**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D´ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



***ANÁLISIS DENDROMÉTRICO DE***

***Tamarix africana L.,***

***ESPECIE LEÑOSA DE RIBERA Y HUMEDALES AUTÓCTONA DE LA ZONA MEDITERRÁNEA.***

***CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA***

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

ALUMNO: *Juan Ramón Torres Sánchez*

TUTOR: *Borja Velázquez Martí*

***Curso Académico:2014/2015***

**VALENCIA, Febrero de 2015**

E:\Miguel\Direccion\Comision academica\Trabajo final de grado\88x31.png

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE**

**VALENCIA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO NATURAL

***ANÁLISIS DENDROMÉTRICO DE***

***Tamarix africana L.,***

***ESPECIE LEÑOSA DE RIBERA Y HUMEDALES AUTÓCTONA DE LA ZONA MEDITERRÁNEA.***

***CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA***

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

ALUMNO: *Juan Ramón Torres Sánchez*

TUTOR: *Borja Velázquez Martí*

***Curso Académico:2014/2015***

**VALENCIA, Febrero de 2015**

E:\Miguel\Direccion\Comision academica\Trabajo final de grado\88x31.png

**TÍTULO:** ANÁLISIS DENDROMÉTRICO de *Tamarix africana* L., especie leñosa de ribera y humedales autóctona de la zona mediterránea. caracterización de biomasa

**RESUMEN:** El presente trabajo realiza una caracterización dendrométrica y energética de *Tamarix africana* por su interés como planta autóctona de la zona mediterránea, adaptada a vivir en zonas semiáridas con suelos salinos e inundaciones ocasionales. Estas características convierte a esta especie en una buena candidata para su utilización en la restauración de determinados ambientes como puedan ser las marjales, abriendo la posibilidad de mejorar su gestión por la obtención de beneficios económicos a partir del aprovechamiento energético de la biomasa generada. Desde el punto de vista dendrométrico, se determinan funciones de volumen de biomasa para los tallos a partir de su diámetro y longitud, y para la mata entera, a partir del diámetro de la superficie proyectada y altura de la planta, lo que permite calcular de forma sencilla por métodos indirectos el volumen de biomasa lignocelulósica que estas plantas pueden generar. Para la caracterización energética se midió, la densidad, el poder calorífico superior y composición de esta madera en C, N, H, S y Cl. La determinación de su composición en C nos permite evaluar el CO2 fijado por la planta durante su crecimiento.

Palabras clave: biomasa, dendrometría, humedales, bioenergía; *Tamarix africana* L.

ALUMNO: *Juan Ramón Torres Sánchez*

DIRECTOR ACADÉMICO: *Borja Velázquez Martí*

**Valencia, Diciembre de 2014**

**TÍTOL: ANÀLISI DENDROMÈTRIC DE Tamarix africana L., ESPÈCIE llenyosa DE RIBERA I AIGUAMOLLS AUTÒCTONA DE LA ZONA MEDITERRÀNIA. CARACTERITZACIÓ DE BIOMASSA**

RESUM: El present treball realitza una caracterització dendrométrica i energètica de *Tamarix africana* L. pel seu interès com a planta autòctona de la zona mediterrània, adaptada a viure en zones semiàrides amb sòls salins i inundacions ocasionals. Aquestes característiques converteix aquesta espècie en una bona candidata per a la seva utilització en la restauració de determinats ambients com ara les marjals, obrint la possibilitat de millorar la seva gestió per l'obtenció de beneficis econòmics a partir de l'aprofitament energètic de la biomassa generada. Des del punt de vista dendrométrico, es determinen funcions de volum de biomassa per les tiges a parir del seu diàmetre i longitud, i per a la mata sencera, a partir del diàmetre de la superfície projectada i alçada de la planta, el que permet calcular de forma senzilla per mètodes indirectes el volum de biomassa lignocelulósica que aquestes plantes poden generar. Per a la caracterització energètica es va mesurar, la densitat, el poder calorífic superior i composició d'aquesta fusta en C, N, H, S i Cl. La determinació de la seva composició en C ens permet avaluar el CO2 fixat per la planta durant el seu creixement.

Paraules clau: biomasa, dendrometria, humedals, bioenergia; *Tamarix africana* L.

ALUMNE: *Juan Ramón Torres Sánchez*

DIRECTOR ACADÈMIC: *Borja Velázquez Martí*

**València, Desembre de 2014**

**TITLE: DENDROMETRIC ANALYSIS OF Tamarix africana L., woody INDIGENOUS SPECIE in riversides AND WETLANDS OF MEDITERRANEAN AREA. CHARACTERIZATION OF BIOMASS**

ABSTRACT: This paper makes a dendrometric and energy characterization of *Tamarix africana* L. for its interest as native plant from the Mediterranean area, adapted to living in arid areas with saline soils and occasional flooding. These features do this specie a good candidate for use in restoring wet environments such as fens, opening the possibility of improving their management by obtaining economic benefits from energy use of the generated biomass. The dendrometric analysis has been based on in the calculation of biomass volume functions for the stems from their diameter and length, and functions for the whole plant from the projected diameter and height above the ground, which allows the calculation of the volume by indirect methods and the lignocellulosic biomass that these plants can generate. For energy characterization, density, calorific value and composition of wood in C, N, H, S and Cl were measured. The determination of composition in C allowed to evaluate the CO2 fixed by the plant during its growth.

Keywords: biomass, dendrometry, wetlands, bioenergy; *Tamarix africana* L.

STUDENT: *Juan Ramón Torres Sánchez*

ACADEMIC DIRECTOR: *Borja Velázquez Martí*

**Valencia, December 2014**

Tabla de contenido

Índice de Contenidos

1.- INTRODUCCIÓN 7

2.- OBJETIVOS 10

2.1. Objetivo general. 10

2.2. Objetivos específicos. 10

3.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 11

3.1.- Análisis Dendométrico de las Plantas 11

3.2. Análisis de la Planta Entera 15

3.3.- Caracterización de la Biomasa. 16

3.4. Características de Tamarix africana 18

4.- MATERIALES y métodos 19

4.1- Análisis Dendométrico de pies 19

4.2- Análisis volumen de planta enTera 21

4.3- caracteRización fisicoquímica de la biomasa 21

4.3.1.- Determinación del contenido de humedad. 22

4.3.2. Determinación de la densidad de la madera. 22

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 24

5.1.- ANÁLISIS DENDROMÉTRICO DE pies 24

5.2.- Análisis de la Planta Entera 27

5.3.- Caracterización de la Biomasa. 29

6.- CONCLUSIONES 31

7.- BIBLIOGRAFÍA 33

Índice de Figuras

Figura 1. *Tamarix africana* L. (Vascular Plant Image Library) 9

Figura 2. División del fueste en cinco partes iguales 12

Figura 3. Sección de un tronco de cono 13

Figura 4. Modelos de crecimiento de copas arbóreas en una superficie determinada 15

Figura 5. Esquema del criterio de medición 20

Figura 6.- sistema de determinación del volumen de la muestra. 23

Figura 7. Relación entre el Diámetro Basal medio de rama y el Volumen de madera de la misma (incluidas ramificaciones) 26

Figura 8. Relación entre el Diámetro Medio de la Proyección y el Volumen Total de la Madera de la Mata 28

Figura 9. Relación entre el Diámetro Medio de la Proyección y el LN del Volumen Total de la Madera de la Mata 28

Índice de Tablas

Tabla 1. Ecuaciones de los modelos de volumen sólido de los vegetales 11

Tabla 2. Volúmenes de solidos 13

Tabla 3. Funciones de volumen 14

Tabla 4. Normas de análisis para la caracterización de Biomasa 17

Tabla 5. Normas de análisis para caracterización de biomasa 21

Tabla 6. Descripción estadística de la población estudiada 24

Tabla 7. Descripción estadística de los factores de forma de varas para los distintos modelos geométricos 25

Tabla 8. descripción estadística de los factores de forma de pies para los distintos modelos geométricos 25

Tabla 9. Función de volumen de pie (incluidas bifurcaciones) de *Tamarix africana* L 26

Tabla 10. Obtención del factor de ocupación de *Tamarix africana* L 27

Tabla 11. Función de volumen de rodal de *Tamarix africana* L 27

Tabla 12. Características termoquímicas 29

Tabla 13. Especificaciones exigidas a las astillas de madera como biocombustibles según EN 14694-Parte 4 29

Tabla 14. Comparación en las características termoquímicas de las distintas estructuras de la planta 30

Tabla 15. Porcentajes de peso de madera y finos (hojas) Tamarix africana L. en base seca. 30

ANÁLISIS DENDROMÉTRICO DE *Tamarix africana* L., ESPECIE LEÑOSA DE RIBERA Y HUMEDALES AUTÓCTONA DE LA ZONA MEDITERRÁNEA. CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA

# 1.- INTRODUCCIÓN

Denominamos biomasa a todo material de origen orgánico no fosilizado, tanto vivo como inerte, que existe en un determinado ecosistema (Velázquez-Martí, 2006). La ciencia forestal ha necesitado conocer la biomasa existente en las especies forestales con explotación industrial, por lo que se han desarrollado técnicas para la medición o estimación de la misma. Al conjunto de técnicas que miden las dimensiones de las plantas se denomina dendrometría. Tradicionalmente, estas mediciones han prestado especial atención al fuste, o tronco principal del árbol, por sus aplicaciones industriales, sin embargo los sistemas de cuantificación de la biomasa arbustiva han sido poco desarrollados. Algunos trabajos destacables son de Karunaratne et al., (2002) y Velázquez-Martí et al.(2010b), La cuantificación de esta biomasa adquiere enorme importancia en distintos ámbitos: primero para evaluar el grado de desarrollo de una determinada especie en un ecosistema, también para definir modelos de incendio basados en la cantidad de combustible existente por unidad de superficie, en el cálculo de la carga ganadera que se alimenta de esa especie, cuantificación del CO2 secuestrado por las masas arbustivas durante su crecimiento y por último en la cuantificación de la energía disponible si se emplean los residuos de estos materiales como biocombustibles tras su eliminación en la gestión de los ecosistemas.

