

INDICE CONTENIDOS

Capítulo	Pág.
1. INTRODUCCION	3
1.1 Justificación y antecedentes	3
1.1.1 Definición de biomasa agroforestal	3
1.1.2 Principales ventajas e inconvenientes de la biomasa como fuente de energía renovable	4
1.1.3 Situación actual del aprovechamiento de la biomasa agroforestal como fuente de energía renovable	7
1.1.4 Perspectivas de futuro para el aprovechamiento sostenible y valorización bioenergética de la biomasa agroforestal	26
1.1.5 Programas de implementación de proyectos y conocimiento científico de biomasa agroforestal como fuente de energía	40
1.2 Estado del arte	48
1.2.1 Clasificación de recursos biomásicos de origen agrícola y forestal en condiciones mediterráneas	48
1.2.2 Caracterización morfológica de la biomasa de origen agroforestal	51
1.2.3 Caracterización física de la biomasa de origen agroforestal	56
1.2.4 Caracterización química de la biomasa de origen agroforestal	60
1.2.5 Caracterización energética de la biomasa de origen	65

agroforestal	
1.2.6 Cálculo de existencias y posibilidades de biomasa agroforestal	69
1.2.7 Experiencias sobre planificación y gestión de la biomasa de base agroforestal	76
2. OBJETIVOS	87
2.1 Objetivo general	89
2.2 Objetivos específicos	89
3. MATERIALES Y MÉTODOS	91
3.1 Selección de especies	93
3.1.1 Estudio previo de distribución de especies leñosas en el medio forestal y agrícola	93
3.1.2 Especies leñosas seleccionadas	97
3.2 Diseño muestral de áreas y toma de muestras	104
3.2.1 Selección de parcelas	105
3.2.2 Selección de individuos	107
3.2.3 Toma de muestras	109
3.2.4 Recolección de muestras	110
3.3 Caracterización morfológica	113

3.3.1 Porcentaje de albura y duramen	113
3.3.2 Porcentaje de corteza	114
3.4 Caracterización física de las astillas	116
3.4.1 Determinación de densidad	116
3.4.2 Determinación de la humedad	118
3.5 Caracterización química de las astillas	121
3.5.1 Determinación de la materia seca	122
3.5.2 Mineralización y determinación del contenido en cenizas	123
3.5.3 Análisis elemental	125
3.5.4 Análisis secundario	129
3.6 Caracterización energética de las astillas	134
3.6.1 Poder calorífico	135
3.6.2 Cenizas	138
3.6.3 Volátiles	139
3.7 Caracterización volumétrica de la biomasa aérea	141
3.7.1 Relación diámetro y volumen fustal	141
3.7.2 Clases diamétricas	142
3.7.3 Morfología en fuste	143

3.7.4	Determinación de volumen de ramas y copa	144
3.7.5	Relación volumen de copa y volumen fustal	145
3.7.6	Estimación de un modelo de predicción de volumen en ramas	145
3.8	Cuantificación biomásica y energética potencial por especie	147
3.8.1	Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea	147
3.8.2	Determinación del potencial energético por árbol y superficie	147
3.9	Análisis de la astilla	149
3.9.1	Tableros de partículas	149
3.9.2	Biocombustibles sólidos: pellets	149
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	151
4.1	Caracterización morfológica	153
4.1.1	Especie forestal mediterránea	153
4.1.2	Cultivo energético leñoso	155
4.1.3	Especies agrícolas leñosas	156
4.2	Caracterización física	160
4.2.1	Especie forestal mediterránea	160
	<i>a) Humedad</i>	160

<i>b) Densidad</i>	161
4.2.2 Cultivo energético leñoso	162
<i>a) Humedad</i>	162
<i>b) Densidad</i>	163
4.2.3 Especies agrícolas leñosas	164
<i>a) Humedad</i>	164
<i>b) Densidad</i>	167
4.3 Características químicas	171
4.3.1 Especie forestal mediterránea	172
<i>a) Análisis elemental</i>	172
<i>b) Análisis secundario</i>	173
4.3.2 Cultivo energético leñoso	174
<i>a) Análisis elemental</i>	174
<i>b) Análisis secundario</i>	175
4.3.3 Especies agrícolas leñosas	176
<i>a) Análisis elemental</i>	176
<i>b) Análisis secundario</i>	177
4.4 Características energéticas de la biomasa	178
4.4.1 Especie forestal mediterránea	178
<i>a) Poder calorífico</i>	178
<i>b) Porcentaje de cenizas</i>	179
<i>c) Materia volátil</i>	181

