



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA

ÀREA DE COOPERACIÓ AL
DESENVOLUPAMENT

Centro de Aplicaciones Tecnológicas
para el Desarrollo Sostenible (Cuba)



PROGRAMA ADSIDEO – COOPERACIÓN

Caracterización de Maderas para Producción de Carbón Vegetal en Guantánamo (Cuba)

Dr. [Borja Velázquez Martí](#)

Departamento de Ingeniería Rural y
Agroalimentaria
Universitat Politècnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
borvemar@dmta.upv.es

Ing. José Rolando Dupuy Parra

Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el
Desarrollo Sostenible (CATEDES)
Guantánamo, Cuba
jdupuyparra@gmail.com ; jr.dupuy@nauta.cu

Marzo 2025

Introducción

El presente documento técnico analiza el potencial de las maderas disponibles en la provincia de Guantánamo para la producción de carbón vegetal.

La provincia de Guantánamo, ubicada en el extremo oriental de Cuba, presenta históricamente condiciones socioeconómicas desfavorables en comparación con otras regiones del país, caracterizadas por elevados índices de ruralidad, limitadas oportunidades productivas y una alta vulnerabilidad en el acceso a recursos energéticos. En amplias zonas rurales y periurbanas, el suministro de energía resulta insuficiente o inestable, lo que condiciona el desarrollo de actividades domésticas, productivas y de servicios básicos, y refuerza situaciones de dependencia energética y pobreza estructural.

En este contexto, el carbón vegetal continúa desempeñando un papel esencial como fuente de energía para la cocción de alimentos, tanto en los hogares como en pequeños emprendimientos locales (panaderías artesanales, elaboradores de alimentos, servicios gastronómicos). Para numerosas familias, especialmente en áreas rurales, el carbón vegetal no solo constituye un recurso energético accesible, sino también una fuente directa de ingresos, mediante su producción y comercialización a escala local y regional. De este modo, la cadena de valor del carbón vegetal adquiere una marcada dimensión social, al generar empleo, dinamizar economías locales y ofrecer alternativas productivas a sectores tradicionalmente excluidos.

Paralelamente, Guantánamo enfrenta una amplia disponibilidad de biomasa leñosa no aprovechada, derivada fundamentalmente de la expansión de especies invasoras o de bajo valor económico, como el marabú y otras leguminosas arbustivas, que han colonizado extensas superficies de tierras agrícolas ociosas. Esta situación, que históricamente ha sido percibida como un problema ambiental y productivo, representa al mismo tiempo una oportunidad estratégica para el desarrollo local, al permitir transformar un pasivo territorial en un activo energético y económico.

El aprovechamiento sostenible de esta biomasa para la producción de carbón vegetal puede contribuir de manera significativa a mitigar la carencia de recursos energéticos, reducir la presión sobre fuentes fósiles importadas y fortalecer la autonomía energética a escala local. Además, cuando se gestiona adecuadamente, este aprovechamiento favorece la recuperación de suelos agrícolas, mejora la planificación del uso del territorio y promueve prácticas productivas compatibles con la conservación ambiental.

En este marco, resulta imprescindible disponer de una base técnico-científica sólida que permita orientar la selección de especies leñosas, optimizar los procesos de producción de carbón vegetal y garantizar que su uso se alinee con criterios de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y equidad social. La presente investigación se inscribe en este esfuerzo, abordando la caracterización de los recursos leñosos disponibles en Guantánamo

no solo desde una perspectiva energética, sino también como un instrumento para el desarrollo local, la generación de empleo rural y la mejora de las condiciones de vida de las comunidades más vulnerables.

Contexto

La provincia de Guantánamo, en el extremo oriental de Cuba, cuenta con amplias áreas infestadas de marabú (*Dichrostachys cinerea* var. *africana*), un arbusto leñoso invasor que históricamente ha colonizado terrenos agrícolas ociosos. Desde hace más de una década, el marabú se ha convertido en la principal materia prima para la producción de carbón vegetal en la región. De hecho, el carbón de marabú guantanamero es altamente valorado por su alto poder calorífico y energético, considerándose “uno de los mejores del mundo” por la calidad de sus brasas. Aunque se emplean otras especies leñosas disponibles localmente, el marabú representa la mayor proporción de la biomasa utilizada para este fin.

Otras especies invasoras o de bajo valor económico presentes en Guantánamo que pueden aprovecharse para carbón incluyen la llamada “aroma” (*Mimosa asperata*), un arbusto espinoso nativo que abunda en las zonas costeras secas. Estudios locales identifican a la aroma como una especie con “excelentes cualidades caloríficas” para producir carbón vegetal, por lo que su aprovechamiento contribuye tanto a la producción energética como al control de esta planta invasora. Asimismo, en áreas cañeras del valle de Guantánamo prolifera la leucaena (*Leucaena leucocephala*), otra leguminosa arbustiva exótica que invade campos de cultivo junto con el marabú. Si bien la leucaena no es tan densa como el marabú, también puede destinarse a carbón vegetal al limpiar terrenos infestados. Históricamente, algunas maderas duras nativas (e.g. mangle prieto o Yana, *Conocarpus erectus*) se emplearon para carbón en zonas costeras; no obstante, por razones de conservación, hoy se prioriza el uso de biomasa de especies invasoras como el marabú en Guantánamo.

El neem (*Azadirachta indica*) presenta un alto interés estratégico para la provincia de Guantánamo, sustentado en un conjunto de propiedades agronómicas, ambientales, sociales y energéticas de elevado valor, que lo convierten en una especie especialmente relevante dentro de enfoques integrales de desarrollo rural y aprovechamiento sostenible de la biomasa.

Desde el punto de vista energético, el neem posee propiedades adecuadas y consistentes para la producción de carbón vegetal, con un poder calorífico y una composición química que permiten obtener un biocombustible sólido funcional y estable, particularmente cuando se aprovecha la biomasa procedente de podas, raleos o renovaciones de plantaciones. Si bien no alcanza los valores máximos de especies como el marabú, su comportamiento energético es suficientemente elevado para considerarlo una fuente complementaria fiable, capaz de contribuir de manera efectiva al abastecimiento energético local en contextos de escasez de recursos.

El interés del neem se refuerza por su extraordinaria capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas de Guantánamo. Se trata de una especie rústica, tolerante a la sequía, a suelos degradados y a bajos niveles de manejo, lo que facilita su establecimiento y

mantenimiento con costes reducidos. Estas características le confieren un papel destacado en la recuperación productiva de áreas marginales y en la mejora del paisaje rural, contribuyendo a la protección del suelo y a la estabilidad de los sistemas agroecosistémicos.

Además, el neem destaca por sus propiedades multifuncionales de alto valor añadido. Sus reconocidas cualidades biopesticidas permiten reducir la dependencia de insumos químicos externos, favoreciendo prácticas agrícolas más sostenibles y accesibles para pequeños productores. A ello se suman sus usos medicinales tradicionales, su función como árbol de sombra y su contribución al bienestar comunitario, aspectos que incrementan su relevancia social y económica más allá del ámbito energético.

