

[CAMBIO CLIMÁTICO]

Panorama de la agricultura ante el desafío energético y el cambio climático

José Ramón Guzmán Álvarez *

Asesor Técnico. Viceconsejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía

El encarecimiento del precio de la energía y la lucha contra el cambio climático plantean un horizonte de nuevos retos para la agricultura. El balance energético de las actividades agrícolas y ganaderas, sin embargo, se le ha prestado insuficiente atención, a pesar de ser uno de sus aspectos esenciales. Al contrario que la mayor parte de las actividades económicas humanas, puede ofrecer contrapartidas que contribuyan positivamente a la reducción de las emisiones de CO₂.



La crisis actual presenta dos facetas complementarias. Por una parte, los acontecimientos recientes están reforzando la hipótesis científica de que asistimos a un cambio climático acelerado. Por otra, el encarecimiento aparentemente imparable del petróleo se ha acelerado durante el periodo 2006-2008, ante la insuficiente oferta para satisfacer la demanda mundial y otros factores coyunturales que están afectando a su cotización.

Ambos elementos coinciden en sus causas y efectos porque el modelo energético actual está fundamentado en la extracción de la energía acumulada durante eones en forma de depósitos biológicos (petróleo, carbón y gas natural): la mayor parte de la energía que consumimos no es más que los rayos de sol almacenados en enlaces químicos por seres vivos pasados.

¿Cuál es la situación de la agricultura

ante esta crisis anunciada? El aumento del precio de la energía ya se está manifestando en la balanza económica de las explotaciones. Paralelamente, se deberá dar respuesta a los desafíos derivados de la mitigación y la adaptación al cambio climático (Olesen y Bindi, 2002).

La agricultura cuenta con una importante particularidad: al contrario que la mayor parte de las actividades económicas humanas, puede ofrecer contrapartidas que contribuyan positivamente a la reducción de las emisiones de CO₂. Al tratarse de una actividad productiva primaria que se basa en última instancia en la fijación de dióxido de carbono mediante la capacidad fotosintética de los vegetales, está abierta a planteamientos que mejoren los balances de captación y almacenamiento de CO₂ lo que, a la postre, redundará en los balances energéticos.

La mejora del balance global de CO₂ de las actividades agrarias se puede abordar desde dos perspectivas: a través de la reducción de las emisiones y mediante el aumento de la capacidad de almacenamiento de anhídrido carbónico (secuestro de carbono).

La reducción de las emisiones, tanto a escala de explotación como a escalas mayores, se puede conseguir disminuyendo la energía utilizada (a través de mejoras en la eficiencia energética o agronómica, del ahorro y racionalización del uso de los combustibles fósiles, de fertilizantes, etc.; véase por ejemplo IDAE, 2005), produciendo energía biológica que sustituya parte de la energía fósil utilizada o aumentando la capacidad como sumidero de carbono.

Las acciones que se propongan se han de enfrentar a los problemas técnicos y sociales y, en la medida de lo posible, deberán tomar en consideración la compleja regulación internacional. Por ejemplo, de acuerdo con el artículo 3.4. del Protocolo de Kyoto

* Dr. Ingeniero Agrónomo. En la actualidad trabaja como Consejero Técnico de la Secretaría General de Políticas Ambientales de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

to, el aumento de la capacidad de almacenamiento o secuestro de CO₂ se podrá conseguir acrecentando la materia orgánica de los suelos, convirtiendo las tierras agrícolas en pastizales, aumentando la materia orgánica leñosa o mediante medidas de forestación.

[El cambio climático: algo más que una hipótesis

El clima mundial ha cambiado siempre. De hecho, el clima actual, tal y como lo conocemos, no deja de ser un episodio breve e inusual. Hace tres millones de años las condiciones del sur europeo eran tropicales. Solamente a partir de una serie de cambios geológicos que afectaron a la distribución de las masas continentales, se dio origen a este clima tan curioso en el que las mejores condiciones de iluminación y temperatura para las plantas coinciden con una carencia de agua crítica.

Desde la última glaciación, que finalizó hace unos 12.000 años, la temperatura media ha ascendido 8° C por causas naturales. Este cambio natural, gradual, ajeno a nuestro devenir, está siendo matizado por un nuevo tipo de cambio climático inducido por la actuación humana. El principal causante de ello parece ser la acumulación de Gases de Efectos Invernadero (GEI): el CO₂ es el más famoso, pero no el único, como veremos. La cantidad de estos gases en la atmós-

fera ha subido vertiginosamente desde la revolución industrial, que tuvo lugar hace menos de tres siglos. Hoy en día (2005) la concentración de CO₂ ha aumentado hasta 379 ppm (partes por millón), a partir del valor preindustrial de 280 ppm, nivel máximo no alcanzado en los últimos 650.000 años.

La elevada velocidad del cambio actual y el hecho de que sus efectos tengan consecuencias sobre el futuro de la Humanidad en su conjunto convierten al cambio climático en el mayor desafío ambiental al que nos hemos enfrentado.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su cuarto informe de evaluación (IPCC 2007) afirmó que, con un nivel muy alto de confianza, "el efecto neto medio de las actividades humanas desde el año 1750 ha resultado en un calentamiento", que posteriormente describe como inequívoco, tal y como evidencian las observaciones. A pesar del alto grado de incertidumbre, el IPCC prevé un aumento de 1,8 a 4°C en las temperaturas del aire en superficie en nuestro planeta en los próximos 100 años. Como demostración de esta realidad, la temperatura media anual de Europa ha aumentado entre 0,3 y 0,6 ° C desde 1990.

Con la finalidad de hacer frente a este reto, la comunidad mundial ha puesto en marcha diversas iniciativas. En 1992 se cele-

bró la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) que estableció como obligación para los países signatarios la puesta en marcha de programas nacionales de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero; además, apelaba a que los países industrializados estabilizaran en el año 2000 sus emisiones respecto a los niveles de 1990. La CMCC instaba también a todas las partes a que se comprometiesen a elaborar, actualizar periódicamente, publicar y poner a disposición de la Conferencia de las Partes sus inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico, valorando las fuentes y sumideros.