4.4.2 Cultivo energético leñoso	181
a) <i>Poder calorífico</i>	182
b) <i>Porcentaje de cenizas</i>	183
c) <i>Materia volátil</i>	184
4.4.3 Especies agrícolas leñosas	185
a) <i>Poder calorífico</i>	185
b) <i>Porcentaje de cenizas</i>	188
c) <i>Materia volátil</i>	190
4.5 Cuantificación volumétrica	192
4.5.1 Especie forestal mediterránea	192
a) <i>Determinación clases diamétricas y altura de fuste</i>	192
b) <i>Determinación del factor de forma</i>	195
c) <i>Determinación volumen fustal</i>	197
d) <i>Relación diámetro y volumen fustal</i>	198
4.5.2 Cultivo energético leñoso	199
a) <i>Determinación clases diamétricas</i>	199
b) <i>Determinación del factor de forma</i>	201
c) <i>Análisis del volumen aparente versus volumen real</i>	202
d) <i>Relación entre diámetro y volumen fustal aparente</i>	204
e) <i>Determinación del volumen en diferentes zonas geográficas de la Comunidad Valenciana</i>	206
4.5.3 Especies agrícolas leñosas	209
a) <i>Determinación de las clases diamétricas del fuste</i>	209
b) <i>Determinación factor de forma</i>	212
c) <i>Determinación volumen fustal</i>	214
d) <i>Relación diámetro y volumen fustal</i>	215

e) <i>Determinación clases diamétricas en ramas</i>	218
f) <i>Función de volumen en ramas</i>	220
g) <i>Determinación del volumen de copa</i>	221
h) <i>Relación del volumen del fuste y volumen de copa</i>	223
4.6 Cuantificación biomásica y energética	225
4.6.1 Especie forestal mediterránea	225
a) <i>Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea</i>	225
b) <i>Determinación del potencial energético por árbol y superficie</i>	227
4.6.2 Cultivo energético leñoso	230
a) <i>Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea</i>	230
b) <i>Determinación del potencial energético potencial por árbol y superficie</i>	233
4.6.3 Especies agrícolas leñosas	235
a) <i>Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea</i>	235
b) <i>Determinación del potencial energético por árbol y superficie</i>	242
4.7 Análisis Cualitativo del material	250
4.7.1 Cumplimiento de requisitos cualitativos para tableros de partículas	250
4.7.2 Cumplimiento de requisitos cualitativos para biocombustible sólidos	251

5. CONCLUSIONES	255
6. BIBLIOGRAFIA	267
Escrita	269
Internet	293
ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Distribución del uso energético de energías renovables en España	21
Tabla 2	Producción potencial de biomasa en Europa 2010 -2030	31
Tabla 3	Variación estacional del contenido de humedad especies forestales (%)	57
Tabla 4	Porcentaje de participación de algunos componentes químicos en coníferas y latifoliadas	62
Tabla 5	Composición química de especies forestales y arbustivas mediterráneas	63
Tabla 6	Poder calorífico superior (PCS) para especies arbóreas de clima Mediterráneo	66
Tabla 7	Contenido de cenizas de especies forestales y arbustos mediterráneos	67
Tabla 8	Materia volátil en cultivos agrícolas y en follaje de una especie forestal	68
Tabla 9	Porcentaje de superficie ocupada por especies forestales en la Comunidad Valenciana	93
Tabla 10	Distribución de la superficie de cultivos agrícolas leñosos por CC. AA.	95
Tabla 11	Distribución de la superficie de los cultivos agrícolas leñosos seleccionados en la región de estudio.	102
Tabla 12	Caracterización morfológica del fuste de <i>Quercus ilex</i>	152
Tabla 13	Caracterización morfológica del fuste de <i>Paulownia spp.</i>	153
Tabla 14	Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de <i>Citrus sinensis</i>	155