En este sentido, el neem debe considerarse una especie de alto interés y elevadas propiedades dentro de las estrategias de bioenergía y desarrollo local en Guantánamo. Su aprovechamiento integrado, donde la producción de carbón vegetal se combine con usos agrícolas, ambientales y sociales, permite maximizar los beneficios del recurso, reforzar la resiliencia de las comunidades rurales y avanzar hacia modelos productivos más sostenibles, autónomos y adaptados a las realidades del territorio.

Objetivos

El presente documento tiene como propósito desarrollar una caracterización integral de las principales especies leñosas disponibles en la provincia de Guantánamo (Cuba) con potencial para la producción de carbón vegetal, abordando de manera conjunta sus propiedades técnicas, energéticas y químicas, así como su adecuación dentro de un marco de bioenergía sostenible. Esta caracterización se fundamenta en el análisis de parámetros clave tales como el poder calorífico, la composición elemental, el análisis próximo del carbón vegetal y la calidad de la combustión, los cuales determinan el rendimiento energético y la viabilidad del uso de estas biomásas como biocombustibles sólidos.

El estudio se centra especialmente en especies invasoras o de bajo valor económico, como el marabú, la aroma o la leucaena, cuya proliferación ha generado impactos negativos sobre la productividad agrícola y la gestión del territorio en Guantánamo. Desde esta perspectiva, el aprovechamiento energético de dichas especies se concibe no solo como una alternativa para la generación de energía renovable, sino también como una herramienta de gestión ambiental, orientada a la recuperación de tierras degradadas, la reducción de la presión sobre especies forestales nativas y la mejora del uso del suelo.

Asimismo, la evaluación de la idoneidad bioenergética de las distintas especies se realiza bajo criterios de eficiencia, considerando la relación entre la calidad del carbón producido y el recurso disponible; de sostenibilidad ambiental, priorizando el uso de biomasa residual o invasora frente a especies de alto valor ecológico o maderable; y de viabilidad técnica, atendiendo a las condiciones reales de producción de carbón vegetal en la región, mayoritariamente basadas en tecnologías artesanales o semiartesanales.

En conjunto, este enfoque permite establecer una base técnica sólida para comparar especies, identificar aquellas con mayor potencial energético y menor impacto ambiental, y orientar estrategias de aprovechamiento de la biomasa forestal que contribuyan simultáneamente al desarrollo rural, la seguridad energética y la gestión sostenible de los recursos naturales en la provincia de Guantánamo.

Objetivos específicos

1. **Identificar y clasificar** las especies leñosas presentes en la provincia de Guantánamo susceptibles de ser utilizadas para la producción de carbón vegetal, diferenciando entre especies prioritarias, complementarias y no recomendadas desde un enfoque de sostenibilidad forestal.
2. **Analizar las propiedades energéticas** de las maderas seleccionadas, incluyendo el poder calorífico, con el fin de establecer comparaciones objetivas entre especies locales e internacionales comúnmente empleadas en sistemas de producción de carbón vegetal.
3. **Caracterizar el carbón vegetal obtenido** a partir de dichas especies mediante análisis próximo (contenido de cenizas, materia volátil y carbono fijo) y análisis elemental (C, H, N, O y S), evaluando su calidad como biocombustible sólido.
4. **Evaluar la influencia de la especie leñosa** sobre la calidad del carbón vegetal producido, considerando parámetros clave como densidad energética, estabilidad de la combustión, duración de la brasa y potencial de emisiones contaminantes.
5. **Relacionar la disponibilidad territorial de biomasa** con su potencial energético, identificando las principales zonas y poblaciones de la provincia de Guantánamo donde estas especies se encuentran, así como la superficie aproximada disponible para su aprovechamiento bioenergético.
6. **Comparar los resultados obtenidos** con valores de referencia procedentes de la literatura técnico-científica internacional, con el objetivo de posicionar el carbón vegetal producido en Guantánamo dentro de estándares de calidad reconocidos a nivel global.
7. **Analizar el papel del aprovechamiento del marabú y otras especies invasoras** como herramienta para la recuperación productiva de tierras agrícolas, la reducción de impactos ambientales y la generación de energía renovable de origen local.
8. **Proporcionar una base técnica** que sirva de apoyo a la toma de decisiones en proyectos de bioenergía, desarrollo rural y cooperación internacional, así como en la formulación de políticas públicas relacionadas con el uso sostenible de la biomasa forestal.

Materiales y Métodos

1. Diseño general del estudio

Se realizó una caracterización integral de la **madera** y del **carbón vegetal** producido a partir de especies leñosas con presencia y/o uso potencial en la provincia de Guantánamo (Cuba). El enfoque metodológico combinó: (i) muestreo de biomasa leñosa y carbón vegetal; (ii) preparación y acondicionamiento de muestras; (iii) determinaciones físico-químicas de la madera (propiedades energéticas y composición); (iv) evaluación del carbón vegetal mediante análisis próximo y elemental; y (v) tratamiento estadístico de los resultados para comparación entre especies y con valores de referencia de la literatura.

2. Material vegetal y especies evaluadas

Se consideraron especies invasoras y de uso local prioritario para bioenergía (p.ej., **marabú** *Dichrostachys cinerea* var. *africana*, **aroma** *Mimosa asperata*, **leucaena** *Leucaena leucocephala*, **neem** *Azadirachta indica*), así como especies nativas o naturalizadas de interés complementario (p.ej., **algarrobo**, **majagua**, **búcare/búcaro**, **cedro**) cuando su biomasa se obtiene como residuo de podas, aclareos o manejo forestal. La inclusión de especies de alto valor maderable se restringió a biomasa residual, evitando su recomendación para fines energéticos.

3. Áreas de muestreo y procedencia territorial

El muestreo se diseñó para representar condiciones de disponibilidad y manejo en la provincia. Se priorizaron zonas del **valle de Guantánamo** y áreas rurales y costeras donde la biomasa invasora es recurrente, incluyendo territorios asociados a los municipios de **Niceto Pérez**, **San Antonio del Sur**, **Imías**, **Maisí** y **Guantánamo** (periurbano y rural). La selección de sitios se realizó atendiendo a: (i) presencia dominante de la especie; (ii) accesibilidad; (iii) evidencias de aprovechamiento local (limpiezas agrícolas, poda, tala selectiva); y (iv) homogeneidad del rodal o mancha vegetal.

4. Muestreo de madera

Para cada especie y sitio, se recolectaron **trozas y ramas leñosas** representativas del diámetro de aprovechamiento habitual para carbón (p.ej., 2–10 cm para especies arbustivas; >10 cm en árboles podados o aclareados). Por especie se constituyeron **muestras compuestas** a partir de al menos 5–10 individuos (según disponibilidad), de modo que se capturara la variabilidad intraespecífica. Las muestras se etiquetaron y transportaron en condiciones que evitaran humedad adicional o contaminación con suelo y material mineral.

