



TÍTULO

**HACIA LA AUTOSUFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL
CEREAL DE SECANO**

UN ESTUDIO DE CASO EN ORCE (GRANADA)

AUTOR

Eduardo Aguilera Fernández

Director
Curso

ISBN

©

©

Esta edición electrónica ha sido realizada en 2010

Gloria Guzmán Casado

**Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura
ecológica (II)**

978-84-7993-167-4

Eduardo Aguilera Fernández

Para esta edición, la Universidad Internacional de Andalucía



Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 2.5 España.

Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

II MÁSTER OFICIAL DE POSTGRADO

**AGROECOLOGÍA: UN ENFOQUE SUSTENTABLE DE LA AGRICULTURA
ECOLÓGICA**

**HACIA LA AUTOSUFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL CEREAL
DE SECANO: ESTUDIO DE CASO EN ORCE (GRANADA)**



EDUARDO AGUILERA FERNÁNDEZ

Directora: Dra. GLORIA GUZMÁN CASADO

Febrero de 2009

INDICE

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMIENTOS..... | 5 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 1.1 Motivación y justificación..... | 6 |
| 1.2 Objetivos..... | 7 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1 Economía ecológica: termodinámica y balance energético en los sistemas agrarios..... | 8 |
| 2.1.1 Termodinámica..... | 8 |
| 2.1.2 Estructuras disipativas..... | 9 |
| 2.1.3 Stock terrestre y flujo solar..... | 9 |
| 2.1.4 Las limitaciones de la materia..... | 10 |
| 2.1.5 Balances energéticos..... | 10 |
| 2.1.6 La eficiencia energética de la agricultura moderna y tradicional..... | 11 |
| 2.1.7 La eficiencia energética de los agrocombustibles..... | 13 |
| 2.1.8 Hacia la autosuficiencia energética en la agricultura: agricultura ecológica y biocombustibles para autoconsumo..... | 15 |
| 2.2 Ecología política: los conflictos derivados de la energía utilizada en la agricultura, y de la agricultura como fuente de energía..... | 17 |
| 2.2.1 Los conflictos ecológico-distributivos asociados al uso de energía fósil en la agricultura..... | 18 |
| 2.2.2 Algunas consideraciones sobre los agrocombustibles desde la perspectiva de la ecología política.. | 21 |
| 2.2.2.1 El coste territorial..... | 22 |
| 2.2.2.2 La competencia con la producción de alimentos..... | 23 |
| 2.2.2.3 El impacto sobre la biodiversidad ecológica y cultural..... | 24 |
| 2.2.2.4 Los agrocombustibles de segunda generación..... | 24 |
| 2.2.2.5 Perspectivas..... | 25 |
| 2.3 Agroecología: evaluación de la sustentabilidad de los agroecosistemas desde una perspectiva interdisciplinar..... | 25 |
| 2.3.1 Ecosistemas naturales y agroecosistemas tradicionales..... | 26 |
| 2.3.2 El concepto de sustentabilidad..... | 27 |
| 2.3.3 La tracción mecánica moderna y tradicional..... | 28 |
| 2.3.4 El dilema de la tracción mecánica en la agricultura sostenible..... | 29 |
| 2.3.5 Ganadería moderna y tradicional..... | 30 |
| 3. BALANCE ENERGÉTICO DEL CEREAL DE SECANO EN ORCE..... | 31 |
| 3.1 Caracterización del agroecosistema..... | 31 |
| 3.2 Metodología..... | 34 |
| 3.2.1 Recopilación de la información primaria..... | 34 |
| 3.2.1.1 Entrevistas..... | 34 |
| 3.2.1.2 Escenarios 0a y 0b: descripción y esquema del manejo ecológico..... | 35 |
| 3.2.1.3 Escenario 0c: descripción y esquema del manejo convencional..... | 36 |
| 3.2.2 Selección de la unidad funcional..... | 37 |
| 3.2.3 Parámetros estudiados..... | 38 |
| 3.2.3.1 Entradas de energía..... | 38 |
| 3.2.3.2 Salidas de energía..... | 38 |
| 3.2.3.3 Balances energéticos..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.4 Energía contenida en los insumos y productos | 39 |
| 3.2.4.1 Tracción mecánica..... | 39 |
| 3.2.4.2 Fertilización..... | 42 |
| 3.2.4.3 Productos fitosanitarios..... | 43 |
| 3.2.4.4 Semillas..... | 43 |
| 3.2.4.5 Mano de obra..... | 44 |
| 3.2.4.7 Grano..... | 44 |
| 3.2.4.8 Paja..... | 45 |
| 3.2.4.9 Biomasa del barbecho..... | 45 |
| 3.3 Resultados..... | 46 |
| 3.3.1 Energía de las labores agrícolas..... | 46 |
| 3.3.2 Balance energético del Escenario 0..... | 47 |
| 3.3.2.1 Entradas de energía..... | 47 |
| 3.3.2.2 Salidas de energía..... | 48 |
| 3.3.2.3 Balance energético..... | 49 |
| 3.4 Conclusiones..... | 50 |
| 4. PROPUESTAS DE MEJORA DE LA SUSTENTABILIDAD BASADAS EN EL APROVECHAMIENTO DE RECURSOS LOCALES PARA LA TRACCIÓN..... | 51 |
| 4.1 Escenario 1: etanol de cereal..... | 52 |
| 4.1.1 Generalidades sobre el uso de etanol como combustible..... | 52 |
| 4.1.2 Descripción del proceso de obtención de etanol a partir de cereal..... | 52 |
| 4.1.3 Entradas de energía en la elaboración de etanol para los tractores..... | 53 |
| 4.1.4 Coproductos: DDGS y electricidad..... | 54 |
| 4.1.5 Eficiencia energética del proceso..... | 54 |
| 4.1.6 Esquema general del Escenario 1..... | 56 |
| 4.1.7 Balance energético del Escenario 1..... | 57 |
| 4.1.7.1 Superficie necesaria para el autoabastecimiento de combustible mediante etanol..... | 57 |
| 4.1.7.2 Entradas de energía..... | 58 |
| 4.1.7.3 Salidas de energía..... | 59 |
| 4.1.7.4 Balance energético..... | 59 |
| 4.2 Escenario 2: aceite de cardo..... | 60 |
| 4.2.1 Generalidades sobre el uso de derivados de aceites vegetales como combustible..... | 60 |
| 4.2.2 Características del cultivo de cardo..... | 61 |
| 4.2.3 Descripción del cultivo convencional de cardo..... | 63 |
| 4.2.4 Descripción del cultivo ecológico de cardo..... | 64 |
| 4.2.5 Balance energético del cultivo de cardo..... | 64 |
| 4.2.5.1 Entradas de energía..... | 64 |
| 4.2.5.2 Salidas de energía..... | 65 |
| 4.2.5.3 Balance energético..... | 65 |
| 4.2.6. ¿Aceite crudo o biodiésel como combustible?..... | 66 |
| 4.2.6.1 Biodiésel: transesterificación del aceite de cardo..... | 66 |
| 4.2.6.2 Utilización directa del aceite: modificaciones en el motor..... | 67 |
| 4.2.7 Esquema general del escenario 2..... | 69 |
| 4.2.8 Balance energético del escenario 2..... | 70 |
| 4.2.8.1 Superficie necesaria para el autoabastecimiento de combustible mediante aceite | |

| | |
|---|-----------|
| de cardo..... | 70 |
| 4.2.8.2 Entradas de energía..... | 71 |
| 4.2.8.3 Salidas de energía..... | 72 |
| 4.2.8.4 Balance energético | 72 |
| 4.4 Escenario 3. biogás de estiércol de oveja..... | 73 |
| 4.4.1 Generalidades sobre el uso de biogás como combustible..... | 73 |
| 4.4.2 Descripción del proceso de obtención de metano a partir de la biodigestión anaeróbica del estiércol..... | 74 |
| 4.4.3 Coproductos. biofertilizante..... | 74 |
| 4.4.4 Necesidad de la integración ganadera: ampliación del sistema..... | 75 |
| 4.4.4.1 Cálculo de la capacidad de carga ganadera..... | 75 |
| 4.4.4.2 Producción de estiércol por oveja..... | 76 |
| 4.4.5 Rendimiento de metano aprovechado en los tractores a partir de la biodigestión anaeróbica del estiércol de oveja..... | 76 |
| 4.4.6 Esquema general del Escenario 3..... | 78 |
| 4.4.7 Balance energético del Escenario 3..... | 78 |
| 4.4.7.1 Grado de cobertura de las necesidades de combustible mediante biogás..... | 78 |
| 4.4.7.2 Entradas de energía..... | 78 |
| 4.4.7.3 Salidas de energía..... | 79 |
| 4.4.7.4 Balance energético..... | 79 |
| 5. COMPARATIVA DE LOS ESCENARIOS ESTUDIADOS MEDIANTE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD..... | 79 |
| 5.1 Indicadores y atributos de sustentabilidad..... | 79 |
| 5.2 Metodología..... | 80 |
| 5.2.1 Selección de los indicadores..... | 80 |
| 5.2.1.1 Consumo..... | 80 |
| 5.2.1.2 Producción..... | 81 |
| 5.2.2 Determinación del nivel de desempeño de los distintos escenarios en cada indicador..... | 81 |
| 5.3 Resultados..... | 82 |
| 5.3.1 Entradas de energía..... | 82 |
| 5.3.2 Salidas de energía..... | 83 |
| 5.3.3 Valoración de los indicadores..... | 84 |
| 5.4 Conclusiones..... | 85 |
| 5.4.1 Etanol..... | 86 |
| 5.4.2 Cardo..... | 87 |
| 5.4.3 Biogás..... | 87 |
| 5.4.4 Reflexiones finales..... | 87 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 88 |
| 7. ANEXOS..... | 96 |
| 7.1 Anexo I..... | 96 |
| 7.2 Anexo II..... | 100 |

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a las personas que encontré en Orce por su amabilidad y disposición para responder todas mis preguntas, y por su quehacer diario en el campo, cuyos frutos llenan nuestros estómagos.

Estoy también muy agradecido a mi tutora, Gloria Guzmán Casado, por su ayuda y sus acertados consejos, sin los cuales la calidad de esta tesina se hubiera visto severamente resentida.

También querría agradecer a todas las personas que de alguna manera han influido en el trabajo. A los compañeros de maestría por esos meses inolvidables que me hicieron crecer tanto. A los profesores, especialmente a los que me escucharon y me ayudaron a dar forma al proyecto cuando su estado era aún embrionario: Angel Calle, Marta Soler, Eduardo Sevilla, Simone Deneayer, Oscar Carpintero y Antonio Alonso. A Yolanda Lechón, por su amable colaboración y los datos que me proporcionó sobre la elaboración del diésel y el etanol. A Antonio Gavilán y otros amigos que también me escucharon y aconsejaron.

A mis padres, por su apoyo constante.

Y muy en especial a Olga, que a diario me da la energía que necesito para hacer estas cosas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La denominada modernización de la agricultura, orientada hacia una maximización de las ganancias a través del incremento de los rendimientos y la reducción de la mano de obra, mediante la incorporación de agroquímicos y la mecanización, ha supuesto un descenso en su eficiencia energética hasta alcanzar en ocasiones saldos deficitarios. De este modo, la que era la más importante fuente de energía en las sociedades preindustriales, ha pasado a ser una importante consumidora de energía. Esta transición ha sido posible mediante la sustitución de los insumos orgánicos empleados en la agricultura tradicional, como animales de tiro y estiércol, que en última instancia provenían de la propia actividad agrícola, por otros de origen fósil, como el gasóleo y los fertilizantes sintéticos, provenientes en última instancia del subsuelo. Como señala Gliessmann (2002:3), a pesar de su éxito, nuestros sistemas de producción de alimentos se encuentran en el proceso de erosionar las bases fundamentales que los sostienen. Esta crisis del modelo de la revolución verde se caracteriza por una sobreexplotación y degradación de los recursos naturales que hacen posible la agricultura -suelo, agua y diversidad genética-, que lógicamente vienen acompañadas de una dependencia de altos niveles de insumos artificiales para suplir estas carencias. Así, una agricultura que dependía básicamente de sí misma para su funcionamiento, ha devenido en otra que necesita importar grandes cantidades de energía no renovable desde regiones remotas del globo. En palabras de Georgescu-Roegen (2007:49) "De esta manera (mediante la mecanización), se está provocando que la existencia biológica del hombre dependa en el futuro de la más escasa de las dos fuentes de baja entropía. También existe la posibilidad de que la mecanización de la agricultura atrape a la especie humana en un callejón sin salida, pues algunas de las especies biológicas implicadas en el método tradicional de agricultura podrían verse abocadas a la extinción"

Reflexiones similares pueden aplicarse también al resto de la sociedad moderna: los procesos de industrialización y globalización han implicado la instauración de un metabolismo social dependiente de altos niveles de energía disponible, que se manifiesta por ejemplo en la deslocalización de la producción en zonas cada vez más alejadas, teóricamente en función de las "ventajas comparativas" de cada región. Consecuentemente, se produce el desmantelamiento del entramado productivo local, que genera una dependencia del sistema global de transporte de mercancías. En términos de equidad global, el problema se ve agravado por los mecanismos que permiten la transferencia de la presión ambiental generada por las tareas de la economía más intensivas en términos biofísicos a países periféricos (Naredo, 2006:68), a la vez que se transfiere la riqueza generada a los países centrales. Paralelamente a los procesos de generación de dependencia, la expansión del uso de las energías fósiles en la sociedad ocasiona otra clase de impactos, esta vez derivados de los residuos producidos durante la combustión, que son responsables de las consecuencias ambientales globales más graves relacionadas con el uso de energía no renovable. En efecto, varios de los gases liberados por los motores de combustión interna que mueven la denominada "civilización de los combustibles fósiles" (Smil, 2001:255) son gases de efecto invernadero cuyo incremento de concentración en la atmósfera es responsable del fenómeno del calentamiento global, pero también de otros impactos graves con repercusiones sobre la biota terrestre y los ciclos de nutrientes. En el IAASTD, un informe reciente copatrocinado por instituciones como la FAO, la OMS, el BM, el PNUMA o la UNESCO (Beintema et al., 2008), se asegura que las nuevas estrategias agrícolas deberán incluir la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero.

Como sabemos, las energías fósiles provienen de la energía solar asimilada por la biosfera en épocas remotas, y ahora las extraemos y consumimos a un ritmo mucho mayor que el de la producción geológica. Las implicaciones sobre la capacidad de mantenimiento de ese ritmo de extracción son obvias: es imposible mantenerlo constante, y mucho menos creciente, debido a las limitaciones impuestas por la realidad geológica. Desde la misma Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2007), se advierte que el mercado mundial de petróleo sufrirá una grave crisis a partir de 2012, debido a que el ritmo de aumento de la oferta de crudo es mucho más lento que el de la demanda. Se prevé que se produzcan subidas explosivas de precios hasta ahora desconocidas, e incluso podría llegarse a situaciones en las que ni siquiera semejantes subidas garanticen el suministro a los países consumidores. Pero el asunto más relevante, es que el ritmo de extracción está abocado a decrecer, a medida que se agotan los yacimientos más accesibles y que contienen los combustibles de mejor calidad. Y la llegada a este máximo en el ritmo de extracción de crudo, conocido como pico o cenit del petróleo, es el punto que se dispone a atravesar esta civilización, que hasta ahora había "gozado" de un incremento más o menos constante en la disponibilidad energética, que ha permitido mantener un crecimiento sostenido de la economía. Este crecimiento, por otro lado, se presenta como una condición básica para el funcionamiento del sistema dominante. Es en este contexto en el que la dependencia de la que hablábamos antes adquiere toda su dimensión.

Ante este panorama, se vuelve urgente la búsqueda de alternativas a los recursos no renovables que aseguren la continuidad de la producción de alimentos, evitando un posible colapso por falta o encarecimiento excesivo de insumos, o por la degradación de las condiciones de producción. La

agricultura ecológica aparece, en este contexto, como la vía más sostenible hacia una ruptura definitiva de la agricultura con la dependencia de los combustibles fósiles. Pero el logro conseguido en ámbitos como la eliminación del empleo de fertilizantes químicos o de agrotóxicos no se ha visto correspondido con avances similares en la sustitución de la energía utilizada en la tracción mecánica. El estudio y desarrollo de alternativas en este campo aparece, así, como uno de los retos fundamentales de la agricultura ecológica. Mediante la internalización de estos flujos energéticos en los agroecosistemas se conseguiría, además, relocalizar la producción energética en el mundo rural, logrando a la vez incrementar el empleo local y asumir en territorio propio los costes ambientales y territoriales de la actividad agrícola.

1.2 OBJETIVOS

- Realizar un balance energético del manejo convencional, ecológico, y en transición del agroecosistema de cereal de secano en Orce (Escenario 0)
- Calcular los mismos parámetros para tres alternativas al diésel en el sistema:
 - a. Etanol elaborado con cereal (Escenario 1)
 - b. Aceite de cardo (Escenario 2)
 - c. Biogás de estiércol de oveja (Escenario 3)
- Comparar las alternativas mediante un análisis multicriterio

2. MARCO TEÓRICO

El presente trabajo se basa en datos procedentes de múltiples y distantes áreas del conocimiento, que abarcan por ejemplo la ingeniería química o industrial, la agronomía, la ecología, la economía o la sociología. La interpretación de esos datos se ha realizado, sin embargo, desde el enfoque concreto de la agroecología, en especial en lo que se refiere al análisis de sustentabilidad, necesario para poder comparar con fundamentación el impacto de cualquier nueva tecnología que se quiera introducir en los agroecosistemas. Y junto con la agroecología, se ha recurrido al arsenal metodológico proporcionado por las emparentadas disciplinas de la economía ecológica y la ecología política. De la primera ha sido clave la herramienta del balance energético, así como su aplicación de los conceptos de la termodinámica a este tipo de sistemas. La segunda nos ha servido para esbozar un análisis previo sobre el impacto global de las mismas tecnologías que luego se han analizado a nivel micro, poniendo especial atención a los agrocombustibles, por la controversia que están generando. Y esta contextualización tan amplia para el abordaje de un problema tan concreto, como el estudio de alternativas al diésel en un agroecosistema, la creemos conveniente porque "la agroecología, aunque pretenda el manejo ecológico de los recursos naturales, y tenga, por tanto, como objeto la agricultura, ganadería y forestería; lo hace explicando las formas de degradación de los recursos y generando sistemas de contención, reposición y regeneración. Ello supone introducirse en aquellas áreas de conocimiento que le permitan entender, analizar y predecir los fenómenos sociales económicos, culturales y políticos que generan tales formas de degradación" (Sevilla y Ottmann, 1999).

Así pues, en las páginas que siguen se tratará de mostrar algunos rasgos básicos de las citadas disciplinas, y la relevancia para el presente trabajo de algunos de los conceptos que manejan. Comenzaremos estudiando cómo las conexiones entre actividad económica y biosfera analizadas desde la economía ecológica han desvelado la ineficiencia energética de la agricultura moderna, y el callejón sin salida termodinámico que este hecho representa en el contexto actual. A continuación, a través del enfoque de la ecología política analizaremos primero los conflictos relacionados con el uso intensivo de energías fósiles que se da en este modelo de agricultura, para luego mostrar las consecuencias de pretender que es posible sustituir una parte significativa del consumo energético de esta sociedad -sin cuestionar el funcionamiento del modelo- mediante los productos derivados de esa agricultura tan consumidora de energía. Por último llegaremos a la agroecología, desde donde se ha tratado de identificar las características que definen los sistemas agrarios sustentables, para así elaborar las propuestas de mejora, y los indicadores para testarlas, que serán objeto de estudio en el resto del trabajo.

2.1 ECONOMÍA ECOLÓGICA: ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD ECONÓMICA EN TÉRMINOS BIOFÍSICOS

Según expone detalladamente José Manuel Naredo en *La Economía en Evolución* (Naredo, 2003), la noción de sistema económico surgió en el siglo XVIII a través de los *fisiócratas* franceses, que instauraron las nociones de *producción*, *consumo* y *crecimiento* como elementos centrales de esta disciplina. Estos autores, en línea con la *economía de la naturaleza* entonces vigente, habían mostrado interés por la vinculación de la actividad económica con el mundo físico que describe, si bien subestimaron los límites debido a la visión organicista del mundo que existía en la época, que atribuía la capacidad de crecimiento a los minerales y a la misma Tierra. Sin embargo, esta noción de sistema económico va perdiendo, cuando otras disciplinas desautorizan la idea del crecimiento mineral, este nexo inicial con el mundo físico para reducirse al universo aislado de los valores de cambio. Se limitó, en sucesivos recortes, el campo de estudio a los objetos *apropiables*, *valorables* y *productibles*, y se estableció el *crecimiento* como la única vía hacia el progreso, de manera que simultáneamente aparecía un medio ambiente inestudiado, compuesto por recursos naturales no valorados, apropiados o producidos, y de residuos que, por definición, han perdido su valor. Esta reducción del campo de estudio ha llevado a las contradicciones actuales entre economía y ecología.

