: Combustible para promover el desarrollo. Recursos Naturales N°1. Oficina regional para América Latina y el Caribe.
- FAO. 1998. [en línea]. <http://www.fao.org/Regional/LAmerica/redes/sisag/arboles/Chi-a-ca.htm> [consulta: 11ago 2004].
- FAUNDEZ, L. y MIERES, G. 1987. Productividad forestal y forrajera en el tipo forestal esclerófilo y estepa de *Acacia caven*. Santiago de Chile, CONAF/PNUD/FAO. Documento de trabajo N° 8, 39 p.
- FUNDACIÓN NACIONAL PARA LA SUPERACIÓN DE LA POBREZA. 1999. Línea Base. Consejo metropolitano. 94p.
- GAJARDO, M. y VERDUGO, R. 1979. Rendimiento en hojas de boldo (*Peumus boldus* Mol.), corteza de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) y carbón de espino (*Acacia caven* Mol.) en la V Región. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 94 p.
- GAJARDO, R. 1983. Sistema Básico de Clasificación de la Vegetación Nativa de Chile. CONAF/ Universidad de Chile. 240 p.

- GALAZ, I. 2004. Caracterización del sistema de producción de carbón de espino *Acacia caven* (Mol.) Mol, en la comuna de Pumanque, VI Región. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 56 p.
- GUTIERREZ, M.; KARSULOVIC, T.; TORRES, P. y LEÓN, A. 1989. Estudio sobre el secado y algunas propiedades de trabajabilidad y usos de la madera de algarrobo, espino y tamarugo. CONAF/PNUD/FAO. Documento de trabajo N° 25. 99 p.
- INE, 2002. XVII Censo Nacional de Población.
- MARCOS, F. 1989. El carbón vegetal. Propiedades y obtención. Agroguías mundi-prensa
- MASSAI, C. 1986. Carbón activado obtenido a partir de madera de *Eucalyptus globulus* (Labill). Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 104 p.
- MIRALLES, G. 1989. Aprovechamiento del proceso de carbonización de leña en hornos metálicos Mark V. 23 p.
- NAVARRO, R. 1995. Efecto de una intervención silvicultural sobre el crecimiento y producción de fitomasa de *Acacia caven* en Melipilla, Región Metropolitana. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 87 p.
- NAVAS, L. 1976. Flora de la Cuenca de Santiago de Chile. Tomo II. Santiago de Chile, Ediciones U. de Chile. 559 p.
- NAVAS, S. 1992. El horno metálico transportable. Tecnología en marcha. Vol. 11.
- NOVOA, R. 1987. Potencialidades del secano costero chileno. CED, Santiago, Chile. 113p.
- OLIVARES, A. 1983. Potencial silvopastoral del matorral de *Acacia caven*. En: Actas del Encuentro del estado de la investigación sobre manejo silvopastoral en Chile. Universidad de Talca. pp 57:64.

- OLIVARES, A. 1989. El ecosistema silvopastoral. *Avances en Producción animal* N° 14 (1-2): 3-14
- PERALTA, M. 1976. *Uso, Clasificación y Conservación de Suelos*. Editorial de Servicio Agrícola y Ganadero, Santiago. 340 p.
- POLZENIUS, G. 1987. Características microambientales provocadas por la presencia de *Acacia caven*. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 101p.
- REYES, H. 1997. Tipificación y funcionamiento de los sistemas de producción y su relación con las innovaciones tecnológicas en economías campesinas; Comuna de Pumanque, VI región. Tesis Ing. Agr. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 176 p.
- RODRIGUEZ, R.; MATTHEI, S. y QUEZADA, M. 1983. Flora arbórea de Chile. Universidad de Concepción. Chile. pp 51:54.
- SANTIBAÑEZ, F.; URIBE, J. M. 1993. Atlas agroclimatológico de Chile. Regiones Quinta y Metropolitana. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria. Corporación Nacional de Fomento. Santiago. Chile. 65 p.
- SERCOTEC, 1986. Perfil técnico económico. Planta elaboradora de carbón vegetal.
- SERRA, M. 1997. Especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina. En: FAO, Zonas Áridas y Semiáridas N°12. pp 159-167.
- TRUCCO, J. 1985. Evaluaciones iniciales de un sistema silvopastoral con *Acacia caven* (Mol.) Hook et Arn. para la Región Mediterránea Sub-húmeda de Chile. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Chillán. 79 p.
- VARGAS, R. 1998. La ruralidad del secano de la Región Metropolitana a fines del Siglo XX. CONAF. Oficina Provincial Melipilla.

VITA, A.; SERRA, M.; GREZ, I.; OLIVARES, A. y GONZALEZ, M. 1995. Intervenciones silviculturales en espinos (*Acacia caven* (Mol.) Mol.) en la zona árida de Chile. Ciencias Forestales. (10) N° 1-2. pp 51-62.

WAGEMANN, G. 1949. Maderas chilenas. Contribución a su anatomía e identificación.

9.- Anexos

Id	Crisol(g)	Crisol+Carb Hum(g)	Crisol + Carb Seco(g)	Carb Hum(g)	Carb Seco(g)	Cont Hum(%)
1	38,5517	40,4437	40,3822	1,892	1,8305	3,36
2	28,6253	30,0354	29,9889	1,4101	1,3646	3,33
3	27,3769	28,4977	28,4588	1,1208	1,0819	3,59
4	28,3552	30,2943	30,2273	1,9391	1,8721	3,57
5	27,8059	29,9571	29,8804	2,1512	2,0745	3,69
6	28,569	30,7906	30,7111	2,2216	2,1421	3,71

Repetición	Peso de la muestra (g)	Poder calorifico (kcal /g)
1	0,8009	6,478
2	0,801	7,369
3	0,8006	6,837
4	0,8003	6,186
5	0,8006	6,659
6	0,8066	6,668

Id	Crisol (950°C;g)	Crisol(g)	Carb Seco (950°C,g)	Carb Seco (105°C,g)	Material Volátil (%)
1	31,238	29,1747	2,0633	2,8572	38,47
2	29,3132	27,8059	1,5073	2,0745	37,63
3	30,1479	28,569	1,5789	2,1421	35,67
4	29,3969	28,6251	0,7718	1,0693	38,54
5	39,25	38,8282	0,4218	0,5785	37,15
6	38,5467	37,717	0,8297	1,1469	38,23
7	29,0097	27,7576	1,2521	1,6776	33,98
8	30,5638	29,1039	1,4599	2,0368	39,51
9	28,6521	27,3894	1,2627	1,7481	38,44
10	39,0794	37,6735	1,4059	1,927	37,06

Id	Crisol(g)	Crisol sin tapa (g)	Crisol sin tapa+Muestra(g)	Muestra(g)	Carb Seco(g)	Cenizas (%)
1	28,6251	16,5999	16,6501	0,0502	1,0693	4,69
2	38,8282	20,2192	20,2442	0,025	0,5785	4,32
3	37,717	19,9118	19,9611	0,0493	1,1469	4,29
4	27,7576	15,2275	15,305	0,0775	1,6776	4,61
5	38,2587	20,2086	20,3077	0,0991	2,1042	4,71
6	38,0251	19,8858	19,9804	0,0946	2,0052	4,71
7	29,4071	16,8276	16,8904	0,0628	1,4154	4,44
8	38,5437	20,169	20,2454	0,0764	1,6957	4,51