Tabla 15	Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de <i>Olea europaea</i>	155
Tabla 16	Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm <i>Prunus amygdalus</i>	155
Tabla 17	Caracterización morfológica en ramas con diámetro \geq a 7,0 cm de <i>Citrus sinensis</i>	158
Tabla 18	Caracterización morfológica en ramas con diámetro \geq a 7,0 cm <i>Olea europaea</i>	158
Tabla 19	Contenido de humedad, en porcentaje, en fuste de <i>Quercus ilex</i>	160
Tabla 20	Densidad básica (g/cm ³) en fuste de <i>Quercus ilex</i>	161
Tabla 21	Densidad normal y anhidra (g/cm ³) en fuste de <i>Quercus ilex</i>	161
Tabla 22	Contenido de humedad, en porcentaje, en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	162
Tabla 23	Densidad básica (g/cm ³) en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	163
Tabla 24	Densidad normal y anhidra (kg/m ³) en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	163
Tabla 25	Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas de <i>Citrus sinensis</i>	164
Tabla 26	Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas <i>Olea europaea</i>	164
Tabla 27	Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas <i>Prunus amygdalus</i>	165
Tabla 28	Densidad básica (g/cm ³) en ramas de <i>Citrus sinensis</i>	167
Tabla 29	Densidad básica (g/cm ³) en ramas de <i>Olea europaea</i>	167
Tabla 30	Densidad básica (g/cm ³) en ramas de <i>Prunus amygdalus</i>	167

Tabla 31	Densidad normal y anhidra (g/cm ³) en ramas de <i>Citrus sinensis</i>	169
Tabla 32	Densidad normal y anhidra (g/cm ³) en ramas de <i>Olea europaea</i>	169
Tabla 33	Densidad normal y anhidra (g/cm ³) en ramas de <i>Prunus amygdalus</i>	170
Tabla 34	Concentración de los elementos principales en <i>Quercus ilex</i> (%)	172
Tabla 35	Estadísticas descriptivas, en mg/Kg, de los componentes secundarios que podemos encontrar en <i>Quercus ilex</i> .	173
Tabla 36	Concentración de los elementos principales en árboles enteros de <i>Paulownia spp.</i>	174
Tabla 37	Estadísticas descriptivas, en porcentaje, de los componentes secundarios que podemos encontrar en la madera de <i>Paulownia spp.</i>	175
Tabla 38	Concentración de los elementos principales en restos de frutales	176
Tabla 39	Estadísticas descriptivas, en porcentaje, de los componentes secundarios en las maderas de las especies de frutales.	177
Tabla 40	Poder calorífico en <i>Quercus ilex</i>	178
Tabla 41	Porcentaje de cenizas en <i>Quercus ilex</i>	179
Tabla 42	Porcentaje de materia volátil en <i>Quercus ilex</i>	181
Tabla 43	Poder calorífico en <i>Paulownia spp.</i>	182
Tabla 44	Porcentaje de cenizas en <i>Paulownia spp</i>	183
Tabla 45	Porcentaje de materia volátil en <i>Paulownia spp</i>	184
Tabla 46	Poder calorífico en frutales	186

Tabla 47	Porcentaje de cenizas por especie frutal	189
Tabla 48	Porcentaje de material volátil por especie frutal	190
Tabla 49	Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas de fuste (cm) y altura (m) de <i>Quercus ilex</i>	192
Tabla 50	Estadística descriptiva del factor de forma (f_V) de <i>Quercus ilex</i>	195
Tabla 51	Volumen del fuste de <i>Quercus ilex</i> (m ³ /árbol)	197
Tabla 52	Ecuación de volumen fustal para <i>Quercus ilex</i>	198
Tabla 53	Estadística descriptiva de la distribución de clases diamétricas fustal (cm) de <i>Paulownia spp.</i>	200
Tabla 54	Estadística descriptiva del factor de forma (f_V) de <i>Paulownia spp.</i>	201
Tabla 55	Ecuación de volumen real para <i>Paulownia spp.</i> para 12 meses de edad.	203
Tabla 56	Volúmenes de fuste (m ³ /árbol) hasta los 5,5 m de altura en plantación de <i>Paulownia spp.</i> de 12 meses	203
Tabla 57	Ecuación de volumen para zona interior y zona costera 1 y 2 para <i>Paulownia spp.</i>	204
Tabla 58	Proyección rendimiento anual del volumen (m ³ /ha/año) de <i>Paulownia spp.</i> en la Comunidad Valenciana	208
Tabla 59	Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas de fuste por especie (cm) en frutales	210
Tabla 60	Estadística descriptiva del factor de forma (f_V) y CV (%) en frutales	213
Tabla 61	Volumen del fuste por especie (m ³ /árbol) en frutales	214
Tabla 62	Ecuación de volumen de las distintas especies de frutales	215