Recientemente se ha intentado resolver estos problemas principalmente desde la *economía ambiental*, que trata de valorar en términos económicos ordinarios las externalidades causadas por la actividad económica, y desde la *economía ecológica*, que considera la economía como un subsistema de la biosfera. No es el momento de examinar ambas disciplinas, pero identificamos en la segunda un mayor potencial para el estudio de la sostenibilidad a largo plazo, y por ello centraremos en ella nuestra atención. La visión de la economía ecológica es una visión integral de la economía, que huye de separar artificialmente lo económico de su contexto natural. En palabras de uno de sus precursores, Karl Polanyi, "La economía es el estudio de cómo la gente transforma la naturaleza para satisfacer sus necesidades" (Polanyi, citado en Hall, 2008). Dentro de este enfoque, las actividades económicas ocurren, necesariamente, en conexión con los sistemas naturales, con lo cual, todas las leyes y procesos que ocurren en esos sistemas ecológicos, como la Ley de la Entropía, deben ser variables independientes en todo modelo de desarrollo (Simón, 1995).

2.1.1 TERMODINÁMICA

Uno de los aspectos clave de la Economía Ecológica es la introducción de las leyes de la termodinámica en la economía, dentro de la senda iniciada en la décadas de los sesenta y setenta por Nicholas Georgescu-Roegen y otros autores. Para analizar la importancia de la termodinámica en la actividad económica, conviene repasar algunos conceptos. Partimos de que la Tierra es un sistema cerrado. Esto es, un sistema que intercambia energía con el entorno pero no materia, ya que podemos despreciar en términos cuantitativos el aporte de los meteoritos. La energía fluye hacia la Tierra en forma de radiación solar, donde parte de ella se transforma mediante la fotosíntesis en energía química, produciendo la compleja biosfera que conocemos. La energía es devuelta al espacio mediante la reflexión (el albedo) y la radiación infrarroja emitida por la superficie calentada. Los seres vivos o las sociedades humanas, en cambio, son sistemas abiertos, que para mantener su estructura necesitan un intercambio constante de materia y energía con el entorno. Existe un tercer tipo de sistema dentro de esta clasificación teórica, que serían los sistemas aislados, en los que no se produce intercambio de materia ni energía con el exterior, un ejemplo de los cuales sería nuestro universo.

La cantidad de energía que puede tener un sistema puede variar a través del intercambio de energía con otros sistemas. Existen dos maneras de que se produzca esta transmisión: bien mediante trabajo, es decir, mediante fuerzas que producen desplazamientos, o bien mediante calor. Este último caso ocurriría cuando dos sistemas se ponen en contacto y no tienen la misma temperatura, de forma que se transmite energía del de mayor temperatura al de menor temperatura en forma de calor, hasta que se alcanza el equilibrio térmico, es decir, hasta que igualan su temperatura. Desde el punto de vista termodinámico se identifican dos estados cualitativamente distintos de la energía: la energía disponible o libre, que puede utilizarse, y la no disponible o disipada. "Debido a que esta distinción tiene una base antropomórfica, los puristas colocan a la termodinámica dentro de una categoría en sí misma, separada de la física. La verdad es que la termodinámica es la física del proceso económico" (Georgescu-Roegen, 2007). Estos estados de la energía están relacionados con el concepto de entropía. La energía libre está relacionada con un mayor orden o menor entropía, y la energía disipada se asocia a un mayor desorden o alta entropía.

Pues bien, en cuanto a su relevancia para la economía, son importantes los dos primeros principios o leyes de la termodinámica. La primera ley se denomina principio de la conservación de la energía, y afirma que en un sistema aislado (como nuestro universo) ésta ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. Este principio nos advierte contra la posibilidad de llegar a encontrar una fuente ilimitada de

energía, en un sistema cerrado como nuestro planeta, que no sea la proveniente del sol o de su propio calor interno acumulado -que no son en realidad ilimitadas, pero sí en la práctica-. La segunda ley afirma que, aunque la cantidad total de materia y energía es constante, durante cualquier transformación o transferencia de la energía una parte de ella se convierte en energía no disponible. En términos prácticos, lo que esto significa es que una parte se utiliza para realizar el trabajo que nos interesa, y la otra parte se pierde como calor residual que no puede ser aprovechado. Esto es, que no pueden existir sistemas de transformación de energía con una eficiencia del 100%. Como ejemplo gráfico podemos observar cómo los niveles tróficos de un ecosistema tienen forma de pirámide. Los organismos de niveles superiores sobreviven transformando la energía de los organismos de niveles inferiores. Como en estas transformaciones, que incluyen la energía necesaria para el mantenimiento de su propio metabolismo, parte de la energía se disipa, la biomasa que puede sustentarse con la energía disponible en cada nivel será decreciente a medida que ascendamos en la pirámide. Georgescu-Roegen (2007:66) ha expresado las implicaciones de este segundo principio: "Esto significa que la materia-energía disponible se degrada irrevocablemente en una forma no disponible. Si nos percatamos de que el complicado concepto de entropía es, en el fondo, un índice del nivel relativo de materia-energía no disponible, la anterior formulación es equivalente a la ley de la Entropía (...) *la entropía de un sistema aislado tiende continua e irrevocablemente hacia un máximo, que se produce cuando el sistema, en última instancia, alcanza el equilibrio (no conteniendo entonces más materia-energía disponible)*"

2.1.2 ESTRUCTURAS DISIPATIVAS

Esta tendencia hacia un mayor desorden, o entropía, es revertida en los sistemas humanos como las ciudades o las sociedades, pero también en los naturales, mediante la importación de energía del entorno y la exportación de entropía. De esta manera, los seres vivos y otras estructuras auto-organizadas, que tienen una configuración muy improbable de acuerdo a las leyes clásicas de la termodinámica, evitan alcanzar el equilibrio termodinámico con el entorno, o muerte térmica (evitan que aumente su entropía), mediante la disipación de energía (en forma de baja entropía) importada del entorno, y la exportación de energía degradada (Giampietro et al., 1991). De ahí que se les denomine estructuras disipativas. La teoría de las estructuras disipativas implica que la capacidad de un sistema de disipar energía está directamente relacionada con su complejidad. Este es el principio de máxima potencia, por el cual los sistemas biológicos y sociales evolucionan hacia una disipación máxima de la energía disponible, mediante un incremento en su complejidad (Lotka, 1922, y Odum, 1971, en Giampietro et al., 1991). Encontramos numerosos ejemplos de este principio al observar el proceso de sucesión de los ecosistemas o la evolución de las sociedades.

A la inversa, estructuras más complejas requieren la disipación de una mayor cantidad de energía. Cuando observamos la complejidad de nuestra civilización moderna y el grado de imbricación de sus procesos básicos, como los flujos de materia y energía, a un nivel ya no sólo local o regional, sino mundial, y al mismo tiempo nos fijamos en la abrumadora cantidad de energía no renovable que permite esa complejidad, nos percatamos de la urgencia del cambio de modelo energético. Este cambio, podemos intuir, no puede venir sólo de una transición a energías renovables, pues como veremos éstas tienen múltiples limitaciones que hacen dudar de la posibilidad de alcanzar de forma sostenida el mismo nivel de consumo de energía que existe hoy día, sino que debe acompañarse de una descentralización -algo que por cierto casa muy bien con las energías renovables, mucho mejor distribuidas que las fósiles- que permita en la mayor medida posible una reducción de la complejidad desde lo global a lo local, para llegar a un modelo de sociedad que pueda funcionar con niveles de consumo energético mucho menores al actual.

2.1.3 FUENTES DE ENERGÍA: STOCK TERRESTRE Y FLUJO SOLAR

El análisis de la naturaleza entrópica del proceso económico llevó a Georgescu-Roegen (1973, en Georgescu-Roegen 2007:43) a concluir que, desde un punto de vista físico, la actividad económica simplemente transforma los recursos naturales valiosos (baja entropía) en residuos (alta entropía). Este economista destacó que la energía libre a la que puede tener acceso el hombre proviene de dos fuentes distintas, (ambas provenientes en última instancia del sol): la primera consiste en una *stock*, es decir, en las existencias de energía libre de los depósitos minerales ubicados en las entrañas de la tierra. La segunda es un *flujo*: la radiación solar interceptada por la Tierra. Esta distinción se corresponde con la de energía no renovable (ENR) y energía renovable. La economía convencional no diferencia una de otra, e incorpora ambos tipos de energía al proceso económico bajo el término *producción*: "En efecto, no hay que confundir lo que es extracción con lo que es verdadera producción sostenible. Es por tanto erróneo, o al menos confuso, hablar de producción de petróleo de la manera como habitualmente lo hacen los economistas, al referirse por ejemplo a la extracción anual en Ecuador o México y a la destrucción posterior de ese petróleo. Es erróneo emplear la misma palabra, producción, para dos procesos distintos: la extracción de petróleo y la producción de biomasa en la agricultura mediante el flujo actual de energía solar y la fotosíntesis" (Martínez Alier, 1998). Partiendo de ese error de base, el proceso de

industrialización que ha dado lugar a la sociedad moderna ha basado su desarrollo en la dilapidación del stock energético de la corteza terrestre, ocasionando problemas sistémicos derivados de la generación de residuos y el agotamiento del propio stock.

2.1.4 LAS LIMITACIONES DE LA MATERIA

Desde la Economía Ecológica se destaca que el alcance de las leyes de la termodinámica incluye también a la materia, además de a la energía. En efecto, los materiales están continuamente expuestos a unas condiciones ambientales que hacen que se oxiden y se desgasten, disipándose sus átomos en el medio. Esta degradación irrevocable de los materiales nos previene contra la idea de un reciclaje infinito: se puede reciclar la materia, pero no la materia disipada. En este sentido la materia supondría una limitación aún más grave que la de la energía, puesto que no tenemos un flujo constante de materia que nos garantice la disponibilidad en el futuro.

Aquí cabe hacer algunas consideraciones sobre los materiales que usa la sociedad y su grado de renovabilidad. Si bien es cierto que no podemos volver a utilizar la materia disipada como tal, también lo es que hay materiales que sí que se renuevan -por ejemplo los productos orgánicos como la madera o los tejidos naturales- y otros que son tan abundantes en la corteza terrestre que son virtualmente ilimitados. Así, Bardi (2008) distingue por su abundancia tres tipos de elementos: elementos comunes, elementos raros y elementos traza. Los elementos comunes (hierro, aluminio, titanio, magnesio) son relativamente abundantes en la corteza terrestre, del orden de varios puntos porcentuales en casi cualquier tipo de roca. Incluso metales raros, como el cobre o el níquel, o elementos traza, como el galio, el selenio o el indio, están presentes en la Tierra en cantidades muy superiores a las usadas por la humanidad. Por tanto, no podríamos hablar de un "agotamiento" en el sentido en que lo hacemos de recursos como el petróleo. Sin embargo, históricamente se ha accedido a los metales más concentrados, que se han ido agotando. Los minerales que van quedando tienen concentraciones de metales cada vez menores, lo que significa que se tienen que movilizar cantidades de mineral cada vez mayores para obtener la misma cantidad de metal. Esto implica la utilización de mayores cantidades de energía, cuya disponibilidad se convertiría en el limitante último de la actividad minera. Para los metales comunes, sería necesaria por lo menos la misma energía empleada actualmente para mantener las tasas de extracción. Para elementos raros, haría falta un aumento considerable en la disponibilidad energética para mantener la extracción, y en el caso de elementos traza este aumento habría de ser realmente enorme. En la actualidad la minería representa aproximadamente el 10% del consumo global de energía primaria (Bardi, 2008).

El problema del "agotamiento" de los materiales puede expresarse como "el coste físico en que incurriríamos si quisiéramos reponer en ciclo cerrado -esto es, devolviendo los recursos a su estado previo a la extracción y en las mismas condiciones de calidad en que nos los proporciona la naturaleza- todos los flujos de energía y materiales que utilizamos en un período determinado de tiempo" (Carpintero, 2005:161). Este coste, que puede ser el mínimo teórico o tener en cuenta la mejor tecnología disponible, se denomina "coste exergético", del cual existen varias aproximaciones en nuestro país (Naredo y Valero, 1999, y Botero, 2000, en Carpintero, 2005:160; Carpintero, 2005:253).

2.1.5 BALANCES ENERGÉTICOS

La energía que nos ofrece la naturaleza está en formas que raramente pueden ser utilizadas directamente por la humanidad. Por ejemplo, si consideramos la luz solar tal cual nos llega, aunque posibilita la existencia de toda la biosfera, encuentra pocos usos para el ser humano más allá de permitir la visión o proporcionar un poco de calor en un día soleado de invierno. Por tanto, para llevar a la práctica la abrumadora serie de aplicaciones que se les da a las diversas fuentes de energía, éstas deben ser previamente transformadas en otra forma útil. En el caso de la energía solar, eso significa producir, por ejemplo, biomasa, electricidad o agua caliente. En el caso de los combustibles fósiles, que se hallan enterrados en puntos dispersos de la corteza terrestre, significa extraerlos, refinarlos y transportarlos hasta los lugares de consumo. Según el segundo principio de la termodinámica, esas transformaciones implican la pérdida de energía en forma de calor no aprovechable. Pero además, para llevar a cabo esa transformación, es necesario invertir energía útil en el proceso, según el siguiente esquema:

Figura 2.1 Proceso de obtención de energía



Fuente: Ballenilla y Ballenilla, 2007

Como vemos, en los procesos de generación de energía no se "genera" nada en realidad, pues esto contradeciría el primer principio de la termodinámica, sino que se transforma la energía de la fuente en otra forma útil para nosotros (Ballenilla y Ballenilla, 2007). Además, hay que considerar que esa nueva forma de energía que hemos logrado (energía primaria) sólo será útil en la medida en que puede sufrir una o varias transformaciones ulteriores. Por ejemplo, la electricidad que hemos obtenido con una placa fotovoltaica puede transformarse para producir energía mecánica, lumínica o calórica. Pero volviendo a la primera etapa representada por el esquema, si asumimos que la fuente de energía nos viene dada -ya que no hemos tenido que invertir ningún esfuerzo en que esté ahí-, y que las pérdidas no pueden aprovecharse, tenemos que hemos invertido una determinada cantidad de energía útil para obtener otra cantidad de energía útil. Al cociente de la energía útil retornada entre la energía útil invertida, esto es, al cociente de las salidas de energía entre las entradas, lo llamamos rendimiento energético, eficiencia energética, TRE (Tasa de Retorno Energético), EROEI o EROI (Energy Return On Input) (Cleveland et al., 1984)

La TRE, un concepto desarrollado a raíz de las crisis petroleras de 1973-74 y 1980-81, constituye uno de los elementos clave de cualquier análisis de sustentabilidad de una fuente de energía. Estos estudios se han realizado desde múltiples perspectivas en función de los objetivos y medios de los diferentes investigadores que han trabajado el asunto. A su vez, el balance energético es un problema complejo en el que una gran cantidad de insumos y productos distintos han de ser cuantificados y valorados energéticamente, para lo cual es necesario recurrir a bibliografía que de nuevo es abundante y que de nuevo se ha enfocado de distintas maneras. El asunto se complica aún más si tenemos en cuenta la gran cantidad de índices e indicadores que pueden calcularse y se han calculado a partir de un balance energético, o las distintas escalas espaciales y temporales a las que puede aplicarse. Esta dificultad ha sido expresada por Pedro Prieto (2006):

"Y ya metidos en esta muy compleja civilización occidental, que cree ser la única, aunque deja a cuatro quintas partes de la humanidad más bien fuera de ella, las transformaciones de energía han llegado a extremos de paroxismo, que resultan muy difíciles, por no decir imposibles de calcular. El numerador de la TRE (la energía obtenida por la sociedad) sigue estando más o menos claro, ya que se siguen publicando las estadísticas, relativamente fiables, de la energía que se produce y consume (...). El problema ahora es el denominador (...); las energías empleadas para producir los muy distintos tipos de energía. Son tan complejas y salen desde tantos puntos y van a tantos destinos, que es muy difícil saber cual es la TRE concreta de una actividad, de un grupo humano o de la utilización de algún determinado tipo de combustible a escala local, regional o mundial. Hoy (...) se puede estar consumiendo electricidad para producir una maquinaria que consumirá petróleo y servirá para transportar e instalar un generador eólico, que a su vez producirá electricidad, que consumirán en su domicilio los empleados de las empresas que fabrican maquinaria especializada o vehículos para el mantenimiento, o asfaltos para las redes de carreteras que harán posible este juego. Lo que duran las carreteras, su mantenimiento y reposición de asfalto, es algo que depende de muchos tráfico, no sólo del mencionado aquí. Así podrían ponerse miles de ejemplos entrelazados, de forma que hoy día no sabemos bien si estamos produciendo para vivir o vivimos para producir los bienes y la energía que estamos consumiendo. Aunque dado el sistema que fomenta intensamente el consumo, se diría que más bien parece que se trate de la segunda opción."

2.1.6 LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA AGRICULTURA TRADICIONAL E INDUSTRIAL

Debido a la enorme cantidad de literatura publicada sobre el tema, y a la diversidad de metodologías empleadas, no vamos a intentar un repaso exhaustivo del estado del arte en este ámbito, ni a tratar de revisar la amplia variedad de indicadores que se han derivado del análisis energético, sino que nos

limitaremos a repasar brevemente los orígenes de este enfoque y reseñar algunos trabajos que consideramos relevantes.

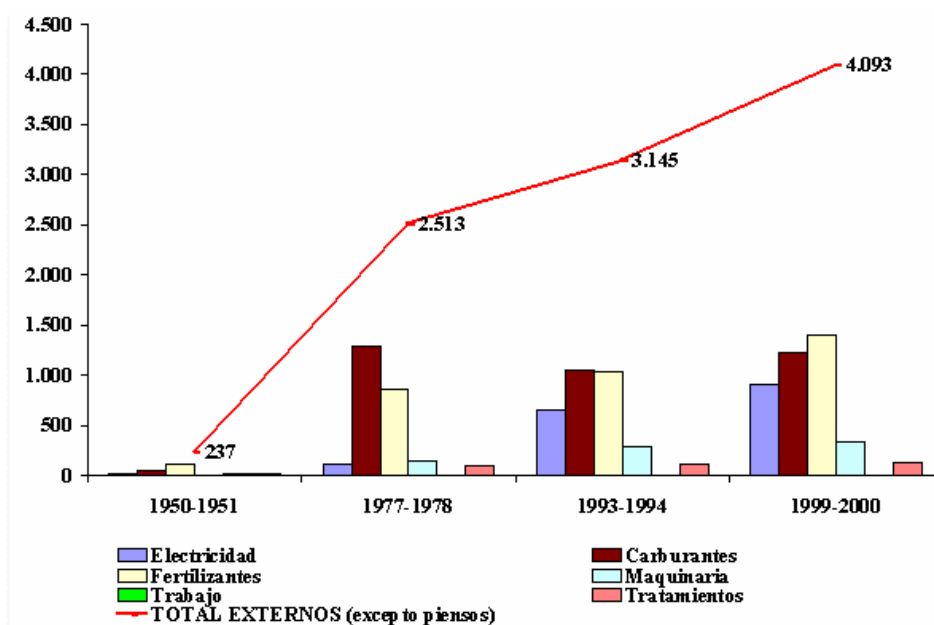
El estudio de la TRE en la agricultura, y de la relación de la energía con la actividad económica en general, tiene como precursor a Podolinsky. Este autor ucraniano, implicado políticamente con el federalismo y los movimientos narodnistas contra el autoritarismo ruso en su país, ya explicaba en el siglo XIX cómo el carbón y el petróleo, la energía del viento y del agua eran transformaciones de la energía solar, y remarcaba la diferencia entre el flujo de energía solar y el stock de carbón acumulado en la Tierra. Podolinsky comparó la producción de pastos y trigo en Francia en 1870, y concluyó que cada kilocaloría de trabajo invertida en la producción de trigo contribuía a incrementar la producción en 22 kilocalorías (Martínez Alier, 2005). Hay que tener en cuenta que contabilizaba la energía de la mano de obra a partir del trabajo realizado, no de los alimentos consumidos, y que no incluía los fertilizantes que se empleaban en el sistema (guano de Chile o Perú). No obstante, el esquema básico es prácticamente el mismo que el de los balances energéticos modernos. Este enfoque fue retomado en la segunda mitad del siglo XX. En 1967 el antropólogo Rappaport calculó el ratio de la energía contenida en alimentos cultivados entre la gastada por los humanos en los Tsembagas de Nueva Guinea, argumentando que la energía obtenida en los alimentos había de ser mayor que la invertida en su producción para el mantenimiento de estas sociedades de subsistencia. Teóricamente, esto no habría de ser necesariamente así en un modelo de sociedad que, como la civilización industrial, no obtiene la mayor parte de su energía de los alimentos sino de los combustibles fósiles.