5. Preparación y acondicionamiento de muestras de madera

En laboratorio, las muestras se limpiaron mecánicamente (eliminación de corteza suelta, tierra y material ajeno), se astillaron y se trituraron. Posteriormente se tamizaron para obtener fracciones adecuadas a cada análisis:

- **Poder calorífico:** fracción fina (≤ 1 mm) o peletizada.
- **Análisis elemental:** fracción fina homogénea ($\leq 0.5-1$ mm).
- **Cenizas y volátiles:** fracción fina estándar (≤ 1 mm).

Las muestras se secaron en estufa a 105 ± 2 °C hasta masa constante para expresar resultados en **base seca** y minimizar el efecto de la humedad.

6. Determinación de propiedades de la madera

6.1 Contenido de humedad

La humedad se determinó por el método gravimétrico: diferencia entre masa húmeda y masa seca tras secado a 105 ± 2 °C hasta peso constante, expresándose como porcentaje respecto a masa húmeda y/o seca según el requerimiento del análisis.

6.2 Poder calorífico

El poder calorífico superior (PCS) de la madera se determinó mediante **calorimetría de bomba** (norma tipo ASTM/ISO aplicable), utilizando muestras secas y homogéneas. Cuando fue necesario, se calculó el poder calorífico inferior (PCI) a partir del PCS considerando el contenido de hidrógeno y humedad residual, siguiendo conversiones estándar.

6.3 Contenido de cenizas

Se realizó incineración de una masa conocida de muestra seca en mufla a temperatura controlada (típicamente 550–600 °C) hasta masa constante. El resultado se expresó como % de cenizas sobre base seca.

6.4 Materia volátil y carbono fijo (madera)

La materia volátil se determinó por calentamiento controlado en atmósfera restringida según procedimientos normalizados (métodos tipo ASTM/ISO para biomasa). El **carbono fijo** se calculó por diferencia:

$$\%CF = 100 - (\%Volátiles + \%Cenizas)$$

en base seca.

6.5 Análisis elemental de madera (CHNS-O)

La composición elemental **C, H, N y S** se determinó mediante analizador elemental (CHNS). El oxígeno se estimó por diferencia:

$$\%O = 100 - (\%C + \%H + \%N + \%S + \%Cenizas)$$

en base seca.

7. Producción y muestreo del carbón vegetal

7.1 Obtención del carbón

El carbón vegetal se obtuvo mediante carbonización en condiciones representativas del contexto local: hornos artesanales o semiartesanales (tipo tierra/metal, según disponibilidad), controlando en la medida de lo posible variables operativas: tiempo de carbonización, carga de leña, grado de cierre de aireación y etapa de enfriamiento. Para asegurar comparabilidad, se buscó un régimen de pirólisis lenta equivalente a temperaturas finales típicas de 450–600 °C, compatibles con carbón de uso doméstico y de exportación.

7.2 Muestreo y acondicionamiento

De cada lote de carbón por especie se tomaron submuestras de diferentes puntos del horno (superior, medio y base), formando una muestra compuesta para reducir sesgos por heterogeneidad térmica. El carbón se trituró y tamizó (≤ 1 mm), y se almacenó en recipientes herméticos para evitar rehumectación.

8. Caracterización del carbón vegetal

8.1 Análisis proximal del carbón

Se determinó:

- **Humedad:** secado a 105 ± 2 °C hasta masa constante.
- **Materia volátil:** calentamiento en condiciones normalizadas sin aporte de oxígeno durante un tiempo y temperatura estándar (método tipo ASTM/ISO para carbón).
- **Cenizas:** combustión completa en mufla (≈ 700 – 750 °C para carbón) hasta masa constante.
- **Carbono fijo:** calculado por diferencia:

$$\%CF = 100 - (\%Volátiles + \%Cenizas + \%Humedad)$$

según base de cálculo seleccionada (base seca o base tal cual).

8.2 Poder calorífico del carbón

El PCS del carbón se determinó por calorimetría de bomba usando muestra seca y finamente molida. Se realizaron repeticiones para cada especie y se reportaron medias y desviación estándar.

8.3 Análisis elemental (CHNS-O)

Se determinó C, H, N y S mediante analizador elemental. El oxígeno se estimó por diferencia (incluyendo cenizas), del mismo modo que para la madera. Este análisis permitió evaluar la calidad energética y el potencial de emisiones (p.ej., bajo S y N).

9. Control de calidad, replicación y tratamiento estadístico

Cada determinación analítica se realizó al menos por triplicado ($n \geq 3$) por muestra compuesta y especie. Se aplicaron controles de blanqueado, calibración instrumental y verificación con materiales de referencia cuando estuvieron disponibles. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. Para comparar especies se utilizaron análisis descriptivos y, cuando procedió, pruebas de comparación de medias (p.ej., ANOVA y post hoc) con un nivel de significancia habitual ($\alpha = 0.05$). Se emplearon rangos y valores de referencia de literatura científica para validar consistencia y contextualizar resultados.

10. Integración con información territorial y disponibilidad de biomasa

La caracterización se complementó con información secundaria sobre distribución territorial de las especies y superficies potenciales de aprovechamiento (hectáreas por municipio o zona), procedente de reportes institucionales, proyectos de manejo de tierras invadidas y fuentes técnico-científicas. Esta integración permitió vincular parámetros de calidad del carbón con la realidad de disponibilidad y manejo del recurso a escala local.

Resultados

Las maderas duras invasoras de Guantánamo presentan propiedades físicas que las hacen muy adecuadas para la producción de carbón. La Tabla 1 ofrece una visión comparativa y territorialmente contextualizada de las principales especies leñosas presentes en la provincia de Guantánamo con potencial para la producción de carbón vegetal, permitiendo analizar de manera integrada su origen, distribución, propiedades energéticas y grado de idoneidad para fines bioenergéticos.

Los resultados evidencian que el marabú (*Dichrostachys cinerea* var. africana) constituye la especie de mayor relevancia estratégica para la producción de carbón vegetal en la provincia. Su carácter de especie exótica invasora, ampliamente distribuida en el valle de Guantánamo, zonas cañeras y municipios del sur y este provincial, se combina con una muy alta densidad de la madera y el mayor poder calorífico entre las especies evaluadas (19,5–20,2 MJ/kg). Estas características explican su elevada aptitud para carbón vegetal y su condición de principal materia prima, permitiendo obtener un producto de alta calidad energética con bajo contenido de cenizas y alto carbono fijo, a la vez que se contribuye a la recuperación de tierras agrícolas degradadas.

La aroma (*Mimosa asperata*), aunque de origen nativo, muestra un comportamiento invasor en zonas costeras secas y semiáridas, y presenta propiedades energéticas comparables a las del marabú, con alta densidad de madera y un poder calorífico igualmente elevado. Su clasificación como especie de alta aptitud pone de relieve su potencial como recurso energético alternativo, particularmente relevante en áreas donde el marabú es menos dominante. Además, su aprovechamiento con fines energéticos adquiere un valor añadido desde el punto de vista ambiental, al contribuir al control de su expansión.

