

La biomasa residual de las plantaciones agrícolas como energía renovable

La utilización de los residuos agrarios para bioenergía podría suponer un doble ingreso para los agricultores; por una parte por la venta de los productos alimentarios, por otra por la comercialización de los residuos. Para posibilitar la planificación de este sistema es necesario conocer la cantidad de residuos que se generan en las explotaciones a partir de mediciones sencillas y la estimación del coste de las diferentes posibilidades técnicas para su cosecha y transporte. En este artículo se presenta un esbozo de los trabajos realizados en el Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universidad Politécnica de Valencia.

Palabras clave: bioenergía, agroenergía, residuos, planificación territorial, logística



Borja Velázquez Martí

Dr. Ingeniero Agrónomo
Grupo de Mecanización y Tecnología Agrícola
Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n 46022 Valencia
borvemar@dmta.upv.es

La biomasa se define como cualquier materia de origen orgánico no fosilizada. En términos generales, esta materia tiene múltiples usos y utilidades para los hombres, pues constituye la base de nuestra alimentación y es materia prima para gran número de industrias, tal como la farmacéutica, cosmética, textil, maderera, papelera o ciertos elementos de la construcción. Asimismo, la biomasa puede suponer una fuente de energía, pues se puede transformar en sustancias combustibles denominadas biocombustibles. Es importante diferenciar estos dos términos pues en numerosos contextos se confunden creiendo que son sinónimos, cuando no lo son. Los biocombustibles son productos finales comercializables en el mercado energético obtenidos de la transformación física, química o microbiológica de la biomasa, que es su materia prima. Es indudable la existencia de numerosas fuentes de biomasa y tipos. Las fuentes más relevantes de enumeran en la tabla 1, extraída de la publicación de Velázquez (2006). Teniendo en cuenta la rápida regeneración de

los sistemas productores de biomasa, puede considerarse ésta como una fuente de energía renovable, por ser inagotable. Por otro lado, los residuos de la fabricación de biocombustibles, junto sus emisiones en la combustión, presenta contaminaciones menores a las derivadas de la fabricación y uso de los combustibles procedentes del petróleo o carbón. No obstante, hay que advertir que los residuos de la fabricación de biocombustibles no son inexistentes, más aún, presentan problemáticas relevantes en muchas ocasiones.

Los biocombustibles obtenidos de la transformación de biomasa se pueden clasificar en pocos grupos según el proceso a los que la biomasa se ve sometida para su obtención. En la tabla 2, también extraída de Velázquez (2006), se muestran los 9 grupos de biocombustibles junto su biomasa origen, estado físico, tipo de transformación que se precisa someter a la biomasa para su elaboración y su aplicación. Como se puede observar tres de los biocombustibles son sólidos, tres líquidos y tres gaseosos.

Los biocombustibles sólidos tienen su origen principalmente en madera, aunque pueden ser también huesos, cáscaras etc. Éstos se combustionan principalmente en caldera bien para obtener calor, absorbido por un fluido transportador, agua o aceite, o bien para la producción de vapor y su utilización en un ciclo de Rankine más o menos modificado para la obtención de energía eléctrica junto calor (cogeneración). Los biocombustibles líquidos y gaseosos también pueden ser empleados en calderas con las mismas aplicaciones que los sólidos, pero pueden ser utilizados como carburantes en motores de combustión interna, es decir, para el transporte. Es por ello que éstos se denominan biocarburantes, biofuel en inglés.

La cadena del aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía comprende tres etapas (Figura 1). La formación del Ingeniero Agrónomo, hace que sea un profesional capaz de ser líder en cualquiera de estas etapas, pero es el especialista idóneo en las dos primeras.

Fuente		Especie o procedencia
Cultivos energéticos: Son plantas especialmente cultivadas para su posterior transformación a biocombustibles	Agrícolas	cardo, sorgo, miscanto, girasol, soja, maíz, trigo, cebada remolacha, especies C4 agrícolas....
	Forestales	chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias, y especies C4 forestales...
Restos de cultivos agrícolas	Cultivos herbáceos	paja, restos de cereales, restos de cultivos hortícolas
	Cultivos leñosos	poda o eliminación de plantaciones de olivo, vid, frutales de hueso y pepita, cítricos etc..
Restos de operaciones selvícolas		cortas finales, podas, claras, clareos, apertura de vías y pistas forestales, limpieza de monte para prevención de incendios, catástrofes forestales (incendios),
Restos de las industrias agroalimentarias		piel de frutos (cítricos), cáscaras (almendra, cacahuete...), huesos (aceituna), pulpa en industrias de zumo, etc..
Restos de industrias forestales		serrines y virutas, polvo de lijado, corteza, tacos y recortes
Restos de las explotaciones ganaderas		purines, cama animal, animales fallecidos
Productos o restos marinos		algas, conchas, etc..
Actividades humanas		residuos alimenticios, papel, otros residuos industriales

Tabla 2. Fuentes de origen de la biomasa con destino energético

Es indudable el protagonismo que posee la agricultura como sistema de producción controlada de biomasa. Además el desarrollo del mercado de los biocombustibles supone una alternativa a la agricultura tradicional alimentaria cuando ésta no resulta totalmente competitiva, sustituyéndola por cultivos energéticos (Mulugetta, 2008). He de destacar el trabajo de investigación desarrollado en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA, 2011) sobre la adaptación de distintos cultivos energéticos a las condiciones existentes en la Comunidad Valenciana. No obstante, es indiscutible la influencia de la proliferación de los cultivos energéticos en el mercado alimentario, siendo objeto de numerosos análisis económicos y sociales (Bantz y Deaton, 2006; Gui et al., 2008). Su efecto incide principalmente por la sustitución de superficie cultivada para alimentos y en consecuencia en la cantidad ofertada al mercado global, lo que puede influir en el precio de los mismos (Banse et al., 2008; Lamer et al., 2008). Ojo, no se pretende aquí demonizar

los cultivos energéticos por ser causantes de los desajustes de la disponibilidad de alimentos en distintas zonas del mundo. Más bien, se incide en que es necesaria una adecuada ordenación del territorio y planificación de la producción alimentaria y agroenergética para evitar, en la medida de lo posible, las interferencias. Los cultivos energéticos realmente suponen una oportunidad para mantener la actividad agrícola en sistemas decadentes desde el punto de vista económico, no técnico.