Pero las crisis energéticas de los setenta y ochenta avivaron el debate, y la conciencia del agotamiento y la dependencia de la energía fósil propició la proliferación de estudios sobre el uso de la energía en la agricultura (por ejemplo, Pimentel et al., 1973; Leach, 1976; Berardi, 1978; Fluck, 1979; Pimentel, 1980). Fluck (1979) identifica varias debilidades de la eficiencia energética como indicador en la agricultura. En primer lugar los alimentos no sólo proporcionan energía, sino también otros nutrientes como proteínas. Segundo, la alimentación en las sociedades industriales tendría un fuerte componente cultural en que de nuevo la energía no es el factor más importante. Tercero, en muchas ocasiones se comparan sistemas agrarios distintos o productos distintos, por lo que estas comparaciones no serían relevantes. No obstante, hay que tener en cuenta que, a pesar del abrumador consumo exosomático de energía en nuestra sociedad, la agricultura sigue y seguirá suponiendo la principal fuente de energía endosomática de la humanidad, y también una fuente de energía exosomática -sobre todo en sociedades no industrializadas, pero también ahora en sociedades modernas con las nuevas formas de bioenergía-, por lo que sí es importante conocer la energía que obtenemos por cada unidad de energía que empleamos en esta actividad. Este tipo de análisis puede que tenga menos sentido en cultivos que tienen un contenido energético muy pequeño en relación a su peso -lo que supone que no sean empleadas principalmente como fuente de energía-, en los que medidas como la intensidad energética, cuantificada en MJ invertidos por kg de producto, o en GJ/ha, podrían resultar más adecuadas. En la actualidad ha cobrado mucho peso el estudio de la energía no renovable, por la conciencia de su agotamiento y sus impactos ambientales. En cualquier caso, en este trabajo hemos preferido no limitarnos al cálculo de un sólo indicador de eficiencia energética e incluir otros parámetros que ofrezcan una visión más completa de lo que ocurre en el agroecosistema desde el punto de vista de la energía.

En el citado trabajo de 1976, Gerald Leach estudiaba de manera sistemática el uso de la energía en la agricultura, identificando tres etapas en el proceso de intensificación energética asociado a la industrialización agraria, de los cuales, hoy en día, se pueden encontrar ejemplos en diferentes partes del mundo: un primer periodo preindustrial, en el que el único insumo sería la mano de obra, a niveles relativamente bajos; otro semiindustrial, con altos insumos de fuerza animal y humana; y un tercero totalmente industrial, con insumos muy altos de combustibles fósiles y maquinaria. Como referencia, según Bayliss-Smith (1982, en Altieri, 1999), podemos indicar que la TRE de la etapa preindustrial del cultivo de maíz era de 30 en México, la eficiencia del cultivo semi-industrial -con tracción animal- en México era de casi 5, y la de la agricultura mecanizada de EEUU de 2,5, incluso con rendimientos por hectárea varias veces superiores a las anteriores.

En el ámbito español, los trabajos pioneros de Pablo Campos y José Manuel Naredo (Campos y Naredo, 1980; Naredo y Campos, 1980) analizaban los balances energéticos de la agricultura española en los años 1950-1951 y 1977-1978. Durante este periodo se producía en España una enorme expansión del input energético del sector agrario, mucho más espectacular que la de otros países industriales, incrementándose a un ritmo anual del 10,5% hasta multiplicarse por 16,6 entre 1950 y 1978, lo que contrasta con lo estimado por Leach (1976) para Reino Unido, donde este input se habría multiplicado por 1,6 entre 1952 y 1972. Ello se debió a que la agricultura española llegaba a 1955 en una fase que podría clasificarse de preindustrial, o semiindustrial, mientras que en otros países el proceso había comenzado mucho antes. Este trabajo ha sido complementado por los de Xavier Simón (Simón, 1999, en Carpintero, 2005:278), Oscar Carpintero (2005) y Carpintero y Naredo (2006), de manera que la evolución de la intensidad en el uso de los inputs agrarios en la agricultura española de los últimos cincuenta años sería como muestra la figura 2.2.

Figura 2.2 Intensidad energética de los inputs externos agrarios en España 1950-2000 (Mcal/ha)



Fuente: Carpintero y Naredo (2006)

Podemos constatar a lo largo del periodo una primera etapa -correspondiente a la estudiada por Naredo y Campos (1980)- en la que se produce una transición brusca desde una agricultura que era mayoritariamente de base orgánica solar, en la que los inputs externos eran muy escasos, a otra muy mecanizada y con un elevado consumo de fertilizantes. En el resto del periodo el consumo de carburante se estabiliza mientras que crece el consumo energético asociado a fertilizantes y maquinaria y se dispara el consumo de electricidad debido al incremento de la superficie de regadío. En suma, el total del consumo energético por hectárea en la agricultura española no cesa de crecer durante toda la segunda mitad del siglo XX, poniendo de manifiesto que el incremento en la producción alcanzado durante ese periodo ha sido a costa de un incremento mucho mayor de la energía empleada para lograrlo. Así, mientras en el conjunto de la agricultura española el output final (agrícola y ganadero) se cuadruplica entre 1950-1951 y 1993-1994, la energía asociada a los inputs externos se multiplica casi por 20, de manera que la eficiencia cae de 6,1 a 1,39 (Naredo y Campos, 1980, Simón, 1999, y Carpintero, 2005, en Carpintero, 2005:278). A pesar de la pérdida de importancia relativa durante el periodo de 1977-2000, el valor absoluto de consumo por hectárea relacionado con los carburantes no disminuye, y se mantiene en unos 5 GJ/ha, que representan aproximadamente 120 litros de gasoil anuales por hectárea.

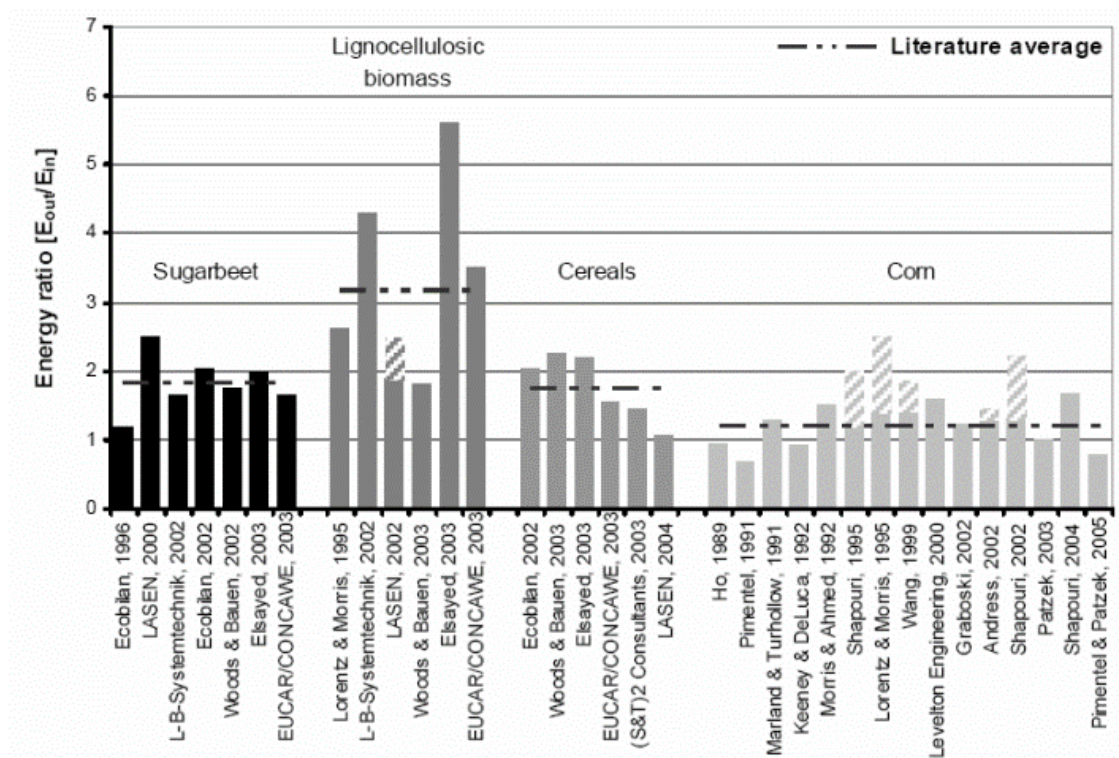
A un nivel más local, centrado en la evolución en el tiempo del agroecosistema como unidad de análisis, este proceso de intensificación energética de la agricultura puede observarse con claridad en el estudio realizado desde la perspectiva del metabolismo social por Manuel González de Molina y Gloria Guzmán (2006) sobre el municipio de Santa Fe, en la Vega de Granada. En este agroecosistema se alcanzaba una eficiencia energética máxima de 9,24 en 1934 para luego descender a 1,75 en 1997. Esta caída tan acusada de la TRE se debió principalmente a la sustitución de la tracción animal, que utilizaba la energía local proporcionada principalmente por los cultivos de cereal de secano, por tracción mecánica, de manera que la potencia instalada en el municipio para tracción se elevó desde los 205 CV en 1934 a los 8.780 CV de 1997. Esta sustitución de la energía mecánica se vio necesariamente acompañada por la importación de más energía del exterior en forma de fertilizantes químicos, para suplir el estiércol que antes producía el ganado de labor, y seguir incrementando los rendimientos, dentro de la mentalidad productivista que caracteriza la modernización agraria. Análogamente, se incrementaba la superficie de regadío mediante la perforación de pozos y la construcción de pantanos y otras obras hidráulicas, suponiendo otro aspecto muy relevante del proceso de intensificación energética.

2.1.7 LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS AGROCOMBUSTIBLES

La mencionada complejidad de su estudio y la variedad de cultivos, biorregiones (con distintas productividades agrícolas) y tecnologías disponibles ha provocado, obviamente, una gran diversidad de resultados en los análisis energéticos relacionados con la agricultura, especialmente en los que se refieren al controvertido tema de los agrocombustibles, donde la valorización de los coproductos representa otro punto caliente de debate. Esta disparidad ha generado una fuerte polémica que no ayuda a aclarar las cosas. Efectivamente, un balance energético positivo es requisito indispensable para que

una tecnología sea viable como fuente de energía. Pero cuando se habla de los agrocombustibles como sustitutos de los combustibles fósiles a menudo se olvida comparar el balance energético de éstos con el de aquellos. Si lo hacemos, como propone Hall (2008), la polémica sobre la eficiencia energética de los agrocombustibles se disipa en gran medida.

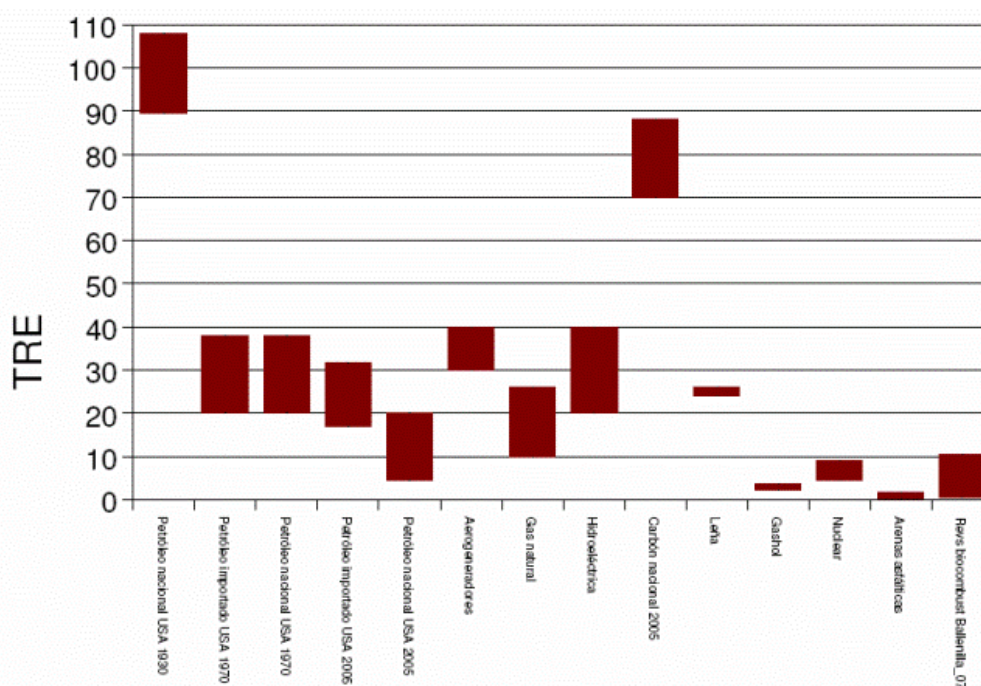
Figura 2.3 Tasa de Retorno Energético del etanol de remolacha azucarera, biomasa lignocelulósica, cereales y maíz.



Fuente: Gnansounou, 2005

En la figura 2.3 podemos ver los distintos valores de eficiencia energética de los agrocombustibles más comunes producidos en zonas templadas, donde podemos apreciar grandes diferencias en los resultados obtenidos para un mismo combustible. Por ejemplo en el etanol de maíz estos valores varían desde menos de 1 -menos de una unidad de energía obtenida por cada una invertida- hasta una TRE de más de 2. Estas variaciones son aún más acusadas en el etanol de biomasa lignocelulósica, de la que podemos destacar su alta eficiencia media, que sin embargo contrasta con su escasa implantación (ver apartado 2.2.2). Pero, como vemos en la figura 2.4, estas diferencias dejan de ser apreciables cuando las comparamos con las de los combustibles habituales que alimentan la sociedad industrial.

Figura 2.4 Tasas de retorno energético de distintas fuentes de energía



Fuente: Ballenilla, 2007 (a partir de Hall y Cleveland, 1981; Cleveland et al., 1984; Hall et al., 1986; Cleveland, 2006; Ballenilla, 2007)

Los agrocombustibles revisados en Ballenilla (2007), que aparecen representados en el extremo de la derecha de la gráfica, incluyen la palma aceitera y la caña de azúcar, con eficiencias de hasta 10 unidades de energía obtenidas por cada una invertida, que son muy superiores a las de los agrocombustibles producidos en zonas templadas (ver la gráfica anterior). Incluso así su TRE sigue quedando por debajo de las de casi todas las fuentes de energía mayoritarias, que se sitúan en general por encima de 15, y sobrepasando a veces las 50 unidades obtenidas por cada una invertida. En términos prácticos, esto significa que, incluso con balances energéticos positivos, y obviando el coste territorial y otros limitantes que comentaremos en el apartado de ecología política, una sociedad alimentada por combustibles de origen agrícola debe estar dispuesta a movilizar cantidades de recursos muchísimo mayores para obtener una misma cantidad de energía. También hay que destacar en la gráfica la espectacular caída en la TRE del petróleo nacional norteamericano desde 1930 a 2005, en consonancia con el agotamiento de la fracción más fácilmente accesible, como veremos en el apartado 2.2.1.

En nuestro país existen dos estudios, realizados por el CIEMAT, que examinan el bioetanol (Lechón et al., 2005) y biodiésel (Lechón et al., 2006) desde la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este tipo de análisis estudia los principales impactos ambientales asociados a la producción y uso de los combustibles -y de cualquier otro producto- desde la cuna hasta la tumba, es decir, desde que las materias primas son extraídas de la tierra hasta que el producto es utilizado (en este caso, quemado en los motores). El ACV difiere en muchos aspectos del balance energético y el análisis de sustentabilidad tal como lo planteamos en este trabajo, pero los citados estudios contienen información muy detallada sobre los procesos implicados en la elaboración de diésel y agrocombustibles y su energía asociada, por lo que serán nuestra principal fuente de información para realizar el balance energético del diésel empleado por la maquinaria actualmente y de la fabricación de etanol en el Escenario 1.

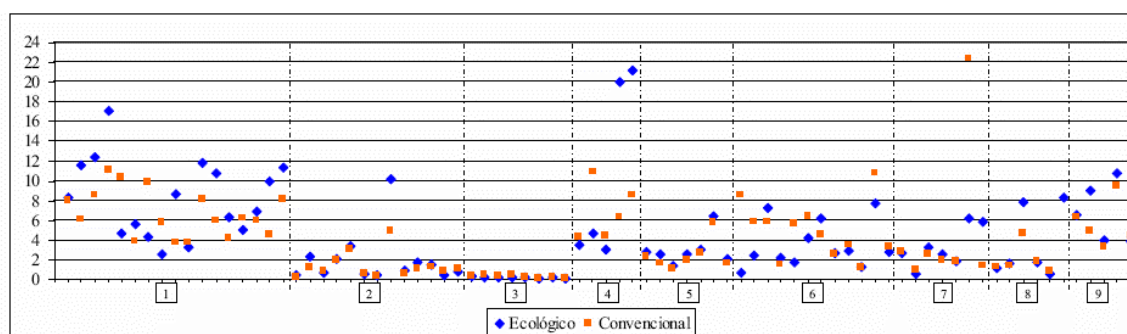
2.1.8 HACIA LA AUTOSUFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA AGRICULTURA: AGRICULTURA ECOLÓGICA Y BIOCOMBUSTIBLES PARA AUTOCONSUMO

Actualmente han surgido varias alternativas que tratan de reducir la intensidad en el uso de la energía en la agricultura mediante estrategias muy distintas. De ellas destacaremos la agricultura integrada, la agricultura de conservación y la ecológica. La primera trata de reducir el uso de insumos químicos ajustando su dosis a la estrictamente necesaria para reponer los nutrientes extraídos o eliminar la plaga detectada. Desde la perspectiva energética este enfoque estaría muy limitado por el hecho de que la utilización de insumos químicos implica la importación al sistema de cantidades importantes de energía no renovable secuestrada en estos productos. El potencial de reducción del consumo energético, por tanto, estaría limitado por el volumen de la extracción de nutrientes que se han de reponer y por los

desequilibrios que permanecen en un sistema cuyo esquema básico no ha sido modificado, que ocasionan la persistencia de las condiciones propicias para la expansión de las plagas. La agricultura de conservación -o labranza cero- logra la eliminación de las operaciones de labranza destinadas al control de malas hierbas, reduciendo el nivel de consumo de combustible, pero a costa de un uso masivo de herbicidas (ver apartado 2.3.4). La agricultura ecológica, orgánica o biológica, en cambio, ha significado en Europa la culminación práctica de la revisión crítica a las tecnologías de intensificación agraria, propias de la revolución verde (Guzmán, 2008). Veremos algunos rasgos básicos del enfoque agroecológico en el apartado 2.3. Por ahora nos limitaremos a revisar algunos ejemplos que comparan el balance energético del manejo orgánico con el de otros estilos de manejo.

Muchos estudios muestran una mayor eficiencia energética en la agricultura ecológica frente a la convencional (Pimentel et al., 1983, Serrano, 2005; Gündoğmus, 2006; Kaltsas et al., 2007; Klimeková y Lehocká, 2007; Lacasta et al., 2008; Alonso et al., 2008; Guzmán y Alonso, 2008; Deike et al., 2008). Sin embargo, esta situación no siempre está tan clara. Por ejemplo, Deike et al., (2008) obtuvieron eficiencias energéticas medias superiores para el cultivo de trigo blando bajo manejo orgánico respecto al manejo integrado en un experimento de larga duración en Brandenburg (Alemania), a pesar del menor rendimiento en el orgánico. Pero esas diferencias no existieron durante un periodo de cuatro años en el experimento. En algunos casos, la situación puede ser a la inversa. Por ejemplo, Pimentel et al. (1983), a pesar de haber hallado eficiencias superiores en ecológico frente al convencional en trigo y maíz, obtienen eficiencias menores en el cultivo de patata y manzanas. En el primer caso, gran parte de la cosecha se malograba por las plagas, mientras que en el segundo los estándares de calidad impedían la venta de un 95% de la cosecha por picaduras de insectos que estropeaban la imagen de las manzanas. También Alonso et al., (2008), en un estudio en el que comparan la eficiencia del manejo ecológico frente al convencional en 80 cultivos distintos, encuentran varios casos en los que la eficiencia de la energía no renovable (EENR) es mayor en el manejo convencional:

Figura 2.5 Eficiencia de la energía no renovable en distintos grupos de cultivos ecológicos y convencionales (MJ/MJ)



Nota: 1 = Cultivos extensivos; 2 = Hortalizas al aire libre; 3 = Hortalizas invernadero; 4 = Cítricos; 5 = Olivar; 6 = Frutales; 7 = Vid; 8 = Frutos secos y 9 = Subtropicales

Fuente: Alonso et al., 2008

Así pues, si bien podemos confirmar que por regla general la agricultura ecológica representa un avance muy importante en cuanto al uso de la energía respecto a la convencional, de forma que en la mayoría de los casos la primera supera la eficiencia de la segunda, y en muchos la duplica o triplica, hay que reconocer que aún queda mucho por recorrer para lograr la eliminación del uso de energía fósil que socava la sostenibilidad de la producción ecológica. Como señalan Alonso et al. (2008), uno de los factores que más compromete la EENR es el riego, y de ahí la importancia para la sostenibilidad de mantener los secanos en la región mediterránea, pues "estos espacios productivos han jugado un papel fundamental en la agricultura preindustrial generando la suficiente energía renovable para hacer funcionar al conjunto de los agroecosistemas y, en último término, a las sociedades" (González de Molina y Guzmán, 2006; Cussó et al., 2006, en Alonso et al., 2008). También señalan el potencial de ahorro mediante el acoplamiento de la agricultura al territorio en que se encuentra, a través de estrategias como el compostaje de residuos, el incremento de la biodiversidad funcional o el empleo de cubiertas vegetales. Igualmente, existiría mucho potencial de mejora en la disminución del uso innecesario o inadecuado de la maquinaria (véase apartado 3.3.1). Pero existen tecnologías y factores de producción, como las estructuras de los invernaderos o el combustible, que requieren mucha energía en su fabricación, o cuya energía inherente es simplemente muy elevada. Esto implica que en el contexto actual, en que la producción de energía está dominada por los combustibles fósiles, su uso suponga un alto consumo de energía no renovable.