En este trabajo se pretende desarrollar las técnicas dendrométricas para la cuantificación y caracterización de la biomasa leñosa de *Tamarix africana.* Ésta es una especie arbustiva perteneciente al género *Tamarix* de la familia *Tamaricaceae* que podemos encontrar en el Mediterráneo occidental en zonas de ribera, en suelos húmedos y algo salinos, en las arenas y lagunas costeras, así como a lo largo de ríos y corrientes de agua, fundamentalmente de aquellas que atraviesan margas y otros terrenos sub-salinos. Recibe diversos nombres vulgares, entre los que destacan taray, tamarix, taraje o tamarisco. Se distribuye tanto en la Península Ibérica como en las Islas Baleares. Se encuentra asociada al clima mediterráneo. Junto a ella, encontramos otras especies como adelfas (*Nerium oleander*), sauces (*Salix spp*) y *Phragmites* (Clevering et al., 2001). Se utilizan para fijar márgenes de ríos y dunas litorales. Se reproducen fácilmente de estaca y acodo. En estado natural se reproduce además por semilla, pero para ello necesita condiciones de inundación estacional.

Este trabajo se enmarca en una línea de investigación que pretende crear herramientas de gestión de los humedales salinos cercanos a las costas (marjales). La dinámica de estos espacios es compleja y dificultosa, y hasta el momento ha sido poco estudiada con técnicas dendrométricas. Por otra parte, cabría la posibilidad de plantear plantaciones bien para restauración ambiental o con fines energéticos. Naturalmente hay que tener en cuenta la influencia sobre el equilibrio del ecosistema y su efecto sobre el medio ambiente que puede tener el establecimiento de estas plantaciones, por lo que esta situación deber ser cuantificada y valorada (Askew y Holmes, 2002).

La planta de *Tamarix africana* fue descrita por Jean Louis Marie Poiret en el año 1789. El nombre genérico es el que daban los romanos a esta planta y se cree derivado del río Tamaris (actualmente llamado Tambro) de la Tarraconense, donde este arbusto crece con profusión. Es un arbusto o arbolillo de hasta 3 ó 4 metros de altura con ramas largas y flexibles de corteza pardo-rojiza. Las más jóvenes son lustrosas y lampiñas, tornándose más oscuras con los años. Las hojas son muy pequeñas, escuamiformes; ensanchadas y abrazaderas en la base, agudas; miden de 1,5 a 3 mm, parecidas a las del ciprés. Las flores van del blanco al rosa pálido, agrupadas en espigas gruesas y cilíndricas de entre 3 y 7 cm de longitud. Las brácteas florales son triangulares y la capsula aovada. Florece en primavera y en verano. (Poiret, 1989; Cirujano, 1993). Las plantas de este género pueblan de manera natural marjales y barrancos del área mediterránea, tiene la capacidad de soportar ambientes salinos. Su madera siempre ha sido apreciada como leña, por lo que ya ha sido utilizada con fines energéticos. No obstante, es necesaria la caracterización de la biomasa, así como averiguar la productividad de la especie en estos espacios para poder decidir si su plantación es conveniente o no. El estudio se plantea con *Tamarix africana*, y no con otras especies de *Tamarix* como el *gálica* o *canariensis*, por ser el *Tamarix africana* el más representativa en la Comunidad Valenciana. Esta especie podría ser utilizada como materia prima para la producción de biocombustibles tras una transformación como el astillado, pelletización, carbonización, pirólisis, gasificación, transesterificación, o fermentación para la obtención de alcoholes o biogás.



Figura 1. *Tamarix africana* L. ([Vascular Plant Image Library](http://botany.csdl.tamu.edu/FLORA/gallery.htm))

# 2.- OBJETIVOS

## 2.1. Objetivo general.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar modelos matemáticos para la determinación de la biomasa total contenida en las plantas de *Tamarix africana*, a partir de mediciones sencillas tales como diámetros o altura, así como su caracterización en cuanto a su contenido en carbono y energía.

## 2.2. Objetivos específicos.

Los objetivos del presente trabajo de investigación se especifican en los puntos siguientes:

1. Analizar la forma y volumen de matas de Taray en cultivo con densidades altas.
2. Adaptar la metodología forestal para la medición de parámetros dendrométricos en cultivos de Taray.
3. Determinar factores de forma de las ramas que permitan obtener el volumen real de los mismos a partir de medición de su diámetro de la base y longitud.
4. Establecer modelos para la determinación del volumen real de biomasa leñosa contenida en la mata a partir de la medición del diámetro de su proyección y la altura de la misma. Posteriormente aplicando la densidad de la madera seca puede determinarse la biomasa total.
5. Estudiar la distribución de la biomasa en la planta.
6. Establecer parámetros de predicción que posteriormente pueden ser aplicados a los inventarios de biomasa con destino energético o industrial, o en sistemas de información geográfica y estudios logísticos de los materiales procedentes del arranque de plantaciones.
7. Caracterización de los materiales biomásicos procedentes de *T. africana* desde el punto de vista energético e industrial.

# 3.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 3.1.- Análisis Dendométrico de las Plantas

Las plantas del género *Tamarix* se caracterizan por ser arbustos, por lo que tienen numerosos pies que forman la mata. Esta circunstancia hace que no se puedan aplicar conceptos dendrométricos como *pie principal*, *fuste* o *diámetro normal*. El número de pies de cada mata es variable, así como los diámetros y alturas de cada uno de ellos.

La medición de la madera que contiene una planta forestal se ha realizado tradicionalmente de forma sencilla y rápida a partir de los coeficientes mórficos o factores de forma (Diéguez et al., 2003). Un factor de forma se define como el cociente entre el volumen real del vegetal y el volumen de un modelo que se toma como referencia, generalmente un sólido de revolución (Ecuación 1). En consecuencia, se trata de un factor de conversión del volumen de un sólido modelo al volumen real de una estructura vegetal (tronco, tallo o rama). En la práctica, y por comodidad en el cálculo de volúmenes, se suele tomar como modelo de comparación el cilindro (Maltamo et al., 2004). No obstante, existen otros sólidos de revolución que pueden ajustarse mejor a la forma del tronco del árbol. En la Tabla 1 se muestra los modelos de volumen utilizados habitualmente. A partir de estos modelos se puede determinar el volumen real, una vez obtenidas las medidas del diámetro del tronco y su altura.

 Ecuación 1

Tabla 1. Ecuaciones de los modelos de volumen sólido de los vegetales

(Velázquez-Martí et al., 2014)

|  |  |
| --- | --- |
| Tipo de modelo | Volumen real del individuo |
| Cilindro | Ecuación 2 |
| Paraboloide | Ecuación 3 |
| Cono | Ecuación 4 |
| Neiloide | Ecuación 5 |

Donde d es el diámetro de referencia del fuste principal y h la altura del vegetal que han sido medidos para cada individuo de la muestra; y f es el factor de forma.

Conocer el volumen real, no obstante, no es tarea sencilla, por lo que se suele realizar una aproximación mediante la medición de sucesivos diámetros a distancias variables. Como se puede observar en la Figura 2, para la determinación del volumen real de una rama se suele proceder a la división de ésta en al menos cinco secciones de las mismas dimensiones, de modo que al medir el diámetro medio de cada sección se obtiene el diámetro inicial y final de cada intervalo.



Figura 2. División del fueste en cinco partes iguales

Donde d es el diámetro de la base de la rama; d0,1 es el diámetro al 10% de la altura total de la rama; d0,3 es el diámetro al 30% de la altura total de la rama; d0,5 es el diámetro al 50% de la altura total de la rama; d0,7 es el diámetro al 70% de la altura total de la rama; d0,9  es el diámetro al 90% de la altura total de la rama. Al valor *fv* se le denomina factor de forma verdadero (Ec. 7).

 Ecuación 6

 Ecuación 7

Por otra parte, pueden ser consideradas distintas ecuaciones para el cálculo de las distintas secciones, como fórmula de cono truncado (Ec. 8); fórmula de Huber (Ec. 9), fórmula de Samlian (Ec. 10), fórmula de Newton (Ec.11).