Tabla 63	Estadística descriptiva sobre la distribución de las clases diamétricas de ramas (cm) de frutales	218
Tabla 64	Modelos de volumen ajustados en frutales por especie	220
Tabla 65	Estadística descriptiva sobre la distribución del volumen de copa (m ³)	221
Tabla 66	Biomasa aérea total contenida en las especies frutales estudiadas (m ³ /árbol)	222
Tabla 67	Análisis de regresión para un modelo de volumen de copa con respecto al volumen del fuste	223
Tabla 68	Resumen de la biomasa contenida (kg y t) en bosques de <i>Quercus ilex</i>	226
Tabla 69	Resumen del potencial energético, por árbol y por superficie, en bosques puros de <i>Quercus Ilex</i>	229
Tabla 70	Ecuaciones para la determinación de biomasa por árbol en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	230
Tabla 71	Ecuaciones para la determinación de biomasa por superficie en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	231
Tabla 72	Resumen de la biomasa contenida por árbol (kg/árbol) y superficie (t/ha) en <i>Paulownia spp.</i>	231
Tabla 73	Ecuaciones para la determinación de potencial energético fustal por árbol en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	233
Tabla 74	Ecuaciones para la determinación de potencial energético fustal por superficie en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	233
Tabla 75	Resumen del potencial energético, por árbol y por superficie, en bosques de <i>Paulownia spp.</i>	234

Tabla 76	Ecuaciones para la determinación de biomasa por árbol en frutales	235
Tabla 77	Ecuaciones para la determinación de biomasa por hectárea en frutales	236
Tabla 78	Resumen de la biomasa contenida en el fuste (kg/árbol y t/ha) en frutales	236
Tabla 79	Ecuaciones para la determinación de biomasa de podas y total en copa por árbol en frutales	237
Tabla 80	Ecuaciones para la determinación de biomasa de podas y total en copa por hectarea en frutales	238
Tabla 81	Resumen de la biomasa extraída en la poda (kg/árbol y t/ha) en frutales	239
Tabla 82	Resumen de la biomasa de la copa (kg/árbol y t/ha) en frutales	240
Tabla 83	Resumen de la biomasa total en frutales (kg/árbol y t/ha)	241
Tabla 84	Ecuaciones del potencial energético por fuste en cada especie frutal	243
Tabla 85	Ecuaciones del potencial energético por hectárea en cada especie frutal	243
Tabla 86	Resumen del potencial energético del fuste, por árbol y por superficie, en frutales	244
Tabla 87	Ecuaciones para la determinación del potencial energético en ramas podadas y total de copa por árbol	245
Tabla 88	Ecuaciones para la determinación el potencial energético en ramas podadas y total de copa por hectárea	245
Tabla 89	Resumen del potencial energético de la poda, por árbol y por superficie	246

Tabla 90	Resumen del potencial energético de la copa, por árbol y por superficie	248
Tabla 91	Resumen de la biomasa total en frutales (kg/árbol y t/ha)	249
Tabla 92	Resumen de cumplimiento de requerimientos para la producción de taleros de partículas según normas.	250
Tabla 93	Resumen de cumplimiento de requerimientos para la producción de pellets según normas.	251

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Suministro de energía primaria por fuente energética en el mundo	8
Figura 2	Destinación de trozas para energía versus industria en países desarrollados y países en desarrollo	9
Figura 3	Producción de biomasa 2009 en toneladas en LAC	11
Figura 4	Producción de energía primaria (Kboe) por país del LAC en 2009	11
Figura 5	Comparación del uso de la biomasa para energía según el origen de la madera en Chile y Europa	15
Figura 6	Uso de la biomasa para energía en porcentaje según el origen de la madera en Europa	18
Figura 7	Consumo de energía primaria en España	19
Figura 8	Biomasa potencial disponible (t/ha/año) en masas forestales existentes	23
Figura 9	Proyección de contribución a la matriz energética por fuente al año 2035 a nivel mundial	26
Figura 10	Proyección de el consumo de madera aserrada en LAC (2003-2020)	28
Figura 11	Comparación del uso de la biomasa para la energía y su distribución por sectores económicos en Chile y Europa	30
Figura 12	Uso de la biomasa para la energía y su distribución por sectores económicos en Europa	32
Figura 13	Proyección del consumo final bruto (CFB) de energías renovables para el 2020 en España.	34
Figura 14	Incremento de potencia de Cogeneración con biomasa en España	34
Figura 15	Ciclo de vida de la madera y contribución de sus uso integral a la mitigación del cambio climático	44