La necesidad de biocarburantes, como sustituyentes de los derivados del petróleo hace pensar que los cultivos energéticos oleaginosos y azucareros sufrirán una proliferación en todo el mundo. De los primeros se obtendrá biodiesel de los segundos bioetanol. La pregunta que suscita la promoción de estos cultivos energéticos es la siguiente; cuando el mercado de biomasa para biocombustibles esté generalizado y globalizado, ¿seremos competitivos en el área mediterránea en estos cultivos energéticos teniendo éstos los mismos condicio-

nantes que los cultivos alimentarios, en los que no somos competitivos? Los condicionantes a los que nos referimos son: deficiente estructura de la propiedad que impide una mecanización adecuada, excesivo precio de las materias primas y mano de obra, y climatología adversa en comparación a otras zonas del mundo con mayor pluviometría y mejor distribuida durante el año. Por ejemplo el rendimiento medio del colza para la producción de biodiesel en norte de España es de 2,80 t/ha, cuando la media de la Unión Europea es de 4,2 t/ha; o el girasol en secano en España tiene un rendimiento medio de 1 t/ha pero en Argentina esta cerca de los 2,3 t/ha. Por otra parte, cultivos tropicales oleaginosos que no pueden ser cultivados en Europa como la palma aceitera o la jatrofa curcas poseen rendimientos de 15 t/ha y 11,5 t/ha respectivamente, siendo los costes de producción 1/3 respecto a los cultivos europeos y la tasa de aceite en la semilla para producir biodiesel es muy similar en todos estos cultivos, un 32% aproximadamente. Ante esto,



Figura 1. Etapas del aprovechamiento de la biomasa para uso energético

	Biomasa saca (kg árbol-1)		Biomasa húmeda (t ha-1)	
	media	Desviación típica	media	Desviación típica
Naranjos	8,524	3,360	4,680	1,751
Mandarinos	6,500	4,405	4,338	2,725
Olivos	22,130	7,611	4,406	3,320
Vid de vinificación en vaso	1,254	0,307	2,028	0,502
Vid de vinificación en espaldera	1,291	0,459	2,736	1,071
Uva de mesa en espaldera convencional	1,401	0,257	3,183	0,578
Una de mesa de espaldera alta (forma en Y)	3,276	0,454	5,461	0,757
Uva de mesa en parral	7,045	0,976	7,827	1,084
Almendro	8,424	4,855	1,057	0,602
Frutales de hueso	7,925	3,812	3,725	1,652

Tabla 3. Biomasa obtenida de operaciones de poda en frutales

habría que diferenciar dos tipos de biocombustibles, primero los líquidos que proceden de aceites y azúcares, obtenidos de semillas oleaginosas y amiláceas respectivamente, y segundo, los biocombustibles sólidos procedentes de residuos, de los cuales hay una amplia gama. Probablemente los países con mejor rendimiento (t/ha) y producción más económica albergará también la industria de transformación para producción de biodiesel o bioetanol.

Al hilo de lo anterior, tres aspectos son los que se deben considerar en la promoción de los biocombustibles: el primero la problemática energética, por la necesidad de reducir la dependencia del petróleo; el segundo el medioambiental, por la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ que provocan el efecto invernadero y el sobrecalentamiento del planeta; y tercero la necesidad que tiene la agricultura de los países europeos, en general, por ser compe-

titiva en una economía globalizada. Los dos primeros aspectos, energético y medioambiental, son problemáticas globales de todo el planeta, y probablemente serán cubiertos con el esfuerzo internacional. Ahora bien, el tercer aspecto, la baja rentabilidad de la agricultura europea, y en concreto la española, es un problema localizado, de ámbito regional, y por tanto su solución dependerá de las soluciones locales y política regional. En este sentido, por los condicionantes anteriormente expuestos, cuando no seamos competitivos en la agricultura para biocarburantes (biodiesel y bioetanol) es necesario potenciar la gestión de residuos o los biocombustibles sólidos, aún procediendo de plantaciones energéticas. Los biocombustibles líquidos son fácilmente trasportables, al igual que se hace con el petróleo; pero la biomasa procedente de residuos, generalmente sólidos no es apta para el transporte, y ello hace que su gestión deba rea-

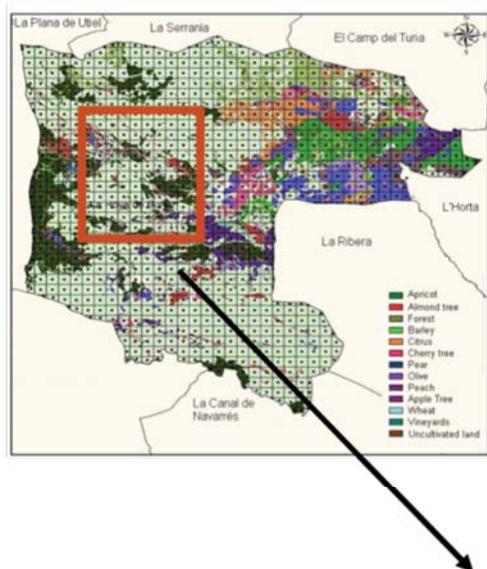
lizarse en la misma zona geográfica donde se producen. Esto no significa que la política de potenciación de la industria de transformación de biomasa para producción de biodiesel o bioetanol en nuestro territorio no sea adecuada para ocupar una posición ventajosa en el mercado, y ganar independencia energética; sólo que en el análisis de viabilidad habría que contemplar las anteriores consideraciones.

