

Extracción de biomasa procedente de la renovación de plantaciones de cítricos

■ **B. Velázquez-Martí, C. Gracia-López, A. Marí-Beltrán.**

Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria.
Universidad Politécnica de Valencia.

Las diversas especies de cultivos leñosos deben ser renovadas con cierta frecuencia, lo que puede suponer una fuente importante de biomasa con posible destino energético o industrial. Estas renovaciones pueden ser debidas a varias causas: finalización del ciclo de vida productivo, cambio de pie para adaptar mejor los cultivos a las características del suelo, para realizar una conversión varietal o por enfermedades del suelo en variedades no tolerantes y arranque por cambio de uso del suelo. El objetivo de este trabajo ha sido determinar la cantidad de biomasa extraíble procedente de estas operaciones en plantaciones de naranjos en la Comunidad Valenciana y analizar la tecnología para ello –arranque, retirada y transporte– desde el punto de vista productivo y económico.

Una de las principales fuentes de energía renovable es la combustión de biomasa, que es considerada neutral desde el punto de vista ambiental en la emisión de CO₂ a la atmósfera (Protocolo de Kyoto, 1997). Se están realizando numerosos estudios para cuantificar estos recursos que provienen principalmente del medio agrícola y forestal (Schneider *et al.*, 2001; Balboa *et al.*, 2003; Montero *et al.*, 2005). Las particularidades climáticas, edafológicas y orográficas influyen directamente en estos sistemas, por lo que es necesario realizar estudios de valoración en cada zona donde existan especies y sistemas productivos diferentes. Las diversas especies de cultivos leñosos deben ser renovadas con cierta frecuencia, lo que puede suponer una fuente importante de biomasa con posible destino energético o industrial. Estas renovaciones pueden ser debidas a varias causas:

a) Finalización del ciclo de vida productivo: después de un número de años determinado, las especies agrícolas leñosas disminuyen su producción y calidad, por tanto deben ser renovadas realizando un

arranque total de la plantación, incluyendo las raíces.

b) Cambio de patrón para adaptar mejor los cultivos a las características del suelo. Hay que realizar una conversión varietal, o por enfermedades del suelo en variedades no tolerantes.

c) Arranque por cambio de uso del suelo.

El objetivo de este trabajo ha sido determinar la cantidad de biomasa extraíble procedente de estas operaciones en plantaciones de cítricos en la Comunidad Valenciana y el análisis de la tecnología para la extracción y logística desde el punto de vista productivo y económico.

En la Comunidad Valenciana tenemos una superficie de 178.676 hectáreas de cítricos, que corresponde aproximadamente a unos 8 millones de árboles. Por datos recogidos de los viveristas autorizados por la Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación de la Comunidad Valenciana se estima que un 1% de los árboles es reemplazado cada año, aparte de los extraídos por motivos urbanísticos. Esto supone una fuente importante de biomasa anual que debe cuantificarse y valorarse en términos energéticos.

Materiales y métodos

Para la evaluación de los métodos de extracción de biomasa procedente del arranque de cítricos y su cuantificación, se realizaron experimentos en plantaciones con marco 4 x 4 m (528 árboles/ha aproximadamente), efectuando distintas pruebas de arranque y extracción

Las mediciones se han efectuado en plantaciones con marco 4 x 4 m, realizando distintas pruebas de arranque y extracción del material vegetal sobre árboles de distintas edades. Para el arranque del material vegetal se ha utilizado una pala y para la retirada de los residuos generados fueron evaluadas dos empacadoras: una de ruedas y otra de cadenas



del material vegetal con árboles de distintas edades. El sistema de extracción evaluado se analiza a continuación.

