

## *Mesa 5. Inventario y ordenación de sistemas y recursos forestales*

### **ACISA: INTEGRACIÓN DE CULTIVOS ENERGÉTICOS UTILIZANDO ANÁLISIS ESPACIAL AVANZADO. EL MODELO DE TRANSPORTE Y ALMACENAJE**

#### *Autores*

E. Castellano<sup>1</sup>, M. Pellitero<sup>1</sup>, M. Varela<sup>2</sup>, R. Saez<sup>2</sup>, H. Cabal<sup>2</sup>, C. Lago<sup>2</sup>, S. Kyritsis<sup>3</sup>, L. Kallivroussis<sup>3</sup>, P. G. Soldatos<sup>3</sup>, J.C. Sourie<sup>4</sup>, S. Rozakis<sup>4</sup>, H. Schwaiger<sup>5</sup>, G. Jungmeier<sup>5</sup>, M. Antinucci<sup>6</sup>, F. Fileni<sup>6</sup>, D. Goussios<sup>7</sup>, G. Faraslis<sup>7</sup>

#### *Resumen*

ACISA es un modelo de decisión multicriterio que permite la integración de sistemas energéticos basados en la biomasa. El modelo, que ha sido revisado por la comunidad científica europea, permite la integración de los cultivos energéticos a escala regional. Se trata de una herramienta analítica que cubre la cadena de biomasa para integrar los cultivos energéticos, tanto en su vertiente de productores de electricidad y calor como en la de biocombustibles líquidos. Además, ayuda al proceso de toma de decisiones al presentar la mejor solución integral desde la perspectiva E3 (económica, ambiental y energética), utiliza casos de estudio reales como validación y pone de manifiesto las potencialidades de utilizar un Sistema de Información Geográfica en la realización de estudios bioenergéticos considerando su dimensión espacial. El modelo permite mejorar el grado de conocimiento de los responsables de planificación bioenergética al desarrollar una herramienta integrada donde pueden elegir entre diversas estrategias en función de los diferentes puntos de vista (económico, ambiental o social) o la mejor solución de compromiso que cumple todas las preferencias. ACISA se compone de varios modelos implantados en un entorno SIG, dentro de los que se va a destacar la fase de almacenaje y transporte.

#### **PALABRAS CLAVE**

Biomasa, SIG, decisión multicriterio, aspectos socioeconómicos.

#### *Correo electrónico*

[ecz@tragsatec.es](mailto:ecz@tragsatec.es)

<sup>1</sup> Grupo Tragsa. C/ Julián Camarillo 6b-1ªC. 28037, Madrid.

<sup>2</sup> CIEMAT. Avda Complutense 22. 28040, Madrid.

<sup>3</sup> Universidad de Agricultura de Atenas. 75, Iera Odos, 11855, Atenas, Grecia.

<sup>4</sup> INRA. BP 01. 78850, Thiverval Grignon, Francia.

<sup>5</sup> JOANNEUM Research. Elisabethstrasse 5. 8010, Graz, Austria.

<sup>6</sup> ECUBA. Via del Cestello, 4. 40124, Bolonia, Italia.

<sup>7</sup> Universidad de Thessaly. Pedion Areos. GR38334, Volos, Grecia.

## **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

ACISA es un modelo de decisión multicriterio desarrollado por un equipo de expertos en producción de biomasa y explotación, diseñado para evaluar el abastecimiento de cultivos energéticos basados en la biomasa, así como para ubicar plantas bioenergéticas en determinadas regiones. Una de sus principales características es que incorpora la experiencia en el campo de los sistemas energéticos basados en la biomasa en una herramienta de decisión espacial, cuyo manejo resulta relativamente sencillo para los diversos agentes implicados.

Los dos componentes fundamentales de la herramienta son el Sistema de Información Geográfica (SIG), dentro del que se encuentran las bases de datos agro-económica y energética, y el Modelo Integrado. Este último se compone, a su vez, de siete modelos: producción de cultivos, transporte y almacenaje, gestión de reservas, conversión de energía, distribución de energía, modelo medioambiental y de criterio múltiple. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de los diferentes

componentes del modelo integrado, en el que se destaca la fase de transporte y almacenaje; el presente artículo se va a centrar en este módulo específicamente, para analizar la forma en que afecta al conjunto de la cadena de biomasa.