El Protocolo de Kyoto (1997) supuso un paso más en las actuaciones para reducir el impacto del cambio climático al establecer unos límites jurídicamente vinculantes a las emisiones de GEI en los países industrializados y contemplar mecanismos de ejecución basados en el mercado con el objetivo último de poner límite a las emisiones. Los mecanismos y las reglas de aplicación fueron concretados en los Acuerdos de Marrakech de 2001. La UE ratificó este protocolo el 31 de mayo de 2002.

El compromiso mundial de Kyoto obliga a reducir las emisiones durante el periodo 2008-2012 al menos en un 5% con respecto a los niveles de 1990. La UE tiene el mandato de reducir sus emisiones globalmente en



Mediante el MDL, los países industrializados pueden ejecutar o invertir en proyectos de reducción de emisiones de GEI (como proyectos de energías renovables



un 8% (336 millones de toneladas equivalentes de CO₂). España resultó favorecida, ya que puede aumentar sus emisiones en un 15% respecto al nivel de emisiones de 1990 debido a su desarrollo económico menor.

[Derechos de emisión

La UE ha puesto en práctica un régimen de comercio de derechos de emisión, en línea con los instrumentos flexibles descritos en el Protocolo. Este régimen afecta a los sectores más intensivos en el uso de energía (sectores regulados). Por este mecanismo los países asignan a sus industrias cuotas para sus emisiones de GEI, con la opción de comprar, vender o intercambiar en el mercado internacional: cuando comenzó a operar este mecanismo el precio del derecho alcanzó los 30 €/t de CO₂, si bien en el año 2006 ha descendido hasta los 10 – 15 €/t.

Otro instrumento contemplado en el protocolo de Kyoto para contener las emisiones son los denominados Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Mediante el MDL, los países industrializados pueden ejecutar o invertir en proyectos de reducción de emisiones de GEI (como proyectos de energías renovables, eficiencia energética y forestación o reforestación) en países que no tengan establecidos compromisos de reducción dentro del Protocolo, siempre y cuando estos proyectos contribuyan al desarrollo sostenible del país donde se lleven a cabo.

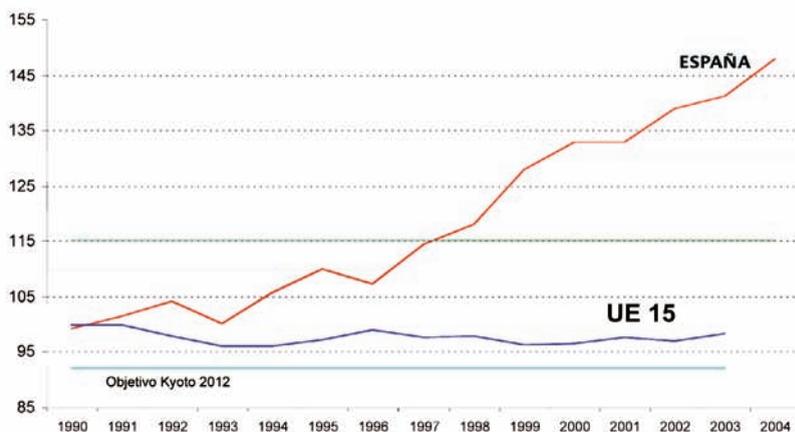
Estamos muy lejos de cumplir el compromiso adquirido: en el año 2004, las emisiones de gases de efecto invernadero de nuestro país superaban en un 48% las emisiones del año de referencia (**Figura 1**). Las previsiones de crecimiento de las emisiones españolas se elevan a más del 55% de crecimiento para los próximos años: este exceso, estimado en 123 millones de toneladas de CO₂, no será gratuito: tendrá un precio en el mercado europeo de emisiones, lo que supondrá un importante desembolso para la economía.

En 1998 se creó el Consejo Nacional del Clima como órgano colegiado para tratar los temas relacionados con el Cambio Climático. En el 2004 fue aprobado el borrador de la Estrategia Española de Lucha contra el Cambio

Figura 1:

Evolución porcentual de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero en relación con los niveles de 1990 (índice 100).

Fuente: Banco Público de Indicadores Ambientales del Ministerio de Medio Ambiente (www.mma.es)



Climático que incluye 440 medidas para reducir las emisiones, incluidas en cinco grandes ámbitos de actuación: la ordenación del territorio, el ahorro y eficiencia en el consumo de energía, el uso de las mejores tecnologías disponibles en las actividades económicas, medidas fiscales que favorezcan una menor contaminación y la aplicación de sistemas de gestión y control ambiental en los sectores implicados. En Andalucía se aprobó el 3 de septiembre de 2002 la Estrategia Autonómica ante el Cambio Climático y en la actualidad está desarrollando el Plan Andaluz de Acción por el Clima 2006-2008.

[Efectos del cambio climático

La relación entre la agricultura y el calentamiento de la atmósfera debido a la acción humana es recíproca y compleja. Como cualquier otra actividad, la agricultura se verá muy afectada. Sin embargo, el sector agrario cuenta con la particularidad de poder ejercer un papel beneficioso en la mitigación de los efectos del calentamiento global a través de su capacidad de secuestrar carbono (Pretty y Ball, 2001).

A nivel mundial se estima que el sector agrícola produce solo una quinta parte de los gases de invernadero (IPCC, 2001), siendo el causante del 50% al 70% de las emisiones de metano y de óxido nítrico y de un 5% de las

de CO₂. En el caso concreto de España, según la evaluación de la distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2002, se estima que la agricultura aporta el 11% de las emisiones (Ministerio de Medio Ambiente, http://www.mma.es/oec/cespana/cce_egei_pad.htm).

Los efectos del aumento de concentración de gases de efecto invernadero sobre la agricultura son todavía inciertos, pero se cuenta ya con la suficiente evidencia científica como para que sean tenidos en consideración (Olesen y Bindi, 2002). Los cambios en la concentración de CO₂, en los valores de la temperatura del aire y del suelo, así como las variaciones en las precipitaciones estacionales tendrán



efectos contrapuestos y no uniformes en España. En realidad, los efectos podrán ser beneficiosos o dañinos para diferentes especies, sistemas agrarios o localidades (Mínguez Tudela et al, 2005).