Los investigadores Carlos Lacasta y Ramón Meco han realizado una serie de ensayos en una finca experimental en Toledo (Lacasta y Meco, 2000; Meco y Lacasta, 2006; Lacasta et al., 2008), en los que

comparan el balance energético y otros parámetros de rotaciones convencionales y ecológicas de cultivo de cebada en secano. Por tratarse de la fuente más completa sobre el cultivo convencional y ecológico de cereal en condiciones similares a las estudiadas en el presente trabajo, estos estudios serán la referencia principal a la hora de evaluar el agroecosistema de Orce. En ellos se pone de manifiesto que el coste energético del monocultivo convencional de cebada es entre tres y cinco veces superior al de las rotaciones ecológicas. Y no sólo es mejor el balance energético, sino que todas las rotaciones ecológicas mostraron márgenes económicos positivos frente al margen bruto negativo de la rotación convencional. La cebada en rotación con barbecho -el cultivo de año y vez que, como veremos, es el más habitual en nuestro agroecosistema objeto de estudio- produce más kilogramos por hectárea en cada cosecha que el monocultivo de cebada bajo manejo convencional, a la vez que consume cinco veces menos energía por hectárea y año. Estos resultados apuntan claramente a que, al menos en condiciones de secano semiárido como las que ocupan grandes extensiones de la SAU española, el camino hacia una agricultura de bajos insumos externos, sobre todo no renovables, como la que se perfila en el contexto de crisis ambiental y energética actual, pasa por la transición a una agricultura ecológica sin fertilización exógena. Sin embargo, incluso la rotación cereal-barbecho, que vimos que es la más frugal energéticamente, consume $2,87 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, lo que equivale a 66 kilogramos de petróleo por hectárea y año. Por tanto, esta agricultura ecológica tendría que dar un paso más, en su camino de vuelta a la autonomía energética, que consistiría en producir su propia energía para la tracción mecánica. En efecto, el combustible supone la mayor parte de la energía consumida en este tipo de manejo, así que la existencia de tecnología que permite obtener carburantes para hacer funcionar los tractores a partir de productos agrícolas abre un interesante campo de posibilidades de mejora del uso de la energía en estos agroecosistemas.

Los únicos estudios que hemos encontrado en la literatura con objetivos similares a los aquí propuestos han sido realizados por un grupo de investigadores de la Universidad de Uppsala (Suecia), que en diferentes trabajos (Bernesson, 2004; Fredriksson et al., 2006, Hansson et al., 2007) han comparado desde la metodología del Análisis de Ciclo de Vida el impacto ambiental de tres combustibles renovables alternativos al diésel en explotaciones agrícolas convencionales y ecológicas: biogás obtenido a partir de una leguminosa usada como abono verde, etanol de cereal (trigo), y biodiésel de aceite de colza. De entre estos combustibles, el biogás fue el que obtuvo un menor impacto ambiental, asociado a una menor ocupación del territorio por obtenerse a partir de una materia prima que estaba ya incluida en la rotación de referencia como abono verde. La obtención de biofertilizante como coproducto de la producción de biogás permite devolver a la tierra el nitrógeno fijado por la leguminosa. Sin embargo, el uso en los tractores agrícolas del biogás tiene un alto coste energético y sobre todo económico. El biodiésel de colza, en cambio, apareció como la tecnología más consumidora de territorio pero más fácilmente implementable por los agricultores, pues permite la utilización directa del combustible obtenido sin modificaciones en los tractores. La eficiencia energética de la producción de biodiésel y bioetanol a partir del cultivo ecológico de colza y trigo en la rotación estudiada fue de 9,6 y 3,1 respectivamente, lo que contrasta con la eficiencia bajo manejo convencional que fue de 2,8 y 2,2. Esta diferencia se debe principalmente al uso intensivo de energía en forma de fertilizantes que se produce en el manejo convencional. La comparación entre distintas escalas de producción (producción en finca, en plantas medianas y en plantas grandes) mostró cómo las ganancias en eficiencia energética de los procesos de elaboración del etanol logradas en las plantas grandes no eran suficientes para compensar el mayor gasto de energía debido al transporte. A pesar de los balances energéticos positivos y las mejoras en el impacto ambiental, el análisis económico mostró que el coste de producción de las alternativas al gasóleo agrícola fue siempre mayor -tanto a pequeña como a gran escala- que el precio de mercado de éste. Este dato nos alerta sobre la importancia de complementar los estudios de los flujos biofísicos con estudios económicos a la hora de probar la viabilidad real de nuevas tecnologías. Pero por otro lado, representa una muestra más del desfase existente entre la riqueza biofísica real y la sesgada valoración que se hace de ésta desde el sistema económico a través de los precios.

2.2 ECOLOGÍA POLÍTICA: LOS CONFLICTOS DERIVADOS DEL USO DE ENERGÍA FÓSIL EN LA AGRICULTURA, Y DE LA AGRICULTURA COMO FUENTE DE ENERGÍA

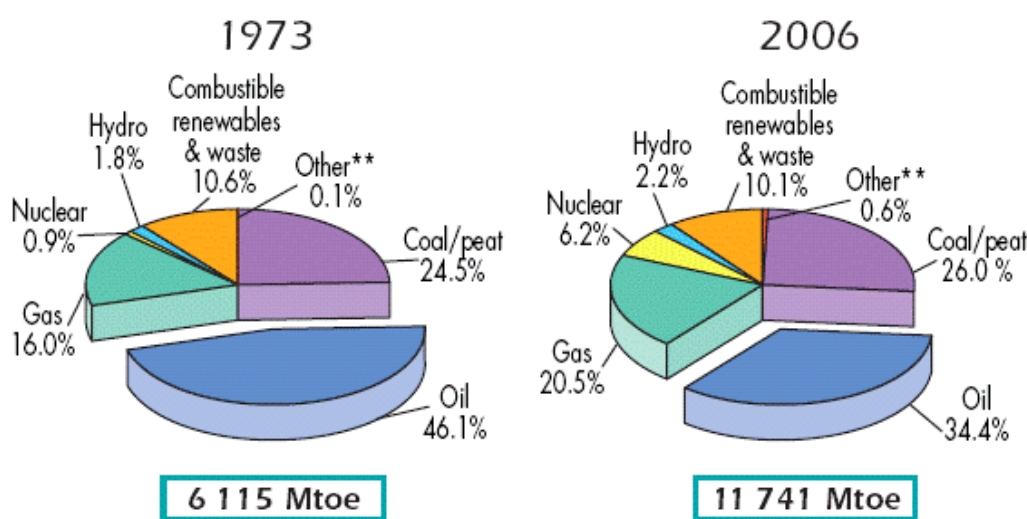
No nos detendremos demasiado en examinar el trasfondo histórico y teórico de la Ecología Política, porque preferimos centrarnos en su aplicación al análisis de los conflictos relacionados con la energía y la agricultura, que tiene un alto interés práctico para el presente trabajo. Nos limitaremos, por tanto, a citar esta breve descripción que hace Joan Martínez Alier: "La ecología política estudia los conflictos ecológicos distributivos. Por distribución ecológica se entiende los patrones sociales, espaciales y temporales de acceso a los beneficios obtenidos de los recursos naturales y a los servicios proporcionados por el ambiente como un sistema de soporte de la vida. Los determinantes de la distribución ecológica son en algunos aspectos naturales (clima, topografía, patrones de lluvias, yacimientos minerales, calidad del suelo y otros). También son claramente sociales, culturales, económicos, políticos y tecnológicos. En parte, la ecología política se superpone a la economía política,

que en la tradición clásica es el estudio de los conflictos de distribución económica" (Martínez Alier, 2004a: 104-105)

2.2.1 LOS CONFLICTOS ECOLÓGICO-DISTRIBUTIVOS DERIVADOS DEL USO DE ENERGÍA FÓSIL EN LA AGRICULTURA

Como vimos, la agricultura moderna se caracteriza por un uso intensivo de energía no renovable. Los derivados del petróleo se han convertido en la principal fuente de energía de la tracción mecánica, sustituyendo al ganado de labor, mientras que el gas natural es fundamental en la elaboración de fertilizantes nitrogenados. Además, la mayor parte de los insumos empleados son elaborados fuera del agroecosistema, en un contexto en que los medios de producción están dominados por energías fósiles. Según en MARM (2008), el consumo de energía primaria en el España en 2005 estuvo compuesto por un 49% de petróleo, 15% de carbón, 20% de gas natural, 10% de energía nuclear y un exíguo 6% de energías renovables. A nivel mundial, la evolución de estos porcentajes, así como del valor absoluto de consumo de energía primaria desde 1971 a 2006 puede observarse en el siguiente gráfico (AIE, 2008):

Figura 2.6 Porcentaje del suministro mundial de energía primaria por tipo de combustible en 1973 y 2006



Fuente: AIE, 2008

Podemos observar que, pese al aparente despertar de la conciencia ecológica en la sociedad, ayudado por las crisis petroleras de los años setenta y ochenta, y por el despliegue mediático de los últimos tiempos, el consumo de energía primaria casi se ha duplicado desde 1973. Y ello, además, no debido a un incremento en la importancia relativa de las energías renovables -que, de hecho, si excluimos la generación hidroeléctrica, ha descendido-, sino a través de la expansión de la energía nuclear y del carbón y el gas natural.

Pese a que la energía nuclear es fuente de numerosos conflictos, la dejaremos de lado para centrarnos en la energía de origen fósil, por su mayor importancia relativa en agricultura. El uso de las energías fósiles conlleva impactos a todo lo largo del ciclo de vida de estos productos. Así, desde la perspectiva del metabolismo social, que ve la economía como un sistema abierto a la entrada de energía y materiales y a la salida de residuos, los conflictos ecológicos podrían clasificarse según los distintos puntos de las *commodity chains* donde suceden (Martínez Alier, 2004b). Empezando por la extracción de las materias primas, encontramos *conflictos mineros* derivados de la extracción de carbón, que se evidencian por las quejas a causa de la contaminación del suelo, del aire y del agua, y por la ocupación de tierras por la minería a cielo abierto y las escorias. La *extracción de petróleo* tiene consecuencias similares, provocando de nuevo contaminación del aire (por la quema de gases), del agua (por los vertidos de agua salada y contaminada a cuerpos de agua locales) y del suelo. El *transporte* global de estas sustancias contaminantes tampoco está exento de conflictos. Los derrames petroleros en el mar, tanto los normales resultado de la limpieza de tanques y otras operaciones, como los debidos a accidentes, causantes de mareas negras, se suman a los conflictos sobre oleoductos y gaseoductos (Martínez Alier, 2004b).

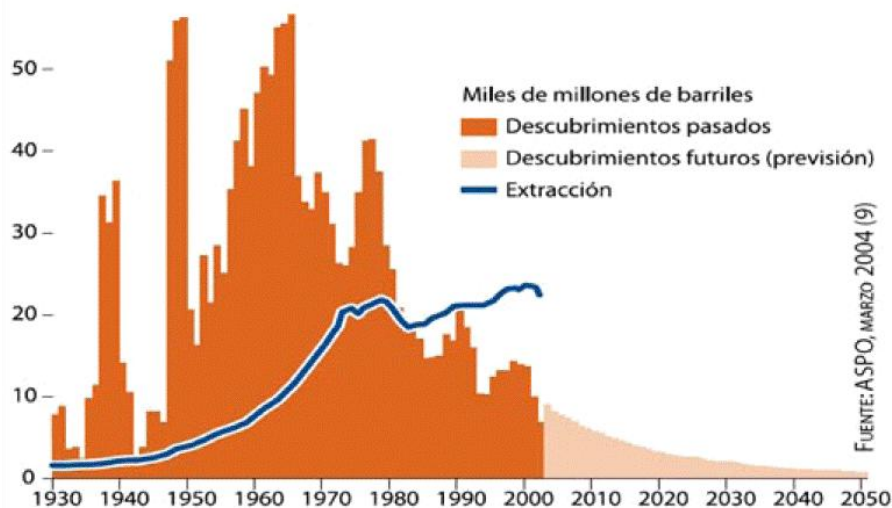
Pero el punto en que los conflictos son más generalizados está al final del ciclo de vida, cuando los combustibles fósiles son quemados y sus residuos liberados a la atmósfera. Esto genera *contaminación transfronteriza*, por ejemplo en forma de partículas de dióxido de azufre que provocan lluvia ácida en países alejados. Y también genera una deuda de carbono de los países ricos hacia los pobres, si partimos

de que debería existir un *igual derecho a los sumideros de carbono* como el suelo, la atmósfera, los océanos y bosques, mientras que en la práctica éstos han sido acaparados abusivamente por los ricos (Martínez Alier, 2004b). Cabe detenerse en este punto. Los países ricos no sólo están acaparando los sumideros globales de carbono, sino que están liberando a la atmósfera más carbono del que puede ser asimilado por estos sumideros sin alterar su equilibrio, provocando un incremento en la concentración de CO₂ atmosférica. Como se comentó en la introducción, el efecto más llamativo de este aumento es el calentamiento global. Consideraremos este aspecto brevemente, pese a ser fundamental, porque últimamente ha gozado de una difusión mediática de la que se han visto privados otros asuntos relacionados y también muy importantes. El cambio climático se manifiesta, además de en un incremento de la temperatura media global, en forma de alteraciones en los patrones meteorológicos de las distintas regiones del planeta. Estos cambios ya se están notando en la agricultura. El citado estudio realizado en Castilla La Mancha (Lacasta et al., 2008), que contrasta la evolución de la meteorología con series temporales largas de rendimientos de cultivo, muestra que los cultivos herbáceos han sufrido una disminución de rendimientos en los últimos años a causa de un aumento de los años secos y de las temperaturas.

Pero el cambio climático no es el único efecto del incremento en las emisiones de CO₂. El efecto directo más pernicioso sobre la biota está en el mar. La mayor concentración de CO₂ provoca una acidificación del agua por la liberación de protones (H⁺), que supone un reto para la bioquímica de los animales marinos, y particularmente sobre los que, como corales, almejas y otros, usan carbonato cálcico (CaCO₃) para producir exoesqueletos. La bajada del pH marino provoca un descenso en la concentración de carbonatos, lo que supone una grave amenaza para estos animales. Se estima que los arrecifes de coral podrían empezar a disiparse cuando la concentración atmosférica de CO₂ alcance los 550 ppm, es decir, en torno al año 2040 con el ritmo actual de emisiones (Hunter, 2007). Los arrecifes son sistemas altamente productivos que sustentan comunidades naturales muy complejas, y a numerosas poblaciones humanas que basan su subsistencia en los recursos que extraen de ellos. Por tanto su desaparición podría tener consecuencias socioambientales muy severas. Por otro lado, en la tierra el aumento de CO₂ tendrá un efecto fertilizante en numerosas especies de plantas, e incrementará la eficiencia en el uso del agua y la tolerancia al frío de las plantas con metabolismo C3 debido a que sus estomas no tendrán que abrirse durante tanto tiempo para captar el CO₂, reduciéndose las pérdidas de agua y calor por evapotranspiración. No obstante, estos efectos no serán homogéneos en todas las plantas, y algunos estudios muestran que podrían tener consecuencias colaterales sobre los cultivos relacionadas con el incremento de las plagas y malas hierbas (Hunter, 2007).

Un último tipo de conflicto derivado del uso de combustibles fósiles, ya esbozado en la introducción, es resultado del *pico del petróleo* y del resto de recursos de origen fósil. El concepto del pico del petróleo fue acuñado por el geofísico estadounidense King Hubbert a mediados del siglo XX, y ahora es investigado y difundido por la ASPO. Hubbert estableció que en un área determinada -ya sea un pozo, o el mundo en su totalidad- el perfil de extracción de petróleo sigue una curva en forma de campana. Esta curva es a menudo denominada "curva de Hubbert". Esto significa que el ritmo de extracción -también en el resto de combustibles fósiles- puede crecer a ritmo exponencial sólo durante un periodo limitado de tiempo, debido a limitaciones físicas. Habitualmente, el límite aparece cuando la mitad del petróleo ha sido extraído y el campo o la región madura, creando una tasa de declinación medible (ASPO, 2008). La siguiente gráfica constituye una importante prueba de la inminencia de ese cenit a nivel mundial:

Figura 2.7 Descubrimientos y extracción mundial de crudo 1930-2050



Fuente: Bullón (2006)

Como puede observarse, el máximo de descubrimientos se da en la década de 1960, y a partir de los años ochenta el ritmo de extracción comienza a superar al de petróleo descubierto. La situación se vuelve más grave si tenemos en cuenta que los yacimientos más grandes y accesibles, esto es, con una mejor tasa de retorno energético, ya han sido descubiertos y parcialmente explotados. Así, mientras a Georgescu-Roegen a comienzos de los setenta le parecía increíble que estuviesen perforando en la plataforma continental, ahora se planea extraer crudo por ejemplo de aguas profundas donde la lámina de agua tiene varios kilómetros de espesor, y después hay que atravesar otro par de kilómetros de sal. Otra fuente muy importante por su enorme volumen y baja TRE son los hidrocarburos no convencionales, como las arenas asfálticas, las pizarras bituminosas o los petróleos pesados como los de la franja del Orinoco en Venezuela. La explotación de estos recursos supone la movilización de ingentes cantidades de agua, energía e infraestructuras para extraer la fracción aprovechable que contienen, con el consiguiente impacto sobre el territorio ocupado por los yacimientos. Además, como regla general no todo el petróleo puede ser extraído de los yacimientos, pues a medida que éstos son explotados, el petróleo remanente queda adherido a las rocas, o a más profundidad, y cuesta cada vez más energía y recursos extraerlo, de forma que en cierto momento la TRE baja de la unidad y ya no tiene sentido extraer más. De hecho, no es necesario que llegue a la unidad para que deje de ser rentable. En general, TREs por debajo de 5 ya conllevan un coste social que puede no merecer la pena asumir (Hall, 2008), especialmente tratándose de fuentes de energía muy contaminantes. De este modo, a medida que el petróleo fácil se agota, el uso por la sociedad de una misma cantidad de energía fósil genera impactos ecológicos y sociales cada vez mayores. Desde esta perspectiva, los conflictos que hemos enumerado relacionados con el uso de combustibles fósiles se verán exacerbados a medida que la humanidad descienda por la curva de Hubbert. Así, lo importante no es cuánto petróleo queda, sino cuánto puede extraerse a un coste social y ecológico tolerable. Este coste, en forma de energía invertida para la extracción de energía fósil, ha ido creciendo a lo largo del siglo XX por las razones mencionadas, y lo hará más aún durante la primera mitad del siglo XXI.

Otra previsible fuente de conflictos ecológico-distributivos relacionada con el pico del petróleo tiene que ver con el acceso a este recurso por parte de los sectores más pobres. En este sentido, el problema es similar al que encontramos con la competencia de los agrocombustibles con los alimentos: en el mercado neoliberal globalizado, el acceso a los recursos no lo tiene quien más los necesita, sino quien tiene mayor poder de compra. Así, en una economía mundial profundamente dependiente del petróleo como la que existe hoy día, los países del Sur no productores aparecen como extremadamente vulnerables a un inicio de escasez de crudo. Frente a esta situación, desde sectores académicos preocupados por el tema han surgido iniciativas como el "Protocolo de Uppsala" (véase Bullón, 2006) que apuntan a un descenso "ordenado" al *mundo de baja energía* del que hablaba H. T. Odum (Odum, 1971, en Ballenilla y Ballenilla, 2007).

Las posibles consecuencias de un corte o reducción de suministro de petróleo sobre la agricultura moderna quedan bien ilustradas en los casos de Cuba y Corea del Norte. Ambos países tienen pocos recursos propios, y ambos dependían de la Unión Soviética para sus importaciones de petróleo, por lo que la caída de ésta supuso para ellos que se redujera repentinamente y drásticamente su suministro de petróleo. La reacción y las consecuencias, en cambio, fueron muy distintas en uno y otro caso. En Cuba, una transición agroecológica y planificada permitió recuperar la producción agrícola y garantizar su distribución. En Corea del Norte la crisis energética provocó una crisis alimentaria que fue fatal. Su agricultura moderna e industrializada colapsó ante la falta de aportes de energía fósil. Se estima que más de tres millones de personas han fallecido como consecuencia de ello (Pfeiffer, 2003:44). El declive de la producción agrícola siguió, muy de cerca, a la caída del consumo de petróleo, pero cuando éste volvió a subir, no fue correspondido por un incremento similar en la producción agrícola. Una combinación de factores fue el motivo que esto ocurriese: la reducción de la disponibilidad de fertilizante en el contexto de unos suelos agotados por la agricultura industrial, la escasez de diésel —acaparado en primer lugar por el ejército— para la maquinaria agrícola y la industria alimentaria, la falta de electricidad para la irrigación, el fallo de la maquinaria por falta de recambios, junto con una meteorología adversa son algunas de las causas que apunta el autor. La escasez de energía se dejó notar en toda la economía. Con cortes de suministro eléctrico habituales y ante la falta de carbón las familias volvieron a la biomasa para calentarse y cocinar, provocando deforestación y, consecuentemente, mayor erosión y más inundaciones.