El objetivo concreto que se persigue es la determinación de los costes de transporte y almacenaje de cultivos energéticos mediante la incorporación de algoritmos escalares y vectoriales. De este modo se pondrá en evidencia la gran importancia que tienen estos costes para determinar el funcionamiento de la planta de transformación de biomasa y, lo que es más importante, su rentabilidad. En este sentido, el modelo de transporte calcula los costes de transporte de biomasa en función de la distancia recorrida y el tipo de vehículo empleado. La distancia real recorrida se estima a partir de la cobertura de la red de transporte integrada en el SIG y de determinadas características de la red. Por otro lado, el modelo de almacenaje calcula los costes en función del volumen almacenado.

## **2. METODOLOGÍA**

Se va a revisar de forma independiente la metodología empleada en las fases de transporte y almacenaje, para analizar los costes en los que se incurre en cada una de ellas, así como sus características específicas.

### **2.1. Modelo de transporte**

En primer lugar, para la determinación de los costes derivados del transporte de cultivos destinados a la producción de biomasa en el modelo integrado, es imprescindible disponer de información cartográfica digital y georreferenciada referente a:

- Parcelas agrícolas (cobertura vectorial).
- Red de carreteras (cobertura vectorial), en el que cada tramo tiene asignada una codificación en función de la categoría de la carretera.
- Modelo digital del terreno (cobertura raster).

La metodología de cálculo de los costes de transporte que se ha diseñado en el modelo integral depende, principalmente, de cinco variables. La primera de ellas, y por otro lado la más obvia, es la distancia, que se mide en km. Además, los costes varían en función del tipo de vehículo que se emplee para el transporte, tanto en lo que respecta a su capacidad de carga como a otros costes inherentes al uso del vehículo (mantenimiento, consumo de combustible y mano de obra). Además, se tiene en cuenta características de la red de transporte, como son la pendiente, tipo de carretera y las condiciones del tráfico. Por último, el tipo de cultivo energético y el tiempo empleado en la carga del mismo son otras variables consideradas.

En cuanto a la primera de las variables, la distancia real recorrida entre el cultivo y la planta de transformación se calcula automáticamente en el entorno SIG a partir de la información cartográfica digital citada anteriormente, por lo que la estimación del coste en función de la distancia no requiere ningún cálculo adicional.

El segundo componente del coste de transporte depende del tipo de vehículo que se emplee, y se compone del coste intrínseco (derivado de la depreciación, el mantenimiento y el envejecimiento del vehículo), el coste del conductor (coste horario de la mano de obra), el coste de combustible (coste derivado del precio del combustible, la potencia del vehículo y la velocidad media de éste) y, por último, el coste del lubricante (estimado como un porcentaje del coste del combustible). Los diferentes valores que se requieren para calcular los costes de transporte se han obtenido de las tarifas internas y la experiencia de empresas públicas (TRAGSA, 2000), así como de instituciones independientes (ATEMCOP).

Las características asociadas a la red de carreteras que influyen en el coste de transporte son el tipo de carretera, la pendiente, las condiciones del tráfico, la velocidad máxima de la carretera y la velocidad media del vehículo empleado. Todos estos rasgos afectan a la velocidad real del vehículo y, como consecuencia de la variación en el tiempo de transporte, se genera una variación en el coste final de transporte.

Hay que tener en cuenta también el tipo de cultivo energético, ya que su densidad va a condicionar qué clase de vehículo será necesario para el transporte y en definitiva el coste total del transporte.

La última variable que influye en el cálculo de los costes de transporte es el tiempo ocupado en la maniobra de carga del cultivo. Esta operación se estima teniendo en cuenta el coste de mano de

obra (cuando se recoja la biomasa directamente del suelo) y, en caso de llevarse a cabo empleando algún tipo de maquinaria, debe considerarse también el coste intrínseco del vehículo, el coste horario del conductor, del combustible y del lubricante.