Figura 16	Cosecha de un cultivo energético mediante tractor	45
Figura 17	Cosecha de trozas delgadas de coníferas para uso energético mediante procesadora y tractor autocargador	48
Figura 18	Acopio de desechos provenientes de aserraderos	49
Figura 19	Acopio de desechos de madera de diverso origen	50
Figura 20	Discos del fuste de <i>Eucalyptus globulus</i> (izquierda) y <i>Acacia melanoxylon</i> (derecha) mostrando la marcación de un diámetro sin corteza (A-B) y un diámetro de duramen (C-D)	52
Figura 21	Corteza y madera de un disco de <i>Quercus ilex</i>	53
Figura 22	Medición de diámetros del fuste a diferentes alturas	70
Figura 23	a) Rodal de fuste excurrente, b) Rodal de fuste delicuescente	72
Figura 24	Superficie por usos en la Comunidad Valenciana	92
Figura 25	Distribución de especies forestales dominantes en la Comunidad Valenciana	94
Figura 26	Renoval puro de <i>Quercus ilex</i> en comarca de Els Ports	96
Figura 27	Mapa de distribución de <i>Quercus ilex</i> en Mediterráneo	97
Figura 28	Distribución de <i>Quercus ilex</i> en bosques puros y mixtos de la Comunidad Valenciana (<i>Quercus ilex</i> L.)	98
Figura 29	Plantación de <i>Paulownia spp.</i> de 12 meses en zona costera de la Comunidad Valenciana.	99
Figura 30	Superficie cultivada de <i>Citrus sinensis</i> , <i>Olea europaea</i> y <i>Prunus amygdalus</i> . Comunidad Valenciana 2002-2010	100
Figura 31	a) <i>Citrus sinensis</i> (naranja). b) <i>Olea europaea</i> (Olivo). c) <i>Prunus amygdalus</i> (almendro)	101
Figura 32	Distribución de especies, a lo largo del gradiente altitudinal, en la Comunidad Valenciana	104
Figura 33	Zonas de muestreo por especie en la Comunidad Valenciana	105

Figura 34	Determinación de diámetros con forcípula en fuste	108
Figura 35	Muestreo de fuste a seis alturas	110
Figura 36	a) Ramas de diámetro < 7,0 cm y b) Ramas de diámetro ≥ 7,0 cm	111
Figura 37	Determinación de la densidad de la madera por el teorema de Arquímedes, según Olesen (1971)	116
Figura 38	a) Estufa de secado. b) balanza de precisión de 0,0001 g. c) recipientes.	119
Figura 39	Laboratorio del Departamento de Química del ETSIAMN, Universidad Politécnica de Valencia	120
Figura 40	Desecador con muestras para su secado	121
Figura 41	Materiales y aparatos utilizados en la mineralización	123
Figura 42	Materiales para determinación de N	126
Figura 43	Espectrofotómetro de emisión atómica ICP para determinar los minerales y S	129
Figura 44	Máquinas utilizadas para la transformación de la madera en astillas o aserrín de diferentes tamaños.	136
Figura 45	Calorímetro marca Cal2k modelo ECO, IIE-UPV.	136
Figura 46	División del fuste en cinco partes iguales (Hohenadl 1936)	143
Figura 47	Porcentaje de albura y corteza en fuste de <i>Quercus ilex</i> .	152
Figura 48	Porcentaje de albura y corteza en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	154
Figura 49	Porcentaje de albura y corteza en ramas con diámetro < a 7,0 cm por especie de frutales	157
Figura 50	Caracterización morfológica en ramas de diámetro ≥ a 7,0 cm por especie	159
Figura 51	Distribución del DAP en los árboles analizados de <i>Quercus ilex</i>	194
Figura 52	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para	199

Quercus ilex

Figura 53	Distribución diamétrica porcentual de fustes en <i>Paulownia spp.</i>	200
Figura 54	Variación del tamaño de la oclusión en fuste de <i>Paulownia spp.</i> hasta los 5,5 m de altura	202
Figura 55	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para zona interior de <i>Paulownia spp.</i>	205
Figura 56	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para zona costera 1 de <i>Paulownia spp.</i>	205
Figura 57	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para zona costera 2 de <i>Paulownia spp.</i>	205
Figura 58	Distribución diamétrica porcentual de fustes en frutales	211
Figura 59	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para <i>Citrus sinensis.</i>	216
Figura 60	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para <i>Olea europaea</i>	216
Figura 61	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m ³) para <i>Prunus amygdalus</i>	216
Figura 62	Distribución diamétrica porcentual en ramas de frutales estudiados	219