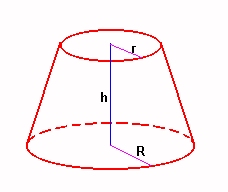
**

Figura 3. Sección de un tronco de cono

Donde R= radio mayor; r= radio menor; h= longitud del intervalo.

Tabla 2. Volúmenes de solidos

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Troncocono |  | Ecuación 8 |
| Huber (1928) |  | Ecuación 9 |
| Smalian (1837) |  | Ecuación 10 |
| Newton |  | Ecuación 11 |

Dónde:

V = volumen (m3)

gm = área basal (m2) en el punto medio de la sección

gs = área basal (m2) en el punto superior de la sección

gi = área basal (m2) en el punto inferior de la sección

L = largo de la sección (m)

Mediante el sumatorio de todos los volúmenes de cada una de las porciones tomadas se obtendrá el volumen real de la rama (Ecuación 12):

 Ecuación 12

Por otra parte, para el cálculo del volumen de las estructuras vegetales como ramas o tallos se han desarrollado diferentes modelos de función que resultan más precisas que la aplicación de los factores de forma.

Tabla 3. Funciones de volumen

|  |  |
| --- | --- |
| **AUTOR** | **FUNCIÓN** |
| Naslund | *V = b0 + b1 D02 + b2 D02 H + b3 D0 H2 + b4 H2* |
| Spurr | *V = b0 + b1 D02 H* |
| Honer | *V = D02 H / (b1 + b2 / H)* |
| Ogaya | *V = b1 D02 + b2 D02 H* |
| Stoate | *V = b0 + b1 D02 + b2 D02 H + b3 H* |

V= volumen con corteza (cm3), D0= diámetro referencial (cm), H= altura total de la rama (cm)

En la literatura se pueden encontrar diversos tipos de funciones de volumen:

a) Los modelos de volumen local relacionan el volumen del árbol con sólo una variable dependiente, generalmente el diámetro normal o de referencia o transformaciones y potencias de esta misma variable. La denominación de este volumen como volumen local se debe a que son de aplicación limitada al área, para lo cual es aplicable la relación diámetro / altura implícita en el modelo de volumen; generalmente una cierta clase de edad y un mismo sitio (Lencinas et al., 2002).

b) Las funciones generales de volumen son modelos cuyo objetivo es la estimación del volumen con dos o más dimensiones del árbol, generalmente el diámetro y la altura total, pero también la edad, la densidad de plantación y la calidad de sitio expresada a través del índice de sitio o la altura dominante a una edad determinada (Costas et al., 2006). Estas funciones tienen un nivel de aplicación más alto que las locales, esto se debe a que la relación de las dimensiones está explícita en el modelo, por lo que facilita sobremanera su uso para diferentes rodales en lugares diferentes (Prodan et al., 1997).

c) Las funciones comentadas anteriormente muestran poca flexibilidad práctica, por lo que a través de ellas se han desarrollado nuevos métodos para la determinación directa de volúmenes hasta un determinado índice de utilización o entre dos límites de utilización. Uno de estos nuevos métodos son las funciones de razón, que estiman el volumen hasta un determinado índice como un porcentaje del volumen total del árbol (Cao et al.1980) por medio de dos métodos, el primero de ellos corresponde a una ecuación de volumen para la predicción del volumen total del árbol; y el segundo corresponde a una de transformación para la estimación de la proporción de volumen hasta un índice de utilización especificado (Prodan et al.,1997; Barrio et al., 2007; Trincado et al., 1997).

## 3.2. Análisis de la Planta Entera

Así como el cálculo del volumen de biomasa en estructuras vegetales (ramas o tallos) de forma individual se basan en factores de forma o funciones de volumen, el desarrollo de técnicas de medición indirecta de la biomasa contenida en la planta entera sigue dos tendencias: Por un lado la determinación de factores de ocupación, a partir de la altura de la planta y el área proyectada sobre el suelo; por otro, a partir de funciones de volumen en base al diámetro de copa, diámetro del fuste, o diámetro equivalente de la proyección.

Velázquez-Martí et al. (2010a) propuso estos métodos para la caracterización dendrométrica de 5 especies arbustivas: *Rosmarinus officinalis* L., *Erica multiflora* L., *Ulex parviflorus* L., *Cistus alvidus* L. y *Quercus coccifera* L. Denominó factor de ocupación a la relación entre el volumen aparente del arbusto tomado como una figura de revolución, y el volumen real de las ramas que los contienen. Su expresión vendrá dada por la ecuación 13. Conociendo el factor de ocupación, la altura de la planta junto con la superficie ocupada se puede determinar el volumen aparente y la biomasa de todas las ramas que forman.

 Ecuación 13

Los modelos habitualmente empleados se muestran en la Figura 4.

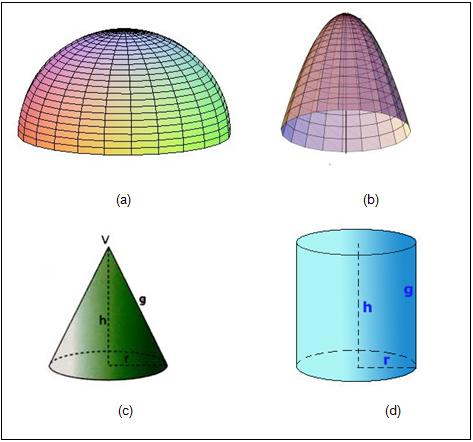


Figura 4. Modelos de crecimiento de copas arbóreas en una superficie determinada

(a) Semielipse; (b) Paraboloide; (c) Crecimiento Cónico; (d) Crecimiento cilíndrico.

## 3.3.- Caracterización de la Biomasa.

Numerosos estudios han ido encaminados a la caracterización energética de la biomasa, tanto la procedente de árboles forestales como de residuos de poda de plantaciones agrícolas, (Vargas-Moreno et al., 2012). Sin embargo, no hay estudios centrados en las propiedades de las plantas de ribera. Una de las propiedades más importantes es el poder calorífico. Éste es el calor desprendido durante la combustión por unidad de masa. El poder calorífico es constante para un material con composición elemental fija. Pero la biomasa, y especialmente los residuos de poda presentan cierta variabilidad, porque por un lado son higroscópicos y absorben humedad de acuerdo a las condiciones climáticas a las que son sometidos; también porque en el momento de su uso pueden estar formadas por mezclas de distintas especies o poseen distintos porcentajes de hojas y madera. Lo que obliga a una determinación puntual del poder calorífico en cada lote cuando se va a usar en la industria. La determinación del poder calorífico se suele realizar con un calorímetro donde una muestra se hace combustionar en una cámara en condiciones controladas, midiendo el incremento de temperatura experimentado por el agua envolvente a la cámara de combustión. La determinación del poder calorífico de forma directa supone un tiempo de análisis aproximado de 20 minutos por muestra (Velázquez-Martí et al., 2014) y tiene unos costes económicos elevados (Callejón-Ferre et al., 2011; Vargas-Moreno et al., 2012). Lo que ha derivado que desde hace tiempo numerosos investigadores hayan publicado modelos indirectos de predicción del poder calorífico de materiales biomásicos bien a partir de su composición elemental, midiendo el porcentaje en carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y otros (Parikh et al., 2007;Buckley et al., 1991;Friedl et al., 2005), bien a partir de análisis proximales o método de Weende, utilizando para ello variables como el contenido de cenizas, humedad de la muestra, etc. (Demirbaş, 2007; Erol et al., 2010; Chun-Yang, 2011) o mediante análisis estructural midiendo el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina (Vargas-Moreno et al., 2012).

Los métodos para la obtención de estos parámetros están plenamente desarrollados por la American Standard Testing Methods (ASTM) y el Comité Europeo de Normalización (CEN). Se exhiben en la Tabla 4.