En el sur de Europa se acrecentarán las temperaturas (sobre todo la intensidad y duración de las máximas y mínimas) y la demanda de agua, por lo que el estrés térmico hará más difícil el desarrollo de la agricultura tal y como hoy la conocemos. La respiración alcanzará tasas más elevadas y el desarrollo se acelerará; en consecuencia, habrá desajustes fisiológicos (es previsible una maduración más temprana, pero con menores niveles de crecimiento).

Aumentará la tasa de descomposición de la materia orgánica, lo que tendrá evidentes efectos sobre la fertilidad del suelo y la aplicación de fertilizantes. La disminución en el contenido de materia orgánica hará a los suelos más susceptibles a la erosión. Es previsible que la variación de otros factores atmosféricos, como la radiación ultra violeta y el contenido de ozono troposférico, también influyan sobre las especies cultivadas, pero sus efectos son, hoy por hoy, indeterminados.

El clima mediterráneo, ya de por sí azaroso, aumentará su irregularidad, limitando aún más la capacidad de adaptación de la agricultura a las condiciones medioambientales. La demanda de agua para riego tendrá que someterse a la disponibilidad, que se



La concentración de CO₂ en la atmósfera ha variado a lo largo de la historia del planeta, nunca ha permanecido estable

verá muy afectada. Presumiblemente, las nuevas condiciones meteorológicas serán más favorables para la proliferación de plagas y de patógenos de las especies ganaderas.

La medición del cambio

Para valorar los efectos de la agricultura sobre las emisiones de GEI es necesario estar habituados a las unidades de medida. La principal consecuencia de la acumulación del CO₂ en la atmósfera es la intensificación del efecto invernadero. Se estima que las emisiones de CO₂ son responsables del 65% del efecto invernadero.

¿Cómo se cuantifica el efecto invernadero? Hemos visto que la variación de la concentración de CO₂ en la atmósfera se suele expresar en ppm. Para valorar la emisión de gases y su almacenamiento se emplea una unidad más familiar: el kilogramo o, en su caso, la tonelada y sus múltiplos. En realidad, se emplean dos unidades: el peso de anhídrido carbónico equivalente y el peso de carbono equivalente. Dado que la relación entre los pesos moleculares del CO₂ y del C es de 44/12, el factor de conversión es igual a 3,67.

La magnitud de las cifras a escala planetaria es desorbitada. Según cálculos de finales de la década de 1990, en la atmósfera hay acumulados 760 Gt de carbono (una Gigatonelada = 10⁹ t, es decir, mil millones de toneladas), en la vegetación 500 Gt, en el suelo 2.000 Gt y en el océano 39.000 Gt (Houghton, 2004). Emitimos unas 6,3 Gt de carbono al año procedentes de los combustibles fósiles, de las cuales 2,3 Gt se disuelven en el océano, 0,7 Gt se acumulan en el suelo o en los ecosistemas terrestres y las restantes 3,3 Gt pasan a formar parte del carbono atmosférico, aumentando el efecto invernadero.

En el caso concreto de España en 2003 emitimos un total de

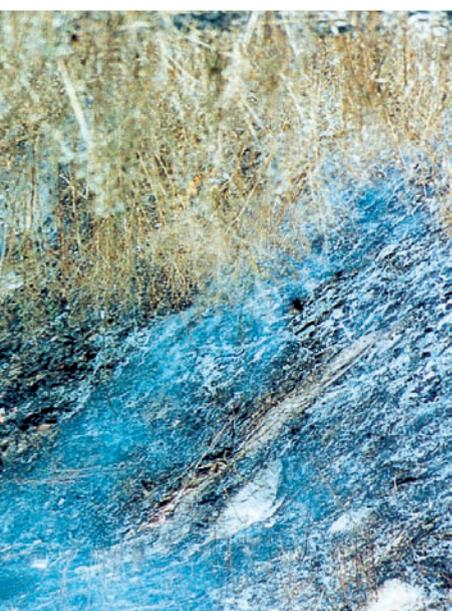
110.179.510 toneladas de C (o lo que es lo mismo, 404.358.802 tCO₂), contribuyendo aproximadamente al 1,7% de las emisiones mundiales.

Pero, ¿cuánto es una tonelada de carbono? Para hacernos una idea, tomemos una referencia conocida por todos: la fijación de dióxido de carbono por las plantas. La fracción de carbono de los seres vivos depende de su composición molecular. Lo primero que tenemos que hacer es eliminar el agua de los tejidos, por lo que tomaremos la materia seca. En el caso de las plantas, una buena aproximación es que el 50% del peso seco es carbono (aunque para ser más exactos habría que utilizar el porcentaje del 44,4% como contenido medio de carbono de la celulosa). Pesar un árbol es complicado pero realizable: el problema principal estriba en extraer las raíces. Estudios recientes muestran que, por ejemplo, un acebuche de 50 cm de diámetro de tronco pesa, raíces incluidas, 1.397 kg, lo que supone 698 kg de carbono o, lo que es lo mismo, 2,563 toneladas de CO₂ (Consejería de Medio Ambiente, 2005).

La captación de CO₂

El Protocolo de Kyoto (artículo 3) establece que en la contabilidad de emisiones y absorción de GEI desde 1990 se “podrán tener en cuenta las actuaciones relacionadas con el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (forestación, reforestación y deforestación), pero también, y a efectos de cálculo para el primer periodo de compromiso, las derivadas de los suelos agrícolas”. En el Acuerdo de Bonn de julio de 2001 se clarificó este artículo estableciéndose que se podrán considerar como actividades elegibles los cambios de sistemas de manejo de cultivo siempre que hayan ocurrido después de 1990 y sean inducidos por el hombre. El Acuerdo de Marrakech estableció reglas jurídicamente vinculantes para el informe y la contabilidad de los sumideros agrícolas.

Las fuentes de GEI achacables a la agricultura son, según el IPCC: la fermentación entérica y el manejo del estiércol derivada del ganado doméstico; la emisión de metano en los arrozales; las quemadas prescritas de sabanas y la descomposición de la materia orgánica de los suelos.