En resumen, el módulo del coste de transporte se determina mediante una fórmula en la que intervienen el coste de la operación de carga de la biomasa, el coste del vehículo en función de la distancia recorrida y el coeficiente de retardo determinado por las características de la red de transporte.

## 2.2. Modelo de almacenaje

El modelo de almacenaje incluye tanto el que tiene lugar directamente en las parcelas agrícolas en que se encuentra el cultivo, como el que se realiza posteriormente en la planta transformadora.

En el modelo se han analizado especies con características muy diferentes, ya sea herbáceas (semillas de colza, girasol, maíz y trigo) como leñosas (eucalipto), por lo que se han estudiado diferentes sistemas de almacenaje. A grandes rasgos, se ha diferenciado entre almacenaje simple al aire libre: montones sin cubrir o cubiertos con plásticos o mediante un tejado, y métodos avanzados de almacenaje: silos de diversos tipos. En el primero de los sistemas el modelo evalúa balas grandes y redondas o pequeñas y rectangulares (RAYBURN, 1992), (WAHLBERG, 1995), (SMITH *et al*, 1996), (HUHNKE, 1997); mientras que en el sistema avanzado se analiza el almacén en silos de torre, silos de búnker y bolsas de ensilado (CROMWELL *et al*, 1992), (TURHOLLOW *et al*, 1996).

Las variables que condicionan la metodología de cálculo del coste de almacenaje son las siguientes:

- Inversión inicial necesaria
- Cantidad de maquinaria y mano de obra necesarias
- Cantidad de cultivo que se pierde durante el almacenaje
- Costes financieros por período de almacenaje

Los costes iniciales de inversión se calculan cuando para el almacenaje se requiere la construcción de una estructura, como es el caso de los silos de torre, silos de búnker y bolsas de ensilado, siendo nulos para el resto de sistemas.

Dentro de los costes de operación se incluyen los derivados de la maquinaria empleada y el material necesario para el almacenamiento, así como la mano de obra. En primer lugar, el coste de la maquinaria depende fundamentalmente de las características técnicas de la maquinaria que se haya elegido para el proceso de almacenaje; en este sentido, su metodología de cálculo es similar a la explicada para el coste de vehículo del modelo de transporte y, por tanto, se calcula a partir del coste intrínseco de la maquinaria (depreciación, mantenimiento y envejecimiento), el coste horario del operador, el coste derivado del precio del combustible y la potencia de la maquinaria y, por último, el coste del lubricante. Además del coste de la maquinaria, y dependiendo del tipo de almacenaje que se elija, pueden encontrarse otros costes como es el derivado de materiales adicionales necesarios para la operación de almacenaje (por ejemplo la cuerda de bramante para las balas).

El análisis de los costes de almacenaje sería incompleto si no se consideraran las pérdidas de material que se producen, y cuyo valor depende de diversas variables (condiciones climáticas, tipo de cultivo y de almacenaje, humedad,...). Estas pérdidas son consecuencia de filtraciones, fermentaciones y de la propia respiración del material, con el consiguiente peligro de auto-combustión.

## 3. RESULTADOS

A partir de las tarifas que se han empleado en la determinación de los costes asociados al transporte de biomasa, se observa que para diferentes tipos de vehículo los costes en los que se incurre varían, siendo mayores cuanto mayor es el tonelaje del mismo. Además, de los costes que componen el coste total del vehículo, el mayor porcentaje corresponde a sus costes intrínsecos, seguido por el del conductor y el combustible y, por último, una pequeña parte asociada al coste del lubricante.

Sin embargo, cuando se analizan los resultados del coste de la operación de carga, el principal componente es el coste del conductor, seguido del coste del combustible y una pequeña parte asociada al coste intrínseco y el gasto de lubricante.

Una vez se ha determinado la metodología necesaria para obtener el coste económico del

modelo de transporte (teniendo en cuenta la recogida de material, su almacenaje y el transporte a la planta transformadora), es posible integrarlo en el entorno SIG de ACISA para su modelización.