Tabla 4. Normas de análisis para la caracterización de Biomasa

| Referencia | Título |
| --- | --- |
| CEN/TS 14588 | Biocombustibles sólidos – Terminología, definiciones y descripciones |
| CEN/ S 14778-1 | Biocombustibles sólidos – Muestreo – Parte 1: Métodos de muestreo |
| CEN/TS 14778-2 | Biocombustibles sólidos – Muestreo – Parte 2: Métodos de muestreo de material particulado transportado en camiones |
| CEN/TS 14779 | Biocombustibles sólidos – Muestreo – Métodos para la preparación de los planes de muestreo y toma de muestras de certificados |
| CEN/TS 14780 | Biocombustibles sólidos – Métodos para la preparación de la muestra |
| EN 14774-2 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de humedad – método de secado en estufa. Parte 2. Método simplificado: Total de humedad |
| EN 14774-3 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de humedad – Método de secado en estufa .Parte 3. La humedad en la muestra general, el análisis |
| CEN / TS 15149-1 | Biocombustibles sólidos – Métodos para la determinación de la distribución del tamaño de partícula – Parte 1: Método de pantalla oscilante utilizando aberturas de tamiz de 3,15 mm y superiores |
| CEN/TS 15149-2 | Biocombustibles sólidos – Métodos para la determinación de la distribución del tamaño de partícula – Parte 2: Método vibrante pantalla con aberturas de tamiz de 3,15 mm y por debajo |
| CEN/TS 15149-3 | Biocombustibles sólidos – Métodos para la determinación de la distribución del tamaño de partícula – Parte 3: Método de pantalla Rotary |
| EN 15103 | Biocombustibles sólidos – Determinación de la densidad a granel (densidad aparente) |
| EN 14918 | Biocombustibles sólidos – Determinación del valor calorífico |
| EN 15148 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de materia volátil |
| EN 14775:2009 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de cenizas |
| CEN/TS 15104 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno – Métodos Instrumentales |
| CEN/ TS 15105 | Biocombustibles sólidos – Métodos para determinar el contenido soluble en agua de cloro, sodio y potasio |
| CEN/TS 15289 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido total de azufre y cloro |
| CEN/TS 15290 | Biocombustibles sólidos – Determinación de los principales elementos |
| CEN/TS 15297 | Biocombustibles sólidos – Determinación de elementos menores |
| CEN/TS 15370-1 | Biocombustibles sólidos – Método para la determinación del comportamiento de fusión de cenizas – Parte 1: Método de temperaturas características |
| EN 15210-1 | Biocombustibles sólidos – Determinación de la resistencia mecánica de pellets y briquetas. Pellets |
| CEN/TS 15210-2 | Biocombustibles sólidos – Determinación de la resistencia mecánica de pellets y briquetas. Parte 2: Briquetas |
| CEN / TS 15234 | Aseguramiento de la calidad del combustible – Biocombustibles sólidos |
| CEN / TS 15296 | Biocombustibles sólidos – Cálculo de los análisis a las diferentes bases |
| EN 14961-1 | Biocombustibles sólidos – especificaciones del combustible y las clases – Parte 1: Requisitos generales |
| EN –ISO 10520 | Almidones y féculas nativos- Determinación del contenido de almidón. Método polarimétrico de Ewers |

## 3.4. Características de Tamarix africana

El Genero *Tamarix* está compuesto por 60 especies distribuidas por las zonas más secas de Eurasia y África. Suelen ser arbustos o pequeños arbolitos, aunque el más grande de ellos *Tamarix aphylla*, puede llegar a medir 15 m. Muy ramosos. Caducifolio o perennifolios, suelen formar densas matas o arboledas en zonas secas con inundaciones ocasionales en terrenos salinos.

El género *Tamarix* ha sido estudiado fundamentalmente por su capacidad para desarrollarse en terrenos salinos o regados con agua salada. Esta cualidad lo hace especialmente interesante para la restauración ambiental (Pen Mouratov et al, 2014) y, de manera destacada, como filtro verde en la purificación de aguas residuales, donde además destaca por su producción de biomasa (Adrover et al, 2008). En este sentido, Tomar et al, (2003) la sitúa en el primer lugar de entre 31 especies estudiadas a lo largo de 9 años en condiciones semiáridas y con riego de aguas salinas tanto en supervivencia, como en crecimiento y producción de biomasa. Su alta capacidad para vivir en ambientes salinos, la convierten en una especie óptima para la restauración ambiental de zonas semiáridas con inundaciones ocasionales, si bien es cierto que puede producirse un efecto adverso por la acumulación de sales bajo su dosel (Yong Zhong et al, 2012) debido a la capacidad que tiene de expulsar la sal que absorbe del suelo a través de sus hojas.

Algunas especies del género *Tamarix* son invasoras prolíficas, abundantes en los ríos regulados y ocupando extensas áreas a lo largo de las orillas de los embalses. Plantas de este género, como *Tamarix ramosissima*, han presentado una tasa de supervivencia superior y una mayor producción de biomasa que otras especies en condiciones de suelo saturado, pero no inundados. Los esquejes de *Tamarix* pueden prosperar en los suelos de la zona expuesta al encharcamiento periódico, a condición de que los brotes no estén sumergidos. (Tallent et al., 2002). Esta especie, de origen asiático y naturalizada en el nuevo mundo, no es una de las especies autóctonas ibéricas, donde se cree que ha sido introducida como ornamental (Cirujano y Castillo, 1990). Por otra parte, es fácil encontrar a las especies autóctonas con un comportamiento similar al descrito: Los cursos fluviales intermitentes de toda la vertiente mediterránea se encuentran cubiertas con bosquetes de estas especies, así como las dunas litorales, cabeceras de pantanos, zonas marginales de humedales costeros y, en general en zonas donde se producen inundaciones ocasionales.

Del mismo modo, la frugalidad de *Tamarix spp*. la convierten en una especie características de las zonas semiáridas, donde cumplen un importante papel en la fijación de suelos y el control de la erosión (De Baets et al, 2007; 2008)

Por otra parte, este género han sido utilizadas para la producción de biomasa lignocelulósica destinada a la generación de etanol con rendimientos satisfactorios (Santi et al., 2014; Xiao et al, 2012). La producción de bioenergía puede ofrecer sinergias ecológicas y económicas beneficiosas a través de la expansión de proyectos de restauración ecológica. La generación de ingresos por la venta de la biomasa procedente del aprovechamiento de especies invasoras pueden ser aprovechados para la expansión de actividades de restauración ecológica (Nackley et al, 2013)

# 4.- MATERIALES y métodos

Se tomaron al azar 40 plantas de *Tamarix africana* L. de una plantación situada en la Marjar dels Moros (Sagunto- Valencia). Esta plantación es un banco clonal cualificado con un marco de plantación de 2,5 x 1,5 m con una densidad de 2666 plantas por hectárea. La técnica de muestreo se realizó de forma aleatoria simple, considerando que 40 supone una muestra con suficiente representatividad. La plantación se encuentra distribuida en 5 filas con 50 plantas. La localización de las plantas muestreadas está mostrada en el anexo 1.

Las plantas estudiadas se estructuran en matas. Se define “Mata” como planta claramente diferenciada de las de su entorno, formanda por distintos pies ramificados leñosos. Los pies son cada una de las partes que nacen de la cepa, es decir, el conjunto formado por un tallo y todas sus bifurcaciones o ramas laterales. Del mismo modo, definimos “Vara” como cada uno de los segmentos que conforman el pie y cuya longitud es igual a la distancia entre dos bifurcaciones consecutivas, consideradas base y final de la misma. Si es terminal la longitud será desde la bifurcación hasta el ápice.

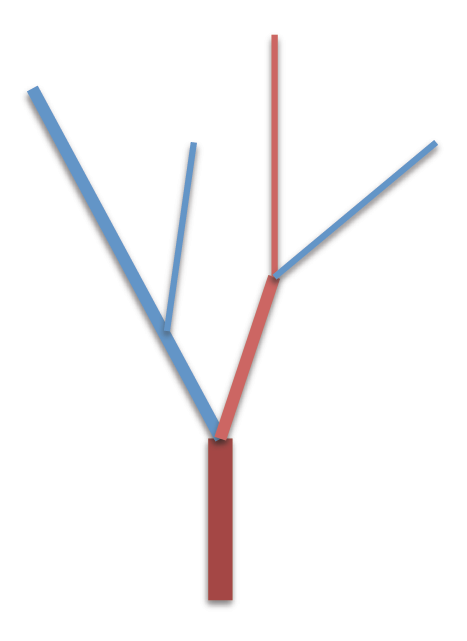
Por la variabilidad en cuanto a número de pies en cada mata, se ha probado una sistemática basada en mediciones en dos fases: Primero se realizó un análisis dendrométrico de los pies de 8 de las plantas seleccionadas, con el objetivo de obtener funciones que permitieran calcular el volumen de las mismas a partir del diámetro de la base y su longitud. Posteriormente se midieron los diámetros y longitudes de todos los pies de las 32 plantas seleccionadas restantes, de modo que al aplicar la función de volumen anteriormente calculada a cada una de los pies se obtuvo el volumen leñoso total de cada una de las plantas.

## 4.1- Análisis Dendométrico de pies

Para la medición de diámetros se utilizó un calibrador de píe de rey digital con resolución de centésima de milímetro. Para la toma de las longitudes, se utilizó un flexómetro estándar.

Para el análisis dendrométrico se seleccionaron 26 varas. Para calcular su volumen se midieron los diámetros cada 10 cm. La forma no circular de cada sección obligó a la determinación de dos diámetros perpendiculares tomándose el diámetro medio para el cálculo del volumen. El volumen de cada porción comprendida entre dos secciones consecutivamente medidas se calculó aplicando la fórmula del tronco de cono (Ec. 8). La suma del volumen de todas las porciones, definieron el volumen real de esa vara.

Cada pié presentó elevada ramosidad. En cada bifurcación aparece una disminución drástica de la sección, con la característica que la suma de las dos secciones resultantes se asemeja a la principal. Para el cálculo del volumen del pié se tomó el criterio de contabilizar tanto el tallo principal como el de todas las ramificaciones (área encerrada en el óvalo Figura 5). La longitud considerada fue la correspondiente a la máxima distancia entre la base y la bifurcación de mayor longitud. Independientemente, también se analizó cada bifurcación como si fuera una nuevo pié, analizándolo de la misma forma.