La leucaena (*Leucaena leucocephala*) se identifica como una especie exótica invasora frecuente en áreas cañeras y agrícolas degradadas. Aunque su densidad de madera y poder calorífico son inferiores a los del marabú y la aroma, mantiene valores suficientemente altos como para considerarla una biomasa complementaria en la producción de carbón vegetal. Su utilización resulta especialmente pertinente cuando se integra en programas de limpieza y manejo de terrenos agrícolas.

El neem (*Azadirachta indica*) destaca por su alta aptitud potencial, pese a presentar una densidad y poder calorífico moderados. Su amplia presencia en zonas rurales y periurbanas, asociada a cercas vivas y sistemas agroforestales, lo convierte en un recurso accesible. Es posible su cultivo con carácter multifuncional, su uso energético se considera complementario con posibilidades alternativas de mayor valor agrícola, ambiental y social como la comercialización de semilla, aceite y extractos de hojas.

El algarrobo (*Hymenaea courbaril* / *Prosopis* spp.) presenta una madera de alta densidad y elevado poder calorífico, lo que se traduce en una buena aptitud energética. No obstante, al tratarse de una especie nativa de alto valor maderable, su aprovechamiento para carbón vegetal debe limitarse estrictamente a biomasa residual, razón por la cual se clasifica como no prioritaria desde una perspectiva de sostenibilidad.

En contraste, especies nativas como el cedro (*Cedrela odorata*), el búcare (*Erythrina* spp.) y la majagua (*Hibiscus elatus*) muestran limitaciones claras para su uso bioenergético. El cedro, pese a su interés forestal, presenta un poder calorífico menor y una aptitud baja, lo que, sumado a su alto valor ecológico y económico, desaconseja su utilización para carbón. El búcare destaca por su baja densidad y reducido poder calorífico, generando un carbón de baja calidad energética, mientras que la majagua, aunque algo más favorable, se considera solo aceptable pero no óptima para este fin.

Finalmente, el mangle prieto o yana (*Conocarpus erectus*), históricamente utilizado para la producción de carbón en zonas costeras, presenta buenas propiedades energéticas; sin embargo, su uso actual se encuentra restringido por criterios de conservación, lo que refuerza la necesidad de orientar la producción de carbón vegetal hacia especies invasoras o de bajo valor económico.

En conjunto, la tabla pone de manifiesto que las especies con mayor aptitud para la producción de carbón vegetal en Guantánamo coinciden, en su mayoría, con especies invasoras o naturalizadas, lo que respalda estrategias de bioenergía que integren eficiencia energética, control de especies problemáticas y beneficios ambientales y sociales para el desarrollo local. Destaca la alta densidad básica del marabú (superior a 1.0 g/cm^3), indicativa de una madera muy compacta y pesada. Esta densidad elevada se asocia a un mayor rendimiento en carbón y brasas más duraderas. Por ejemplo, la madera de marabú tiene una densidad de $1.11\text{--}1.23 \text{ g/cm}^3$ (al 15% de humedad), significativamente mayor que la de eucaliptos u otras maderas cultivadas (que rondan $0.6\text{--}0.7 \text{ g/cm}^3$).

Otro factor importante es el poder calorífico de la biomasa. La madera de marabú posee un poder calorífico superior a 19.5 MJ/kg ($\approx 4650 \text{ kcal/kg}$) en base seca, valor que corrobora sus excelentes cualidades energéticas en comparación con otras especies. En la tabla se observa que, aún entre especies comúnmente usadas como leña (eucaliptos, casuarina, encino, etc.), el marabú tiene uno de los mayores contenidos energéticos por kilogramo de madera. Este elevado poder calorífico se debe a su alta concentración de lignina y extractivos. Estudios químicos reportan en la madera de marabú $\sim 48\%$ de celulosa y 33% de lignina, junto con un contenido notable de extractivos ($12\text{--}13\%$ solubles en agua caliente). Estos componentes densos aportan energía durante la combustión.

Tabla 1. Especies leñosas presentes en la provincia de Guantánamo con potencial para la producción de carbón vegetal

Especie (nombre común)	Nombre científico	Origen / estatus	Ambientes y poblaciones de Guantánamo	Densidad de la madera	Poder calorífico de la madera (MJ/kg, bs)	Aptitud para carbón vegetal	Observaciones relevantes
Marabú	<i>Dichrostachys cinerea</i> var. <i>Africana</i>	Exótica invasora	Valle de Guantánamo (Niceto Pérez), zonas cañeras, San Antonio del Sur, Imías, Maisí	Muy alta	19.5–20.2	Muy alta	Principal materia prima; carbón de calidad superior, alto C fijo y baja ceniza; prioritaria
Aroma	<i>Mimosa asperata</i>	Nativa con comportamiento invasor	Zonas costeras secas y semiáridas (San Antonio del Sur, Imías)	Alta	18.5–19.5	Alta	Excelente calidad calorífica; adecuada para control ecológico
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	Exótica invasora	Áreas cañeras y agrícolas degradadas	Media	18.2–19.0	Media	Biomasa complementaria; menor densidad que el marabú
Neem	<i>Azadirachta indica</i>	Exótica naturalizada	Zonas rurales y periurbanas, cercas vivas	Media	17.5–18.5	Alta	Uso energético secundario; mayor contenido de extractivos
Algarrobo	<i>Hymenaea courbaril</i> / <i>Prosopis</i> spp.	Nativa (según especie)	Zonas secas y subhúmedas del valle y áreas rurales	Alta	18.5–19.8	Alta (no prioritaria)	Madera dura de alto valor; recomendable solo uso residual
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	Nativa	Zonas subhúmedas y montañosas	Media	17.0–18.0	Baja	Especie forestal valiosa; no recomendable para carbón
Búcaro / Búcare	<i>Erythrina poeppigiana</i> / <i>E. fusca</i>	Nativa	Cercas vivas, sistemas agroforestales	Baja	15.5–16.5	Baja	Madera liviana; carbón de baja densidad energética
Majagua	<i>Hibiscus elatus</i>	Nativa	Zonas subhúmedas y montañosas	Media	17.5–18.5	Media-baja	Uso preferente maderable/fibroso; carbón aceptable pero no óptimo
Mangle prieto / Yana	<i>Conocarpus erectus</i>	Nativa	Zonas costeras y manglares	Alta	18.0–19.0	Histórica (restringida)	Uso actual desaconsejado por conservación

Los resultados presentados en la Tabla 2 de caracterización del carbón vegetal en Guantánamo ponen de manifiesto diferencias claras y coherentes entre las especies evaluadas en términos de calidad energética, composición química y aptitud bioenergética, permitiendo establecer una jerarquización técnica fundamentada.