Al incorporar en los costes de transporte y de almacenaje el coste del conductor y el de combustible, en función del tipo de vehículo o maquinaria seleccionado, el modelo integral que se ha desarrollado proporciona importantes datos de salida relacionados con aspectos socioeconómicos, como puede ser la conservación del medio ambiente (a partir de los litros de combustible empleados) y los puestos de empleo que se van a generar (a partir de las horas de mano de obra necesarias en el proceso).

Con independencia de los anteriores resultados, el SIG incorporado al modelo integral debe realizar las operaciones necesarias para determinar el coste final derivado del análisis del transporte entre la parcela en que se encuentra el cultivo energético y la planta de transformación en energía. En primer lugar, el modelo interactivo construye el modelo de pendientes (expresado en forma de porcentaje) a partir del modelo digital del terreno y por aplicación de un algoritmo, obteniendo la pendiente celda a celda. A continuación, el modelo determina la pendiente media, en este caso, para cada tramo de carretera considerado, que el propio SIG incorpora a la tabla de atributos de la red de carreteras. Finalmente, sólo resta por ejecutar el cálculo del coste final de transporte de la cadena completa, es decir, desde la parcela en que se localiza el cultivo hasta la planta de transformación; el modelo separa el cálculo en tres operaciones: coste de transporte entre la parcela agrícola y el punto más cercano de la red de carreteras, coste del itinerario seguido por la red de carreteras y, para terminar, el coste entre la red de carreteras y la planta de transformación. De forma automática el modelo elige la ruta de coste mínimo, y determina el valor del coste total derivado del transporte como la suma algebraica de los tres costes.

El modelo calcula los costes de pérdidas durante el almacenaje sin más que considerar el porcentaje de pérdida según tipo de almacenaje elegido, la cantidad de material y el precio del cultivo.

Por último, el modelo es capaz de calcular los costes financieros de la fase de almacenaje empleando un módulo de stock compatible con diversas especies y teniendo en cuenta los requerimientos de la planta de transformación que se esté modelizando.

Los resultados finales que se obtienen por integración de la fase de transporte y almacenaje (teniendo en cuenta también la recogida del cultivo) se van a reflejar en forma de mapas, en los que se van a diferenciar zonas de coste variable, principalmente en función de la distancia desde la parcela a la planta de transformación, como puede verse en la Figura 2. De esta forma el modelo puede determinar el mejor itinerario (de menor coste) para una planta de transformación de biomasa dada y las parcelas de cultivo que aparecen en el mapa de la zona.

Además, el modelo está diseñado para permitir hacer pruebas modificando los datos de costes y la ubicación de una posible planta, de forma que genere el mayor beneficio para la zona en cuanto a puestos de trabajo, respetando al máximo otras variables como la contaminación derivada del proceso, proximidad a núcleos de población, red de carreteras,... De esta manera, la herramienta implantada en el SIG permite cuantificar el coste total de poner en práctica estrategias orientadas a facilitar la integración de cultivos energéticos, para hacerlos más competitivos, aportando información fiable a los diversos sectores que se ven afectados en este tipo de decisiones (agricultores, cooperativas, empresarios, gobierno, autoridades regionales, expertos en medio ambiente,...).

#### **4. CONCLUSIONES**

En muchos casos, las características de la propia planta de transformación (fundamentalmente su capacidad de almacenaje) van a determinar el tipo de método de recogida y transporte, así como la elección del tipo de almacenaje apropiado. Sin embargo, se observa que la distancia real recorrida es una de las características que mayor influencia tiene en la determinación de las curvas de coste, ya que definen áreas con distintos rangos de coste.

Disponer de una herramienta como ésta supone una gran ayuda para la toma de decisiones, y para analizar diversas alternativas sobre la viabilidad de instalar una planta en una determinada zona, viendo cómo varían los costes de parcelas situadas en diferentes lugares.

ACISA permite a los usuarios hacer pruebas interactivas con distintas opciones (tipo de transporte, vías de comunicación, maquinaria empleada en el almacenaje,...), además de ofrecer la mejor opción que se adapte a una serie de preferencias elegidas.