Volumen del pie

Diámetro basal

Longitud del pie

Figura 5. Esquema del criterio de medición

Obtenido el volumen de cada pié de definió el factor de forma (Ec. 1), tomando como modelo distintas figuras geométricas en base a su diámetro basal y longitud: cilindro, paraboloide, cono y neiloide. Para analizar su variabilidad se obtuvo la media, desviación típica y coeficiente de variación. Por otra parte se analizaron modelos de regresión múltiple de cara a determinar funciones de volumen de rama a partir del diámetro de su base y longitud.

## 4.2- Análisis volumen de planta enTera

Habiendo obtenido una función de volumen para los pies en función del diámetro basal y longitud con suficiente precisión, se midieron los diámetros basales de cada uno de los pies que conforman la mata. Por sumatorio de los volúmenes asociados a cada una de los pies se obtuvo el volumen total de la madera de la mata.

Por otra parte, se midió el diámetro de la proyección y la altura dominante de cada una de las matas. A partir de éstos se obtuvo un volumen aparente ocupado, aplicando la fórmula del cilindro. A través de la relación entre el volumen real calculado para la planta y su volumen cilíndrico aparentemente ocupado se calculó el factor de ocupación por la ecuación 13, determinándose la media y dispersión.

Por otra parte se analizaron modelos de regresión múltiple para la obtención de funciones que permitieran determinar el volumen de la planta a partir del diámetro del rodal y la altura dominante.

## 4.3- caracteRización fisicoquímica de la biomasa

El análisis de la madera se llevó a cabo en el laboratorio de Propiedades Físicas y Bioenergía de la UPV . Las propiedades analizadas se obtuvieron aplicando las normas de la Tabla 5.

Tabla 5. Normas de análisis para caracterización de biomasa

| Referencia de la norma | Título |
| --- | --- |
| CEN/ S 14778-1 | Biocombustibles sólidos – Muestreo – Parte 1: Métodos de muestreo |
| CEN/TS 14780 | Biocombustibles sólidos – Métodos para la preparación de la muestra |
| EN 14774-3 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de humedad – Método de secado en estufa .Parte 3. La humedad en la muestra general, el análisis |
| EN 14918 | Biocombustibles sólidos – Determinación del valor calorífico |
| EN 15148 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido de materia volátil |
| CEN/TS 15104 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno – Métodos Instrumentales |
| CEN/TS 15289 | Biocombustibles sólidos – Determinación del contenido total de azufre y cloro |
| CEN / TS 15234 | Aseguramiento de la calidad del combustible – Biocombustibles sólidos |
| EN 14961-1 | Biocombustibles sólidos – especificaciones del combustible y las clases – Parte 1: Requisitos generales |

Para la determinación de Poder Calorífico se utilizó el Calorímetro LECO AC500. Para la determinación del Carbono, Nitrógeno, e Hidrógeno se utilizó el analizador LECO TruSpec CHN. Para la Determinación del Azufre, se utilizó el analizador LECO TruSpec S. Para la determinación del Cl, se utilizaron titulador semiautomático Metler Toledo G20.

## 4.3.1.- Determinación del contenido de humedad.

Para la determinación del contenido de humedad de las muestras, se utilizó la Norma UNE-EN 14774-3 A continuación se esquematiza el procedimiento seguido:

1. Preparación de los recipientes de secado, etiquetándolos del 1 al 30.
2. Peso de cada recipiente de secado con una báscula de precisión de 0,001 g.
3. Transferencia de entre 1 y 5 gramos de muestra desde cada contenedor hermético a su correspondiente recipiente de secado.
4. Peso de cada recipiente de secado con la muestra mediante báscula de precisión de 0,001 g.
5. Introducción de los recipientes con las muestras en una estufa de secado a una temperatura de 105 ± 2 ºC.
6. Tras 24 horas de secado, se pesaron los recipientes con la muestra ya seca, en la báscula de precisión, teniendo en cuenta realizar este pesado entre los 10 – 15 segundos después de sacar las muestras de la estufa para evitar la absorción de humedad ambiental por parte de la muestra.
7. Cálculo del contenido de humedad, expresado como porcentaje de masa, mediante la ecuación 14.

 Ecuación 14

Dónde:

* + - * + Mar es el contenido de humedad del biocombustible;
        + m1 es la masa en gramos del recipiente de secado vacío;
        + m2 es la masa en gramos del recipiente de secado y la muestra antes del secado;
        + m3 es la masa en gramos del recipiente de secado y la muestra después del secado.
        + \*m4 es la masa en gramos de la humedad del embalaje.

## 4.3.2. Determinación de la densidad de la madera.

La densidad de la madera se expresa como masa de madera seca por unidad de volumen en verde. Para calcular la densidad, primero se determina el volumen en verde mediante la inmersión de las muestras. Estas fueron sumergidas en un vaso de precipitados con agua, calibrado para 250 mililitros. La diferencia entre el volumen de agua desplazada equivale al volumen de la muestra sumergida (ecuación 11) (Husch et al., 2003). Se calcularon la media y la desviación típica para las densidades obtenidas, en total se realizaron catorce mediciones. Los materiales utilizados para esta determinación fueron un matraz de destilación con un tubo de vertido en el cuello, un vaso de precipitados de 250 ml, agua destilada, una báscula de precisión 0,001 g, y 14 muestras de madera. Por otra parte, se determinó el peso seco de las muestras, para ello se introdujeron las muestras en un horno de secado a una temperatura constante de 105 +- 2º C durante 24 horas.

Para la determinación del volumen de las muestras, se llenó el matraz de destilación hasta que el agua destilada sobrepasaba el tubo situado en el cuello, permitiendo que el exceso de agua se perdiese por el mismo. Una vez aforado, se introducía la pieza de madera que, al tener, en verde, una densidad superior a la del agua, se hundía sin necesidad de ayuda adicional. El ascenso del nivel del agua por efecto del desplazamiento que de la misma hacía el objeto introducido, provoca que esta se escape por el orificio del centro del cuello del matraz hasta volver a aforarse. El líquido vertido se recoge en un recipiente de peso conocido y se calcula el volumen en función del peso del agua destilada recogida en una báscula de precisión de 0,001g.

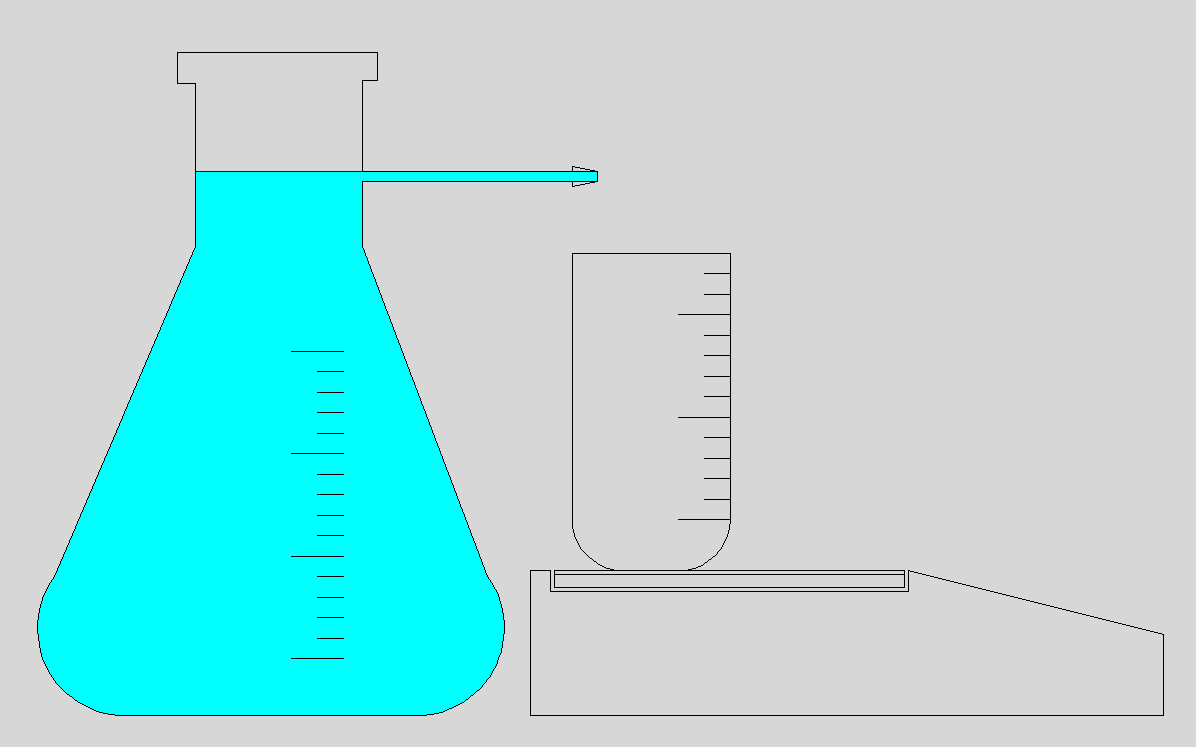


Figura 6.- sistema de determinación del volumen de la muestra.