Una gran cantidad de biomasa residual con posible uso energético puede ser extraída de la gestión de la agricultura mediterránea, especialmente en operaciones de poda, renovación de plantaciones o restos de cosecha. Actualmente estos residuos son amontonados y eliminados por quema o trituración en campo no consiguiendo ningún beneficio directo, más bien un coste en estas operaciones y suponiendo un factor de elevada peligrosidad de incendio en zonas cercanas a áreas forestales. La

Tipo de organización	Ecuación predictiva
Astilladoras móviles con alimentación manual previa alineación de residuos en calle	R ² =0,68
Astilladoras móviles con alimentación con grúa de pinzas previa alineación de residuos en calle	R ² =0,64
Astilladoras móviles con alimentación con cabezal pick up previa alineación de residuos en calle	R ² =0,71
Astilladora transportables previa concentración	R ² =0,77

Tabla 4. Estimación de tiempos de trabajo de astilladoras en la recogida de residuos de poda (Velázquez y Fernández, 2009b)

Iteración 1



Paso 1. Cada cuadrante a_{ij} se comprueba para encontrar a los que tienen un tipo específico de biomasa disponible mayor que Q ubicado dentro de un radio R (por ejemplo, $R = 60$ km).

$$D(a_{ij}, a_{mn}) < R$$

$$\sum_{i,j}^{n,m} m(a_{ij}, a_{mn}) > Q_T \quad \text{t de biomasa}$$

9,46	2,69	7,70	3,09	4,49	7,21	6,89	2,85	9,81	6,19
5,90	8,13	6,66	9,88	3,05	9,29	3,47	0,21	2,92	8,14
1,75	8,90	6,32	6,15	9,78	1,62	1,96	4,70	4,42	7,94
2,31	0,61	1,32	1,74	3,71	1,40	1,55	4,50	2,68	6,77
2,72	8,55	3,59	1,10	2,04	8,66	3,19	0,46	1,29	9,93
0,10	0,18	4,65	1,58	3,31	2,92	9,34	6,75	1,47	5,54
5,99	0,25	1,62	3,18	7,15	8,38	9,74	7,46	3,42	5,48
0,83	9,56	6,95	4,13	8,38	7,83	8,47	0,51	1,12	3,05
3,92	0,68	1,83	5,42	4,36	1,89	1,07	7,32	9,98	7,01
4,52	5,16	5,23	5,67	6,45	4,99	1,39	0,04	1,31	3,87

Figura 2. Selección de un cuadrante de la Hoya de Buñol cuyo valor es la biomasa disponible al año

utilización de esta biomasa adicional de la agricultura mediterránea como fuente de energía podría rentabilizar las operaciones de mantenimiento dentro de una gestión sostenible, y conseguir ingresos adicionales para los agricultores, que además de comercializar sus cosechas pueden obtener ingresos complementarios por los residuos generados en las explotaciones agrarias. Para el aprovechamiento de la biomasa residual leñosa procedente de la agricultura, y el consecuente aumento de la renta agraria, es necesario desarrollar la cadena expuesta en la figura 1 y evidentemente debe ser impulsada o favorecida desde las distintas administraciones. En mi opinión, debe comenzarse por crear una necesidad de materia prima, es decir, la creación de demanda de biocombustibles; por ejemplo, con ayudas a la instalación de calderas de biomasa (pélets o astillas) para calefacción en viviendas, o para miniplantas de cogeneración (energía eléctrica + calor) en industrias. Estas instalaciones precisarán de industrias de transformación y valorización de biomasa que puede obtenerse de residuos leñosos agrícolas y forestales. Debe trabajarse en mi opi-

nión a escala pequeña, de forma que puedan abastecerse los transformadores de zonas muy concretas y con una planificación previa. La existencia de demanda implicará la implantación de sistemas de recogida o cosecha de residuos, bien mediante recursos propios o a través de empresas agraria de servicios. Esta fuente de biomasa no ha sido utilizada hasta ahora, debido a que presentan diferentes dificultades técnicas en su extracción, manipulación y transporte, así como por la carencia de suficiente información sobre la cantidad y aptitud de estos residuos. Desde hace varios años el Grupo de Mecanización y Tecnología Agraria del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universidad Politécnica de Valencia ha estado trabajando en la gestión de estos residuos, principalmente en residuos forestales y de plantaciones de árboles frutales en cuatro aspectos:

1. Determinación de la cantidad de biomasa residual producida en operaciones de poda a partir de las características agronómicas de las diferentes plantaciones (especie en cultivo, tamaño de los árboles, edad, marco de plantación, producción de fruta, secado/regadío), obteniéndose ecua-

ciones de predicción que pueden ser implementadas a los inventarios agrícolas para conocer la distribución espacial de la biomasa potencial obtenible en una determinada zona. (Fernández 2010; Velázquez y Fernández 2010a; Velázquez y Fernández 2010b; Velázquez et al., 2010a; Velázquez et al., 2010b; Velázquez et al., 2010c; Velázquez et al., 2011a; Velázquez et al., 2011b). Con ello es posible la implementación de modelos logísticos como *borvemar model* y *bioloco* (Biomass logistics computer).

2. Análisis técnico, económico y energético de sistemas de cosecha de la biomasa (Velázquez y Fernández, 2009a; Velázquez y Fernández, 2009b; Velázquez et al., 2009; Velázquez y Fernández, 20010b).
3. Desarrollo de modelos logísticos para optimizar la recogida y abastecimiento de biomasa a centros de transformación, como *borvemar model* y *bioloco* (Biomass logistics computer). (Velázquez y Annevelink, 2009; Velázquez y Fernández, 2010c)
4. Caracterización de los residuos obtenidos tanto desde el punto de vista energético como industrial, determinando la aptitud de los materiales para distintos procesos (Callejón et al., 2011)

La biomasa residual tanto en especies leñosas como en herbáceas es muy variable según especies, variedades, densidad de plantación o sistemas de cultivo, según la finalidad de la poda, edad de las plantaciones, tamaño de los árboles. Es por ello que hemos desarrollado modelos más o menos complejos, pero con mucha precisión. En la tabla 3 presentamos valores medios de productividad de biomasa de los árboles frutales más importantes. No obstante, la elevada dispersión y la cantidad de factores influyentes hacen que recomendemos la aplicación de las ecuaciones presentadas en las fuentes citadas en el punto 1, para tener una buena precisión en la planificación local o zonal.