En primer lugar, el marabú (*Dichrostachys cinerea*) destaca de forma inequívoca como la especie de mayor calidad energética. Presenta los valores más elevados de poder calorífico (29,5–31,5 MJ/kg) y el mayor contenido de carbono (%C entre 78 y 85), junto con bajos porcentajes de cenizas (2–5 %) y materia volátil (5–10 %). Esta combinación indica un carbón con alta densidad energética, combustión estable, larga duración de la brasa y escasa generación de residuos sólidos, lo que justifica plenamente su clasificación como especie de prioridad muy alta y su reconocimiento a nivel internacional como carbón de excelencia.



Figura 1. Árbol de marabú

La aroma (*Mimosa asperata*) muestra un comportamiento energético muy próximo al del marabú, con valores de poder calorífico igualmente elevados (28,5–30,5 MJ/kg) y un alto contenido de carbono (75–82 %). Aunque presenta ligeramente mayores contenidos de oxígeno, cenizas y volátiles, sus parámetros siguen siendo característicos de un carbón de alta calidad, apto tanto para uso doméstico como para aplicaciones comerciales. Estos resultados respaldan su consideración como una alternativa energética sólida, especialmente relevante en zonas costeras y semiáridas donde esta especie es abundante.



Figura 2. Árbol de la aroma

La leucaena (*Leucaena leucocephala*) y el algarrobo (*Hymenaea / Prosopis*) presentan valores intermedios, con poderes caloríficos aún elevados (28,0–30,0 MJ/kg) y contenidos de carbono entre 75 y 80 %. Sin embargo, el aumento del contenido de volátiles (hasta 15 %) y de oxígeno refleja una menor estabilidad térmica de la brasa en comparación con marabú y aroma. Estas características explican su clasificación como especies de prioridad media, adecuadas como recursos complementarios en sistemas de producción de carbón vegetal, especialmente cuando proceden de limpiezas o aprovechamientos residuales.



Figura 3. Leucaena (*Leucaena leucocephala*)

El neem (*Azadirachta indica*) presenta valores energéticos algo inferiores, con poder calorífico entre 27,0 y 29,0 MJ/kg y un contenido de carbono más moderado (70–78 %), acompañado de mayores proporciones de volátiles y cenizas. Estos resultados confirman que, aunque el carbón de neem es técnicamente viable, su calidad es inferior a la de las especies prioritarias. No obstante, su interés radica en su multifuncionalidad, siendo recomendable su aprovechamiento energético únicamente a partir de biomasa residual, dentro de esquemas agroforestales integrados.



Figura 4. Árbol de neem

Las especies clasificadas con prioridad baja (cedro, búcaro y majagua) presentan las limitaciones más evidentes desde el punto de vista bioenergético. El cedro (*Cedrela odorata*), pese a su bajo contenido de cenizas, muestra un poder calorífico reducido y un porcentaje elevado de volátiles, lo que se traduce en una combustión menos eficiente. El búcare (*Erythrina* spp.) presenta los peores indicadores energéticos del conjunto, con el menor contenido de carbono (60–65 %), el mayor porcentaje de oxígeno (25–30 %) y una fracción volátil muy elevada (25–35 %), lo que resulta en un carbón ligero, de rápida combustión y baja durabilidad de la brasa. La majagua (*Hibiscus elatus*), aunque mejora ligeramente estos valores, sigue mostrando un comportamiento energético inferior al de las especies invasoras.

En conjunto, los resultados evidencian que la calidad del carbón vegetal está fuertemente condicionada por la especie leñosa de origen, siendo las especies invasoras y de bajo valor económico las que ofrecen, paradójicamente, los mejores rendimientos energéticos. Esta constatación refuerza la conveniencia de orientar las estrategias de bioenergía en Guantánamo hacia el aprovechamiento prioritario del marabú y especies afines, combinando eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y beneficios socioeconómicos para el desarrollo local.

Tabla 3. Caracterización del carbón vegetal en Guantánamo

Especie	Nombre científico	Poder calorífico (MJ/kg)	%C	%H	%N	%O	%S	%Cenizas	%Volátiles	Prioridad
Marabú	Dichrostachys cinerea	29.5–31.5	78–85	2.0–3.5	0.8–1.2	10–15	<0.05	2–5	5–10	Muy alta
Aroma	Mimosa asperata	28.5–30.5	75–82	2.5–3.5	0.7–1.1	12–18	<0.05	3–6	6–12	Alta
Leucaena	Leucaena leucocephala	28.0–30.0	75–80	2.5–4.0	0.8–1.5	15–18	<0.05	3–7	8–15	Media
Neem	Azadirachta indica	27.0–29.0	70–78	3.0–4.5	0.6–1.2	15–20	<0.05	4–8	10–18	Media
Algarrobo	Hymenaea / Prosopis	28.0–30.0	75–82	2.5–3.5	0.5–1.0	12–18	<0.05	2–5	6–12	Media
Cedro	Cedrela odorata	26.0–27.5	68–72	4.0–5.0	0.3–0.6	18–22	<0.05	1–3	15–25	Baja
Búcaro	Erythrina spp.	24.0–26.0	60–65	4.5–5.5	0.3–0.8	25–30	<0.05	3–6	25–35	Baja
Majagua	Hibiscus elatus	26.5–28.0	70–75	3.5–4.5	0.4–0.8	18–22	<0.05	2–4	15–22	Baja

Clasificación técnica según estrategia de bioenergía sostenible

- **Especies prioritarias para carbón vegetal**
 - ✓ Marabú
 - ✓ Aroma
 - ✓ Neem
- **Especies complementarias (uso condicionado o residual)**
 - Leucaena
 - Algarrobo
- **Especies no recomendadas (alto valor ecológico o baja calidad energética)**
 - ✗ Cedro
 - ✗ Majagua
 - ✗ Búcaro
 - ✗ Manglares

Identificación de especies

El reconocimiento adecuado de las especies leñosas adquiere una importancia central en el contexto de la producción de carbón vegetal y del aprovechamiento sostenible de la biomasa en la provincia de Guantánamo, ya que constituye el punto de partida para una gestión técnica, ambiental y socialmente responsable del recurso forestal. La correcta identificación de las especies no es un aspecto meramente botánico, sino una herramienta clave para la toma de decisiones en sistemas productivos locales donde los recursos son limitados y las presiones sobre el territorio son elevadas.

Desde el punto de vista energético, cada especie presenta comportamientos claramente diferenciados en términos de densidad de la madera, poder calorífico, rendimiento en carbón, duración de la brasa y generación de cenizas o humos. La confusión entre especies morfológicamente similares —como ocurre entre marabú, aroma y leucaena, todas ellas leguminosas con hojas compuestas— puede conducir a errores en la selección de la biomasa, afectando negativamente la eficiencia del proceso de carbonización y la calidad del producto final. Reconocer correctamente las especies permite optimizar el uso del recurso, seleccionar las más adecuadas para carbón vegetal y evitar expectativas energéticas irreales.