A los datos obtenidos se les aplica la ecuación 15 para la determinación de la densidad de cada muestra

 Ecuación 15

Dónde:

*ρm* = Densidad de la madera (g/cm3),

*Ps* = Peso seco de la muestra (g),

*Vv* = Volumen en verde de la muestra (cm3)

# 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1.- ANÁLISIS DENDROMÉTRICO DE pies

En la Tabla 6 se muestra el resumen estadístico para cada una de las variables medidas en las varas y en los pies. Incluye estadísticos de posición, dispersión, y de forma. De particular interés aquí son los coeficientes de asimetría y de curtosis estandarizada, los cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. Se observa que tanto los pies como las varas cumplen la condición de estar dentro de este intervalo, excepto en la variable volumen total cuyo valor es de 2,44 y 5,55 respectivamente. En el caso de los pies esto puede ser debido a que se tomaron como individuos los pies junto a sus bifurcaciones, y también las bifurcaciones considerándolas individuos independientes, existiendo un mayor número de evaluaciones realizadas en estructuras pequeñas que en grandes. Sin embargo por la poca desviación del rango establecido [-2,+2] se considera que es posible tomar esta variable en modelos de regresión posteriores sin problemas de significación.

Tabla 6. Descripción estadística de la población estudiada

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Resumen Estadístico | Varas | | |  | Pies | | |  |
|  | Dv | Lv | Vv |  | Dr | Lr | Vr |  |
| Recuento | 47 | 47 | 47 |  | 26 | 26 | 26 |  |
| Promedio | 1,53 | 83,83 | 129,30 |  | 2,48 | 209,65 | 561,65 |  |
| Desviación Estándar | 0,61 | 48,67 | 145,42 |  | 0,98 | 86,85 | 500,20 |  |
| Mínimo | 0,62 | 10,00 | 3,43 |  | 1,15 | 50,00 | 70,23 |  |
| Máximo | 2,97 | 190,00 | 641,85 |  | 4,45 | 400,00 | 1973,36 |  |
| Rango | 2,35 | 180,00 | 638,42 |  | 3,30 | 350,00 | 1903,14 |  |
| Coeficiente de asimetría | 1,911 | 0,902 | 5,521 |  | 0,851 | 0,542 | 2,443 |  |
| Curtosis Estandarizada | -0,405 | -1,133 | 5,555 |  | -0,983 | -0,443 | 1,030 |  |

Dv es el diámetro de la base de una vara, Lv, es la longitud de la vara (entre la base y su bifurcación), Vv es el volumen de la vara. Dr es el diámetro de la base del pié, Lr es la longitud desde la base del pié hasta la terminación de la rama más larga. Vr es el volumen real del pié (incluyendo las bifurcaciones).

Del mismo modo, en el caso de las varas, al analizar las varas de cada pié, existían más varas finas que gruesas, dado que las finas surgen de bifurcaciones sucesivas de cada pié. Por tanto se presentan dos grupos claramente diferenciados en cuanto al volumen: por una parte están las “varas finas” muy numeroso que serían los últimos tramos de cada rama; y por otro las “varas gruesas” que serían las secciones iniciales del pié, entre la base y el punto de bifurcación. Así, encontramos un grupo de varas cortas y finas y otro de gruesas y largas con volúmenes estadísticamente normales. A pesar de ello, se observa en la Tabla 6 que la desviación respecto a los estadísticos de la forma de la distribución de los datos no se aleja excesivamente de los valores considerados normales y por tanto se considera que no invalida el valor del factor de forma ni las funciones de volumen.

En la Tabla 7 se muestra el análisis de los factores de forma para los diferentes modelos de volúmenes de revolución considerados. Para ello se han seleccionado 47 varas de diferentes diámetros correspondientes a secciones de pie comprendidas entre dos bifurcaciones o el final de la rama cuando no existían bifurcaciones.

Tabla 7. Descripción estadística de los factores de forma de varas para los distintos modelos geométricos

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **fCilindro** | **fParaboloide** | **fCono** | **fNeiloide** | |
| Factor de forma medio | | 0,819234 | 1,63843 | 2,45772 | 3,27691 |
| Desviación Estándar | | 0,322355 | 0,644668 | 0,967001 | 1,28948 |
| Mínimo | | 0,289 | 0,579 | 0,868 | 1,158 |
| Máximo | | 1,5 | 3 | 4,499 | 5,999 |
| Rango | | 1,211 | 2,421 | 3,631 | 4,841 |
| Coeficiente de asimetría | | 0,548072 | 0,548618 | 0,547796 | 0,547322 |
| Curtosis Estandarizada | | -0,819303 | -0,817875 | -0,819342 | -0,81994 |

Se puede observar que el factor de forma más cercano a la unidad es el cilindro, por tanto, es la figura que mejor representa la forma de la vara, aunque hay que apuntar la elevada dispersión encontrada. Del mismo modo, la Tabla 8 nos muestra los mismos parámetros para los 26 pies estudiados.

Tabla 8. descripción estadística de los factores de forma de pies para los distintos modelos geométricos

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **fCilindro** | **fParaboloide** | **fCono** | **fNeiloide** | |
| Factor de forma medio | | 0,906538 | 1,81304 | 2,71958 | 3,62612 |
| Desviación Estándar | | 0,337517 | 0,675165 | 1,01252 | 1,3502 |
| Mínimo | | 0,432 | 0,863 | 1,295 | 1,726 |
| Máximo | | 1,5 | 3 | 4,499 | 5,999 |
| Rango | | 1,068 | 2,137 | 3,204 | 4,273 |
| Coeficiente de asimetría | | 0,920317 | 0,921807 | 0,920617 | 0,920227 |
| Curtosis Estandarizada | | -1,33289 | -1,33197 | -1,3326 | -1,33288 |

El factor de forma más cercano es, igualmente el cilindro, mejorando los valores obtenidos para las varas, si bien los valores de dispersión aumentan.

Para la obtención de las funciones de volumen de pie se analizaron como variables explicativas el diámetro medio en cm y la longitud cm. La Tabla 9 muestra el resultado del mejor ajuste en un modelo de regresión lineal múltiple que establece la relación entre VR medido en cm3 y las variables independientes descritas.

Tabla 9. Función de volumen de pie (incluidas bifurcaciones) de *Tamarix africana* L

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ecuación | R2 | EMA | RMS |
|  | 0,96 | 77 | 106 |

D= diámetro medio de la base en cm ; VR total de la rama incluidas bifurcaciones medido en cm3 ; R2 coeficiente de determinación, EMA= error medio absoluto, RMS= desviación típica de los errores

Figura 7. Relación entre el Diámetro Basal medio de rama y el Volumen de madera de la misma (incluidas ramificaciones)

El valor-P en el análisis ANOVA del modelo resultó ser menor que 0,05, por tanto, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza mayor del 95,0%. El estadístico R2 indica que el modelo así ajustado explica 95,87% de la variabilidad del volumen de la rama. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 106,078 cm3. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones. El error absoluto medio (EMA) de 77,12 cm3 es el valor promedio de los residuos.

## 5.2.- Análisis de la Planta Entera

Tras medir los diámetros medios de la proyección, la altura total y calcular el volumen total de las matas seleccionadas mediante suma de los volúmenes de cada pié que la forman, en la Tabla 10 se muestra el factor de ocupación FO respecto al modelo cilíndrico, es decir, la relación entre el volumen real de la mata, formado por madera, y el volumen aparente formado por el cilindro con diámetro igual al de la proyección y altura la de la mata.

Tabla 10. Obtención del factor de ocupación de *Tamarix africana* L

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | DM  (cm) | A  (cm) | VT  (cm3) | FO  (dm3/m3) |
| Nº de mediciones | 32 | 32 | 32 | 32 |
| Promedio | 2,46 | 2,99 | 9366,54 | 0,61 |
| Desviación Estándar | 0,54 | 0,38 | 4610,51 | 0,18 |
| Mínimo | 1,02 | 2,16 | 513,67 | 0,28 |
| Máximo | 3,51 | 3,6 | 16519,0 | 1,03 |
| Rango | 2,49 | 1,44 | 16005,3 | 0,76 |
| Coeficiente de asimetría | -0,94 | -1,64 | -0,48 | 0,52 |
| Coeficiente de curtosis | 1,61 | 0,82 | -0,44 | 0,23 |

En la Tabla 11 se muestra el ajuste de un modelo de regresión exponencial para describir la relación entre VT y el diámetro medio de la proyección de la mata.

Tabla 11. Función de volumen de rodal de *Tamarix africana* L

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ecuación | R2 | EMA | RMS |
|  | 0,95 | 0,24 | 0,19 |

Dp= diámetro medio de la proyección de la mata en cm ; VT total de la mata incluida bifurcaciones medido en cm3 ; R2 coeficiente de determinación, EMA= error medio absoluto, RMS= desviación típica de los errores

Figura 8. Relación entre el Diámetro Medio de la Proyección y el Volumen Total de la Madera de la Mata

Si tomamos logaritmos podemos representar esta relación en su forma lineal:



Figura 9. Relación entre el Diámetro Medio de la Proyección y el LN del Volumen Total de la Madera de la Mata

El valor-P del análisis de varianza al que se somete el modelo resultó menor de 0,05. Así que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-Cuadrada nos indica que el modelo así ajustado explica 94,44% de la variabilidad en VT. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94,26%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,249862. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones. El error absoluto medio (EMA) de 0,19 cm3 es el valor promedio de los residuos.