Como método simplificado se expone aquí la aplicación de los coeficientes de potencialidad biomásica gravimétrica y superficial. Estos coeficientes pueden ser aplicados a cada parcela. Por tanto, la inventariación, base de la planificación, se realiza a partir del catastro parcelario cuando es conocida la producción y la superficie, datos que posee cualquier cooperativa o SAT. Los coeficientes de potencialidad λ y δ se calculan a partir de las ecuaciones (1) y (2).

$$PB_j = V_j \times l_j \quad PB_j = S_j \times d_j$$

(1) y (2)

PBj es la biomasa residual potencial obtenida en un sistema biológico de características j en t/año. Vj es la cantidad de recurso obtenido en un sistema productivo de características j cada año (t de frutos/año en plantaciones frutales, ó, m3 de biomasa maderable/año en un sistema forestal). Vj es el coeficiente de potencialidad gravimétrica de producción de biomasa energética en un sistema de características j (toneladas de biomasa residual por cantidad de biomasa aprovechable de forma industrial, m3 madera en caso de sistemas forestales, toneladas de fruta en caso de sistemas agrícolas etc.). Sj es la superficie del sistema de características j. λ_j es el coeficiente de potencialidad superficial de producción de biomasa en una parcela de características j (t de biomasa residual/ha y operación).

El subíndice j hace referencia a la especie dominante, edad, número de árboles por hectárea, diámetro medio de los árboles, altura media de la vegetación, determinada operación realizada en su gestión (poda, limpieza, renovación etc...) y tecnología empleada en la extracción de la bio-

(Ecuación 1)

$$C_{ij} = \frac{\sum_j^{nm} [m(a_{ij}, a_{nm}) \cdot \bar{H} \cdot \bar{r}_{nmb}] + \sum_j^{nm} \frac{m(a_{ij}, a_{nm})}{CT} \cdot CF_i + \sum_j^{nm} \frac{D(a_{ij}, a_{nm}) \cdot m(a_{ij}, a_{nm})}{CT} \cdot CV}{\sum_j^{nm} m(a_{ij}, a_{nm})}$$

masa residual generada.

A continuación se exponen los métodos existentes para la recogida de biomasa residual, y que hemos evaluado en cuanto a tiempos de trabajo, rendimiento y consumo de combustible

a) Extracción con astillado mediante astilladoras transportables: Estas astilladoras son máquinas que van generalmente montadas bastidores de grandes dimensiones por ser de elevada potencia, traccionadas por tractor agrícola o camiones que se sitúan a los límites de la parcela o camino anexo para realizar el astillado en posición fija previa concentración de los materiales a astillar debido a que no pueden maniobrar por plantaciones de marco estrecho. La concentración de los residuos en el camino o en lindes de la parcela se puede realizar de forma manual o mecanizada. En parcelas de buena accesibilidad, baja pendiente y superficie poco abrupta, un tractor agrícola con rastrillo o sarmientadora puede concentrar de los residuos en pilas a los lados de la parcela en una zona de acopio o cargadero. En caso de inaccesibilidad la concentración debe hacerse manual.

Estas astilladoras presentan dos opciones en cuanto a sistemas de alimentación, que influyen decisivamente en el rendimiento de la máquina: Carga mediante una grúa cargadora con pinzas donde la propia astilladora coloca los materiales en la plataforma de alimentación; o

carga manual por operarios. Tras la trituración, estas máquinas poseen un sistema continuo de descarga de forma que a medida que se va produciendo la astilla se va depositando directamente en un contenedor de transporte independiente gracias a una impulsión neumática. Los contenedores son transportados a las plantas energéticas a través de camiones.

Dado que el tractor que concentra los residuos a los pies de la parcela realizará diferentes pilas separadas una distancia variable, la astilladora se verá obligada a desplazarse distancias cortas durante el tiempo de trabajo.

b) Astilladoras móviles: Estas astilladoras son capaces de desplazarse entre las líneas de cultivos pudiéndose realizar la carga manual o mecanizada en el punto donde se encuentran los residuos.

Astilladoras de alimentación manual. Constan de una tolva donde varios operarios van introduciendo los materiales mientras la máquina es arrastrada por un tractor agrícola a velocidades muy lentas. Los operarios recogerán de forma manual los residuos hilerados, abarcando una anchura variable.

Astilladoras de alimentación mecánica. Existen dos posibilidades; máquinas en que el material a astillar se recoge con grúa de pinzas propia de la máquina; y máquinas con un eje de alzado de materiales que introduce los mismos en una cámara de asti-

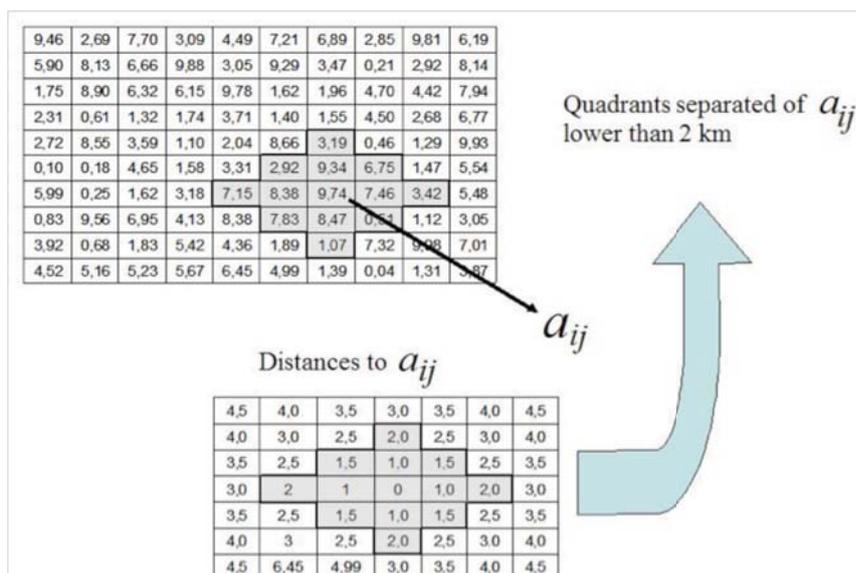


Figura 3. Comprobación de la biomasa que existe en zonas con radio de 2 km Q= 50 t/año, R =2 km

llado almacenando posteriormente el material en un depósito propio (cabezas pick up).