Aquí hay que destacar la relación entre el subsidio de energía fósil y la HANPP (Human Appropriation of Net Primary Production). Como señala Margalef (1974:791): "la generalización del uso de gas embotellado en la región mediterránea ha reducido el incentivo de sacar leña de los ecosistemas naturales, con lo cual se favorece la reanudación de la sucesión natural". A la inversa, la reducción de la energía fósil supuso en Corea del Norte el aumento de la presión sobre los ecosistemas, así como el actual encarecimiento mundial de la energía está provocando la expansión de los agrocombustibles sobre zonas del globo hasta ahora dejadas de lado por la modernidad, como veremos en el siguiente apartado.

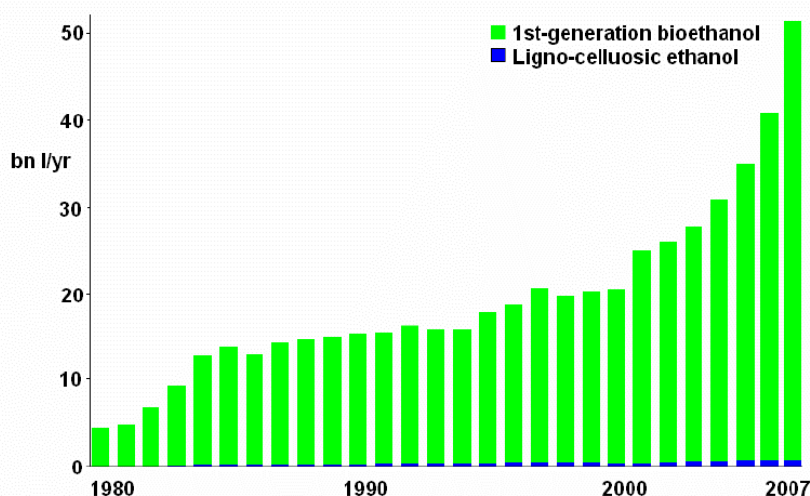
2.2.2 ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS AGROCOMBUSTIBLES DESDE LA PERSPECTIVA DE LA ECOLOGÍA POLÍTICA

En el presente trabajo se tratan los agrocombustibles como una alternativa más para reducir la dependencia de la energía no renovable en la agricultura. La necesidad de este enfoque creo que ha sido demostrada en páginas anteriores. Una producción sostenible de alimentos es requisito indispensable en la construcción de la sociedad sustentable, porque los alimentos representan la fuente de energía endosomática de la humanidad. Y una agricultura sostenible no es posible con un uso mayoritario de energía no renovable. Pero en la actualidad los agrocombustibles se emplean -y se plantean- sobre todo para el transporte. Este sector crucial de la economía globalizada está mayoritariamente basado en los motores de combustión interna, que necesitan para funcionar carburantes líquidos, provenientes en su mayoría del petróleo. En este sentido, se ha visto en los agrocombustibles una alternativa renovable y ecológica al diésel y la gasolina, que como se produce localmente contribuiría además a reducir la dependencia energética de los países. Pero las consecuencias sociales y ambientales derivadas de la generalización de este tipo de cultivos no se han hecho esperar.

El término agrocombustible se ha propuesto para remarcar las problemáticas asociadas a la producción de combustibles derivados de la biomasa que están surgiendo en todo el mundo, y señalar que su característica principal es que se producen mediante la agricultura, y no necesariamente mediante las técnicas respetuosas con el medio que se asocian al prefijo *bio*. De hecho, los combustibles fósiles también tienen un origen que en última instancia es biológico, pues provienen de la fosilización de la materia orgánica. Así pues, el prefijo *bio* no haría sino disfrazar de verde un vector energético que puede causar importantes impactos ambientales y sociales. En este trabajo se ha usado preferentemente el término agrocombustible, para referirnos al biodiésel y el bioetanol que están en el mercado. En algunos casos hemos usado el término biocombustibles, para referirnos a combustibles producidos para el autoconsumo agrícola o a partir de desechos (biogás).

Los agrocombustibles son una forma de energía obtenida a partir de la biomasa. Hoy por hoy, los presentes en el mercado son en su mayoría combustibles líquidos (agrocarburantes) obtenidos a partir de cultivos energéticos, es decir, de cultivos que, sean alimentarios o no, tienen un uso energético y no alimentario. En este sentido, las notas que siguen se referirían al bioetanol y al biodiésel, y no al biogás, pues en nuestro caso éste se obtiene a partir de residuos (aunque puede producirse a partir de prácticamente cualquier tipo de materia orgánica), y por lo tanto no implicaría la competencia con la producción de alimentos. Si bien es cierto que existen tecnologías que permiten la elaboración de bioetanol y biodiésel a partir de residuos de cosecha, también lo es que la vasta mayoría de los agrocombustibles producidos en el mundo no utilizan este tipo de materias primas, como se muestra en el siguiente gráfico:

Figura 2.9 Producción de etanol de primera generación (verde) y lignocelulósico (azul) 1980-2007. (miles de millones de litros/año)



Source: Mabee and Saddler, 2007

Fuente: IEA (2008)

Esto significa que en la actualidad, los agrocarburantes son producidos (en cantidades crecientes, como podemos observar en la gráfica) usando los mismos alimentos -o los mismos recursos agrícolas, en el caso de cultivos no alimentarios- consumidos por las personas. En los siguientes puntos se esbozarán los conflictos socioambientales y las limitaciones biofísicas relacionadas con la expansión de los agrocombustibles en los mercados globales en el contexto de la economía neoliberal, que en la práctica no hace sino perpetuar y ampliar un modelo de producción y consumo insostenible. En este sentido, el

enfoque de este trabajo enlazaría más con las propuestas de soberanía alimentaria y energética en los términos que se exponen en la Declaración del Seminario Internacional Agrocombustibles como obstáculo a la construcción de la Soberanía Alimentaria y Energética (Autoría Colectiva, 2008).

2.2.2.1 EL COSTE TERRITORIAL DE LOS AGROCOMBUSTIBLES

El hecho de que los agrocombustibles tengan un alto coste territorial supone su principal debilidad, y de él se derivan los demás problemas que encontramos cuando nos planteamos usarlos como sustitutos de los combustibles fósiles líquidos. La escala de este coste puede apreciarse si comparamos la "densidad de potencia" (power density) de ambas fuentes de energía: los agrocombustibles proporcionan en torno a 0,1 W/m², mientras que los yacimientos petrolíferos y de carbón proporcionan entre 1.000 y 10.000 W/m² (Smil, 2003, en Giampietro, 2006)

En cuanto a las razones para que el coste sea tan alto, tenemos en primer lugar la baja intensidad de la energía solar. La tierra recibe del sol en forma de radiación electromagnética 1,78 x 10¹⁷ W diarios (Margalef, 1974: 435), pero esta energía se distribuye por toda la superficie del planeta, de manera que su captación para aprovechamiento humano supone la ocupación de superficies mucho mayores que el uso de otras fuentes energéticas concentradas como la nuclear o los combustibles fósiles. Sin embargo, el hecho de que sea renovable y bien distribuida nos viene a decir que la energía solar y sus derivados (eólica, biomasa, hidráulica) son la principal fuente energética a la que debemos mirar en la construcción de la sociedad sostenible.

La utilización de la energía solar implica además su transformación en otras formas de energía más directamente utilizables por la sociedad. En el caso que nos ocupa, eso supone el aprovechamiento del proceso de fotosíntesis realizado por las plantas para obtener una biomasa que será la materia prima con la que elaborar el combustible. Aquí nos encontramos con dos transformaciones de la energía en las que, como sabemos por la segunda ley de la termodinámica, se pierde una parte en forma de calor no aprovechable. En la primera, la fotosíntesis, las plantas transforman la energía solar en tejidos vegetales con una eficiencia del 4% en condiciones óptimas (Pimentel, 78 y 91, en Gliessmann 2002). Pero en la mayoría de agroecosistemas la producción se ve afectada por limitantes que alejan su valor del óptimo. En ecosistemas mediterráneos el agua es el principal limitante, de forma por ejemplo en el trigo sólo se fija como media un 0,2% de la radiación lumínica incidente, cifra que es todavía menor en el caso de agroecosistemas relativamente poco productivos como los cerealistas de secano semiárido de la península ibérica. Esta escasa eficiencia en la transformación de la luz solar contrasta con la eficiencia del 15-20% de las placas solares fotovoltaicas. En la segunda transformación, una parte de la biomasa cosechada se transformará en un líquido (bioetanol o biodiésel) de alto contenido energético, con una eficiencia muy variable según la materia prima y la tecnología utilizada, pero que de nuevo implica la pérdida de una parte importante de la energía.

Por último, hay que tener en cuenta que la producción de determinados bienes mediante el cultivo de los agroecosistemas requiere de un aporte constante de energía para romper la sucesión natural del ecosistema, y mantener un equilibrio alejado del óptimo ecológico que permita maximizar las poblaciones de las especies que nos interesan en detrimento de las otras. En la actualidad, como hemos visto, la mayor parte de ese flujo de energía viene de fuentes no renovables, así que este apartado tiene un bajo peso específico en el coste territorial de la agricultura moderna, debido a que estas fuentes tienen, como vimos, una alta "densidad de potencia". Sin embargo, esta primera impresión es engañosa. Herramientas como la huella ecológica (Wackernagel y Rees, 1996) nos muestran que en realidad, el uso de combustibles fósiles oculta otro coste territorial nada despreciable: el de los bosques necesarios para absorber el carbono que se emite durante su combustión. Así, mientras la huella directa de la alimentación española -incluyendo producción de vegetales, carne y pescado- pasaba de los 18,9 millones de hectáreas en 1955 a los 27,4 millones en 2000, la huella asociada a la energía requerida para la tracción mecánica de la agricultura española pasó de ocupar una superficie de 1,6 millones de hectáreas a ocupar 67,6 millones en 2000 (Carpintero, 2005: 533), lo cual es más que la superficie agraria útil española. De nuevo, hay que insistir en que, además, ese "ahorro territorial" sólo puede ser transitorio, limitado por el eventual agotamiento de las fuentes de energía del modelo.

La desproporción entre el coste territorial de la biomasa y el consumo energético de la sociedad moderna se hace patente si observamos que toda la producción de biomasa del territorio español apenas daría para cubrir el 7% del consumo de energía primaria de nuestro país (Riechmann, 2008). Otro cálculo, de la OCDE, estima que en Europa habría que destinar el 72% de la superficie agraria para cultivos energéticos para cubrir el objetivo del 10% de consumo de carburante (Riechmann, 2008). Y si queremos probar las posibilidades de los agrocombustibles como sustitutos de los fósiles en el transporte en nuestro país, podemos hacer el ejercicio de calcular la superficie de cereal necesaria (en relación a la superficie actual) para producir la cantidad de energía equivalente al consumo nacional anual de gasolina, a partir de los datos de producción agraria española, energía contenida en ambos tipos de combustible, eficiencia de la destilación del etanol y consumo de carburantes.

- Producción 18.579.000 t cereales España 2006/2007 (MARM, 2009)
- 1 kg de etanol requiere unos 4 kg de cereal (Lechón et al., 2005)
- Etanol: 26,8 MJ/kg
- Gasolina: 42,8 MJ/kg
- Consumo 6.680.000 t gasolina España 2007 (Europa Press, 2008) ; luego:

- Producción de energía en forma de etanol si se empleara toda la producción de cereal española: 124.479.000 GJ (P)
- Consumo de energía en forma de gasolina en España: 285.904.000 GJ (C)
- Ratio: 2,3 (C/P)

Es decir, que se necesitaría más del doble de la superficie de cereal española para cubrir las demandas de gasolina del país (que en 2007 representó únicamente el 20,4% del consumo total de combustible) con etanol obtenido de cereal, y eso sin contar la energía consumida en la producción del cereal -cuya huella oculta ya hemos comprobado que es mayor que la huella visible- y en la destilación del alcohol. Si además tenemos en cuenta el déficit de cereal que ya existe en España, donde se importaron 13,3 millones de toneladas de grano en 2007 de los 29,8 millones que se consumieron ese año (MARM, 2009), nos haremos una idea de lo improbable que resulta tal sustitución.

Según el CIEMAT (Lechón et al., 2005), a partir de datos de dos empresas productoras, una distribución orientativa de las materias primas utilizadas en la elaboración de biodiésel en plantas españolas sería: 25% de colza (en un 95% importada de Francia), 40% de soja importada de EEUU, 25% de palma aceitera de Malasia, y 10% de girasol nacional. La Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA, 2007), en cambio, afirma que actualmente la producción nacional es mayor que la importada, pero reconoce que esa situación pronto cambiará para poder satisfacer la demanda. Esto resulta obvio en un contexto en que no es de esperar una disminución en la demanda interna de productos alimentarios -pues de hecho ya se importa una porción considerable de las materias primas para la elaboración de piensos-, así que el grueso del incremento habría de venir del exterior. Esa situación difícilmente podría ser calificada de sostenible, sobre todo en una situación de crisis alimentaria global. En el caso del mundo, la AIE (2007, en FAO, 2008) estima que, de 2005 a 2030, se pasará de un 1% a un 3% en el uso de agrocarburos en el transporte, lo que supondrá que, según sus estimaciones la producción habría de crecer desde los 20 a los 100 emtp. Así pues, para llegar a un mero 3% del consumo de energía en el transporte, la producción de agrocarburos tendría que quintuplicarse respecto a la de 2005. Si tenemos en cuenta que ya estamos en un *mundo lleno*, o ecológicamente saturado (Daly, 1993, en Riechmann, 2006: 44), y que se espera que la población mundial siga creciendo algunas décadas más, no entendemos muy bien cómo sería posible tal crecimiento de la producción si no es a expensas de la alimentación.

2.2.2.2 COMPETENCIA CON LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

En el sistema económico neoliberal que domina en el mundo, quien tiene poder adquisitivo -esto es, no quien tiene riquezas físicas, sino dinero para comprarlas- es quien acaba apropiándose de los recursos. Por otro lado, el consumo de energía endosomático es parecido en ricos y pobres -con las salvedades derivadas del consumo de carne-, mientras que es en el consumo exosomático donde se abre la brecha. El consumo exosomático de la civilización occidental está basado en los combustibles fósiles y los recursos mineros. Por tanto, la interferencia con las fuentes de energía endosomática es muy escasa: los recursos empleados son distintos. Lo que estamos haciendo al apostar por los agrocombustibles para el transporte es, en realidad, poner en un mismo plano la energía exosomática asociada al transporte con la endosomática asociada a los alimentos, mediante la utilización de un mismo recurso: el suelo fértil necesario para cultivar. De esta manera, se pone en marcha la competencia entre alimentos para los pobres y combustible para los ricos, donde todos sabemos quiénes tienen las de perder. Tal como lo expresan Elizabeth Bravo y Mae Wang-Ho en su artículo "The New Biofuels Republics" (ISIS 2006): "En otras palabras, las naciones pobres en desarrollo será forzadas a alimentar los voraces apetitos de los países ricos por biocombustibles a expensas de sus propias masas hambrientas y de sufrir la devastación de sus bosques naturales y biodiversidad".

De nuevo, algunas cifras nos ayudan a hacernos una idea de la desproporción existente: suponiendo que cada coche recorre 20000 Km/año con un consumo de 7 litros/100 Km, habrían de emplearse 1400 litros de etanol producido a partir de 3500 kg de grano. Es decir, unas siete veces más grano que el que necesita un individuo para alimentarse durante un año (Connor y Minguez, 2006, en Carpintero, 2007). Como hemos visto, los países ricos no cuentan con tierras para poner en cultivo los millones de hectáreas necesarias, así que habrían de recurrir a los países del Sur, en lo que se perfila como una nueva forma de neocolonialismo.

Desde la FAO se advierte que los cultivos energéticos no alimentarios pueden suponer un eventual encarecimiento de los alimentos: "Cuando la demanda de biocombustibles incrementa los precios de los productos usados como materias primas para elaborar biocombustibles, los precios de todos los

productos agrícolas que dependen de la misma base de recursos tienden a aumentar. Por esta razón, producir biocombustibles de cultivos no alimentarios no implica necesariamente eliminar la competencia entre los alimentos y los combustibles; si se necesita la misma tierra y otros recursos tanto para los cultivos alimentarios como para el cultivo de materias primas para generar biocombustibles, sus precios seguirán la misma evolución, aun cuando las materias primas cultivadas no puedan emplearse para la alimentación" (FAO 2008). A pesar de todo, la FAO sigue apostando por la tecnología y la productividad: "Empero, con el aumento del rendimiento y la expansión e intensificación de las zonas cultivadas podría aumentar significativamente la producción de materias primas y reducirse los costos".

2.2.2.3 EL IMPACTO SOBRE LA BIODIVERSIDAD ECOLÓGICA Y CULTURAL

Como vemos, no hablamos ya sólo de la competencia con el cultivo de alimentos, sino del aumento de la presión que la agricultura industrial, buscando más superficie y rendimiento, ejerce sobre las regiones donde aún se preservan estilos tradicionales de manejo y sobre las zonas más o menos naturales. Estas "islas de premodernidad" (Toledo, 2000:53) han sobrevivido a la expansión de la industrialización y homogeneización agraria gracias a su situación marginal, ya sea por sus condiciones climatológicas, edáficas, su accesibilidad a las infraestructuras de distribución, etc., de manera que se han convertido en los últimos reductos de biodiversidad y diversidad sociocultural. Estos sistemas tradicionales de cultivo son centrales en la estrategia metodológica de la agroecología (Altieri, 1999), desde donde se reconoce que por haber surgido de un proceso de coevolución prolongado en el tiempo, representan una forma más correcta de reproducción social y ecológica. En cualquier caso, atesoran un conocimiento y una diversidad de los que difícilmente podrá prescindir la humanidad para encarar con éxito la crisis ecológica actual.

Pero la aparición en escena de los agrocombustibles, en el contexto que hemos analizado, supone la generalización de una nueva serie de cultivos industriales que en muchos casos estarían adaptados a terrenos marginales, lo que en la práctica significa que se expanden las fronteras biofísicas de la agricultura industrial. Precisamente en esos terrenos ven los partidarios de los agrocombustibles el mayor potencial de expansión de los cultivos energéticos, ya que eliminaría de la ecuación la competencia con los cultivos alimentarios (ver, por ejemplo, Mondal et al., 2008). Un ejemplo del impacto que esta expansión ya está produciendo es la palma aceitera en Malasia, el segundo exportador mundial de aceite de palma tras Indonesia. Estos dos países presentan las mayores tasas de deforestación del mundo (FAO 2007). Según un informe de Amigos de la Tierra (Friends of the Earth et al., 2005), las plantaciones de palma son responsables del 87% de la deforestación del país. El aceite de palma malayo vimos que supone una porción muy importante de las materias primas utilizadas para elaborar biodiésel en España. Y si miramos los impactos medioambientales de los agrocombustibles dentro del territorio de la Unión Europea, encontramos estudios como el de Elbersen et al. (2007), que alertan de que una demanda creciente de agrocombustibles puede afectar negativamente (en relación a la biodiversidad) a las áreas agrícolas extensivas si éstas no son protegidas explícitamente.

2.2.2.4 LOS AGROCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN

En este sentido suponen una amenaza todavía mayor los agrocombustibles de segunda generación, con los que se transforma toda la biomasa lignocelulósica de las plantas y cuyo desarrollo, por tanto, puede abrir paso a toda una serie de cultivos que pueden ocupar un rango aún mayor de biotopos, además de someter a los suelos a una mayor presión al romper los flujos de reciclado de nutrientes. Por ejemplo, en un informe de la FAO (2008) se sostiene que: "algunas perennes de crecimiento rápido, como las plantas leñosas de rotación breve y los pastos altos, crecen a veces en suelos pobres y degradados en los que la producción de cultivos alimentarios no es óptima a causa de la erosión y otras limitaciones. Ambos factores podrían reducir la competencia por la tierra para la producción de alimentos y piensos. En cuanto a las desventajas, varias de estas especies se consideran invasivas o con posibilidades de serlo y podrían tener efectos negativos para los recursos hídricos, la biodiversidad y la agricultura".

El aprovechamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de etanol o biogás supondrá la entrada en la industria de los agrocarburos de dos tipos de materias primas muy importantes por su volumen que aún se encuentran virtualmente fuera de su influencia, aunque sí están ya dentro del ámbito de la generación de electricidad y calor mediante la combustión directa de biomasa. Se trata de los residuos agroforestales y de las propias plantaciones forestales. En ambos casos, la retirada de los campos de tales cantidades de biomasa supondría una grave amenaza para la sostenibilidad en nuestro territorio, ya que los suelos de la península sufren un déficit crónico de materia orgánica debido a las condiciones edafoclimáticas y los estilos de manejo agroforestal, que se vería severamente agravado. De este modo, la vulnerabilidad de nuestra agricultura a un corte de suministro de los insumos que importa masivamente, ya de por sí tremenda si observamos el grado de mecanización existente (dependencia de la energía mecánica), se ve exacerbada cuando constatamos que se está dilapidando la fertilidad natural del suelo (dependencia de los fertilizantes químicos y los agrotóxicos) mediante las técnicas convencionales de cultivo. Ante este panorama, resulta paradójico que se nos ofrezca como la solución más sostenible para los problemas de nuestro hipertrofiado sistema de transporte el empleo de los únicos

recursos que pueden recuperar esa fertilidad. El cultivo de especies forestales con fines energéticos, por su parte, aparece marcado por la amenaza de la expansión de monocultivos de variedades transgénicas - para facilitar la liberación de su celulosa de la lignina- de eucaliptos y otras especies de crecimiento rápido esquiladoras del suelo y la biodiversidad.