Desde una perspectiva ambiental y de sostenibilidad, el reconocimiento de especies resulta aún más crítico. En Guantánamo coexisten especies invasoras o naturalizadas, cuya expansión compromete la productividad agrícola, junto con especies nativas de alto valor ecológico o maderable que deben ser protegidas. Una identificación inadecuada puede derivar en la tala de especies no recomendadas, como cedro, majagua o manglares, generando impactos ambientales negativos y contradiciendo los principios de manejo sostenible. Por el contrario, una correcta identificación favorece el aprovechamiento prioritario de especies invasoras, transformando un problema ambiental en una oportunidad productiva.

El reconocimiento de especies también tiene una dimensión social y económica significativa. Para las comunidades rurales, el conocimiento práctico de las especies facilita la organización del trabajo, la planificación de las labores de corte y carbonización, y la valorización adecuada del producto obtenido. Capacitar a productores y carboneros en la identificación de especies contribuye a mejorar la calidad del carbón, reducir esfuerzos innecesarios y aumentar los ingresos, fortaleciendo la economía local y la seguridad energética.

Asimismo, en el marco de proyectos de desarrollo local, cooperación internacional y políticas públicas, la correcta identificación de las especies leñosas es esencial para diseñar estrategias coherentes de restauración productiva, control de invasoras y uso sostenible del territorio. Permite alinear los objetivos energéticos con los ambientales y sociales, asegurando que las intervenciones se basen en criterios técnicos y no en prácticas empíricas o de corto plazo.

En definitiva, el reconocimiento de las especies leñosas en Guantánamo es un elemento transversal que conecta la calidad energética del carbón vegetal, la sostenibilidad ambiental del aprovechamiento forestal y el impacto socioeconómico en las comunidades rurales. Su correcta integración en los procesos de producción y gestión de la biomasa constituye una condición indispensable para avanzar hacia modelos de bioenergía más eficientes, responsables y adaptados a la realidad local.



Figura 5. Hojas de marabú (*Dichrostachys cinerea* var. *africana*)



Figura 6. Flores de marabú (*Dichrostachys cinerea* var. *africana*)

Las especies leñosas analizadas en este estudio presentan rasgos morfológicos diferenciados que permiten su identificación en campo cuando se observan de manera integrada el porte de la planta, la estructura del tronco y las ramas, el tipo de hoja y, en algunos casos, la presencia de espinas o características del follaje. La correcta distinción entre ellas resulta especialmente relevante en contextos productivos como el de Guantánamo, donde coexisten especies invasoras, naturalizadas y nativas con comportamientos energéticos y valores ecológicos muy distintos.

El marabú se reconoce fácilmente por su porte arbustivo–arbóreo muy ramificado, con múltiples tallos que surgen desde la base y una abundante presencia de espinas rígidas a lo largo de las ramas. Forma rodales densos y casi impenetrables. Sus hojas son bipinnadas, con numerosos folíolos muy pequeños y finos, lo que confiere al follaje un aspecto ligero y delicado, en contraste con la robustez del entramado leñoso. Esta combinación de espinosidad, alta ramificación y hojas muy divididas es una de las claves más claras para su identificación.

La aroma comparte con el marabú la pertenencia al grupo de las mimosoideas, por lo que también presenta hojas bipinnadas; sin embargo, se distingue por un porte generalmente menos denso, con ramas más abiertas y un follaje algo más laxo. Aunque puede presentar espinas, estas suelen ser menos prominentes que en el marabú. Sus folíolos tienden a ser algo más grandes y espaciados, lo que da a la copa una apariencia menos compacta. En campo, la aroma suele encontrarse en zonas costeras secas y se reconoce por su estructura arbustiva más ordenada y menos agresiva.



Figura 7. Hojas de La aroma (*Mimosa asperata*)

La leucaena se diferencia con claridad de marabú y aroma por su porte más arbóreo y limpio, con un tronco más definido y una copa relativamente abierta. Sus hojas son también bipinnadas, pero con menos pares de folíolos, de mayor tamaño y disposición más regular. El follaje suele ser verde claro y el conjunto de la planta transmite una sensación de ligereza y orden, sin la espinosidad ni el entramado cerrado característico del marabú. Esta morfología facilita su reconocimiento en áreas agrícolas degradadas y bordes de caminos.



Figura 8. Hojas Leucaena (*Leucaena leucocephala*)

El neem se distingue de inmediato del grupo anterior por el tipo de hoja, ya que no es bipinnada. Presenta hojas simplemente pinnadas, con folíolos grandes, alargados y serrados, claramente visibles a simple vista. El árbol tiene un porte arbóreo definido, con tronco recto

y copa amplia, y carece de espinas. Su follaje más grueso y su estructura general lo asemejan a árboles forestales tropicales, lo que permite diferenciarlo sin dificultad de las leguminosas estudiadas.



Figura 9. Hojas y semillas de neem

El algarrobo, según la especie, muestra un porte robusto, con tronco grueso y copa amplia. Sus hojas pueden ser compuestas, pero son más grandes y menos finamente divididas que las de las mimosas. La madera dura y el aspecto sólido del árbol, junto con su mayor tamaño, permiten distinguirlo como una especie forestal de mayor valor estructural.

El cedro se identifica por su tronco recto y bien definido, con corteza relativamente lisa en ejemplares jóvenes y una copa alta. Sus hojas son compuestas pinnadas, con folíolos grandes y bien formados, lo que lo diferencia tanto de las mimosoideas como del neem. Su porte elegante y forestal contrasta con el carácter arbustivo de las especies invasoras.

El búcare presenta un porte ligero, con tronco blando y ramas extendidas. Sus hojas son grandes y simples o trifoliadas, muy diferentes de las hojas finamente divididas del marabú, la aroma o la leucaena. Además, su madera blanda y su aspecto general menos compacto facilitan su identificación.

Finalmente, la majagua se reconoce por su porte medio, hojas simples, grandes y acorazonadas, y una copa más cerrada. A diferencia de las leguminosas, su follaje es denso y continuo, lo que la hace fácilmente distinguible en campo.

En conjunto, la identificación de estas especies se apoya principalmente en tres criterios visuales fundamentales: tipo de hoja (bipinnada, pinnada o simple), presencia o ausencia de espinas y porte general de la planta. El dominio de estas características permite diferenciar con fiabilidad las especies estudiadas, evitando confusiones que podrían derivar en decisiones inadecuadas de aprovechamiento energético o manejo forestal.

Análisis próximo del carbón vegetal (volátiles, ceniza y carbono fijo)

Tras la carbonización de la leña en hornos artesanales (proceso de pirólisis lenta), se obtiene el carbón vegetal, cuyo desempeño como combustible se evalúa mediante el análisis próximo: fracción de materia volátil, contenido de cenizas y carbono fijo, además del poder calorífico. Un carbón de calidad presenta baja materia volátil (gases ya expulsados en la carbonización), bajo contenido de cenizas, y alto porcentaje de carbono fijo, que es la fracción sólida carbonosa que arde lentamente proporcionando calor sostenido.