En consecuencia, y de acuerdo con las indicaciones de las directrices del IPCC y diversos estudios (Pretty y Ball, 2001; Vleeshouwers y Verhagen, 2002; Lal, 2004; Martens et al, 2005; Franzluebbbers, 2005), la agricultura puede ayudar a reducir las emisiones contabilizadas oficialmente actuando sobre los siguientes aspectos: incidiendo en el manejo del estiércol para reducir el factor de emisión debido a cada tipo de manejo (lagunas anaeróbicas, abonado, cría extensiva); reduciendo la emisión del metano derivado del cultivo del arroz; reduciendo las emisiones de óxido de nitrógeno derivada de la supresión de la quema de rastrojos; reduciendo la emisión de nitrógeno derivada de los fertilizantes sintéticos y de otras fuentes; promoviendo tecnologías más eficientes energéticamente en las industrias agroalimentarias; en lo que se refiere al balance global de carbono, promoviendo sistemas de manejo que reduzcan la utilización de fertilizantes y fitosanitarios de síntesis.

En lo referente al papel de sumidero de GEI, las posibilidades de contabilizar oficialmente las captaciones debidas a la agricultura son pocas. Una alternativa sería incluir el secuestro de carbono en los suelos agrarios, de acuerdo con el artículo 3.4 del Protocolo de Kyoto, pero esta propuesta es muy discutida debido al carácter temporal del almacenamiento (Robert, 2001; Pretty y Ball, 2001; Franzluebbbers, 2005). Otra sería reconocer la capacidad de sumidero del crecimiento de las plantaciones leñosas, ya sean de árboles de cultivo o de especies forestales que ocupen antiguas tierras labradas. Sin embargo, como hemos vis-



Ejemplos de aplicación agroenergética

1. Carbono almacenado por las nuevas plantaciones de olivar y la reforestación de tierras agrarias en Andalucía

En los últimos años estamos asistiendo a un cambio de uso muy importante en la agricultura andaluza. Si por un lado se está perdiendo superficie cultivada (entre 1987 y 2003 la superficie agraria ha pasado de constituir el 57,1% del territorio al 44,7%), por otro lado se está produciendo una reorientación productiva del espacio agrícola. En concreto, entre 1990 y 2003 se han puesto más de 37 millones de olivos, lo que supone unas 250.000 ha de nuevos olivares. Otro cambio de uso destacado ha sido el derivado de las ayudas a la reforestación en terrenos agrícolas, que durante su período de vigencia ha favorecido la plantación de 139.237 ha.

¿Cuánto carbono se ha retirado de la atmósfera como consecuencia de todo ello? Para determinar el carbono almacenado por las nuevas plantaciones de olivar (Consejería de Agricultura y Pesca – Unidad de Prospectiva, 2006) se partió de la información procedente de las solicitudes de ayuda a la producción de aceite de oliva y las declaraciones de cultivo de olivar. Como estimación del CO₂ fijado por los nuevos olivares, se aplicaron los valores modulares obtenidos por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para el acebuche, lo cual supone una aproximación preliminar. Por último, a cada edad de los olivos se le asignó un diámetro medio de fuste representativo.

Según estas premisas, los 37.348.346 olivos puestos entre 1990 y 2004 han fijado 5.239.461 tCO₂ (toneladas de CO₂) ó 1.427.646 tC (toneladas de Carbono), con una tasa de captación de carbono durante el último año (de 2004 a 2005) de 253.835 tC/año (931.504 tCO₂), lo que es equiparable al 12,5% de la tasa estimada de fijación por parte de la superficie forestal de Andalucía, según el Inventario de Captaciones de la Consejería de Medio Ambiente. La tasa de fijación de las nuevas plantaciones equivale al 1,62% de las emisiones de GEI de Andalucía del año 2003 (que sumaron 57.615.726 tCO₂).

La superficie plantada mediante las ayudas a la reforestación de tierras agrícolas asciende a 139.237 ha. Según una estimación realizada por el Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba, el carbono acumulado en 2005 se estima en 236.033 tC bajo unas hipótesis de crecimiento optimistas y en 188.826 tC para una hipótesis pesimista. El crecimiento de estos bosques permitiría acumular carbono a una tasa de 50.578 tC/año bajo las condiciones optimistas ó 40.462 tC/año bajo las pesimistas (se adopta como valor representativo la media de esas dos cifras: 45.000 tC/año).

2. Flujo de energía en el olivar

El cultivo del olivo ocupa 2.400.000 ha en toda España. En las últimas tres décadas se ha asistido a su modernización (Barranco et al, 1999) tras la definitiva desaparición del



El secuestro biológico de carbono debe ser un elemento dentro del conjunto de medidas para mitigar los efectos del cambio climático que se adopten a corto y medio plazo en espera de que se desarrollen tecnologías para reducir las emisiones

to, este reconocimiento no resulta fácil debido a la rigidez de los aparentemente flexibles mecanismos incluidos en el Protocolo de Kyoto.

El carbono es intercambiado de forma natural por las plantas a través de procesos como la fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión. Actuaciones humanas relacionadas con los usos de la tierra, cambios de usos y silvicultura, entre otras, conllevan cambios en los reservorios de carbono e intercambios de carbono entre la atmósfera y los ecosistemas (Lal *et al*, 2004).

Por ello, es necesario distinguir en-

tre reservorios y sumideros. Un reservorio de carbono es todo sistema capaz de acumular o liberar carbono, como por ejemplo la biomasa forestal, los productos de la madera, los suelos o la atmósfera; se expresa en unidades de masa. Un sumidero es aquel proceso o mecanismo que hace desaparecer de la atmósfera CO₂. Un reservorio dado puede ser un sumidero de carbono atmosférico si durante un intervalo de tiempo es mayor la cantidad de carbono que afluye a él que la que sale de él.