2.2.2.5 PERSPECTIVAS

A la vista de los impactos y limitaciones que hemos mostrado, cabe preguntarse sobre si tiene sentido un apoyo institucional como el que se viene realizando en los países de la OCDE, "que incluye las mezclas obligatorias de biocombustibles con combustibles basados en el petróleo, las subvenciones a la producción y la distribución y los incentivos fiscales" (FAO, 2007). Según estimaciones de la OCDE, el apoyo económico total que están recibiendo los agrocombustibles se situaría en los 6.330 millones de dólares anuales en Estados Unidos (5.800 para etanol y 530 para biodiésel) y 4.700 millones en la Unión Europea (1.600 para etanol y 3.100 para biodiésel) (OCDE, 2006, en FAO, 2007).

Pero hemos comprobado que la problemática asociada a los agrocombustibles, sea cual fuere la tecnología utilizada, está más relacionada con los problemas de escala y de integración en el mercado internacional que con la propia tecnología en sí. El problema, según nuestro análisis, viene de plantearlos como alternativa para el transporte. La cuestión más urgente en la actualidad para este sector estaría, más que en el origen de la fuente de energía, en el sobredimensionamiento del propio sector, provocado por un transporte de mercancías irracional -por ejemplo, en 2006 se exportaron desde nuestro país 496.000 t de aceite de oliva, y ese mismo año se importaron 128.000 t (FAOSTAT, 2009)- y una movilidad que en su mayoría se basa en el transporte individual motorizado, que es la alternativa de transporte más consumidora de recursos. Como señala Jorge Riechmann (2008), lo que necesitamos no son objetivos obligatorios para agrocarburantes, sino de reducción de la movilidad individual motorizada.

Así, los agrocombustibles aparecen como una porción más en el mix energético renovable de una sociedad sostenible, pero una porción cuyas dimensiones han de estar supeditadas a las limitaciones impuestas por el territorio propio, al autobastecimiento de alimentos y a la conservación de espacios naturales, y no regidas por la voraz demanda de los mercados energéticos globalizados. De hecho, su producción con objetivos desvinculados del comercio internacional y de su uso en el transporte, y en su lugar orientada al autoabastecimiento de energía en la agricultura, puede contribuir a la autonomía energética y, consecuentemente, a la sostenibilidad de la misma, como veremos en el apartado 2.3.4 y a lo largo del resto de este trabajo.

2.3 AGROECOLOGÍA: EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LOS AGROECOSISTEMAS DESDE UNA PERSPECTIVA INTERDISCIPLINAR

La Agroecología tiene una dimensión integral en la que las variables socioculturales ocupan un papel muy relevante ya que, aunque parta de una práctica agropecuaria y forestal que se desarrolla en una explotación, desde ella se pretende entender las múltiples formas de dependencia que han sido históricamente generadas por la expansión de la modernidad y transmitidas por la agricultura industrializada. En este sentido, resulta imprescindible explicar los modos de dominación que guían en la actualidad tales formas de dependencia que se generan -respecto al funcionamiento de la política, la economía y la sociedad- sobre la ciudadanía, en general, y sobre los agricultores, en particular. En los apartados anteriores hemos comprobado la utilidad de los enfoques de la economía ecológica y la ecología política para explicar estas formas de dependencia. Hemos tratado de mostrar a través del análisis de los flujos biofísicos y de los conflictos ecológico-distributivos las paradojas y contradicciones de la agricultura moderna, centrándonos en el uso de la energía. Así pues, los apartados anteriores pueden entenderse como la base sobre la que ahora esbozaremos la idea agroecológica de sustentabilidad, con la que trataremos de construir y evaluar las alternativas de mejora de manejo en nuestro agroecosistema objeto de estudio.

La Agroecología se inicia -o se *redescubre*- a comienzos de los años ochenta en Latinoamérica como respuesta a la crisis ecológica y social, desde un manejo sustentable y un acceso igualitario a los recursos naturales. Se trataría de rescatar el conocimiento campesino, dejado de lado por el pensamiento científico convencional, para encontrar experiencias útiles para afrontar los retos del presente. La Agroecología como disciplina es definida en 1987 por Miguel Ángel Altieri como las "bases científicas para una agricultura ecológica", definición que es sucesivamente ampliada y completada desde distintas disciplinas para incluir otros aspectos, hasta la integralidad del enfoque actual que requiere la articulación de tres componentes o dimensiones (Ottmann 2005:21-30), que estarían muy interconectadas entre sí al solaparse muchos de sus objetos de estudio, y cuyos rasgos básicos resumimos a continuación:

- La **ecológica** (nivel distributivo), que abarca los aspectos técnico-agronómicos y en la que se emplea como unidad de análisis el agroecosistema, que surge al artificializar (es decir, simplificar) el ecosistema anterior, aunque introduciendo una nueva diversidad, la humana. Se trataría de estudiar el estado actual del ecosistema en cuestión (el grado de simplificación de su estructura y función), para lo cual es necesario recurrir al proceso histórico. Con ello se pretende discernir las formas correctas (es decir, sustentables) de manejo de los recursos que han surgido del proceso de coevolución social y ecológica en cada agroecosistema. Se considera la sociedad como un subsistema del ecosistema explotado.
- La **sociocultural** (nivel estructural), desde una perspectiva histórica, que abarcaría las Teorías del Desarrollo pero criticando la imposición de un único modelo y promoviendo una dimensión participativa. En ella estaría incluido también el propio campesinado, así como la disciplina de la Economía Ecológica. Se parte de asumir que el objetivo de aumentar el nivel de vida debe ser definido desde cada identidad sociocultural, llevando a los conceptos de *etnoecosistema* (un sistema complejo agro-socio-económico-ecológico) y *potencial endógeno* (refiriéndose al potencial tanto ecológico como humano del área de estudio respecto a un desarrollo rural sustentable).
- La **política** (nivel dialéctico), desde la búsqueda de la equidad, mediante la articulación de las experiencias productivas para nivelar las desigualdades generadas en el proceso histórico. Se incorporan aquí los movimientos sociales y la Ecología Política para la elaboración de estrategias de cambio, a través de formas de acción social colectiva. Aquí la sustentabilidad emergería de la articulación de los espacios sociales de disidencia al paradigma de la modernización, desde los movimientos posmodernos a las islas de "premodernidad". Por otro lado otros aspectos, como los Estudio Campesinos, aparecen de forma transversal en las tres dimensiones.

Por tanto, hasta el momento hemos hecho un recorrido por los niveles estructural y dialéctico de la agroecología aplicada a nuestro problema en cuestión, para ahora aterrizar en el nivel distributivo, donde nos moveremos principalmente en el desarrollo del trabajo.

2.3.1 LOS ECOSISTEMAS NATURALES Y LOS AGROECOSISTEMAS TRADICIONALES

Desde la perspectiva agroecológica la unidad de análisis es el agroecosistema, del que deben estudiarse sus propiedades ecosistémicas además de las habituales de rendimientos o beneficios, ya que son las primeras las que proporcionan el equilibrio dinámico necesario para la sostenibilidad. Las cualidades emergentes (propiedades) del ecosistema pueden usarse, por tanto, como indicadores de sustentabilidad (Gliessmann et al., 2007): el flujo de energía (deben maximizarse las fuentes renovables), reciclaje de nutrientes (deben evitarse las pérdidas), mecanismos de regulación de poblaciones (controlan las plagas), equilibrio dinámico (relacionado con la adaptación a los cambios ambientales). Estas cualidades de autorregulación deben potenciarse con el objetivo de dejar de depender de la intervención externa para mantener la producción.

Pero estudio de la sostenibilidad agraria a largo plazo requiere de la comprensión los agroecosistemas tradicionales (indígenas o campesinos), además de los ecosistemas naturales. En ello se basa la agroecología para ayudar a los agricultores en la transición a agroecosistemas sostenibles. La agroecología pone un énfasis especial en el estudio de los agroecosistemas tradicionales como modelos de sustentabilidad (Altieri, 1999), debido a que han probado su capacidad de mantenimiento de la productividad a lo largo del tiempo. Y esto es así porque, aunque el manejo de agroecosistemas sostenibles está cimentado en la agronomía y la ecología, no se queda ahí, sino que abarca también los aspectos humanos que modelan el agroecosistema. De este modo, "partiríamos de un análisis de las vías por las cuales las culturas tradicionales han capturado el potencial agrícola de los sistemas sociales y biológicos en el curso de la coevolución" (Sevilla Guzmán, 2008). Eso no significa abogar por una vuelta a lo tradicional en las agriculturas ya modernizadas, sino entender que los agroecosistemas y prácticas tradicionales conservan lecciones importantes de cómo debieran diseñarse los agroecosistemas sostenibles modernos (Gliessmann, 2002). Se trataría, por tanto, de aprender de la racionalidad ecológica de los agroecosistemas tradicionales para diseñar nuevos sistemas sustentables adaptados a las condiciones actuales. Por ejemplo, algunas de las características sostenibles que identifica este último autor en los agroecosistemas tradicionales serían (Gliessmann, 2002):

- No dependen de insumos externos adquiridos en el mercado.
- Hacen uso amplio de recursos renovables y disponibles localmente.
- Enfatizan el reciclaje de nutrientes.

- Tienen impactos benéficos o con un efecto negativo mínimo en el ambiente, dentro y fuera de la unidad de producción.
- Están adaptados o son tolerantes a las condiciones locales, en lugar de depender del control o la alteración total del ambiente.
- Maximizan los rendimientos sin sacrificar la capacidad productiva a largo plazo del sistema como un todo y la habilidad de los humanos para usar los recursos de manera óptima.
- Se apoyan en el uso de variedades de cultivo locales y a menudo incorporan plantas y animales silvestres.
- Son relativamente independientes de factores económicos externos.
- Están contruidos sobre el conocimiento y la cultura local.

2.3.2 EL CONCEPTO DE SUSTENTABILIDAD

Como señalan Alonso y Guzmán (2006), "Hacer operativo el concepto de sostenibilidad no es una tarea sencilla, cuyo grado de complicación aumenta en la medida que se trata de evaluar sistemas complejos, como los agrarios, donde las cuestiones económicas, sociales y ambientales se solapan en un conjunto de relaciones sinérgicas y antagónicas". Hay que tener en cuenta que, además, la evaluación de la sostenibilidad sólo es válida para sistemas específicos, con límites espaciotemporales definidos, y que la sostenibilidad no puede ser mediada *per se*, sino mediante la comparación de dos o más sistemas (López Ridaura et al., 2002). A continuación veremos algunas ideas que tratan de aproximarnos a la aplicación a la agricultura de este concepto. Según Altieri (1999), la mayoría de las definiciones de sustentabilidad incluyen por lo menos tres criterios:

- Mantenimiento de la capacidad productiva del agroecosistema.
- Preservación de la diversidad de la flora y la fauna.
- Capacidad del agroecosistema para automantenerse.

Una metodología de evaluación de la sustentabilidad cuya robustez ha sido ampliamente comprobada es el MESMIS. Está basado en la construcción participativa del conjunto de indicadores y de todo el proceso de evaluación, a partir del análisis de los atributos de sustentabilidad. La puesta en marcha de de una evaluación tan completa como la que propone el MESMIS no ha sido posible aquí, pero sí podemos tomar algunas ideas de este enfoque que nos ayuden a completar nuestra noción de sustentabilidad. Así, dentro del marco MESMIS, los sistemas de manejo de recursos naturales (NRMS) sostenibles se definirían operativamente como aquellos sistemas que (López Ridaura et al., 2002):

- Logran un alto nivel de productividad mediante el uso eficiente y sinérgico de los recursos naturales y económicos.
- Mantienen una producción fiable, estable y resiliente a través del tiempo, asegurando el acceso a los medios de producción, promoviendo un uso renovable, restauración y conservación de los recursos locales; integrando una adecuada diversidad espacial y temporal del entorno natural con las actividades económicas; incorporando la prevención y mecanismos de reducción de riesgos.
- Proveen de flexibilidad (adaptabilidad) ante nuevas circunstancias económicas y biofísicas, incorporando la innovación y procesos evolutivos de aprendizaje, así como mediante el uso de estrategias de opción múltiple.
- Distribuyen, de forma equitativa, los costes y beneficios del sistema entre los varios actores, asegurando tanto la accesibilidad económica como la aceptación cultural de las alternativas propuestas.
- Promueven un nivel aceptable de auto-confianza (autoempoderamiento), de forma que el sistema pueda controlar y responder a cambios provenientes de fuera de sus fronteras.

Pero además de manejar los rasgos básicos de este concepto, es conveniente una sistematización para poder evaluar la sostenibilidad comparada de varios sistemas. Algunos autores han propuesto una serie de indicadores para realizar esta evaluación (Bockstaller et al., 1997, en Pervanchon et al., 2002;

Pervanchon et al., 2002). Sin embargo, creemos que el proceso se clarifica si consideramos que la sostenibilidad de los agroecosistemas puede describirse por un limitado paquete de propiedades dinámicas o atributos, que además de describir su conducta esencial, pueden usarse como criterio en el diseño, la realización o ejecución o evaluación de un proyecto de desarrollo agrícola (Conway, 1985, en González de Molina y Guzmán, 2006). Cada uno de los atributos se evaluaría mediante un conjunto de indicadores. Estos atributos son la productividad, la equidad, la autonomía, la resiliencia y la estabilidad (Conway, 1985, Reijntjes et al., 1992, Guzmán et al., 2000, en González de Molina y Guzmán, 2006). Otros autores contemplan un set de atributos ligeramente distinto. A continuación se muestra una breve descripción de cada uno de los atributos de sustentabilidad (adaptado de Guzmán et al., 2000, en Serrano, 2005):

- **Productividad:** Puede definirse como la habilidad de un agroecosistema para satisfacer las necesidades y servicios ambientales requeridos. Desde el enfoque convencional se mide mediante el rendimiento físico por unidad de superficie o por hora trabajada, y la relación entre gastos e ingresos (beneficios). Desde una perspectiva más holística su evaluación estaría más vinculada a un uso eficiente de los recursos disponibles, e incluiría, por tanto, también la dimensión energética, especialmente el indicador de Eficiencia de la Energía No Renovable. También, como la productividad a largo plazo depende de la fertilidad del suelo mediante el reciclaje de la materia orgánica, algunos autores han propuesto el cociente de la biomasa en pie (sin cosechar) entre la PPN como un indicador de productividad (Gliessmann, 2003)
- **Estabilidad:** está relacionada con la permanencia de la producción y los rendimientos a lo largo del tiempo, que deben mantenerse sin un aporte creciente de energía y nutrientes.
- **Resiliencia:** hace referencia a la capacidad del agroecosistema de volver a su estado normal ante a una perturbación grave que altere su equilibrio, como un evento climático severo.
- **Equidad:** la justicia social es otro rasgo característico de los agroecosistemas sustentables. El acceso al poder y a los propios recursos naturales debe estar distribuido que se cubran todas las necesidades básicas de todos los miembros de la organización social. Es destacable que la desigualdad social conlleva impactos ambientales, como el sobrepastoreo, deforestación, roturaciones abusivas, etc. derivados tanto del polo favorecido como del desfavorecido del sistema social desigualitario.
- **Autonomía:** se asocia al grado de integración de los agroecosistemas, que viene determinado por el flujo de materiales, energía e información entre sus componentes y el sistema en su conjunto, entre éstos y el medio y sobre todo con el grado de control que se tiene sobre dicho movimiento. En suma, la autonomía del sistema estaría vinculada al grado de internalización de los flujos en el mismo, esto es, la capacidad interna de suministrar los flujos necesarios para la producción.

Estas ideas de diferentes autores sobre las características que deben compartir los agroecosistemas sostenibles nos van a permitir dos tareas fundamentales en nuestro trabajo: por un lado nos ayudan a seleccionar los indicadores más adecuados a la hora de evaluar la sostenibilidad de un agroecosistema en concreto, como se detalla en el apartado 6 del trabajo. Por otro lado, nos permitirán tener un criterio previo para seleccionar las alternativas de manejo que vamos a estudiar como candidatas a mejorar la sustentabilidad del sistema.

Dados los objetivos que hemos planteado, es conveniente hacer un repaso al asunto de la tracción mecánica en la agricultura desde un punto de vista agroecológico. Para ello identificaremos los problemas asociados a la tracción en la agricultura moderna, examinaremos las vías ofrecidas por la agricultura tradicional, y apuntaremos posibles soluciones basándonos en lo aprendido.

2.3.3 LA TRACCIÓN MECÁNICA MODERNA Y TRADICIONAL

La energía de la tracción es la necesaria para mover la maquinaria agrícola, y se emplea en el caso de los cereales para labrar el terreno, sembrar, aplicar productos y cosechar. Uno de los rasgos básicos de la agricultura convencional es el laboreo intensivo. El suelo se ara de una forma total, profunda y regular (Gliessmann, 2002). Con ello se pretende romper su estructura del suelo para permitir un mejor drenaje, un crecimiento más rápido de las raíces, aireación y mayor facilidad para sembrar. También se pretende un control de las arvenses e incorporar residuos de cultivo. Habitualmente la labranza intensiva se combina con rotaciones cortas, de modo que el terreno queda desnudo durante gran parte del año y la maquinaria pesada realiza frecuentes pasadas. Estas prácticas generan dos consecuencias negativas que se retroalimentan positivamente: por un lado la maquinaria compacta el suelo, y por otro la menor cobertura vegetal provoca una disminución de la materia orgánica del suelo, cuya estructura se degrada, aumenta su erosión y se compacta aún más, forzando al empleo de más fertilizantes y maquinaria para

romper la compactación. La labranza intensiva, combinada con el monocultivo, las rotaciones cortas y también la irrigación, expone al suelo al efecto erosivo del viento y la lluvia. El suelo que se pierde de esta manera es la parte más rica en materia orgánica (Gliessmann, 2002). A la degradación del suelo habremos de sumar el uso intensivo de energía fósil que explicamos en el apartado 2.1.6, y sus problemas asociados de contaminación y dependencia de un recurso limitado.

Frente a este modelo, hemos de buscar alternativas encaminadas a lograr una mayor sostenibilidad. Para ello, es conveniente examinar el funcionamiento de los agroecosistemas tradicionales, que han demostrado a lo largo de siglos su perdurabilidad. Para el caso de los cultivos cerealistas en el sur de la península ibérica, podemos tomar como ejemplo la descripción que hacen Campos y Naredo (1980) de la rotación del tradicional cultivo al tercio practicado en el valle del Guadalquivir. Esta rotación de tres hojas (cereal-leguminosa-barbecho) era labrada con tracción animal, obteniéndose 23 kilocalorías por cada una invertida de fuera de la finca, y eso teniendo en cuenta que las yuntas presentan una eficiencia de la transformación del alimento en energía mecánica muy baja, de sólo 3,79 %, debido en parte a la fuerte estacionalidad de las labores en este sistema, que obligaban a mantener durante todo el año a animales que apenas iban a trabajar unas cuantas semanas. Esta alta eficiencia de la energía externa se logra mediante una alta proporción de reempleos: la semilla y la tracción animal. El ganado de labor utiliza la fracción de la producción agrícola no aprovechable directamente por los humanos -la paja de los cultivos- y una pequeña parte del grano, para proporcionar la energía mecánica y el fertilizante necesarios para el cultivo. De este modo se circularizan los flujos físicos dentro del sistema, y se aprovechan al máximo las posibles sinergias entre sus elementos.

Pero hay que tener en cuenta que esta internalización de los flujos conlleva un coste territorial: "En efecto, cuando en los Estados Unidos culminaba en 1918 en más de 25 millones el número de caballos y mulos, se estima que la cuarta parte del grano servía a la alimentación de los animales de fuerza. Asimismo, antes de que empezara a disminuir el ganado de labor después de la primera guerra mundial, Leach estima que en Inglaterra, cerca del 30% de la superficie agrícola se destinaba a su alimentación" (Naredo y Campos, 1980). En España en los años cincuenta todavía se debatía la conveniencia de la mecanización y de sus fuentes de energía. Así, una ponencia en el I Congreso Nacional de Ingenieros Agrónomos en 1950 se trataba el ganado de labor como la "fuente de energía clásica en la agricultura", y se clasificaban los motores en dos grupos: uno que depende de las importaciones de carburante (diésel y gasolina), y otro alimentado de recursos propios, que incluiría motores eléctricos y otros que funcionan con carbón, otros combustibles sólidos o gas obtenidos en las fincas (Naredo y Campos, 1980). En esa misma conferencia se estimaba en un 25% la superficie agrícola destinada en España a la alimentación de los animales de labor.