## 5. REFERENCIAS

ATEMCOP. Revista técnica dirigida al sector de la construcción, las obras públicas y la minería. *Asociación de Técnicos de maquinaria para la Construcción y las Obras Públicas*. Madrid. Mensual. ISSN: 0211-8319.

CROMWELL, R.P.; PREVATT, J.V. & BECKER W.J. 1992. *Silage storage structures*. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences.

HUHNKLE, R. 1997. *Hay harvesting, handling and storage*. Oklahoma Cooperative Extension Service. E-826, Chapter 11.

RAYBURN, E.B. 1992. *Round bale storage costs*. West Virginia University Extension Service.

SMITH, J.A.; GRISSO, R.D.; VON BARGEN, K. & ANDERSON, B. 1996. *Management tips for round bale harvesting, moving and storage*. University of Nebraska Cooperative Extension.

TRAGSA (Empresa de Transformación Agraria, S.A.). 1999. Tarifas de trabajos. Costes 2000.

TURHOLLOW, A.; DOWNING, M. & BUTLER, J. 1996. The cost of silage harvest and transport systems for herbaceous crops. BIOENERGY'96. *The Seventh National Bioenergy Conference: Partnerships to Develop and Apply Biomass Technologies*. Nashville, Tennessee.

VARELA, M.; SAEZ, R.; CABAL, H.; LAGO, C.; KYRYTSIS, S.; KALLIVROUSSIS, L.; SOLDATOS, P.G.; SOURIE, J.C.; ROZAKIS, S.; CASTELLANO, E.; PELLITERO, M. SCHWAIGER, H.; JUNGMEIER, G.; ANTINUCCI, M.; FILENI, F.; GOUSSIOS, D. & FARASLIS, G. Global analysis of energy crops in a spatial dimension. CIEMAT, Colección Documentos, 2004.

WAHLBERG, M.L. 1995. *Hay as part of cowherd production system*. Virginia Cooperative Extension. Publication 400-002.