Primera fase

La primera fase fue el abatimiento de los árboles, tanto la parte aérea como la raíz, mediante una pala Caterpillar 938G (135 kW), mostrada en la **foto 1**. Tras el apeo de los árboles, la misma pala amontonaba los materiales en filas para que posteriormente una empacadora pudiera trabajar desplazándose linealmente con el mínimo número de giros posible. Dado que se eliminaba conjuntamente parte aérea y raíz, una cantidad importante de tierra quedaba adherida a los materiales. Para que esta tierra pudiera desprenderse, en parte, en el proceso de amontonamiento, el cazo de la pala poseía un cuerpo enrejado abierto (**foto 2**). Una vez el árbol estaba arrancado y amontonado en hileras, los materiales fueron empacados ensayando dos empacadoras: una de ruedas (**foto 3**) con prensa de 44 kW, que actuó en plantaciones de árboles de 15-25 años con un diámetro medio de tronco de 23 cm, y otra de cadenas (**foto 4**) con prensa de 66 kW, que arrancó los árboles de entre 25-35 años con diámetro medio de tronco de 35 cm. Cada una de las máquinas poseía un equipo de dos operarios: uno encargado de la conducción de la máquina y del manejo de la grúa cargadora, el otro troceaba los árboles previamente apeados y alineados para que las diversas partes pudieran ser atrapadas por la grúa y colocadas en el canal de compresión con facilidad. En ambas máquinas la carga de los materiales a empacar se realizaba por la parte superior, sobre el canal de compresión con abertura de dimensiones similares. Una vez los materiales eran colocados en dicho canal, se comprimían lateralmente formando pacas prismáticas de unas dimensiones aproximadas de 70 x 100 x 170 cm.

Tras el empacado, las pacas quedaban en el suelo aproximadamente alineadas en el mismo sentido en el que estaban previamente los materiales (**foto 5**). La conformación de los materiales en pacas permite mejorar las condiciones de almacenamiento y realizar el transporte utilizando camiones convencionales (**foto 6**). El transporte de las pacas al centro de transformación de biomasa se realizó mediante camión con grúa propia de carga. El camión utilizado en los experimentos era de tres ejes con Tara de 12.800 kg y PMA de 26.000 kg.

Foto 1. Vistas de la pala utilizada en el arranque de los árboles.

Foto 2. Vista del cazo enrejado en las operaciones de arranque.

Foto 3. Empacadora de ruedas utilizada en plantaciones de árboles menores de 25 años.

Foto 4. Empacadora de cadenas utilizada en plantaciones de árboles mayores de 25 años.

De cada uno de los experimentos se extrajo una muestra de diez balas empacadas, determinando la humedad. También se analizó el peso de esas mismas pacas a humedad de extracción y tras una semana de secado al aire.

El análisis del proceso de extracción se ha basado en tres criterios:

- Criterio técnico, análisis de tiempos y capacidades de trabajo.
- Coste económico.
- Balance energético.

La evaluación de la variante utilizada se realizó de acuerdo con el análisis de cada máquina que interviene en la misma; y después se hizo una evaluación global del conjunto desde los tres criterios citados.



Foto 5. Distribución de las pacas en la parcela.

Cuadro I.

Distribución de los tiempos de trabajo con la pala Caterpillar 938 G (135 kW).

| | | Plantaciones <25 años | Plantaciones >25 años |
|--|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Tiempo trabajo efectivo | Tiempo de maniobras para el arranque | 32,50% | 18,10% |
| | Tiempo de arranque | 41,30% | 59,10% |
| | Tiempo de amontonamiento | 12,30% | 8,20% |
| | Total trabajo efectivo | 82,10% | 85,40% |
| Tiempo de trabajo improductivo | Interrupciones | 10,60% | 11,50% |
| | Descansos | 3,30% | 3,10% |
| Coste medio por tonelada de biomasa seca obtenida | | 8,35 €/t | 9,30 €/t |

Resultados y discusión

La cantidad de biomasa obtenida en árboles de 15-25 años con un diámetro medio de tronco de 23 cm fue de 25,98 t/ha. En plantaciones con árboles entre 25 y 35 años con un diámetro medio de tronco de 35 cm fue de 48,34 t/ha de media.

Evaluación del arranque

La pala realiza el trabajo de arrancado de árboles y amontonamiento, empleando 1,06 h/ha en plantaciones de árboles de menos de 15 años, 3,5 h/ha en árboles de entre 15 y 25 años y 7,25 h/ha en árboles de más de 25 años. No obstante, hubo árboles de elevado porte, de edad superior a 35 años, en los que el tiempo de arranque fue considerado excesivo y se ha recomendado el uso de una retroexcavadora. Este tipo de árboles supuso un 3% de los ensayados, por lo que se hace notar que existen ciertas limitaciones en este sistema de arranque. La distribución de tiempos de trabajo empleados por la pala en operaciones de arranque se presenta en el **cuadro I**.

El consumo de combustible resultó de 16,22 l/h y el coste medio de la máquina de 62 €/h, incluidos el combustible y la mano de obra.