c) Empacadoras: Son equipos de recogida de restos agrícolas o forestales que tienen como principio de funcionamiento la compactación de los materiales. De esta forma es posible optimizar el almacenamiento y transporte utilizando equipamiento agrícola convencional. Las empacadoras son máquinas autónomas que recogen los residuos bien directamente (como en el caso de los cereales, pero que se puede desarrollar también en leñosos) o previamente concentrados mediante un tractor (caso de algunos sistemas de extracción de residuos leñosos). La alimentación de las empacadoras de residuos leñosos se realiza a través de una pinza adaptada propia de la máquina que deposita los materiales en el dispositivo de compresión donde tras el aumento de la densidad los materiales quedan ligados mediante una cuerda plástica o metálica formando pacas de forma cilíndrica o prismática. Las pacas formadas son dispuestas mediante la grúa de pinzas en pilas hasta la espera de un camión de transporte convencional. Los materiales transportados al llegar a la planta de transformación pueden ser almacenados en una zona de recepción al aire libre a la espera de que se necesite material combustible para las calderas de generación energética. Entonces las pacas deben ser previamente astilladas en máquinas estáticas, astilladoras instaladas en las plantas de transformación de forma permanente. Estas astilladoras son empleadas habitualmente para triturar los restos residuales de la producción industrial pero pueden también ser utilizadas para la trituración de residuos cuando son extraídos del campo mediante empacado.

Los tiempos de trabajo empleados en las distintas opciones de organización guardan una relación lineal con la cantidad de biomasa existente en la parcela. Como orientación ofrecemos las ecuaciones de la tabla 4, donde T viene expresado en h de trabajo efectivo por hectárea y B es la biomasa existente en la parcela en t/ha. Como se puede observar existe alta dispersión por el número de factores que pueden influir en este tiempo de trabajo, como anchura de las calles, espacio para el giro de la máquina, tipo de cultivo etc.

El procedimiento para la planificación consistirá en calcular la biomasa residual producida a partir de las ecuaciones de cuantificación (punto 1) y posteriormente aplicar las

ecuaciones de la tabla 4. A partir de las cuantificaciones de biomasa realizadas, y mediante los análisis espaciales de distribución se pueden sistematizar modelos de decisión para optimizar los sistemas de cosecha de biomasa residual, su distribución a puntos de almacenamiento o suministro y transporte. En esta fase de trabajo es donde se pueden explotar todas las posibilidades de los Sistemas de Información Geográfica, o sistemas que, basándose en el empleo de información geográfica como base de partida, permiten el desarrollo de aplicaciones que requieren de diferentes tipos de información alfanumérica. En estos sistemas se pueden integrar datos cartográficos y/o espaciales de diversas fuentes como pueden ser bases cartográficas oficiales como las de Catastro u otros organismos que las distribuyen vía servicios WMS. Su integración con imágenes de satélite en formato raster o nubes de puntos provenientes de LIDAR aéreo permitiría enfocar el objetivo global de esta fase hacia la definición de modelos logísticos que optimicen la recolección y distribución de biomasa o fruta a puntos especialmente destinados a ello.

Las ecuaciones de regresión para la predicción de la biomasa producida en los cultivos en función de los factores influyentes permiten realizar inventarios de la biomasa disponible en una determinada zona a partir del catastro parcelario y de las características agrónomicas de los distintos cultivos existentes. Así a partir de estos datos básicos podrán aplicarse modelos logísticos como el modelo Borvemar, desarrollado por Velázquez y Annevelink (2009). Este modelo permite localizar puntos de concentración de biomasa para su distribución a partir mapas digitales SIG. Este algoritmo se basa en buscar puntos en los que la biomasa contenida en un radio determinado supere una cantidad mínima con coste mínimo. Tras la obtención de los puntos de concentración es aplicable el modelo Bioloco (Biomass Logistics Computer Optimization) desarrollado por Annevelink y de Mol, (2007), y Diekema, et al., (2005). Este algoritmo establece un modelo logístico basado en grafos donde existen nodos origen (fuentes de biomasa) y nodos destinos (plantas de transformación de biomasa), conectados por arcos que representan costes o distancias. Este modelo calcula los nodos óptimos de los cuales se deben abastecer los nodos destinos en un momento dado teniendo en cuenta la estacionalidad de las fuen-

tes. Bioloco model se sirve del Borvemar model para la determinación de los nodos para después seleccionar cuales de ellos son los óptimos en cada momento.

Los pasos de cada iteración para la aplicación del modelo Borvemar se exponen a continuación (Velázquez y Annevelink, 2009).

Paso 1. Cada pixel (a_{ij}) de un mapa raster se comprueba para encontrar los que tienen un tipo específico de biomasa disponible en una cantidad mayor que un determinado valor Q dentro de un radio R (por ejemplo, R = 2 km). Es decir

$$D(a_{ij}, amn) < R$$

$$\sum_{i,j}^{n,m} m(a_{ij}, a_{nm}) > Q$$

t de biomasa

Paso 2. Los cuadrantes, que cuentan con las condiciones anteriores, se seleccionan.

Paso 3. Para cada cuadrante a_{ij} seleccionado, se calcula el coste de cosechar y transportar toda la biomasa disponible desde todos los amn a a_{ij}, tal que D(a_{ij}, amn) < R. El coste se obtiene por la ecuación (ecuación 1).

Donde C_{Fi} es el coste fijo de los medios de transporte (€/viaje). Incluye el coste del operador durante el tiempo de carga (3-4 horas); CV es el coste variable del transporte (€/km). Se incluye el consumo de combustible y el operador; CT es la capacidad de los medios de transporte (p.e. 5 t/viaje). El parámetro r_{mb} es el porcentaje de biomasa que hay en el pixel amn del tipo b.

El vector son los costes de cosecha de biomasa de cada tipo.

$$\vec{H} = (H_a, H_b, \dots, H_z)$$

El producto * es el coste de cosecha de toda la biomasa en el cuadeante amn.

$$* \vec{H} \vec{x}_j$$

$$\vec{H} \vec{x}_j = H_a x_{ja} + H_b x_{jb} + \dots + H_z x_{jz}$$

Paso 4. Todos los elementos a_{ij} son ordenados de acuerdo al coste. El a_{ij} con menor coste es seleccionado.

En las figuras 2, 3 y 4 se muestra la primera iteración del modelo Borvemar aplicado a una zona de la Hoya de Buñol (Valencia) con píxeles de tamaño de 1km x 1km.