El carbón de marabú producido en Guantánamo cumple con creces estos criterios de calidad. Diversas fuentes técnicas y comerciales reportan valores en rangos muy favorables, resumidos en la Tabla 2. Típicamente, el carbón de marabú contiene alrededor de un 80% o más de carbono fijo, apenas un 2–5% de cenizas, y menos de 10% de material volátil. Esto resulta en un poder calorífico elevado, del orden de 29–32 MJ/kg (≈ 7000 – 7600 kcal/kg). En efecto, especificaciones internacionales señalan que el carbón vegetal de maderas duras alcanza entre 29,000 y 35,000 kJ/kg de poder calorífico (equivalente a 6900–8360 kcal/kg), y el marabú cubano se sitúa en la parte alta de ese rango gracias a su origen en madera densa y resinosa.

El cuadro anterior refleja que el carbón de marabú producido de manera tradicional (hornos de tierra u hornos metálicos) alcanza valores sobresalientes: por ejemplo, análisis de laboratorio arrojan **75.7% de carbono fijo, 5.2% de cenizas, 4.1% de humedad** en un lote comercial típico. En condiciones óptimas de carbonización (temperaturas ~ 500 – 600 °C), el carbón puede incluso superar el 80% de carbono fijo y bajar al 2% de cenizas. Una consecuencia práctica de esta calidad es la **larga duración de la brasa**: se reporta que el carbón de marabú puede arder incandescente por **4–5 horas por carga** sin apagarse, manteniendo temperaturas superiores a 180 °C durante varias horas. Además, por su bajo contenido volátil, prácticamente **no emite humo ni chispas** al arder, brindando una combustión limpia y segura. Estas propiedades explican la alta demanda internacional del carbón de marabú cubano para uso en restaurantes y parrillas profesionales.

En cuanto al carbón de aroma u otras maderas locales, aunque faltan datos publicados detallados, es de esperar que presenten características próximas similares si la carbonización es correcta. La aroma (Mimosa) produce, al igual que el marabú, una brasa de calidad puesto que su madera comparte la dureza y baja humedad de las leguminosas invasoras. De hecho, en campo se recomienda talar la aroma para carbón precisamente por sus *excelentes cualidades caloríficas* similares a las del marabú.

Análisis elemental (composición química CHON)

El análisis elemental de la madera y el carbón permite conocer la proporción de elementos básicos –principalmente Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O) y otros como Nitrógeno (N)–, lo cual influye en el poder energético y el comportamiento en la combustión.

La madera seca de marabú presenta aproximadamente 50% de carbono en peso. Estudios en Cuba reportan valores de $\sim 51.3\%$ C, $\sim 5.4\%$ H, $\sim 0.9\%$ N y $\sim 42.4\%$ O en la madera base seca. Este contenido de carbono es elevado para una biomasa lignocelulósica, reflejando su alto contenido lignífico. En contraste, el oxígeno (42% aprox.) y el hidrógeno ($\sim 5\%$) constituyen

el resto de los componentes orgánicos de la madera, en línea con otras maderas duras tropicales. La proporción de nitrógeno en la madera es muy baja ($<1\%$), indicando escaso contenido proteico o de compuestos nitrogenados.

Tras la carbonización, la composición elemental se concentra en carbono. El carbón vegetal de marabú obtenido a $\sim 500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de pirólisis puede contener 80–85% de carbono elemental, con el oxígeno reducido al $\sim 10\text{--}15\%$ y el hidrógeno a solo $\sim 2\text{--}4\%$ [18]. Por ejemplo, carbones producidos a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostraron $\sim 80\%$ C, 3.4% H, 16% O; y a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\sim 84\text{--}85\%$ C, $\sim 2.5\%$ H, $\sim 12\%$ O. Esto evidencia la expulsión de compuestos volátiles (ricos en O y H) durante la cocción de la madera, quedando un residuo carbonoso muy rico en carbono fijo. Consecuentemente, el poder calorífico aumenta: la madera con $\sim 19.5\text{ MJ/kg}$ sube a $\sim 30\text{ MJ/kg}$ en el carbón, al haberse concentrado el contenido de C.

Vale destacar que el contenido de nitrógeno permanece bajo en el carbón ($\sim 1\%$), lo que significa que su combustión emite muy pocos óxidos de nitrógeno contaminantes. Asimismo, la ausencia de azufre en estas maderas ($\text{S} < 0.1\%$) implica que el carbón de marabú es prácticamente libre de emisiones de SO_2 , a diferencia de carbones minerales. Esta *química limpia* del carbón vegetal de marabú es una ventaja ambiental adicional.

En síntesis, el marabú y especies afines producen un carbón con alto contenido de carbono elemental ($\geq 80\%$), hidrógeno y oxígeno bajos, y trazas mínimas de nitrógeno/azufre, alineándose con los carbones vegetales de mejor calidad a nivel internacional. Estas características químicas explican su alto poder energético y la eficiencia de su combustión.

Distribución geográfica y disponibilidad del recurso en Guantánamo

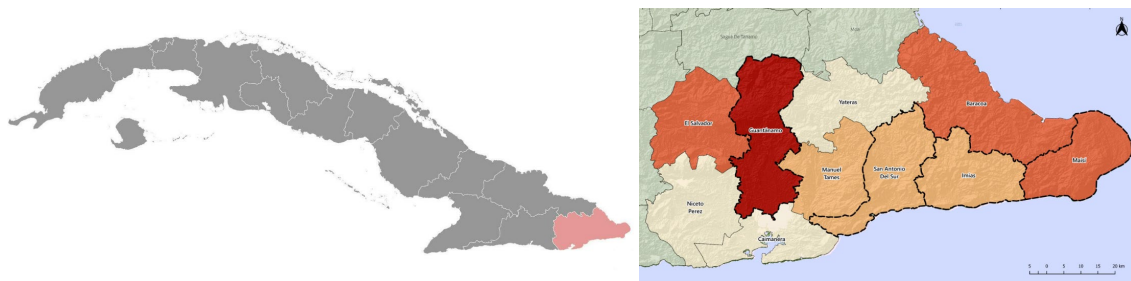


Figura 10. Localización área de estudio

La materia prima para el carbón (madera de marabú y otras) se obtiene de diversos territorios dentro de la provincia de Guantánamo, en especial aquellos con tierras llanas o semiáridas donde estas malezas leñosas han proliferado. Algunas zonas de origen destacadas y su disponibilidad aproximada son:

Valle de Guantánamo – Niceto Pérez: Incluye áreas de la UBPC Río Frío y otras fincas al suroeste de la ciudad de Guantánamo. Son sabanas y pastizales degradados, infestados de marabú durante décadas. La Empresa Agroforestal Guantánamo administra un patrimonio de ~39,000 hectáreas en la provincia, muchas de ellas en esta zona, donde abundan marabú y aroma. Según un inventario, estas tierras contienen “*rodales con especies de alto valor energético*” aptos para carbón. En Niceto Pérez se han limpiado ya cientos de hectáreas: por ejemplo, en 2016 se bulldozearon 100 ha de marabú para destinarlas a cultivos varios, aprovechando la biomasa removida para carbón. Se estima que miles de hectáreas más en el valle podrían seguir utilizándose de forma sostenible con este fin.