Se ha observado que el rendimiento del arranque en árboles de entre 15 y 25 años con la pala utilizada disminuye un 50% respecto a los

árboles de entre 25 y 35 años. El porcentaje de tiempo empleado en el arranque respecto al del trabajo total aumenta aproximadamente en 20 unidades.

Evaluación del empacado

En el **cuadro II** se muestra la productividad del proceso de empacado. El coste horario medio de las empacadoras fue de 92 €/h, contabilizando dos operarios para el manejo de cada una de las máquinas. El consumo de gasóleo fue de 7,5 l/h.

La masa de las pacas osciló entre 420 y 460 kg por paca recién formada, con una media de 435 kg con una humedad en base humedad media del 17,6%. El volumen obtenido de material por paca varió entre 1,1 y 1,21 m³.

Se observa que el número de pacas realizado por la empacadora de ruedas es un 10% mayor que la de cadenas. Esto se ha debido principalmente a que los árboles a empacar con la empa-

El transporte de las pacas al centro de transformación de biomasa se realizó mediante un camión con grúa de carga propia. La cantidad de biomasa obtenida en árboles de 15-25 años fue de 25,98 t/ha. En plantaciones con árboles entre 25 y 35 años fue de 48,34 t/ha de media



Cuadro II.

Resultados del trabajo de la empacadora de ruedas y cadenas.

| | | Ruedas | Cadenas |
|--|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Tiempo de evaluación (min.) | | 1.440 | 1.970 |
| Tiempo de trabajo efectivo | Carga y formación de la paca | 49% | 49% |
| | Desplazamientos | 22% | 19% |
| | Total efectivo | 71% | 68% |
| Tiempo improductivo (interrupciones, esperas, averías, etc.) | | 29% | 32% |
| Nº total de pacas en el tiempo evaluado | | 220 | 200 |
| Nº pacas/ha | | 73,3 | 133,3 |
| Nº de pacas producidas/hora de trabajo efectivo | | 12,9 pacas/h | 9,0 pacas/h |
| Tiempo de trabajo efectivo empleado por paca | | 4,65 min./paca | 6,70 min./paca |
| Tiempo de trabajo total empleado por paca | | 6,55 min./paca | 9,85 min./paca |
| Volumen medio por paca | | 1,19 m ³ /paca | 1,16 m ³ /paca |
| Peso medio en verde por paca (17,6% humedad) | | 430 kg/paca | 440 kg/paca |
| Peso medio por paca seca | | 354,32 kg/paca | 362,56 kg/paca |
| Densidad aparente material seco empacado | | 297,75 kg/m ³ | 312,55 kg/m ³ |
| m ³ de materiales/hora de trabajo efectivo | | 15,36 m ³ /h | 10,39 m ³ /h |
| m ³ de materiales/hora de trabajo | | 10,91 t/h | 7,07 t/h |
| Toneladas de material seco/hora de trabajo efectivo | | 4,57 t/h | 3,25 t/h |
| Toneladas de material seco/hora de trabajo | | 3,25 t/h | 2,21 t/h |
| Coste medio por paca | | 8,95 €/paca | 13,46 €/paca |
| Coste medio por m ³ aparente de biomasa empacada | | 7,52 €/m ³ | 11,60 €/m ³ |
| Coste medio por tonelada de biomasa seca | | 25,25 €/t | 37,13 €/t |

cadadora de cadenas eran sustancialmente de mayor tamaño por ser de mayor edad. Dado que ambas empacadoras tenían una abertura del canal de compresión semejante, el tamaño de las piezas a cargar debía ser aproximadamente el mismo. En el caso de plantaciones de más de 25 años el operario que debía reducir las dimensiones de los materiales a recoger por la grúa cargadora de la empacadora empleaba más tiempo, lo que prolongaba el período de carga y con ello el ciclo, que pasaba de 4,65 minutos por paca en las plantaciones de árboles menores de 25 años a 6,70 minutos por paca en plantaciones de árboles mayores.

El volumen aparente medio de biomasa empacada por unidad de superficie resultó para plantaciones menores de 25 años de 87,27 m³/ha y en plantaciones de más de 25 años de 154,67 m³/ha. Estos valores adquieren importancia para planificar el transporte, secado (en su caso) y almacenamiento de las pacas obtenidas.

El coste medio por hectárea de la máquina empacadora es de 1.225 €/ha.