2.3.4 EL DILEMA DE LA ENERGÍA DE LA TRACCIÓN EN LA AGRICULTURA SOSTENIBLE

En el apartado 2.2.1 vimos que el combustible empleado en la tracción mecánica en la agricultura convencional y ecológica, el diésel, proviene de una fuente de energía no renovable y muy contaminante, cuyo uso se hace cada vez más desaconsejable y hasta peligroso, y desde luego incompatible con una agricultura sostenible. Pero, ¿cuáles son las alternativas? La mecanización de muchas labores, especialmente en los cereales, ha supuesto tal cambio en las condiciones de producción que sería difícil pensar en una vuelta al método tradicional de tracción animal. Y ello por varios motivos. La superficie requerida para su alimentación, la ausencia en el presente de cabaña de labor y de mano de obra suficiente en el campo, o la necesidad de un cambio completo de tecnología, que no permite utilizar el patrimonio actual, son algunos de los factores que nos llevan a dejar de lado esta opción en nuestras alternativas. En ellas, hemos preferido esquemas que permitan la utilización de la maquinaria ya existente en el sistema. En realidad, esta opción, aunque resulte paradójico, estaría más acorde con la racionalidad de la agricultura tradicional, siempre dispuesta a echar mano de los recursos más cercanos. La alternativa habría de estar, por tanto, en alguna de las tecnologías de captación de energías renovables desarrolladas en los últimos tiempos, que transforman la energía solar de manera más eficiente que los animales de labor. La energía solar fotovoltaica y térmica serían las mejores en este sentido, pero proporcionan energía eléctrica, que no puede ser utilizada por los tractores agrícolas. Sólo hemos encontrado un modelo de tractor de funcionamiento eléctrico (Heckertoh, 1999), diseñado por una organización de permacultura norteamericana, que además se autoabastece de energía mediante una placa solar fotovoltaica incorporada. De este modo el coste territorial de la captación de energía se elimina, debido a que la superficie de captación es móvil. Pero su potencia es de sólo 20 CV, lo que contrasta con los 110 CV de media de la maquinaria empleada en Orce. Esto podría conllevar problemas derivados de la demanda mucho mayor de mano de obra, además de la inversión en nueva maquinaria. Por estos motivos y por su escasa implantación -no existe, que sepamos, producción industrial de estos tractores-, hemos descartado esta opción en las alternativas a estudiar. Pero destacamos que su potencial de ahorro territorial y de recursos es mucho mayor que el de los biocombustibles, por lo que será una tecnología a cuya evolución conviene prestar atención.

Los biocombustibles, en cambio, aparecen como una solución mucho más inmediatamente realizable. Pero ya hemos comprobado el peligro social y ecológico que supone apostar por su producción a gran escala, y su alto coste territorial. En suma, el dilema entre las tecnologías disponibles para la tracción mecánica en la agricultura, diésel y biocombustibles, muestra que una agricultura sostenible debe pagar en su propio territorio los impactos que genera su consumo de energía. Como señala Muñiz (2008): "El modelo energético dominante se ha basado en la concentración y la abstracción. (...) Las energías renovables rompen con esta ocultación y le dan la vuelta: donde antes había una producción de pocas centrales potentes, con enormes impactos ambientales globales pero invisibles, aparecen ahora multitud de puntos de poca potencia con impactos locales, pequeños pero perceptibles; donde antes se daba una concentración territorial de la producción aparece ahora una dispersión territorial que se visualiza en multitud de aerogeneradores, placas solares, plantaciones, plantas de aprovechamiento de la biomasa, (...) Así, un modelo energético sostenible hace visible lo que estaba escondido y, por lo tanto, choca con una mentalidad en la que consumo de energía y preservación del entorno se plantean de manera abstracta, sin relación con nuestra manera de vivir y consumir." Esta reflexión se corresponde con la realizada respecto a la agricultura por Guzmán y González de Molina (2007) a raíz de su estudio sobre la evolución de la modernización de un agroecosistema andaluz (véase apartado 2.1.6): "Cuanto más biodiverso y dependiente de los flujos de energía renovables y de materiales reciclables es un agroecosistema más territorio consumirá. En esta medida, la agricultura ecológica debe "pagar" un coste que no paga la convencional, ya que difícilmente puede eludir las exigencias territoriales que exige la búsqueda de sustentabilidad".

La mera sustitución del vector energético utilizado, empero, no solucionará los problemas asociados al laboreo intensivo (excepto en lo que respecta a la energía) que comentamos en el primer párrafo del apartado anterior. Aquí tendría un papel relevante la agricultura ecológica y su capacidad de diseñar propuestas de manejo más sincrónicas con los ciclos naturales y, por tanto, más ahorradoras en energía. En esta tarea, debe enfrentarse a las alternativas propuestas desde la agricultura moderna, como la siembra directa basada en el uso masivo de herbicidas y cultivos transgénicos tolerantes a ellos. Esta técnica, encaminada a prevenir la erosión de unos suelos agotados por el modelo agrícola de la revolución verde, trae consigo un gran número de impactos en los agroecosistemas, tanto sobre sus componentes sociales como ecológicos, entre los que destacan la perturbación de las comunidades microbianas que degradan la materia orgánica en el suelo y la ponen a disposición de los vegetales (Boccardi y Boccardi, 2007), la contaminación genética debida al uso de transgénicos, o la intoxicación de los seres humanos expuestos a los pesticidas, que ya están disparando la tasa de cáncer en zonas rurales donde está extendido este sistema.

2.3.5 LA GANADERÍA MODERNA Y TRADICIONAL

La ganadería está muy vinculada al sistema cerealista en Orce, y representa un elemento central en una de las alternativas de mejora que hemos propuesto, la de la elaboración de biogás a partir de estiércol de oveja. Por ello, es conveniente hacer algunas reflexiones previas sobre lo que supone la ganadería desde un punto de vista energético y agroecológico.

En los sistemas agroalimentarios modernos la ganadería implica un enorme coste energético y de recursos. En la lógica común de la modernidad, los procesos se separan -como parcela la realidad la ciencia convencional- en una especialización cada vez mayor con el objeto de aumentar el rendimiento económico. Así, se separa la agricultura de la ganadería a través de la expansión en el uso de piensos concentrados, y las grandes instalaciones pecuarias sustituyen a las pequeñas. De esta forma se multiplican las distancias, y los ciclos que vimos que ocurrían en la integración ganadera de la agricultura tradicional ya no se cierran. El estiércol, que en el modelo tradicional suele constituir la base de la fertilidad del suelo, se convierte en el modelo moderno en un incómodo residuo de la ganadería industrial, demasiado pesado y voluminoso para ser transportado donde se necesita, que provoca la contaminación de los cuerpos de agua locales y cuya ausencia en el subsistema agrícola provoca, además, la necesidad de importar fertilizantes. Este modo de producción industrial de carne tiene también consecuencias a mayor escala. En la actualidad la ganadería constituye el motor de la importación de cereales y oleaginosas en España, siendo en gran parte responsable de la deuda ecológica debida a la soja que nuestro país tiene sobre todo con Brasil y Argentina (No Te Comas El Mundo., 2007).

Sin embargo, como en el caso de la energía de la tracción mecánica, donde en el modelo industrial se multiplican los conflictos asociados a la obtención de recursos y la generación de residuos, en el modelo tradicional esto era prevenido por su funcionamiento integrado a base de ciclos cerrados y potenciación de las sinergias. En efecto, el ganado aprovechaba los recursos que no podían ser directamente utilizados por los humanos, desde residuos de cosecha, compuestos de materiales lignocelulósicos que el sistema digestivo de los rumiantes puede asimilar, o residuos del propio hogar, mediante cerdos o gallinas, hasta los prados y recursos forestales, que complementan el uso agrícola de las zonas más fértiles. Además, la explotación ganadera de los bosques ha sido el medio tradicional de control de incendios forestales, que además de prevención de incendios proporcionaba carne, leche y lana. Esta tarea ahora, en una

economía parcelada, tiene que ser realizada mediante el uso intensivo de materiales y energía en forma de maquinaria pesada.

Asimismo, en el contexto actual, esta potenciación de las sinergias que vemos en el agroecosistema tradicional, puede ser aún mejor aprovechada mediante tecnologías que, como la biodigestión, permiten, a partir de un recurso muy rico en nutrientes y energía como el estiércol, obtener por un lado la fracción fertilizante (biofertilizante) y por otro la fracción energética (biogás). Esta energía puede reinvertirse en el sistema, incrementando su eficiencia en el uso de la energía del exterior.

3. BALANCE ENERGÉTICO DEL CEREAL DE SECANO ECOLÓGICO Y CONVENCIONAL EN EL MUNICIPIO DE ORCE

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGROECOSISTEMA

La comarca de Huéscar está situada en el borde nororiental de la cuenca del Guadiana Menor, en el apéndice norte de la provincia de Granada. El valle del río Guadiana Menor, que pertenece a la cuenca hidrográfica del Guadalquivir, constituye una depresión intramontañosa cuyo suave relieve contrasta con las abruptas sierras circundantes (Mágina, Harana, Huétor, Sierra Nevada, Baza, Estancias, María, La Sagra, Grillimona, Seca, Castril y Cazorla). El rasgo más importante del territorio es el aislamiento climático que ejercen las cadenas montañosas sobre la depresión, que se traduce en una cierta continentalidad y una carencia de precipitaciones (sombra de lluvias), lo cual origina un paisaje vegetal de escasa cobertura. La depresión sólo se comunica con el exterior mediante pocos pasillos naturales con los territorios manchegos (Topares) y murciano-almerienses (Chirivel, Almanzora) a través de los cuales se puede constatar el avance de los procesos de desertificación de los subdesiertos del sudeste peninsular. Los materiales geológicos predominantes pertenecen a la unidad tectónica del Neógeno-Cuaternario, que tienen como carácter común su naturaleza básica y poco consolidada (en algunos casos con una alta salinidad). A partir de ellos, se han originado suelos en general potentes y de carácter básico, sobre los que se llevan a cabo las labores agrícolas: cambisoles vérticos, cambisoles cálcicos, vertisoles crómicos, fluvisoles calcáricos y en menor medida suelos salinos (Salazar et al., 2001; Salazar et al., 2002). Los suelos dominantes en Orce pertenecerían, según la clasificación USDA 87, a los Grandes Grupos Xerochrept (Inceptisols), Haploxeralf (Alfisols) y Calciorthid (Aridisols) (SEISnet, 2009).

El macrobioclima de la cuenca del Guadiana Menor es mediterráneo, y más concretamente un bioclima mediterráneo xérico oceánico, cuyo nivel de precipitaciones corresponde a un ombrotipo semiárido (Salazar et al., 2002). Orce está situado a 925 metros sobre el nivel del mar, y a más de cien kilómetros de la costa más cercana. Las mesetas de la comarca superan habitualmente los 1.000 metros, lo que hace padecer a esta depresión unas duras inclemencias ambientales. La radiación solar es alta durante todo el año. La radiación media en la zona es de $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con una mínima en enero de $8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y máxima en junio con unos $26 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Vera, 2005). La temperatura media anual es de $14,7 \text{ °C}$. El verano es cálido y seco, con una temperatura media del mes más cálido de $20,05 \text{ °C}$, mientras que el periodo otoño-invierno es frío, con abundantes heladas y temperaturas del mes más frío de $7,02 \text{ °C}$. Las precipitaciones se producen principalmente en otoño, invierno y primavera, siendo de sólo 322,9 litros anuales por metro cuadrado en el municipio de Orce (ARGOS, 2008). Aquí podemos citar, para comparar, que la pluviometría media de la península es de 684 mm, mientras que la de la meseta es de 450 mm (MARM, 2008). También cabe señalar que en la misma comarca la pluviosidad media es muy variada, de manera que en las zonas más montañosas las lluvias son mucho más abundantes, llegando a los 1.500 mm. anuales en el pico de la Sagra, que es el más alto de las sierras subbéticas con 2.384 metros.

Dada su posición geográfica, esta cuenca recibe la influencia continental de la provincia Mediterráneo-Iberolevántina y la termicidad de la Murciano-Almeriense, lo que se traduce en una singular flora y vegetación. La vegetación climática predominante corresponde a la serie de los coscojares-lentiscares, siendo de gran interés por su abundancia los espartales y los romerales gipsícolas (Salazar et al., 2002). La escasa cobertura vegetal, el tipo de precipitaciones y las condiciones topográficas e hidrológicas de la cuenca condicionan que un 40% de los suelos presenten una erosión severa. Estos procesos erosivos se agravan con la roturación de matorrales y espartales autóctonos para la introducción de cultivos o repoblaciones poco acordes con el medio. El escaso éxito de ambas actividades en numerosas zonas provoca el abandono de terrenos, que quedan desprovistos de vegetación y con serias dificultades para regenerarlas por ellos mismos. Esto ha empobrecido el paisaje y la vegetación del territorio, favoreciendo la aparición de matorrales de escasa cobertura, como los tomillares halonitrófilos, que además no detienen los procesos de erosión (Salazar et al., 2001).

Durante la práctica totalidad del Plioceno y el Cuaternario, esto es, durante los últimos cinco millones de años de la historia geológica de la Tierra, esta cuenca ha sido endorreica, pues sus aguas quedaban

estancadas en un gran lago sin conexión física con el mar. Como respuesta al plegamiento generalizado de la cordillera, toda la cuenca se fue elevando hasta alcanzar una altura media de 1000 m sobre el nivel del mar, subsidiendo de manera paralela respecto a las serranías circundantes. En un momento geológico comparativamente reciente, hace sólo entre 100.000 y 17.000 años, las aguas del lago son capturadas por el río Guadalquivir, a través de su afluente el Guadiana Menor, pasando la cuenca a ser exorreica y verter sus aguas al mar, con lo que se produce su desecación y el desarrollo de una nueva red hidrográfica. Esta geología tan singular conforma actualmente un paisaje semidesértico único al norte del Mediterráneo, en el que resalta un llanura amplia y árida, que indica la antigua superficie de colmatación del lago (Palmqvist y Arribas, 2008).

A lo largo de la evolución de este extenso lago, se depositaron abundantes sedimentos con fósiles de los vertebrados que vivían en sus inmediaciones, los cuales permiten reconstruir con precisión la historia paleobiológica de la comarca. Los yacimientos de las dos pedanías de Orce, Venta Micena y Fuente Nueva, concentran la mayor densidad de fósiles de mamíferos cuaternarios de Eurasia. Además Orce posee otro aspecto singular, que tiene que ver con nuestros ancestros lejanos, pues en dos yacimientos parcialmente excavados de la comarca se han sacado a la luz conjuntos de utensilios líticos manufacturados por los homínidos hace más de un millón de años. Las evidencias de actividad antrópica aparecen asociadas a numerosos fósiles de megaherbívoros, como elefantes, hipopótamos y rinocerontes (Palmqvist y Arribas, 2008).

Más cercanos en el tiempo son los yacimientos del Cerro de la Virgen, un poblado fechado en 2000 a. C., donde se han encontrado tres fases de estratos del neolítico, seguidos de otros romanos, visigodos y árabes. Desde el siglo VIII Orce perteneció a la Kura de Tudmir. Su emplazamiento tuvo gran importancia, como prueba su aparición con el vocablo "Urs" -del que proviene "Orce"- en las crónicas. Este vocablo era utilizado por los musulmanes para designar un asentamiento humano con posesión de tierras otorgadas como premio a los combatientes en las contiendas. En el siglo XI se construyó su alcazaba, coincidiendo con la desmembración del Califato de Córdoba. En 1320 pasó al Califato de Granada, como vanguardia musulmana de esta ciudad. La entrega a Fernando el Católico se produjo en 1488. Villa ganadera por excelencia, Orce llegó a alcanzar, en 1752, una cabaña de 56.540 cabezas de lanar y cabrío, lo que suponía un producto bruto anual de 236.100 reales de vellón, convirtiéndolo en el pueblo más próspero de todo el ángulo nororiental del antiguo Reino de Granada. Después de la Guerra de Independencia, el desplazamiento de las lanas españolas en los mercados europeos a favor de las lanas sajonas, dan el golpe de gracia al esplendor y la opulencia económica de la Villa. El primer cuarto del siglo XX la población es numerosa (4.113 habitantes aproximadamente) y los recursos escasos. El hambre y la miseria hacen su aparición y una epidemia mortal de gripe diezma la villa en 1917. Ante esta situación se produce un movimiento de emigración a América. La situación socio-política se agrava tras la finalización de la Primera Guerra Mundial. La latente conflictividad y malestar quedan silenciados forzosamente con la proclamación de la Dictadura del General Primo de Rivera. La dictadura da paso a la República en 1931, y en 1936 comienza la guerra civil y Orce queda en zona republicana. Durante el conflicto se pierde parte de su patrimonio artístico-religioso. Cuando termina la guerra empieza una larga y gélida posguerra para los 4.144 habitantes que poblaban entonces la localidad. En 1945 se estrena el "Chircal Cinema", ficticia evasión a un mundo mejor y distinto. En el año 1950 Orce registra la cifra más alta de habitantes de toda su historia: 4500 (web Orce, 2008).

A partir de 1950, Orce empieza a despoblarse con la emigración a otras zonas de España y Europa. A principios de los setenta el agua corriente se instala en la localidad, y los electrodomésticos entran a formar parte de la vida doméstica. Comienza a percibirse la llamada era del bienestar. A partir de 1976, tras el fin de la dictadura, el trabajo temporal en la vendimia francesa se convierte en un pilar importante en la economía de muchas familias. Comienzan en Venta Micena las prospecciones paleontológicas, dando como resultado el descubrimiento en 1982 de un controvertido fragmento craneal humano que situaría al "Hombre de Orce" como el homínido más antiguo hallado hasta esta fecha en Europa. Uno de los momentos más importantes de este último cuarto de siglo ocurre en septiembre de 1995, con la celebración en esta localidad de un importante "Congreso Internacional de Paleontología Humana". Hoy, a la entrada del nuevo milenio con apenas 1500 habitantes, las expectativas de futuro se escriben en clave de desarrollo contra despoblación (web Orce, 2009).

En la actualidad, el municipio de Orce cuenta con 1.357 habitantes, de los cuales 1.318 habitan en el pueblo. El 29,77% de la población tiene más de 65 años. Las principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería. En la primera, el cereal de secano ocupa las mayores extensiones, mientras que en la segunda es la oveja segureña el producto estrella de toda la comarca.

Tabla 3.1 Número de explotaciones agrarias por tamaño de SAU (Ha) en Orce, 1999 y 1982

| | 0,1 - 5 | 5 - 10 | 10 - 20 | 20 - 50 | > 50 |
|-------------|---------|--------|---------|---------|------|
| 1999 | 58 | 28 | 36 | 49 | 101 |
| 1982 | 173 | 86 | 94 | 80 | 101 |

Fuente: SIMA (2008)

El número de explotaciones agrarias ha descendido notablemente desde 1982 hasta 1999, especialmente en las explotaciones más pequeñas. De hecho, la reducción es drástica en las menores de 20 hectáreas, cuyo número ha bajado en torno a un 60% durante el período, pero no tanto en las que tienen entre 20 y 50, y se ha mantenido en las que tienen más de 100 hectáreas. Este hecho puede estar asociado a la preponderancia de los cultivos herbáceos de secano en el municipio, cuyo aprovechamiento en régimen extensivo, en la condiciones de productividad agrícola que existen en la zona, dejan unos beneficios económicos por hectárea que pueden hacer inviables las explotaciones más pequeñas, aunque en muchos casos comprobamos que la actividad agrícola se realizaba a tiempo parcial.

Tabla 3.2 Distribución general de la tierra por aprovechamiento en la comarca de Huéscar, 2006 y 1995 (Ha)

| | Barbecho y otras tierras | Cultivos herbáceos | Cultivos leñosos | Pastizales | Monte maderable | Monte abierto | Monte leñoso | Erial a pastos | Espartizal | TI | SNA |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|------------|------|------|
| 2006 | | | | | | | | | | | |
| Castilléjar | 3622 | 2038 | 1029 | 0 | 948 | 1633 | 100 | 105 | 358 | 2742 | 20 |
| Castril | 1934 | 903 | 4912 | 6136 | 3121 | 52 | 5884 | 1221 | 13 | 43 | 271 |
| Galera | 2111 | 2816 | 692 | 200 | 255 | 0 | 568 | 2213 | 2048 | 155 | 272 |
| Huéscar | 7048 | 5769 | 2581 | 6974 | 14267 | 408 | 2451 | 2636 | 628 | 445 | 1461 |
| Orce | 7624 | 8365 | 998 | 2492 | 2868 | 756 | 3280 | 2598 | 2607 | 450 | 350 |
| Puebla de Don Fadrique | 13123 | 12766 | 2668 | 8553 | 7727 | 1603 | 1812 | 2539 | 670 | 55 | 149 |
| 1995 | | | | | | | | | | | |
| Castilléjar | 3437 | 3524 | 250 | 0 | 400 | 1660 | 100 | 105 | 283 | 2742 | 20 |
| Castril | 1261 | 2687 | 3931 | 6136 | 3167 | 52 | 5884 | 91 | 13 | 43 | 264 |
| Galera | 2379 | 3322 | 180 | 200 | 270 | 0 | 568 | 2394 | 2048 | 155 | 261 |
| Huéscar | 7304 | 8112 | 1744 | 6974 | 14275 | 406 | 2451 | 1483 | 1228 | 728 | 1421 |
| Orce | 10255 | 8697 | 632 | 2492 | 2868 | 798 | 3280 | 0 | 2607 | 450 | 350 |
| Puebla de Don Fadrique | 10821 | 17855 | 1610 | 8553 | 7731 | 1603 | 1812 | 640 | 1315 | 55 | 112 |

Notas: TI: Terreno improductivo; SNA: Superficie No Agrícola; La tabla no incluye la superficie de ríos y lagos
Fuente: SIMA (2008)

Podemos apreciar que la porción más grande de la superficie en la mayoría de los municipios de la comarca corresponde a los cultivos herbáceos, que incluirían también la superficie del barbecho. Existe una relación de aproximadamente 1:1 entre la superficie de éste y la de aquéllos que aparece en la tabla, lo que sugiere que la rotación más extendida es la de año y vez, en la que un año se siembra un cultivo herbáceo (normalmente cereal) y otro se deja en barbecho. Como veremos, los resultados de las entrevistas apoyarán esta suposición. Es remarkable que en algunos municipios de la comarca, entre los que se incluye Orce, se ha incrementado notablemente la superficie de erial a pastos en el período de 1996 a 2005, en detrimento de la superficie de cultivos herbáceos, lo que apunta a una tendencia al abandono de la actividad agrícola. También se ha incrementado en todos los municipios la superficie de cultivos leñosos, lo cual puede achacarse a la expansión de olivos y sobre todo almendros.