El retraso entre la acumulación y la pérdida representa el “secuestro” que

es un reservorio temporal por definición. Por tanto, los bosques y otras formaciones vegetales así como los productos derivados de la madera son reservorios de carbono sólo de forma temporal, pudiendo compensar durante ese lapso de tiempo parte de las emisiones de carbono de origen antropogénico. De hecho, los sistemas pueden variar su condición de sumidero o fuente con el paso del tiempo, a veces de manera brusca, como ocurre cuando se quema un bosque. Como consecuencia de este carácter temporal, la contabilidad del carbono almacenado en la biomasa

cultivo tradicional, lo que ha implicado la incorporación de importantes subsidios externos energéticos al agrosistema. Hay que tener en cuenta que el cultivo del olivar tradicional, previo a la intensificación, apenas introducía energía externa al sistema (Naredo, 1983). En la actualidad conviven diferentes estilos de olivicultura (Guzmán Álvarez, 2005): desde el muy intensivo que ocupa parcelas principalmente de regadío y que está basado en un



marco de plantación muy estrecho y una mecanización prácticamente completa de todas las labores, hasta olivares enclavados en enclaves agrológicos marginales y que reciben pocos subsidios externos.

Han aparecido, además, estilos de olivicultura que dependen de la realización de determinadas prácticas y recomendaciones de cultivo regladas como la olivicultura ecológica o la producción integrada.

Por otra parte, el olivar está siendo objeto desde hace una década de estudios para valorizar sus residuos y su conversión en biomasa. Las alternativas propuestas se basan en el aprovechamiento de los residuos de poda y de los subproductos del aceite de oliva (orujo de dos fases – alpeorujo – y los restos de pulpa y huesos de aceituna). Para estudiar el efecto de diferentes estilos de cultivo sobre el olivar se ha realizado una primera aproximación al balance de energía y de carbono de una explotación olivarera de secano extensivo en una localización campi-

ñesa idónea para su cultivo, con un rendimiento medio de 4.000 kg de aceituna/ha y una densidad de 100 árboles por hectárea. Se han incluido los siguientes estilos de olivicultura: agricultura actual convencional sólo con laboreo, semilaboreo con cubierta vegetal espontánea y olivicultura ecológica.

La información de partida sobre las labores de cultivo y los insumos se han tomado de Guerrero (1989), Barranco *et al* (1999) y para el caso de la olivicultura ecológica, Sánchez Sánchez, (2003), modificando la necesidad de abono orgánico equivalente precisa para obtener una producción de 4.000 kg/ha de acuerdo con los datos de Naredo (1983).

En el cultivo convencional no se han tenido en cuenta los herbicidas residuales de uso frecuente, pero cuya utilización está actualmente limitada por su incidencia en la contaminación de los acuíferos. No se han considerado los costes energéticos de mayor dificultad de evaluación (y en cual-

quier caso, con una importancia menor sobre los balances) asociados a la construcción y mantenimiento de la maquinaria y los asociados al transporte de los productos de la explotación (véase Guzmán Álvarez, 2007).

3. Balance de energía del cultivo de colza en secano para la obtención de energía

Como ejemplo de estimación de la eficiencia energética de los cultivos agroenergéticos, se propone un balance energético y de emisiones de carbono de

un cultivo de colza en condiciones de secano. La información de partida se ha tomado de Guerrero (1999). Los valores representativos energéticos y de emisiones se han tomado de las referencias de West y Marland (2002), teniendo en cuenta el carácter de primera aproximación de esta simulación. El ratio de energía (entrada/salida) es positivo: se obtienen 1,5 unidades de energía por cada unidad que se consume en el proceso global. La fracción más significativa del consumo energético se debe al abonado, en concreto a la fertilización nitrogenada, que requiere el 59% de la energía necesaria para la producción del cultivo. La rotación con leguminosas podría reducir en parte esta gran demanda de energía fósil: una hectárea de veza, por ejemplo, puede fijar entre 75 y 100 unidades de N/ha y año (Vay *et al*, 1989; <http://www.sarep.ucdavis.edu/ccrop/>). El balance de carbono es favorable, lográndose una reducción en las emisiones de carbono fósil de 308 kg de carbono por hectárea de colza.

vegetal está sometida a unos criterios particulares.

Se admite que los ecosistemas maduros se caracterizan por poseer un nivel de equilibrio en su contenido de carbono (no serían por tanto sumideros, sólo reservorios). Por el contrario, los árboles recién plantados o en regeneración absorben carbono durante 20 a 50 años o más, aún una vez establecidos dependiendo de la especie y del lugar.

Valores típicos de contenido de carbono en los suelos mediterráneos (cambisoles, calcisoles) oscilan entre 10 y 20 tC/Ha en los primeros 30 cm y 25-50 tC/ha en el primer metro de profundidad (en los vertisoles estos valores aumentan hasta 45 tC/ha y 110 tC/ha respectivamente), con una gran variación dependiendo de las prácticas de manejo (Robert, 2001).

El laboreo intensivo de las tierras agrícolas causa pérdidas sustanciales del carbono del suelo (la conversión de un terreno forestal en cultivo de maíz en Francia conllevó una pérdida del 25% del carbono en los cinco primeros años y del 50% en tres décadas, Arrouays y Péliissier, 1994).

Los resultados de los experimentos que se llevan a cabo en la estación de Rothamsted desde el año 1843 son igualmente ilustrativos: los suelos que reciben aportación adicional de materia orgánica duplican su conte-

nido en carbono y en los que se conservan los residuos mantienen estable la materia orgánica; por el contrario, la transformación de pastizales en tierras arables supuso la pérdida del 55% del carbono en 20 años, pasando del 3,5% al 2% de carbono en el suelo (Robert, 2001).

Secuestro del carbono

La práctica de laboreo de inversión/volteo del suelo es la causa principal de las emisiones de CO₂ en las áreas cultivadas (Olson et al, 2005). Dado que las principales pérdidas de CO₂ se deben a la fragmentación del suelo que ocasiona el laboreo y que facilita el intercambio de CO₂ y O₂ desde el suelo a la atmósfera y viceversa, todas aquellas prácticas de cultivo que supongan aumentar la materia orgánica, incrementarán el secuestro de CO₂.