Para aplicar la segunda iteración se partiría de las cuadrículas de la figura 6, a la que se le aplicarían los pasos del 1 al 4. Tras 4 iteracio-

nes no existen zonas que cumplan las condiciones establecida de biomasa mínima en el radio especificado, y por tanto concluiría el proceso de cálculo. En la figura 7 se muestran las subareas seleccionadas para la cuadrícula de partida. En la figura 8 se muestran los puntos seleccionados en la comarca de la Hoya de Buñol para una biomasa mínima de 1000 t en un radio de 6 km.

El primer punto de concentración seleccionado por tener el menor coste en su área de influencia (R=2 km) queda representado en la figura 5

Para aplicar la segunda iteración se partiría de las cuadrículas de la figura 6, a la que se le aplicarían los pasos del 1 al 4. Tras 4 iteraciones no existen zonas que cumplan las condiciones establecida de biomasa mínima en el radio especificado, y por tanto concluiría el proceso de cálculo. En la figura 7 se muestran las subareas seleccionadas para la cuadrícula de partida. En la figura 8 se muestran los puntos seleccionados en la comarca de la Hoya de Buñol para una biomasa mínima de 1000 t en un radio de 6 km.

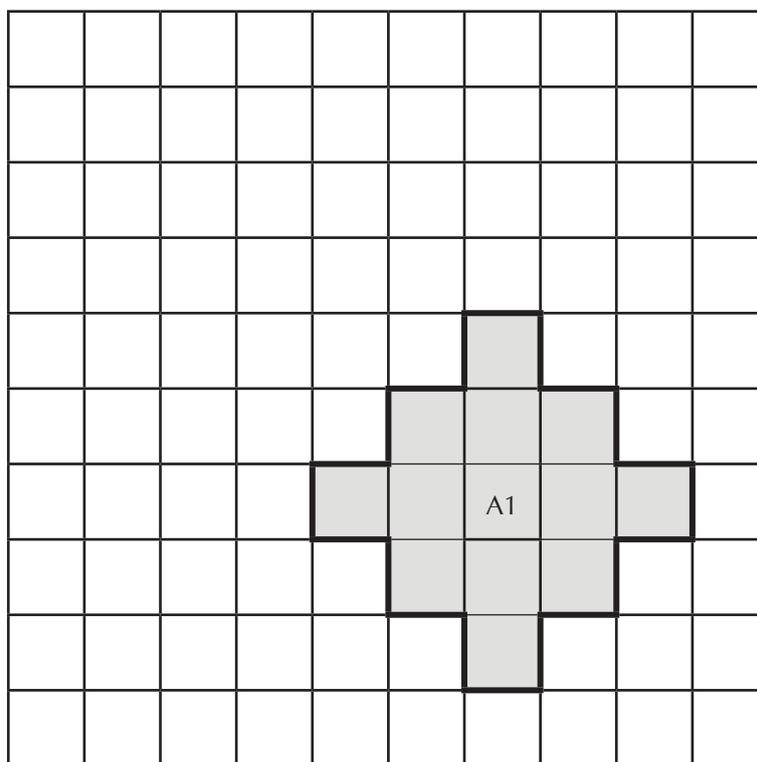


Figura 5. Subárea A1 obtenida d ela aplicación de la iteración 1

Tabla 1. Cantidad de biomasa que está disponible dentro de 2 km de radio alrededor de cada aij en toneladas

35,62	52,53	58,43	50,92	61,38	41,96	46,19	44,25	41,43	37,86
45,80	68,01	69,79	76,28	68,40	59,26	45,73	59,17	53,33	46,40
46,10	59,30	72,55	63,33	61,44	62,56	52,98	39,29	55,34	53,70
32,17	46,14	55,64	49,23	45,44	52,37	47,25	39,88	48,64	51,21
25,81	34,31	36,04	49,59	50,17	47,69	53,80	61,98	50,42	41,56
25,59	39,41	36,40	37,21	64,41	72,29	71,70	56,58	54,94	43,70
25,17	42,55	50,68	56,12	64,62	86,71	76,21	69,91	55,80	44,48
32,80	41,11	52,73	67,67	75,91	69,81	72,88	66,75	56,59	39,97
32,49	44,35	54,53	54,18	59,18	65,94	57,58	47,56	38,69	39,13
20,33	36,56	41,91	43,25	43,79	33,69	32,92	30,48	32,04	25,26

Q > 50
R = 2 km

Menor coste

Coste de cosecha y concentración,
H= 2 €/t

Coste fijo de transporte
CF= 0,5 €/viaje

Coste variable de transporte
CV= 1,5 €/km

Capacidad de transporte
CT = 5 t/viaje

Tabla 2. Coste de concentración en cada sub area posible

2,434	2,489	2,511	2,505	2,544	2,426	2,492	2,525	2,441	2,448
2,458	2,466	2,460	2,492	2,487	2,470	2,480	2,569	2,479	2,438
2,537	2,484	2,510	2,476	2,479	2,549	2,570	2,503	2,500	2,488
2,528	2,508	2,553	2,538	2,494	2,546	2,561	2,521	2,491	2,484
2,505	2,452	2,493	2,593	2,552	2,475	2,509	2,583	2,528	2,443
2,542	2,541	2,512	2,518	2,556	2,507	2,475	2,482	2,527	2,492
2,485	2,530	2,546	2,526	2,487	2,495	2,455	2,505	2,537	2,536
2,503	2,448	2,496	2,524	2,504	2,468	2,500	2,532	2,526	2,502
2,504	2,493	2,512	2,477	2,486	2,544	2,555	2,496	2,386	2,454
2,428	2,506	2,513	2,481	2,484	2,500	2,577	2,546	2,478	2,450

Figura 4. Cuantificación de la biomasa en cada zona y aplicación de la ecuación de costes

9,46	2,69	7,70	3,09	4,49	7,21	6,89	2,85	9,81	6,19
5,90	8,13	6,66	9,88	3,05	9,29	3,47	0,21	2,92	8,14
1,75	8,90	6,32	6,15	9,78	1,62	1,96	4,70	4,42	7,94
2,31	0,61	1,32	1,74	3,71	1,40	1,55	4,50	2,68	6,77
2,72	8,55	3,59	1,10	2,04	8,66	-	0,46	1,29	9,93
0,10	0,18	4,65	1,58	3,31	-	-	-	1,47	5,54
5,99	0,25	1,62	3,18	-	-	-	-	-	5,48
0,83	9,56	6,95	4,13	8,38	-	-	-	1,12	3,05
3,92	0,68	1,83	5,42	4,36	1,89	-	7,32	9,98	7,01
4,52	5,16	5,23	5,67	6,45	4,99	1,39	0,04	1,31	3,87