La estructura logarítmica de la ecuación obtenida coincide a las presentadas por Montero et al. (2005) cuando presento las ecuaciones alométricas para la obtención de la biomasa de los árboles forestales de la Península Ibérica.

## 5.3.- Caracterización de la Biomasa.

La humedad media en el momento del corte correspondió a un 43,11% en base húmeda, con una desviación típica del 1%. En el caso de ser utilizados estos materiales como combustible sólido se requiere que su humedad descienda como mínimo al 10%. Por esa razón se analiza la densidad del material seco y al 10% de humedad, siendo 1,18 g/ml en verde y de 0,67 g/ml en seco.

Las características termoquímicas del *Tamarix africana* L. se representan en la Tabla 12

Tabla 12. Características termoquímicas

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | %C | %H | %N | %Cl | %S | PCS  (MJ/kg) | Densidad seca  (g/cm3) | Densidad  (10% humedad)  (g/cm3) |
| Media | 41,79 | 6,25 | 1,04 | 0,18 | 0,84 | 17,21 | 0,67 | 1,18 |
| Desviación típica | 1,54 | 0,16 | 0,47 | 0,08 | 0,22 | 0,38 | 0,02 | 0,02 |
| Mix | 40,60 | 6,04 | 0,46 | 0,08 | 0,47 | 20,72 | 0,64 | 1,14 |
| Max | 42,31 | 6,66 | 1,99 | 0,30 | 1,25 | 19,50 | 0,71 | 1,22 |
| Coeficiente de asimetría | 1,60 | 1,29 | 0,89 | 0,34 | 0,85 | -0,46 | 0,83 | 0,34 |
| Coeficiente de curtosis | 0,34 | 1,89 | -0,84 | -1,19 | -0,55 | -0,07 | -0,81 | -0,52 |

La norma EN 14694-Parte 4 establece las especificaciones de las astillas procedentes del monte, plantaciones y otra madera virgen, residuos de madera no tratada químicamente, así como subproductos y residuos de la industria de procesado de la madera, y madrea usada para su uso como combustible. Éstas se detallan en la Tabla 13

Tabla 13. Especificaciones exigidas a las astillas de madera como biocombustibles según EN 14694-Parte 4

|  |  |
| --- | --- |
| Parámetro | Nomenclatura |
| Cenizas | A3< 3% |
| Poder Calorífico | Q13>13 MJ/kg\* |
| % Nitrógeno | N1.0<1.0 % |
| % Azufre | S0.1<0,1 % |
| % de Cloro | Cl0.05<0.05 % |

Como se puede comprobar los contenidos de Cloro y azufre son más altos de lo requerido pero se hace viable mezclar estos materiales con otros de menor contenido en estos elementos para su corrección y utilización como biocombustible en forma de astilla.

Para comprobar si existen diferencias entre las piezas de distinto diámetro en cuanto a PCS y composición se realizaron análisis en finos que corresponden a hojas, ramas entre 0 y 1 cm, entre 1 y 2 cm, entre 2 y 3 cm, entre 3 y 4 cm, entre 4 y 5 cm, y entre 5 y 6 cm, efectuando análisis de varianza. Como se puede comprobar en la Tabla 14 existen diferencias significativas exclusivamente en el porcentaje de nitrógeno, cloro y azufre, siendo los finos los que mayor porcentaje presentan, cosa que resulta obvia por su función fotosintética. Los valores más altos de N en los finos hay que tenerlos en cuenta si se utiliza estos materiales en la fabricación e pélets, puesto que del contenido de N depende su clasificación en calidad según la norma UNE-EN 14961-2.

Tabla 14. Comparación en las características termoquímicas de las distintas estructuras de la planta

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| D | %C | %H | %N | %S | %Cl | PCS (MJ/kg) |
| Finos | 40,80a | 6,06a | 1,91a | 1,188a | 0,230ab | 17,42a |
| 0-1 | 43,46a | 6,30a | 0,89bc | 0,604b | 0,116c | 18,23a |
| 1-2 | 44,10a | 6,32a | 0,54bc | 0,616b | 0,255a | 17,93a |
| 2-3 | 43,96a | 6,38a | 0,67bc | 0,719ab | 0,260a | 17,96a |
| 3-4 | 42,86a | 6,27a | 0,86bc | 0,783ab | 0,179b | 18,25a |
| 4-5 | 41,73a | 6,15a | 1,28b | 0,989a | 0,129c | 17,66a |
| 5-6 | 41,96a | 6,22a | 1,39b | 0,862a | 0,121c | 17,27a |

En la Tabla 15 se muestra la relación de peso entre madera y finos en las plantas de *Tamarix africana* L. Esta relación debe ser usada para la corrección de los contenidos de N y Cl si se desea que sus valores no sobrepasen un determinado nivel.

Tabla 15. Porcentajes de peso de madera y finos (hojas) Tamarix africana L. en base seca.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | % Madera | % Finos |
| Recuento | 14 | 14 |
| Promedio | 35,51 | 64,48 |
| Desviación Estándar | 8,98 | 8,99 |
| Coeficiente de Variación | 25,30% | 13,93% |
| Mínimo | 23,05 | 48,71 |
| Máximo | 51,28 | 76,94 |
| Rango | 28,22 | 28,22 |
| Coeficiente de asimetría | 0,38 | -0,38 |
| Coeficiente de Curtosis | -1,02 | -1,02 |

El porcentaje de carbono analizado nos permite evaluar la capacidad de absorción de CO2 de esta especie. El volumen medio de la planta entera obtenido en este trabajo ha sido de 9366,54 cm3. Este valor multiplicado por la densidad seca 0,6712 g/cm3 nos proporciona una masa media de 6286,82 g/planta (6,29 kg/planta) y una masa de carbono capturado de 2,57 kg/planta. Con un poder calorífico superior en base seca (PCS) de 17,21 MJ/kg, se obtiene una energía total por planta de 108,20 MJ/planta. Por tanto, una plantación de 2.666 plantas por hectárea proporciona 16760 kg de biomasa/ha (16,76 t/ha), supone 6,87 t de CO2 capturado por hectárea y una energía calorífica almacenada de 288451,07 MJ/ha.

La plantación donde se ha realizado el estudio contaba, en el momento de la toma de muestras, con 5 años de implantación, lo que supone que por ha y año los valores serán:

* Producción: 16760 kg / 5 años = 3352,13 kg / ha año
* CO2: 6,87 t/ ha año / 5 años = 1,37 kg / ha año
* Poder calorífico: 288451,07 MJ/ha / 5 años = 57690,21 MJ / ha año
* Poder energético: 57690,21 MJ / ha año = 16025,06 kWh / ha año

Con un precio estimado del kWh de Biomasa de 0,03 €/kWh, el ingreso anual de una plantación con estas características por la energía sería de 480,75 €/ha año

# 6.- CONCLUSIONES

*Tamarix africana* L. se presenta como una alternativa de cultivo energético adaptado a suelos salinos en zonas con inundaciones ocasionales, resistente a las altas temperaturas y periodos estivales prolongados que caracterizan al área mediterránea dado que su poder calorífico superior de 17,21 MJ/kg es similar al de otras maderas forestales como la de pino o chopo destinadas a astillas para combustión en caldera que se sitúa entre 17 y 19 MJ/kg aunque con una mayor densidad (630 Kg/m3 frente a otras especies como el pino (500 kg/m3) o el chopo (400 kg/m3), lo que representa un importante factor desde el punto de vista logístico.

La humedad del material recién cortado oscila entorno al 43%, lo que obliga a desecación para su uso como biocombustible.

Se ha llevado a cabo la caracterización dendrométrica con el fin de poder calcular de manera indirecta la biomasa disponible a partir de mediciones sencillas como el diámetro o la altura, tanto en estructuras individuales como en matas enteras. Esta caracterización se ha realizado a dos niveles: En primer lugar se han obtenido factores de forma de las ramas, que han demostrado que la forma que mejor se ajusta a la forma de la rama es el cilindro; en segundo lugar obtenido una función que permite conocer la cantidad de madera existente en cada vara con suficiente precisión.

La determinación de la densidad (0,63 g/cm3) y los porcentajes de C, H, N, S y Cl aplicados a las funciones de volumen permiten determinar de forma precisa la energía contenida por planta o cualquier estructura, el CO2 capturado y el contenido de estos elementos, lo cual es imprescindible para una adecuación de los mismos en mezclas con otros materiales para la fabricación de biocombustibles. Esto es muy importante, puesto que el contenido especialmente de N, S y Cl determinan la calidad de los mismos.

Los contenidos de Cloro y azufre son más altos de lo requerido según la norma UNE EN 14694-Parte 4 sobre la calidad de las astillas procedentes del monte, plantaciones y otra madera virgen, residuos de madera no tratada químicamente, así como subproductos y residuos de la industria de procesado de la madera, y madera usada para su uso como combustible, pero se hace viable mezclar estos materiales con otros de menor contenido en estos elementos para su corrección y utilización como biocombustible en forma de astilla, briquetas o pélet industrial.

La determinación del porcentaje de C (de 41%), ha permitido la evaluación de este material como sumidero de dióxido de carbono, estimando una captación media de 2,58 kg/planta.