La cuantía de la incorporación de carbono dependerá de las condiciones edafológicas y climáticas. Estudios recientes estiman que las prácticas de conservación del suelo afectan muy positivamente al contenido de carbono en el suelo (Tebrügge, 2001). Así, la siembra directa puede producir un aumento de carbono en el suelo de 0,77 toneladas por ha y año y el mínimo laboreo de 0,5 t de carbono por ha y año (recordemos que el almacenamiento de 1 tonelada de carbono produce una captura de 3,7 toneladas de CO₂). A esto hay que añadir el balance energético derivado del ahorro de combustible derivado de las prácticas agrícolas de conservación (sabiendo que un consumo de 100 litros de combustible produce la emisión de 94 kg de carbono y 345 Kg de CO₂).

Otras estimaciones cifran en una capacidad de secuestro de carbono por las prácticas de laboreo de conservación de entre 0,5 – 1 t C/ha y año bajo condiciones templado húmedas y 0,2 tC/ha y año bajo semiáridas (Robert, 2001). En la **Tabla 1** se especifican otros valores de referencia tomados de fuentes bibliográficas adicionales.

Los estudios demuestran empíricamente que hay un mayor porcentaje de carbono orgánico bajo laboreo de conservación que bajo convencional, sobre todo en los 10 primeros centímetros. En condiciones mediterráneas y para un sistema de cultivo herbáceo extensi-



vo se midió un 1,15% de materia orgánica entre 0 y 5 cm bajo laboreo de conservación y un 0,85% en laboreo convencional; entre 5 y 10 cm el contenido fue de un 1,20% en laboreo de conservación y de un 0,75% en convencional (Moreno et al, 2005).

En este sentido, hay que tener en cuenta la gran capacidad de secuestro que tienen los suelos agrícolas mediterráneos, pues la mayor parte de ellos se sitúan con menos del 1,5% de materia orgánica (López Arias y Grau Corbí, 2005). En cualquier caso, son necesarios estudios de detalle sobre la capacidad de secuestro de los suelos agrícolas, sobre todo el efecto de las prácticas de agricultura de conservación (Gómez et al, 1999; Murillo et al, 1998), así como crear redes de seguimiento sobre los estudios sobre los efectos de la agricultura sobre el carbono (Martens et al, 2005; Franz-luebbers, 2005).

Durante los primeros años, la capacidad sumidero del suelo es muy elevada, pero va decreciendo hasta que el carbono alcanza un nuevo equilibrio. El periodo de tiempo hasta la saturación de carbono es muy variable: el valor que el IPCC toma para las latitudes templadas es de 20 años. Por esta razón, el uso de sumideros de carbono está sujeto a críticas, por su falta de permanencia, así como por la difícil cuantificación del carbono almacenado en los distintos ecosistemas (Robert, 2001). Aunque verdaderamente hay un beneficio neto en el hecho de “ganar tiempo”. Pero

Tabla 1:
Potencial de las alternativas de manejo para secuestrar carbono en la agricultura europea (Smith et al, 2001; Smith, 2004).

	Capacidad de secuestro de carbono (t C/ha y año)
No laboreo	0,38
Laboreo de conservación	< 0,38
Retirada	< 0,38
Cultivos permanentes	0,62
Estercolado	0,38
Barbecho en cereales	0,69
Compostaje	0,38
Cultivos energéticos	0,62
Extensificación	0,54
Agricultura ecológica	0-0,54
Conversión a pastos	1,2-1-69
Conversión a tierra forestal	0,62



Tabla 2:
Poderes caloríficos (PCI)¹ de diversos combustibles fósiles y biocombustibles.

Fuente: Fernández, 2003

	PCI kcal/kg
Gasoil	8.361
Bioéster de colza	8.156
Bioéster girasol	7.893
Gasolina	10.500
Etanol	6.400

¹ Poder calorífico: Cantidad de energía que desprende en la combustión de 1 kg de combustible. Puede ser superior (PCS) o inferior (PCI). Este último es el resultado de restar del PCS la energía consumida por el agua formada en la combustión al transformarse en vapor. El PCI suele ser entre el 90 y el 95% del PCS.

para ello, es preciso asegurar la permanencia del carbono almacenado, manteniendo las prácticas de cultivo que supongan un enriquecimiento de la materia orgánica del suelo.

De acuerdo con los datos de 1998 (Fernández, 2003), la energía per capita consumida en España se situaba en 87,4 Millones de calorías (Mcal) al día, por debajo de la media de los países industrializados (136,4 Mcal/día), pero muy superior a la de los países en vías de desarrollo (22,9 Mcal y día). Los mayores consumos se localizan en Canadá (266,8 Mcal/día) y Estados Unidos (238,1 Mcal/día).

Los países europeos tienen un índice de consumo similar al de España (Alemania, con 115,9 Mcal/día). Una cifra muy indicativa de la evolución del modelo energético en España la aporta la comparación entre la evolución demográfica y la evolución del consumo energético: si durante el período 1973-2004 la población se ha multiplicado por 1,25, el consumo final energético lo ha hecho por 2,5.

La biomasa

Una alternativa energética es la biomasa. Por ella se entiende cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en un proceso biológico. Se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia orgánica

formada por vía biológica. Procede tanto del sector agrario y forestal como de otras fuentes como la valorización de los residuos.

El desarrollo de la biomasa como fuente de energía se está viendo favorecido por el alza de los precios del petróleo, la preocupación por el medio ambiente y por una razón de tipo coyuntural, pero que es fundamental para nuestra agricultura: la modificación de la política agraria comunitaria y la falta de rentabilidad de los cultivos alimenticios.

Las ventajas de la utilización de la biomasa son numerosas (Fernández, 2003): se eliminan residuos, se obtiene un balance de fijación de CO₂ positivo; mediante cultivos energéticos perennes se reduce el riesgo de erosión y se favorece la biodiversidad; se evita la contaminación por azufre; se disminuye la dependencia energética; y tiene efectos beneficiosos sobre el empleo y la economía rural.