El camión grúa que se utilizó para el transporte de las pacas desde las parcelas de ensayo a la planta de tratamiento cargaba treinta pacas, distribuidas uniformemente por las parcelas en aproximadamente 30 minutos. La distancia entre las parcelas de ensayo y la planta de transformación de la biomasa era de 64 km. El ciclo de la unidad de transporte, que incluía el tiempo de carga, transporte, descarga y vuelta a la parcela, resultó de 2,62 horas, realizándose cuatro recogidas al día. Para la recogida de una hectárea se precisaban entre seis y ocho viajes. El consumo medio de la uni-

Foto 6. Camión de transporte de las pacas.

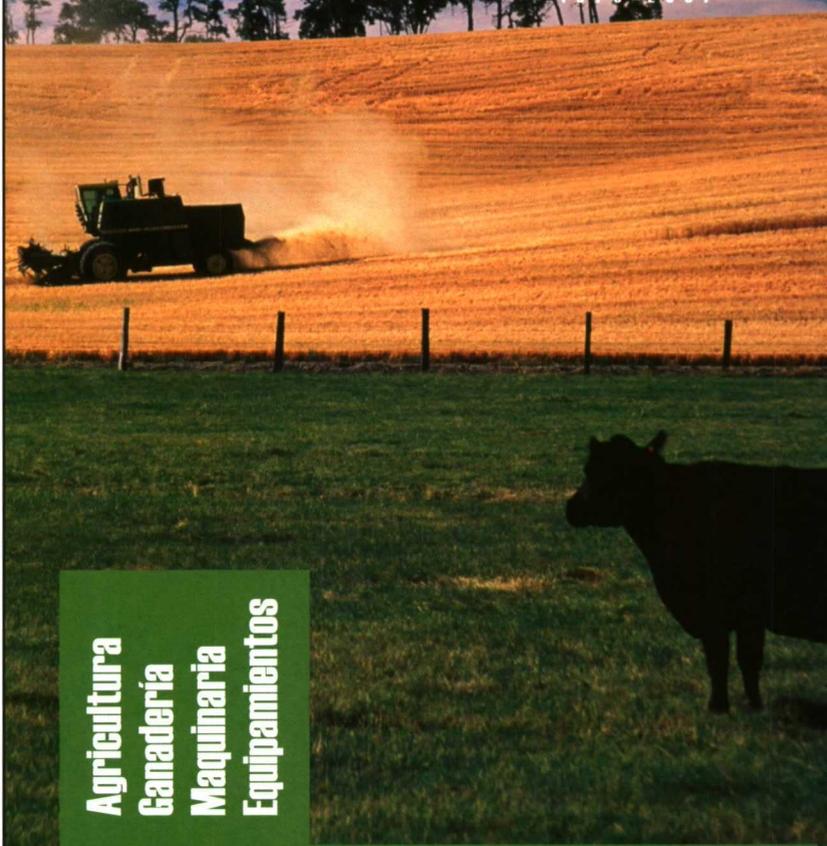


FERIA INTERNACIONAL
Semana Verde
de Galicia



> 13 al 17 de Junio '07

30 años
SEMBRANDO
FUTURO
1978-2007

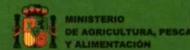
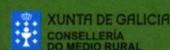


Agricultura
Ganadería
Maquinaria
Equipamientos

sembrando futuro <<<



FEIRA INTERNACIONAL DE GALICIA
36540 SILLEDA- Pontevedra- Tel 986 577000
semanaverde@feiragalicia.com
www.feiragalicia.com



Cuadro III.

Balance energético.

| | Plantaciones <25 años | Plantaciones >25 años |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Litros de gasóleo consumidos en el arranque y empacado por tonelada de biomasa seca | 4,49 | 5,83 |
| Litros de gasóleo consumidos en el transporte por tonelada de biomasa seca | 5,29 | 3,25 |
| Energía consumida en extracción y transporte por tonelada de biomasa seca (MJ/t) | 376,32 | 349,13 |
| Energía obtenida de la combustión de las pacas a humedad de extracción (MJ/t) | 15.820 | 15.820 |
| Relación energética <i>input-output (output/input)</i> | 42 | 45 |

Cuadro IV.