Figure 6. Available biomass in each quadrant 1 km x 1 km for doing the iteration 2

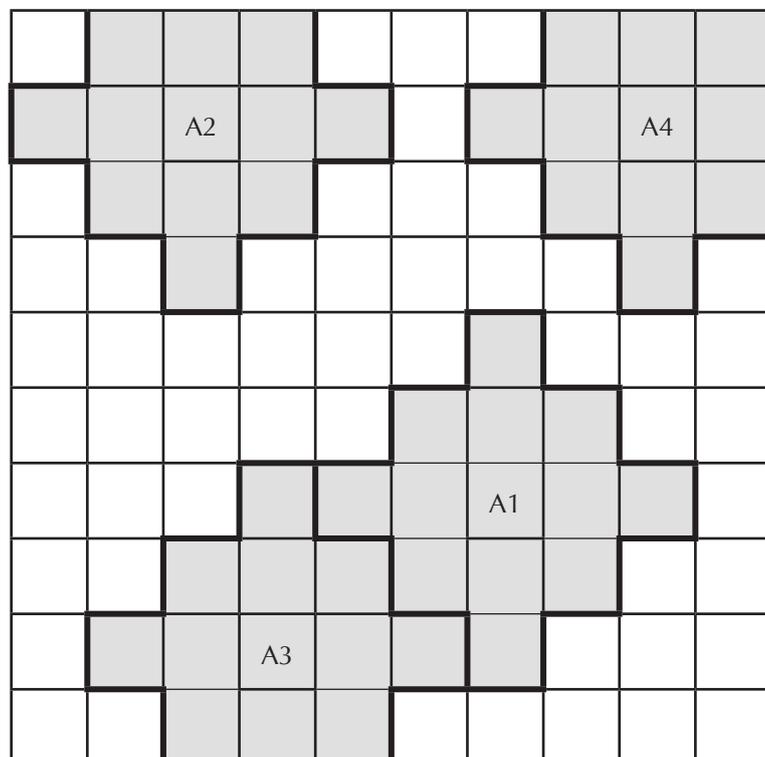


Figure 7. Subarea A1 obtenida de la iteración 1; subarea A2 obtenida de la iteración 2; subarea A3 obtenida de la iteración 3, y subarea A4 obtenida de la iteración 4.

Bibliografía

- Annevelink, E. and R.M. de Mol. 2007. Biomass logistics. 15th European Biomass Conference, Berlin, Germany
- Banse M, van Meijl H, Tabeau A, Wolter G. 2008. Will EU biofuel policies affect global agricultural markets? European review of agricultural economics 35(2):117-141.
- Bantz S, Deaton M. 2006 Understanding US biodiesel industry growth using system dynamics modeling. IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium: 156-161.
- Callejón Ferre A.J., Velázquez Martí B., Lopez-Martinez J.A., Manzano-Agugliaro F. 2011. Greenhouse crop residues: Energy potential and models for prediction of their higher heating value. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 948-955
- Diekema, W.H., R.M. de Mol, E. Annevelink and H.W. Elbersen. 2005. Combining goals in the logistics bio-energy chains. 14th European Biomass Conference, Paris, France: 495-498.
- Fernández-González E. 2010. Análisis de los procesos de producción de biomasa residual procedente del cultivo de fútales mediterráneos. Cuantificación, cosecha y caracterización para uso energético o industrial. Tesis Doctoral. Universidad
- Gui M, Lee K, Bhatia S. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. Energy 33(11):1646-1653.
- IVIA 2011. Ensayo de nuevas especies de cultivos energeticos en zonas aridas de la Comunidad Valenciana. 2007TAHVAL00070. <http://www.ivia.es/documentos/resolucion.htm>
- IVIA 2011. Cultivos bioenergéticos y su tecnología. 2007TAHVAL00078. <http://www.ivia.es/documentos/resolucion.htm>
- Lamers P, McCormick K, Hilbert J. 2008. The emerging liquid biofuel market in Argentina: Implications for domestic demand and international trade. Energy policy 36(4):1479-1490.
- Mulugetta Y. 2008. Human capacity and institutional development towards a sustainable energy future in Ethiopia. Renewable & sustainable energy reviews 12(5):1435-1450.
- Velázquez-Martí B. 2006. Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. 176pp
- Velázquez-Martí B., Annevelink E. 2009. GIS application to define biomass collection points as sources for linear programming of delivery networks. Transactions of ASABE 52(4): 1069-1078
- Velázquez-Martí B., Fernandez-Gon-

zalez E. 2009a. Analysis of the process of biomass harvesting with collecting-chippers fed by pick up headers in plantations of olive trees. Biosystems engineering 52(4): 225-236

Velázquez Martí B., Fernández-González E. 2009b. Evaluation of mechanized methods for harvesting residual biomass from Mediterranean fruit tree cultivations. Conference LAND. TECHNIK VDI-AgEng 2009 "Innovations to meet future challenges" Hannover, 6-7 November 2009

Velázquez Martí B., Fernández-González E., Gracia-López C. 2009. Influencia de la poda mecánica en la reducción de costes, producción y calidad en las plantaciones de cítricos. V Congreso Nacional y II Ibérico de la Sociedad Española de Agroingeniería Lugo, 28-30 de sept. 2009

Velázquez-Martí B., Fernández-González E. 2010a. Residuos de poda del olivar e incremento de la renta agraria. La Semana Vitivinícola 3330: 2496-2500

Velázquez-Martí B., Fernández-González E. 2010b. The influence of mechanical pruning in cost reduction, production of fruit and biomass waste in citrus orchards. Applied Engineering in Agriculture 26(4) 531-540

Velázquez-Martí B., Fernandez-Gonzalez E. 2010c. Mathematical algorithms to locate factories to transform biomass in bioenergy focused on logistic network construction. Renewable Energy 35(9): 2136-2142

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., Estornell J., Ruiz L.A. 2010a. Dendrometric and dasometric analysis of the bushy biomass in Mediterranean forests. Forest Ecology and Management 259: 875-882

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., Salazar D.M., López-Cortés I. 2010b. Cuantificación de la poda de la vid. La Semana Vitivinícola 3334: 2678-2682.