Finalmente los modelos dendrométricos ofrecen herramientas para evaluar crecimientos y desarrollo de las plantas cuando éstas sean utilizadas como elementos de restauración paisajística, fluvial y de protección del suelo, así como la posibilidad de gestionar y conservar los humedales y otros espacio naturales por el efecto desalinizador que esta especie posee y que puede proporcionarle una doble función.

Este estudio proporciona las herramientas necesarias para determinar la viabilidad de *T. africana* con fines energéticos. No obstante queda un amplio campo de investigación para poder determinar su rentabilidad como cultivo. Habría que determinar el marco de plantación más rentable, técnicas de cultivo, turnos de corta, etc.

# 7.- BIBLIOGRAFÍA

**ADROVER, M.; FORSS, A. L.; RAMON, G.; VADELL, J.; MOYA, G.; TABERNER, A. M.** (2008). Selection of woody species for wastewater enhancement and restoration of riparian woodlands. Journal of environmental biology; 29(3):357-61.

[**ASKEW, M.F**](http://wos23.isiknowledge.com/CIW.cgi?SID=Z65KBj4kG48lHE1IeHO&Func=OneClickSearch&field=AU&val=Askew+MF&curr_doc=2/26&Form=FullRecordPage&doc=2/26)**.; HOLMES, C.A.** (2002) The potential for biomass and energy crops in agriculture in Europe, in land use, policy and rural economy terms (Reprinted from Aspects in Applied Biology, vol 65, pg 365-374, 2001), International Sugar Journal 104(1247): 482

**BARRIO, M.; SIXTO, H.; CANELLAS, I.; GONZÁLEZ, F**. (2007) Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de Populus x euramericana (Dode) Guinier cv. en la meseta norte y centro de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales; 16(1), 65-75.

**BUCKLEY, T.J.** (1991) Calculation of higher heating values of biomass materials and waste components from elementals analyses. Resour Conserv and Recy; 5:329-341. Doi:1016/0921- 3449(91)90011-C.

**CALLEJÓN-FERRE, AJ.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.A.; MANZANO-AGÜGLIARO, F.** (2011) Greenhouse crop residues: energy potential and models for the prediction of their higher heating value. Renew Sust Energy Rev; 15:948-55, doi:10.1016/j.rser.2010.11.012.

**CAO, Q.; BURKHART, H.; Max, T.** (1980) Evaluation of two methods for cubic-foot volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit; For Sci 26, 71-80.

**CIRUJANO, S.; CASTILLO, J.L.** (1990) [Anales del Jardín Botánico de Madrid](http://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=80); 48 (2) 273-274.

**CIRUJANO, S.** (1993) Flora Ibérica. Real Jardín Botánico. CSIC, Tomo III. LCVII 437-440

**Chun-Yang, Yin.** (2011) Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. Fuel; 90: 1128–1132.

**CLEVERING O.A., BRIX H., LUKAVSKÁ J. (**2001). Geographic variation in growth responses in Phragmites australis. Aquatic Botany 69 (2001) 89–108

**COSTA, R.; MAC DONAGH, P.; WEBER, E.; FIGUEREDO, S.; GÓMEZ, C.; IRSCHICK, P.** (2006)Modelos predictivos de la producción de *Pinus taeda* empleando variables vinculadas con las podas. Bosque; 27(2): 98-107.

**DE BAETS, S; POESEN, J.; KNAPEN, A.; BARBERA, G.G.; NAVARRO, J.A.; BARBERÁ, G.G.** (2007) Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. Plant and soil; 294(1-2):169-183.

**DE BAETS, S.; POESEN, J.; REUBEBS, B.; WEMANS, K.; DE BAERDEMAEKER, J.; BAETS, S.; BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B.** (2008) Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. Plant and soil; 305(1-2):207-226.

**Demirbaş, A.** (2007) Mathematical modeling the relations of biomass fuels based on proximate analysis. Energy Source A; 29;1017-23, doi:10.1080/00908310500433855.

**DIÉGUEZ, U.; BARRIO, M.; CASTEDO, F.; ALVEREZ, M.F.; RUIZ, A.D.; ÁLVAREZ, J.G.; y ROJO, A**. (2003) Dendrometria. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. 160-205 pp.327 pp.

**Erol, H.; Haykiri-Acma, S.; Kücükbayrak.** (2010) Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. Renewable Energy; 35:170–173.

**FRIEDL, A.; PADOUVAS, E.; ROTTER, H.; VARMUZA, K.** (2005) Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. Anal Chim Acta; 544:191-8, doi:10.1016/j.aca.2005.01.04

**HUSCH, B.; BEERS, T.W.; KERSHAW, J.A. JR.** (2003) Forest Mensuration, John Wiley & Sons, INC.

**KARUNARATNE, S.; ASAEDA, T.** (2002)Mathematical Modeling as a Tool in Aquatic Ecosystem Management. Journal of environmental engineering 2002;128(4):352-359.

**LENCINAS, M.; MARTINEZ PATUR, G.; CELLINI, J.; VUKASOVIC, R.; PERI, P.; FERNÁNDEZ M.** (2002) Incorporación de la altura dominante y la clase de sitio a ecuaciones estándar de volumen para *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted. *Bosque (Valdivia)* [online]. 2002, vol. 23, no. 2, 5-17.

**MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PITKÄNEN, J.; HYYPPA, J.; VEHMAS, M.** (2004) Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. Remote sensing of environment, 90(3): 319-330.

**MONTERO, G., RUIZ-PEINADO, R., MUÑOZ M**. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie Forestal 13-2005.

**NACKLEY, L.; LIEU, V.H.; GARCIA, B.B.; RICHARDSON, J.; ISAAC, E,; SPIES, K.; RIGDON, S.; SCHWARTZ, D.T.** (2013) Bioenergy that supports ecological restoration. Frontiers in ecology and the environment; 11(10):535-540.

**PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K.** (2007) A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. Fuel; 86:1710-19, doi:10.1016/j.fuel. 2006.12.029.

**PEN MOURATOV, S.; SHUKUROV N.; YU, J; RAKHMONKULOVA, S.; KODIROV, O.; BARNESS, G.; KERSTEN, M.; STEINBERGERt, Y.** (2014). Successive development of soil ecosystems at abandoned coal-ash landfills. Ecotoxicology; 23(5):880-897.

**POIRET, J.L.M.** (1789) Voyage en Barberie; 2:139.

**PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. (**1997) Mensura Forestal. IICA-BMZ/GTZ. San José. Costa Rica. 561pp.

**SANTI, G.; D.A.** (2014) Ethanol production from xerophilic and salt-resistant Tamarix jordanis biomass. Biomass & bioenergy; 61:73-81.

**TALLENT HALSELL, N.G.; WALKER, L.R.** (2002) Responses of Salix gooddingii and Tamarix ramosissima to flooding. Wetlands; 22(4):776-785

**TOMAR, O.S.; MINHAS, P.S.; SHARMA, V.K.; SINGH, Y.P.; GUPTA, R.K.** (2003) Performance of 31 tree species and soil conditions in a plantation established with saline irrigation. Forest ecology and management; 177(1-3):333-346.

**TRINCADO, G.; GADOW, K.; SANDOVAL, V.** (1997) Estimación de volumen comercial en latifoliadas. Bosque 18(1), 39-44.

**VARGAS-MORENO, JM.; CALLEJÓN-FERRE, A.J.; PÉREZ-ALONSO, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.** (2012) A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. Ren Sust Ener Rev.;16(5):3065-83.

**VELÁZQUEZ-MARTÍ, B**. (2006) Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2006-766.

**VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, E.** (2010) Mathematical algorithms to locate factories to transform biomass in bioenergy focused on logistic network construction. Renew Energy; 35: 2136-42, doi: 10. 1016/j.renene.2010.02.011

**VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, E.; ESTORELL, J.; RUIZ L.A**. (2010). Dendrometric and dasometric analysis of the bushy biomass in Mediterranean forests. Forest Ecology and Management 259: 875-882

**VELÁQUEZ-MARTÍ, B.; SAJDAK, M.; LÓPEZ-CORTÉS, I.; CALLEJÓN-FERRE, A.J.** (2014) Wood characterization for energy application proceeding from pruning Morus alba L., Platanus hispanica Münchh. and Sophora japonica L. in urban áreas. Renewable Energy 62: 478-483

**XIAO, L.; SHI, Z.; BAI, Y.; XU, F.; SUN, R.** (2012) Hydrothermal treatment of Tamarix ramosissima: Evaluation of the process as a conversion method in a biorefinery concept. In: Proceeding of the 4TH International Conference on Pulping, Papermaking and Biotechnology (ICPPB . Nanjing: Nanjing Forestry Univ; 1028-1033.

**YONG ZHONG SU; XUE FEN, W.; RONG, Y.; XIAO, Y.; WEN JIE, L.; WEN-JIE; YONG ZHONG, W.; XUE FEN, Y.; XIAO, L.** (2012) Soil Fertility, Salinity and Nematode Diversity Influenced by Tamarix ramosissima in Different Habitats in an Arid Desert Oasis. Environmental management; 50(2):226-236.

# Anexo 1.

Localización de las plantas muestreadas en el banco clonal.