Costa sur (San Antonio del Sur e Imías): Corresponde a la franja costera semiárida desde Caimanera y Guantánamo Bay hacia el este hasta Imías. Municipios como San Antonio del Sur (Valle de Caujerí) e Imías poseen extensiones significativas cubiertas de matorrales de marabú y aroma, debido al clima seco (200–600 mm de lluvia) propicio a estas especies. En estas zonas, proyectos de desarrollo rural han empezado a explotar el marabú para carbón a la par que recuperan suelos para la ganadería y la agricultura. Un ejemplo es el Coto Genético “La Güira” (ubicado en San Antonio del Sur), cuyos gestores aprovechan la biomasa de 545 hectáreas de marabú para producir carbón vegetal, limpiando así tierras que luego se destinan a pastos mejorados. Este tipo de iniciativa demuestra el doble beneficio: *energético* (producción de carbón exportable) y *ambiental* (restauración de áreas invadidas).

Extremo oriental (Maisí): El municipio de Maisí, en la punta de Cuba, también presenta áreas invadidas por marabú en su franja costera. Aunque la pluviometría aumenta hacia el este, existen bolsillos de terrenos planos con marabú/aroma, cuyo aprovechamiento está contemplado en programas provinciales. De hecho, un proyecto con apoyo de la FAO (IRES) prioriza la restauración productiva de tierras con marabú en municipios como San Antonio, Imías y Maisí, con meta de eliminar el marabú en más de 15,000 ha hacia 2027 en toda Guantánamo. Solo en 2023, dicho proyecto limpió 3,143 ha infestadas de marabú en la provincia, preparando gran parte de ellas para sistemas agroforestales (árboles frutales y maderables). Esto da una idea del gran potencial en biomasa disponible: esas miles de hectáreas despejadas equivalen a cientos de miles de toneladas de leña de marabú susceptibles de carbonizarse.

Áreas cañeras (sur de Guantánamo): En los alrededores del antiguo central Argeo Martínez (municipio Guatemala/Guantánamo) el marabú y la leucaena invaden parcelas cañeras. Un estudio reportó presencia de *D. cinerea* y *L. leucocephala* dispersas en 2,723 ha de campos de caña en esta zona[28], dificultando la cosecha azucarera. La limpieza de marabú en áreas cañeras es otra fuente de madera para carbón. De hecho, Cuba explora proyectos para industrializar este recurso: en la Cartera de Inversión Extranjera se incluyó una planta de carbón activado en Guantánamo que aprovecharía 3,300 ha infestadas de marabú y luego reforestaría esas tierras liberadas. Esto refleja el interés en escalar el uso energético del marabú a nivel industrial.



Figura 11. Principales puntos donde se localizan los cultivos para la producción de carbón vegetal.

La provincia de Guantánamo dispone de decenas de miles de hectáreas cubiertas de marabú y otros marabustiales que pueden ser utilizadas de forma sostenible para producir carbón vegetal. Zonas llanas de Niceto Pérez, San Antonio del Sur, Imías, Maisí, Caimanera y periferias de Guantánamo capital concentran la mayor parte de este recurso. La combinación de iniciativas locales (cooperativas agroforestales, UBPC) y apoyo internacional (FAO, ONU) está permitiendo convertir el problema del marabú en una oportunidad: generar energía renovable (carbón vegetal de exportación) a la vez que se recuperan suelos para la agricultura y ganadería. Con un manejo adecuado, el vasto potencial biomásico del marabú en Guantánamo puede seguir aportando beneficios económicos (ingresos por exportaciones, empleo local de carboneros) y ambientales (control de invasoras y reforestación) en los próximos años. Las características técnico-científicas presentadas confirman que el marabú guantanamero, por su calidad y abundancia, seguirá siendo el pilar de la producción de carbón vegetal tanto local como para mercados internacionales.

Conclusiones

El presente estudio ha permitido establecer una caracterización técnica, energética y química sólida de las principales especies leñosas disponibles en la provincia de Guantánamo con potencial para la producción de carbón vegetal, evidenciando que la región dispone de un recurso biomásico abundante y estratégico, capaz de contribuir de manera significativa a la

seguridad energética y al desarrollo local en contextos de limitada disponibilidad de fuentes convencionales de energía.

Los resultados confirman que el marabú (*Dichrostachys cinerea* var. *africana*) constituye la especie prioritaria para la producción de carbón vegetal en Guantánamo, tanto por su amplia disponibilidad territorial como por la elevada calidad del carbón obtenido, caracterizado por un alto contenido de carbono fijo, bajo porcentaje de cenizas y materia volátil, y un poder calorífico comparable o superior a estándares internacionales. Su aprovechamiento energético permite, además, transformar una problemática ambiental asociada a la invasión de tierras agrícolas en una oportunidad productiva y económica, favoreciendo la recuperación de suelos y la generación de ingresos en el ámbito rural.

Asimismo, especies como la aroma (*Mimosa asperata*) y la leucaena (*Leucaena leucocephala*) presentan un potencial bioenergético relevante, especialmente como recursos complementarios, aportando flexibilidad a los sistemas de producción de carbón vegetal y contribuyendo al control de especies invasoras o de bajo valor económico. El neem (*Azadirachta indica*), por su parte, destaca como una especie de alto interés estratégico debido a su multifuncionalidad; aunque su aptitud energética es moderada, su integración en esquemas agroforestales permite valorizar la biomasa residual sin comprometer sus importantes usos agrícolas, ambientales y sociales.

Las especies nativas de mayor valor maderable o ecológico, como el cedro, la majagua, el búcare y otras formaciones costeras, muestran una menor idoneidad energética o restricciones de uso, lo que refuerza la necesidad de priorizar criterios de sostenibilidad en la selección de biomasa para fines energéticos, evitando la presión sobre recursos forestales estratégicos y promoviendo el aprovechamiento responsable de residuos leñosos.

Desde una perspectiva social y territorial, la producción de carbón vegetal a partir de especies invasoras y biomasa residual se consolida como una actividad clave para el desarrollo local, al generar empleo, diversificar las fuentes de ingreso y mejorar el acceso a energía en comunidades rurales con limitados recursos. La articulación entre calidad energética, disponibilidad territorial y manejo sostenible resulta fundamental para maximizar los beneficios económicos y sociales del recurso.

En conjunto, las conclusiones del estudio ponen de manifiesto que el aprovechamiento bioenergético de la biomasa leñosa en Guantánamo es técnicamente viable, ambientalmente pertinente y socialmente relevante, siempre que se enmarque en estrategias integradas de gestión del territorio, restauración productiva y desarrollo rural sostenible. Estas evidencias proporcionan una base técnica útil para la toma de decisiones en proyectos de bioenergía, políticas públicas y programas de cooperación internacional orientados a fortalecer la autonomía energética y la resiliencia de las comunidades locales.