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., López-Cortés I., Salazar-Fernández DM. 2010c. Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean almond groves. Renewable Energy 36: 621-626.

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., López-Cortés I., Salazar-Fernández DM. 2011a. Quantification of the residual biomass obtained from pruning of vineyards in Mediterranean area. Biomass and Bioenergy: In Press doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.009

Velázquez-Martí B., Fernández-González E., López-Cortés I., Salazar-Fernández DM. 2011b. Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in mediterranean olive groves. Biomass and Bioenergy: In Press doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.042

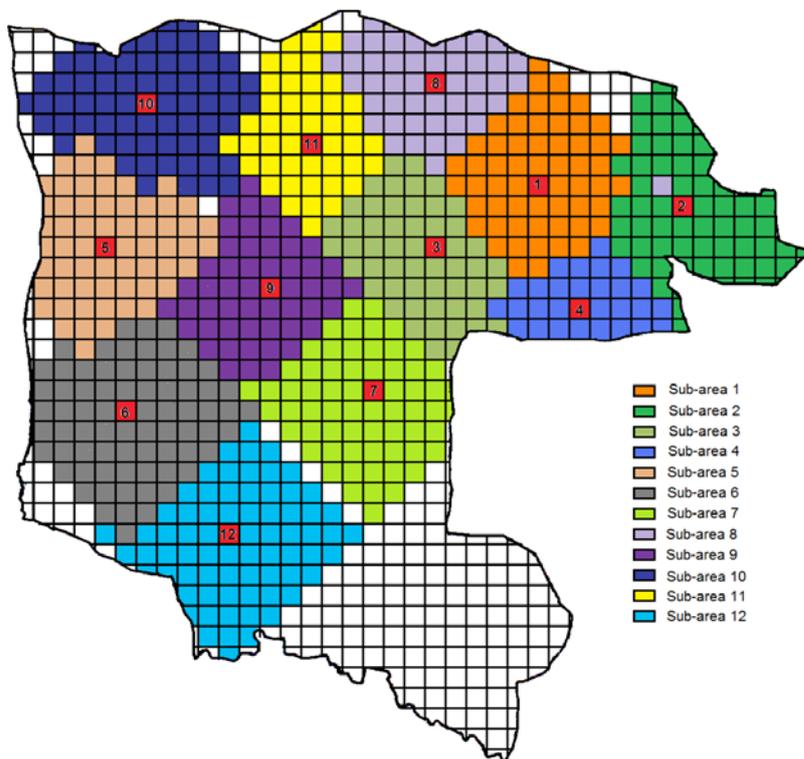


Figura 8. Puntos seleccionados en la comarca de la Hoya de Buñol junto sus zonas de influencia para una biomasa mínima de 1000 t y radio de 6 km.

Biocombustibles	Estado Físico	Biomasa de origen	Tipo y proceso de transformación	Utilización
Leñas y astillas	Sólido	Cultivos energéticos forestales Cultivos energéticos de especies leñosas Restos de operaciones selvícolas Recortes y tacos procedentes de las industrias forestales	Física Fragmentación	Combustión directa en calderas Formación de carbón vegetal Formación de pélets y briquetas
Carbón vegetal	Sólido	Cultivos energéticos forestales Cultivos energéticos de especies leñosas Restos de operaciones selvícolas Recortes y tacos procedentes de las industrias forestales	Física Fragmentación Carbonización	Combustión directa en calderas Formación de pélets y briquetas
Pélets y briquetas	Sólido	Cultivos energéticos agrícolas y forestales Restos de operaciones selvícolas Restos de las industrias forestales Residuos urbanos	Física Trituración Secado Compactación	Combustión directa en calderas
Bioetanol y biometanol	Líquido	Azúcares procedentes de cultivos como la caña de azúcar o remolacha Almidón obtenido de diversas especies vegetales entre las que destaca patata, maíz y demás cereales Almidón obtenido de materiales lignocelulósicos (maderas)	Química Fermentación de azúcares Destilación	Directamente como carburantes de motores de encendido provocado Como aditivo mezclándose con gasolina en una proporción comprendida entre el 10 y 20 %. En síntesis de biocarburantes de mayor calidad: ETBE, MTBE
Metiléster y dimetiléster	Líquido	Cualquier aceite de origen vegetal, principalmente de cultivos oleaginosos: colza, el girasol y el cacahuete... Aceites vegetales residuales de freiduría, o de procesos industriales	Física y química Prensado de semillas Transesterificación de aceites con metanol o etanol, obteniendo el éster correspondiente junto con glicerina	Directamente como carburantes de motores de encendido por combustión (biodiesel)
Aceites piroléñosos	Líquido	Residuos leñosos, paja de cereales (arroz, trigo...), tallos de maíz, mazorca de maíz.	Química y física Pirólisis (calentamiento instantáneo de la biomasa a temperaturas entre 400-450°C y posterior enfriamiento rápido)	Calderas para la obtención de calor Como carburante de motores En turbinas para energía eléctrica.
Biogás	Gaseoso	Residuos ganaderos (purines) fangos aguas residuales, residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas, residuos orgánicos industriales, como de la industria del aceite, vino o de zumos	Química Fermentación anaerobia de origen microbiológico, obteniendo principalmente metano, nitrógeno, amoníaco e hidrógeno.	Combustión directa en calderas Como carburante de motor
Gas obtenido por gasificación	Gaseoso	Residuos leñosos, paja de cereales (arroz, trigo...), tallos de maíz, mazorca de maíz.	Química Oxidación parcial de la biomasa a alta temperatura (1400°C) sin combustión, obteniendo hidrógeno e hidrocarburos (metano)	Combustión directa en calderas Como carburantes de motor En turbinas para energía eléctrica Producción de otros líquidos o gases combustibles de síntesis
Biohidrógeno	Gaseoso	Biomasa con gran contenido en agua o alcoholes	Química Hidrólisis	Carburante