Sin embargo, la explotación intensiva de cultivos energéticos puede hacer cernos caer en errores del pasado (abus del monocultivo, pérdida de biodiversidad, uso abusivo de recur-

sos, balances energéticos ineficientes...). Por otro lado, se han de vencer algunos frenos para su extensión como la dispersión territorial de su producción, la estacionalidad y la reducida densidad energética. No olvidemos que la fijación fotosintética es poco eficiente: la tasa de aprovechamiento por parte de los vegetales de la energía incidente se sitúa en general por debajo del 1%, incluso bajo condiciones favorables. Ello obliga a que la superficie agrícola precisa para obtener energía a escala industrial sea muy extensa: por ejemplo, una central de generación eléctrica de dimensiones medias, como la construida en Sangüesa, Navarra, con 25 MW de potencia (con capacidad para suministrar aproximadamente el 5% de la energía demandada por los 600.000 habitantes de Navarra) necesita unas 160.000 t de paja de cereal al año, lo que implica el cultivo de entre 130.000 y 150.000 ha. Lo anterior suscita reflexiones evidentes si se tiene en cuenta que solamente 1.439 MW del total de 72.003 MW de potencia instalada en España para abastecimiento de energía procedía de la biomasa y los residuos urbanos.

Los cultivos energéticos se pueden aprovechar energéticamente de una manera prácticamente directa por combustión o de un modo indirecto a través de su conversión a biocombustibles como el biodiésel (sustitutivo del gasóleo) o el bioalcohol (sustitutivo de la gasolina). Si transformamos la biomasa en productos sustitutivos de los derivados del petróleo, aumentamos su contenido en energía, la empaquetamos (**Tabla 2**).

En síntesis, el aprovechamiento de la biomasa puede ser directo a través de los biocombustibles sólidos (en general materias lignocelulósicas procedentes de los residuos de los cultivos) o a través de la obtención de bioetanol y biodiésel. Es interesante recordar que el bioetanol procede de

Tabla 3:
Producción de aceite por diversos cultivos en el área mediterránea.
Fuente: Fernández, 2003.

	Producción de grano kg/ha	Contenido en aceite %	Producción de aceite kg/ha
Girasol de secano	700	44	308
Colza de secano	1.500	40	600
Cardo	1.500	24	360

Tabla 4:

Rendimiento de diversos cultivos y producción de etanol en el área mediterránea. Fuente: Fernández, 2003.

	Producción kg/ha	Rendimiento en etanol kg/l	Producción de etanol l/ha
Remolacha	60.000	10	6.000
Trigo de secano	2.500	2,85	877
Maíz	10.000	2,7	3.703
Pataca	65.000	12	5.416
Sorgo azucarero	90.000	15	6.000

la conversión de los glúcidos – azúcares, almidón e inulina - en alcoholes (de 100 g de glucosa se obtienen 47,2 g de etanol) y el biodiésel de la transformación de lípidos en ésteres (de 1,05 t de aceite se obtiene 1 t de biodiésel, incorporándole 0,11 t de alcohol metílico y dando lugar a un residuo de 0,1 t de glicerina). Y ello, relacionarlo con el diferente coste energético que le supone a los vegetales obtener uno u otro tipo de compuestos químicos.

Los glúcidos son más fáciles de elaborar que los lípidos; la energía almacenada en los primeros es de 4.100 kcal/kg y en los segundos de 9.300 kcal/kg. Es una buena razón para que los osos polares acumulen energía en forma de grasa para pasar felizmente el largo invierno; por eso mismo nos cuesta tanto esfuerzo eliminar los michelines. Obtener un mayor porcentaje en aceite por unidad de superficie en los cultivos es todo un reto, porque estamos aumentando nuestra disponibilidad energética (Tabla 3). En cuanto al bioetanol, el reto es aumentar la productividad superficial y el contenido en glúcidos

convertibles en bioetanol (Tabla 4).

[Balances de carbono y de energía

La contabilidad de los flujos de energía que intervienen en la obtención de las producciones agrícolas y la de las emisiones y captación de carbono son herramientas imprescindibles para estudiar los efectos y la relación de la agricultura con el medio ambiente (Pimentel, 1992; Fluck, 1992). En los últimos años se ha retomado el enfoque termodinámico en la investigación agraria, a lo que se le ha unido el interés por el balance de carbono (Boman y Turnbull, 1997; Dalgaard et al, 2001; Lal, 2004).

La agricultura debería incorporar en todos sus análisis la vertiente energética y de la gestión del carbono. Al igual que cualquier técnico está familiarizado con el componente económico de la actividad, se debería ser capaz de visualizar las actividades relacionadas con el cultivo de la tierra y la cría de los animales domésticos con la perspectiva energética y del ciclo del carbono. Se trata de un enfo-

que sintético que exige traspasar las fronteras de las aproximaciones parciales analíticas. Esta perspectiva holística permitirá, además, situar el papel de la agricultura en el contexto energético y de cambio climático mundial, poniendo en valor sus efectos positivos y reduciendo sus impactos negativos.

Para llevar a cabo esta contabilidad, lo primero que necesitamos es determinar los valores unitarios de cada actuación: ¿cuánta energía es precisa para producir una unidad de nitrógeno?, ¿qué cantidad de carbono equivalente se emite al ejecutar una labor de cultivo? La contabilidad debe incluir los costes energéticos y las emisiones producidas fuera de la explotación pero que han tenido por destino algún insumo consumido en la misma. Por esta razón se debe tener en consideración no solamente la energía implicada directamente en el ciclo del cultivo (como el gasóleo quemado por el tractor en las diferentes labores de cultivo), sino la energía consumida por todos los insumos utilizados en su proceso de fabricación (por ejemplo, la energía que se precisa para obtener y transportar una unidad de abono nitrogenado), incluyendo la parte proporcional de la fabricación de la maquinaria, el equipo, etc.

Existen abundantes referencias e indicadores en la bibliografía científica, con ligeras diferencias según la fuente en función de la metodología utilizada y las condiciones de obtención de los coeficientes (Tablas 5 y 6). En el caso de las labores de cultivo, una buena aproximación práctica se obtiene a partir del consumo de gasóleo (1 litro de gasóleo emite 0,94 kg

Tabla 5:

Requerimientos de energía fósil y emisiones de carbono en las diferentes labores de cultivo.