Análisis de costes.

| | Plantaciones <25 años | Plantaciones >25 años |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Coste por volumen aparente de biomasa empacada (€/m³ de biomasa) | | |
| Coste de extracción | 13,13 | 18,52 |
| Coste de transporte | 1,79 | 1,84 |
| Coste total | 14,92 | 20,37 |
| Coste por unidad de masa (€/t de biomasa seca producida) | | |
| Coste de extracción | 33,60 | 46,43 |
| Coste de transporte | 6,00 | 5,90 |
| Coste total | 39,60 | 52,33 |
| Coste por unidad de energía obtenida en la combustión de material seco (€/MJ) | | |
| Coste de extracción | 0,0017 | 0,0024 |
| Coste de transporte | 0,0003 | 0,0003 |
| Coste total | 0,0020 | 0,0027 |

dad de transporte fue de 10 l/h, que equivale a 0,41 l/km. El coste de transporte fue de 0,5 €/km.

Balance energético

El poder calorífico de los materiales obtenidos en la paca seca se estima ente 18,25 MJ/kg y 19,2 MJ/kg. Sabiendo que el poder calorífico del gasóleo es de 43,2 MJ/kg y su densidad es de 0,890 kg/l, la energía consumida por cada litro será de 38,44 MJ/l. Al conocer el gasóleo gastado por cada m³ de paca obtenido, podemos realizar el balance energético, que se muestra en el **cuadro III**.

En el **cuadro IV** se observa que poco más del 2% de la energía obtenida ha habido que invertirla en combustibles fósiles en las operaciones de extracción y transporte. Debido a la humedad que presentan, el poder calorífico de los materiales extraídos es un 30% menor a su poder calorífico en seco, por lo que es necesario planificar áreas de secado de los residuos.

Análisis de costes

En el **cuadro IV** se muestra el total de los costes que supone la utilización de la biomasa procedente de la renovación de plantaciones de cítricos.

Se puede observar que el coste de extracción de biomasa energética y colocación de parcela preparada para su transporte es un 25% más caro en plantaciones de árboles de más de 25 años que en plantaciones de menor edad. Esto es debido principalmente al incremento de la dificultad del arranque y al alargamiento del ciclo de carga de la empacadora.

La arrancadora empleó como media 3,5 h/ha. Las empacadoras tuvieron una productividad media de 3,25 t/h de biomasa en plantaciones de menor edad y tamaño y de 2,21 t/h de biomasa en las plantaciones de mayor edad, resultando un coste total de 39,6 €/t y 52,3 €/t de biomasa seca empacada extraída a pie de parcela

El coste medio de extracción por hectárea en plantaciones de menos de 25 años resulta de 944,48 €/ha; en plantaciones de más de 35 años, de 3.494,32 €/ha.

Una vez la biomasa se ha depositado en planta, debe añadirse un coste de tratamiento de la misma que resulta de alrededor de 53 €/t.

Consideraciones finales

La madera de los cítricos es ampliamente conocida por sus buenas propiedades en la combustión. La realización de los experimentos presentados permite efectuar una primera aproximación de las toneladas anuales de biomasa con posible destino energético que se podrían obtener de la renovación de las plantaciones de cítricos en una determinada zona. Por ejemplo, estimando una renovación de plantaciones del 1% anual en la Comunidad Valenciana, se obtendrían unas 66.000 t de biomasa seca, sin contar las plantaciones arrancadas por cambio de cultivo o uso del suelo. Esta biomasa supone 1.242,12 millones de MJ disponibles.

Se han determinado los costes medios de extracción y transporte, así como la relación entre la energía consumida procedente de combustibles fósiles y la energía conseguida de la combustión de los materiales obtenidos. Esto hace posible evaluar el sistema desde un punto de vista económico y ambiental.

Por otra parte, un aprovechamiento integral de los residuos provenientes de estas plantaciones pasaría por considerar también la masa de materiales obtenidos de las podas. El estudio de estas actividades y las opciones tecnológicas posibles para ello son objeto de una línea de investigación que actualmente desarrolla el Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria de la Universidad Politécnica de Valencia.

Los resultados presentados son preliminares y serán complementados y validados después de varios años de evaluación. No obstante, empiezan a ser usados en los inventarios de biomasa actuales. ■

Bibliografía

Balboa M., Alvarez J.G., Rodríguez-Soalleiro R., Merino A. 2003. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte II: Cuantificación e Implicaciones ambientales. CIS-Madera 10: 27-37.

Montero G., Ruiz-Peinado R., Muñoz M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Ed INIA, Ministerio de Educación y Ciencia.

Schneider LC, Kinzig AP, Larson ED. 2001. Method for spatially explicit calculations of potential biomass yields and assessment of land availability for biomass energy production in Northeastern Brazil. Agriculture Ecosystems & Environment, 84(3): 207-226