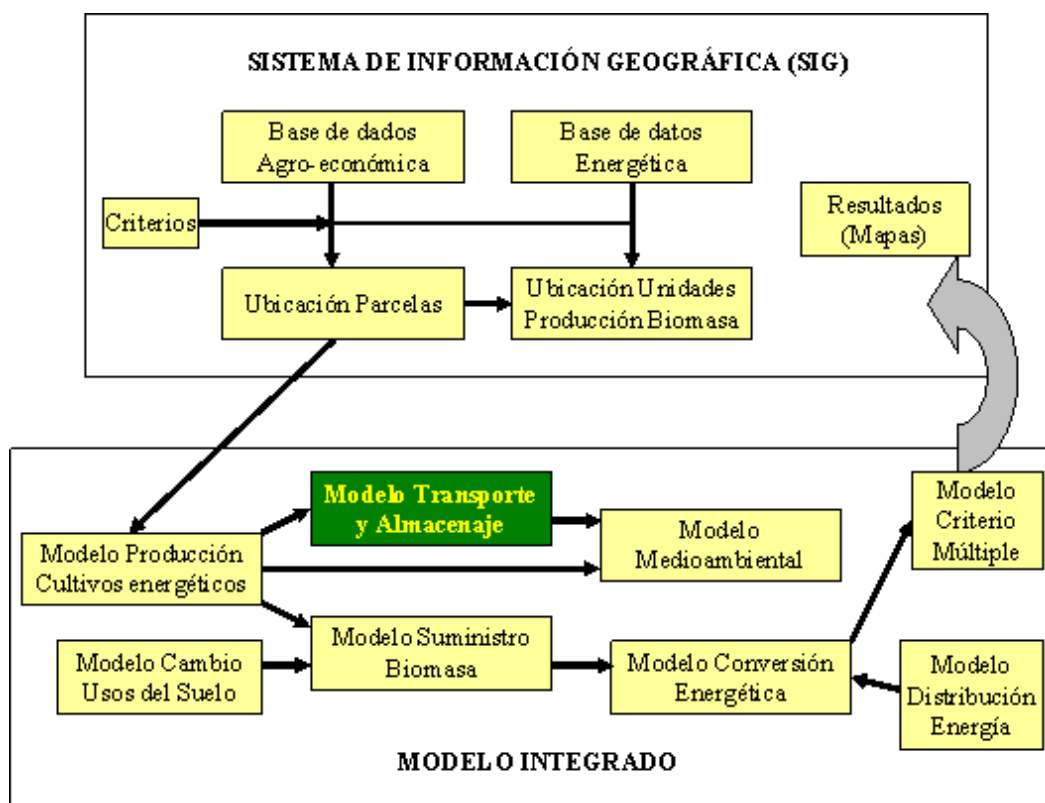


Figura 1. Diagrama del modelo integrado de decisión multicriterio (ACISA)

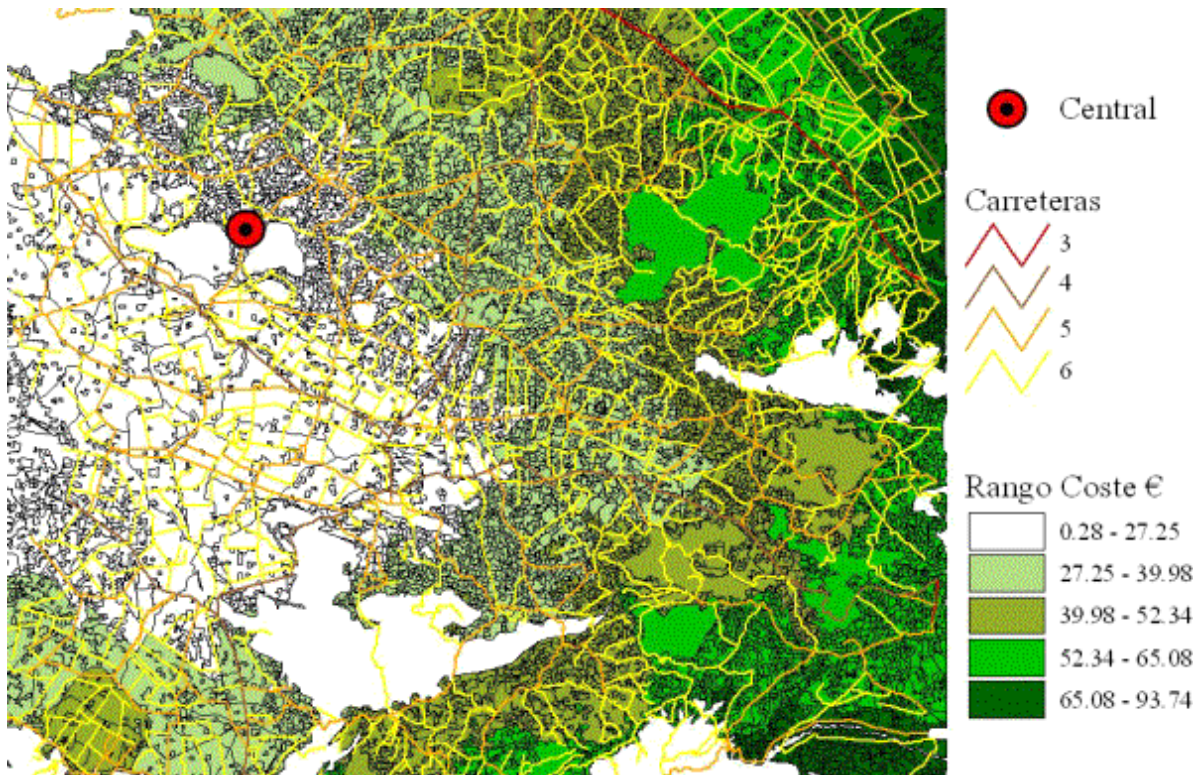


Figura 2. Mapa de rangos de coste de recolección, transporte y almacenaje para una determinada ubicación de la central