	Consumo gasóleo l/ha ¹	Energía gasóleo MJ/ha ¹	Energía suplementaria ² MJ/ha ¹	Emisión de carbono	
				kg C/ha ¹	kg C/ha ³
Vertedera	21,78	1.122	102	26,75	13,4-20,1
Grada de disco	6,7	345	55	8,72	4,0-11,2
Siembra	4,93	254	58	6,79	2,2-3,9
Cultivador	3,26	168	42	4,57	3,0-8,6
Aplicación de fertilizante	9,82	506	60	12,35	0,5-10,1
Aplicación de fitosanitarios	1,22	63	56	2,54	0,7-2,2
Recolección	11,14	574	186	16,47	6,2-18,0

¹ West y Marland, 2002.

² Energía gastada en la fabricación, transporte y reparación de la maquinaria, West y Marland, 2002.

³ Lal, 2004.

Tabla 6:**Emisiones de carbono equivalente por diferentes fitosanitarios.**

Fuente: Lal, 2004

HERBICIDAS	kg C/kg m.a.
2, 4-D	1,7
2, 4, 5-T	2,7
Alacloro	5,6
Atrazina	3,8
Clorsulfurón	7,3
Cianazina	4
Dicamba	5,9
Dinoseb	1,6
Diquat	8
Diurón	5,4
EPTC	3,2
Fluazifop-butyl	10,4
Fluometuron	7,1
Glifosato	9,1
Linurón	5,8
MCPA	2,6
Metolacoloro	5,5
Paraquat	9,2
Propacloro	5,8
Trifluralina	3
FUNGICIDAS	PCI kcal/kg
Ferbam	1,2
Maneb	2
Captan	2,3
Benomilo	8
INSECTICIDAS	PCI kcal/kg
Metilparatión	3,2
Forato	4,2
Carbofurán	9,1
Carbaril	3,1
Taxapeno	1,2
Cipermetrina	11,7
Clorodimefor	5
Lindano	1,2
Malatión	4,6
Paratión	2,8
Metoxicloro	1,4

(trabajo manual, trabajo animal, fertilizantes orgánicos, etc.) y la energía almacenada por los alimentos se sitúan entre 10:1 y 53:1 (Simmons, 1982).

Cuando se utilizan animales en lugar del trabajo humano, la comodidad y las posibilidades de ampliar el cultivo aumentan, pero también crecen las exigencias energéticas: un caballo trabajando 12 horas al día aporta 8.800 calorías de trabajo, precisando para su alimentación 46.600 calorías. Con subsidio de energía fósil, la eficiencia puede llegar a ser negativa (gastamos más energía de la que recuperamos en forma de alimento): cálculos realizados a mediados de los años de la década de 1970 situaban la proporción salida/entrada entre un valor de 2,2 para la producción de trigo en Gran Bretaña y 0,16 para las granjas de huevos.

La relación entre la agricultura y la energía es compleja y difícil de sintetizar en unas líneas. De hecho, son relativamente escasas las referencias bibliográficas que abordan de una manera práctica esta cuestión, pese al evidente interés que se ha despertado derivado de la nueva crisis energética y del calentamiento global, al que habrá que adaptarse. La agricultura tiene mucho que aportar, porque es una actividad que continúa dependiendo en buena medida de la energía solar; tenemos margen, además, para reducir la dependencia de la energía fósil, por ejemplo racionalizando y reduciendo el uso de fertilizantes químicos. La agricultura, además, puede contribuir al desafío energético. Pero deberíamos hacer las cosas con sensatez. La sabiduría de la agricultura autosuficiente (a la fuerza) del pasado nos puede dar algunas claves para corregir nuestros excesos. Y contamos con el conocimiento y la tecnología del siglo XXI: no estamos desprotegidos.

Tabla 7:**Requerimientos de energía fósil y emisiones de carbono en la fabricación de fertilizantes (por kg de unidad fertilizante) cultivo.**

	MJ/Kg ²	MJ/Kg ²	MJ/Kg ⁴	kg C/kg ⁴
Amoniaco	55 - 65	78	57,46	0,857 ⁴ , 1,4 ³
Superfosfato (PO)	11 a 18	15	6,85	0,120 ⁴
Potasa (KO)	7 a 9	8	7,03	0,165 ⁵

Fuente: 1Stout, 1990; 2Southwell y Rothwell, 1977; 3Lal, 2004, 4West y Marland, 2002 (se incluyen los requerimientos energéticos de procesado y transporte; se estima un gasto de 0,0014 MJ/kg y km por carretera y una distancia de transporte de 160 km).

de carbono y libera 10.175 kcal ó 42,6 MJ, incluyendo el aporte de la extracción y transporte, IEA, 2004; Lal, 2004; Vest y Marland, 2002). También son útiles las relaciones entre la emisión de carbono y la energía consumida: una cifra indicativa es 0,02 kg C/MJ (Lal, 2004), valor aproximado para cuando la fuente utilizada es el gasóleo o la gasolina; en el caso de la biomasa, esta cifra aumenta hasta 0,03 kg C/MJ (IPCC, 1996).

El subsidio energético con fuentes fósiles ha permitido aumentar la productividad de los agrosistemas. Sin embargo, la eficiencia energética es en numerosas ocasiones muy cuestionable. En los sistemas de agricultura preindustrial, valores típicos de la relación entre los insumos energéticos



La conversión de un terreno agrícola anual a un terreno forestal supone la emisión de 1,60 tC/ha y año, mientras que el paso de un terreno agrícola no anual a uno forestal la de 8,9 tC/ha y año

Bibliografía

Queda a disposición del lector en los siguientes correos electrónicos: joser.guzman@juntadeandalucia.es y redaccion@editorialagricola.com.

Guzmán Álvarez, José Ramón. 2007. “Una estimación del balance energético y de emisiones de carbono del cultivo del olivo en España”, en: Susana Sanz (coord.), Congreso del Sesquicentenario de la creación de la Carrera de Ingeniero Agrónomo, Madrid, pp.. 295-305.

Agradecimientos

El autor agradece la colaboración de Francisco Cáceres Madueño y de Marta Santiago Molina, de la Consejería de Medio Ambiente. •