Tabla 3.3 Superficie destinada a cultivos herbáceos de secano en la comarca de Huéscar, 2006 (hectáreas)

| | Cultivo 1 | Ha 1 | Cultivo 2 | Ha 2 | Cultivo 3 | Ha 3 | Cultivo 4 | Ha 4 | Cultivo 5 | Ha 5 | Cultivo 6 | Ha 6 | Cultivo 7 | Ha 7 |
|-------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| Castilléjar | Cebada | 885 | Avena | 497 | Trigo | 163 | Veza | 57 | Lenteja | 10 | Yero | 10 | CF | 9 |
| Castril | Cebada | 502 | Avena | 107 | Trigo | 69 | Yero | 29 | Garbanzo | 25 | CF | 19 | Veza | 17 |
| Galera | Cebada | 963 | Avena | 826 | Trigo | 251 | Yero | 50 | CF | 42 | TE | 20 | CP | 14 |
| Huéscar | Cebada | 2.735 | Avena | 1.248 | Trigo | 252 | CF | 231 | Garbanzo | 25 | TE | 25 | Yero | 20 |
| Orce | Cebada | 4.113 | Avena | 1.991 | Trigo | 1.388 | CF | 310 | Yero | 42 | Garbanzo | 19 | Centeno | 11 |
| Puebla de Don Fadrique | Cebada | 6.168 | Avena | 1.554 | Trigo | 1.379 | CF | 239 | Yero | 50 | TE | 22 | Guisante | 18 |

Notas: CF: Cereales de invierno para forraje; TF: Tranquillón, Escaña y otros; VF: Veza para Forraje; CP: Otros Cereales de Primavera
Fuente: SIMA (2008)

En todos los municipios se da el mismo patrón en la distribución de la superficie dedicada a los cultivos más comunes, siendo la cebada el más abundante, seguido de la avena y del trigo. Esta misma distribución es la que hemos hallado en las entrevistas realizadas, en las que estos tres son los únicos cultivos que han aparecido. Los demás cultivos que aparecen en la tabla son mucho más minoritarios, e incluyen en primer lugar los cereales de invierno para forraje -que son las mismas especies anteriores pero cosechadas antes de su madurez-, seguidos de los yeros -una leguminosa utilizada principalmente también como forraje-, garbanzos, centeno y guisantes secos. Una pequeña parte de la superficie aparece en la base de datos como "Tranquillón, escaña y otros". El tranquillón es un cruce de cebada y centeno, y la escaña es una especie de trigo primitiva, pero no sabemos cuáles en concreto se cultivan en la comarca.

3.2 METODOLOGÍA

3.2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA

3.2.1.1 ENTREVISTAS

Se han realizado entrevistas abiertas semiestructuradas. El modelo utilizado de adjunta en el Anexo I. El diseño de la entrevista se adaptó a partir de CIFAED (2008), estudio en el que se habían caracterizado casos de explotaciones de cultivos herbáceos en toda Andalucía. Como los insumos y productos energéticos considerados en el presente trabajo corresponden a los que tienen un coste de oportunidad en sentido económico, la adaptación fue relativamente sencilla, y el cuestionario de partida sufrió pocas modificaciones.

Para la selección de agricultores a entrevistar se acudió a las listas de productores ecológicos existentes en la web de la Dirección General de Producción Ecológica (DGPE) de la Junta de Andalucía. De este modo se pudo localizar un limitado número de productores, todos ecológicos o en transición, ya que no existe un registro de acceso público para agricultores convencionales. Para localizar al resto, se recurrió a la técnica conocida como de "la bola de nieve" (Vallés, 1999, en Ottmann, 2005:89), es decir, se acudió a los mismos productores entrevistados, que fueron mencionando a vecinos, conocidos o amigos tanto convencionales como ecológicos, hasta lograr un número mínimo de entrevistados en cada categoría de manejo estudiada. No obstante, en la práctica la técnica no fue completamente exitosa, siendo finalmente necesario recurrir a la búsqueda directa de agricultores en plazas, mercadillos y bares de Orce. Especialmente difícil fue la localización de agricultores convencionales, pues, como se verá, las condiciones en este municipio han propiciado una transición masiva hacia la agricultura ecológica, de manera que quedan pocos agricultores que sigan practicando un manejo convencional.

El número mínimo representativo de entrevistados se estableció en cuatro productores para cada categoría, de forma que finalmente se realizaron 3 encuestas a agricultores ecológicos, 5 en transición y 4 convencionales. Las encuestas realizadas se completaron con 2 encuestas a agricultores ecológicos de Orce presentes en el citado estudio del CIFAED (2008). Como requisito para realizar la entrevista, debían trabajar ellos mismos el cultivo de cereal, fueran o no titulares de la explotación. Esta explotación, además, había de estar dentro del término municipal de Orce, para asegurarnos de que las características

agronómicas fueran similares en todos los casos estudiados. Las entrevistas se realizaron personalmente. La entrevista directa o personal tiene una serie de ventajas e inconvenientes (Serrano, 2005):

- **Ventajas:** se sabe con seguridad quién contesta; se obtiene un elevado número de respuestas; se tiene la oportunidad de explicar al entrevistado cualquier duda que le surgiera tanto referente a la entrevista en sí, como a la razón de realizar dicha entrevista; se evita que el entrevistado se vea influido por terceras personas.
- **Inconvenientes:** cuando el número de preguntas que contiene es muy largo, cumplimentar el cuestionario se hace lento, pudiendo el entrevistado cansarse de responder a tantas preguntas; dependencia del horario laboral del entrevistado, con lo cual habrá ocasiones en que se tenga que cancelar la entrevista, o se tenga que cambiar el lugar y la hora, traduciéndose todo en mayores costes (de llamadas, de desplazamientos, de tiempo, etc.).

A estos inconvenientes se suma el mayor o menor grado de subjetividad en los datos recopilados, debido a que éstos no han sido obtenidos experimentalmente sino que dependen de la precisión de la memoria y percepción de los entrevistados. Este problema se vería compensado por la ventaja de obtener información directa sobre el funcionamiento real del agroecosistema, que no puede ser obtenida a través de experimentos aislados de esa realidad.

3.2.1.2 ESCENARIOS Oa Y Ob: DESCRIPCIÓN Y ESQUEMA GENERAL DEL MANEJO ECOLÓGICO

Se ha considerado que el manejo es el mismo en los agricultores en transición que en los agricultores ecológicos, ya que la única diferencia entre ambos es el número de años que lleven haciendo un manejo ecológico. Como se apuntó en el apartado anterior, se han estudiado 5 fincas ecológicas y 5 en transición. Uno de los agricultores "en transición", en realidad, no lo estaba oficialmente, es decir, no estaba tramitando la certificación, pero se ha decidido su inclusión por llevar tres años sin utilizar ningún producto químico de síntesis.

El tamaño de las fincas va de las 22 a las 520 hectáreas. La cebada y la avena son los cultivos mayoritarios. En algunos casos también cultivan trigo duro, cuya superficie suele ser menor. La rotación más extendida es la de año y vez, de manera que cada año se cultiva aproximadamente la mitad de la superficie, y la otra mitad se deja en barbecho. Además, procuran no sembrar nunca un cultivo en el mismo sitio dos veces seguidas. Algunos agricultores dejan en barbecho una superficie algo menor a la mitad, hasta el 33% como mínimo. En estos casos, normalmente la cebada y el trigo siguen siempre al barbecho, mientras que la avena puede seguir al barbecho o a uno de los otros dos cultivos.

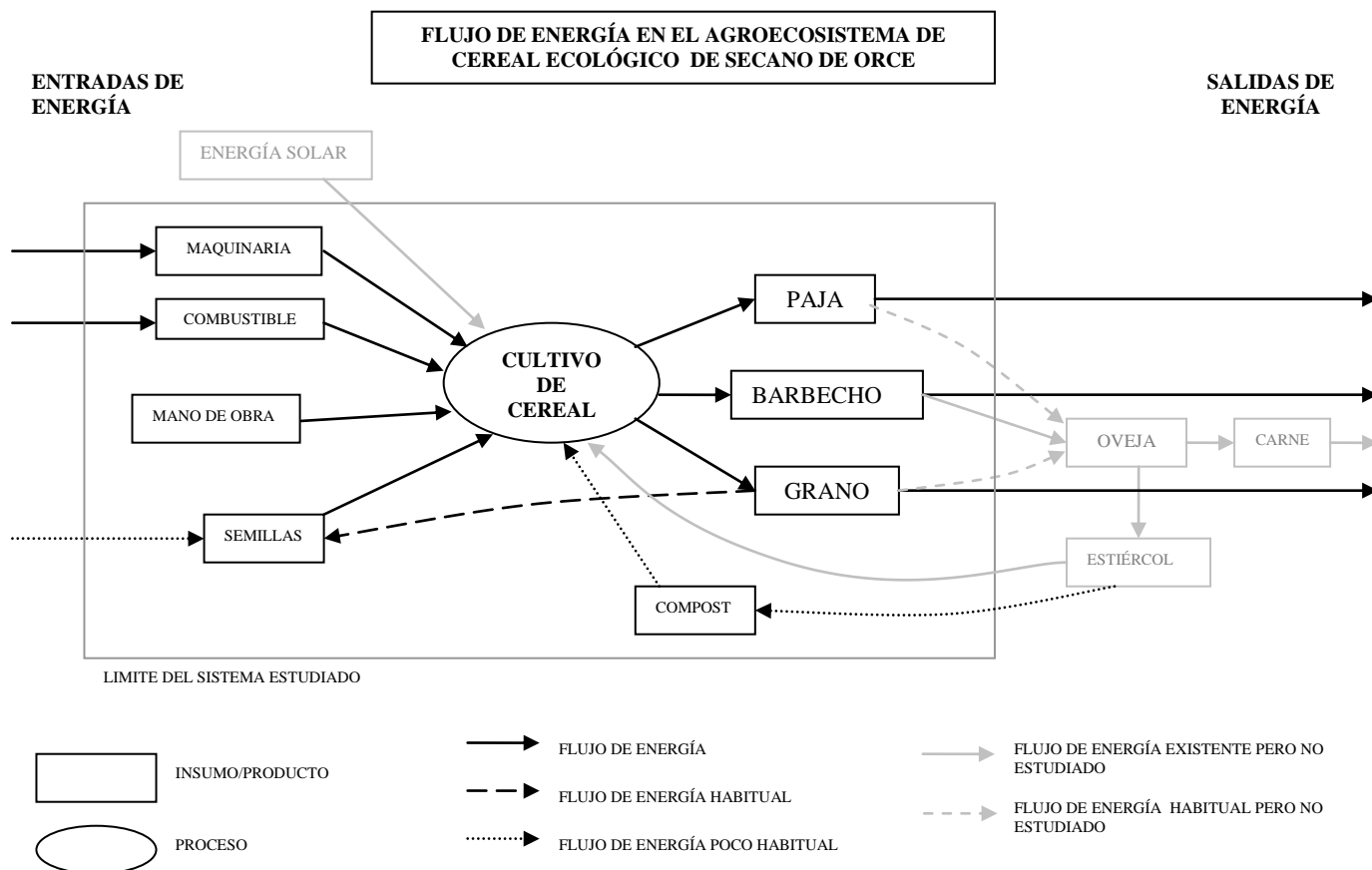
Todos los agricultores entrevistados emplean cebada Albacete, con dosis de siembra entre los 100 y los 160 kg/ha. Las variedades de avena utilizadas son Araceli, Caleche, Mojácar, Blanca, Roja, Previsión, Rubia, y del País. Las dosis de semilla de avena están entre los 100 y los 150 kg/ha. En cuanto al trigo, la variedad más habitual es Alfaro, aunque también aparece Peñafiel. Las dosis de siembra son algo mayores en el trigo que en los otros dos cultivos, entre los 130 y 190 kg/ha. En cuanto al origen de las semillas, en la mayoría de los casos estudiados utilizan semilla propia, excepto un agricultor que la compra certificada. Algunos agricultores llevan el grano que han guardado como semilla a tratarlo con oxiclورو de cobre, para la prevención de enfermedades fúngicas.

El manejo es el mismo para todos los cultivos, así como los rendimientos medios. No se aplica fertilización exógena, excepto los dos agricultores que utilizan el estiércol de sus propias ovejas. Después de la cosecha a principios de verano, los rastrojos son aprovechados por ovejas. La primera labor no se realiza hasta febrero-mayo, cuando se le da un pase de vertedera. En mayo-julio se dan uno o más pases de cultivador o grada de disco, para eliminar las malas hierbas que hayan salido durante la primavera. En septiembre, si han salido muchos *manca perros* (*Salsola kali* L.) durante el verano, algunos agricultores dan otro pase de cultivador. Estas plantas pertenecen a la subfamilia quenopodiáceas, y son de ciclo anual, de aspecto globoso, hasta 60 cm. de altura y florecen en verano. Tras florecer se secan y sus tallos se curvan hasta tomar una forma casi esférica. Habita terrenos arenosos o salinos de todo el mundo. Es considerada como plaga en lugares tan distantes como Canadá, Australia o Argentina, y un icono para el oeste norteamericano. Tradicionalmente se ha utilizado para la elaboración de jabones y vidrio por su alta alcalinidad y contenido en potasio (Wikipedia, 2009). Debido a su alto contenido en ácido oxálico, son tóxicas para el ganado, y de ahí probablemente su amplia presencia en la zona. Su dureza, abundancia y tamaño hacen que llegue a resultar muy molesta para la realización de las labores agrícolas, y algunos agricultores comentaban que a veces las quitaban a mano (esta labor no se ha contabilizado, por ser esporádica).

El último pase de cultivador se da en octubre, para preparar el terreno para la siembra. Esta se realiza tras las primeras lluvias, entre octubre y diciembre. Suelen emplear para esta labor sembradora a chorrillo, aunque en algunos casos lo hacen con abonadora centrífuga. Una vez sembrado, algunos

agricultores dan un pase de rulo para enterrar las piedras y apelmazar el suelo alrededor de la semilla. Ésta es la última labor hasta la cosecha, en julio. La recolección se realiza con cosechadora acompañada de un tractor con remolque, para llevarse el grano. Si la producción de paja ha sido suficiente, después de la cosecha llevan a cabo su empacado y recogida. En algunos casos esta tarea la realizan ellos mismos, con ayuda de uno o dos peones, y en otros llegan a una acuerdo con alguien que lo hace. Todos los agricultores entrevistados emplean maquinaria propia, excepto la cosechadora que suele ser alquilada.

A continuación se muestra un diagrama con los principales flujos energéticos presentes en el manejo ecológico del cereal (Escenarios 0a y 0b).

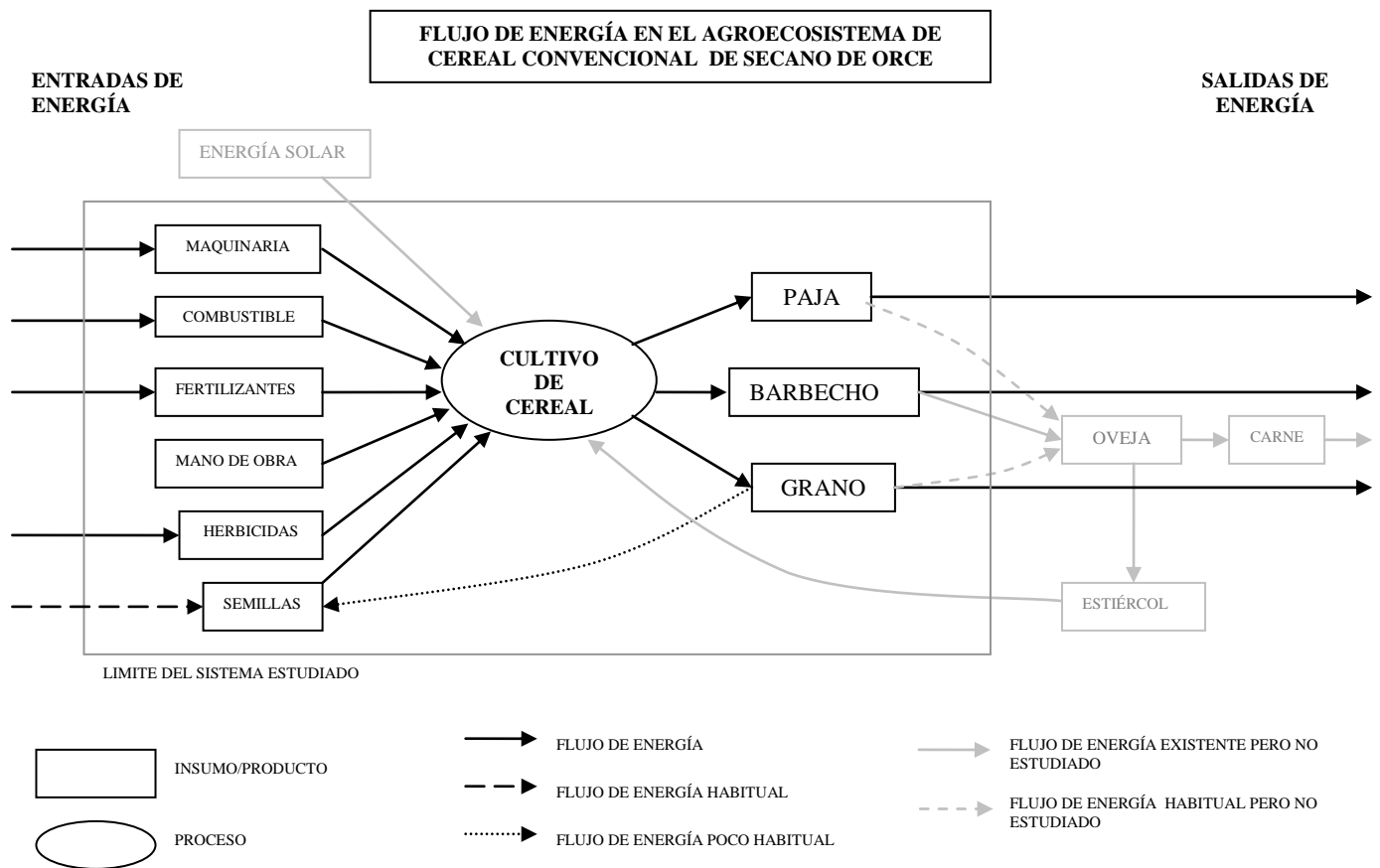


3.2.1.3 ESCENARIO 0c: DESCRIPCIÓN Y ESQUEMA GENERAL DEL MANEJO CONVENCIONAL

El manejo convencional es muy parecido al manejo ecológico en cuanto a la disposición espaciotemporal de los cultivos. Se estudiaron 4 casos, con fincas de entre 50 y 150 hectáreas. Todos los agricultores convencionales realizan una rotación de año y vez, dejando la mitad de la superficie en barbecho y cultivando la otra mitad. Los cultivos empleados son la cebada y la avena. La cebada es caballar de la variedad Albacete, con dosis de siembra de 120-150 kg/ha. La avena es Caleche o Roja, de nuevo con dosis de 120-150 kg/ha.

El manejo y los rendimientos son similares en ambos cultivos. Las ovejas aprovechan el rastrojo hasta noviembre-abril en que se da el primer pase con el arado de vertedera. En primavera se da un pase de cultivador, y otro en octubre antes de abonar. Después de este pase, realizan el abonado de fondo, aplicando entre 80 y 200 kg/ha de NPK 15-15-15. A continuación viene la siembra, de nuevo con las primeras lluvias, alrededor de noviembre. Tras la siembra, realizan un pase de rulo. En primavera, si llueve, dos de los agricultores aplican un abonado de cobertera, en un caso 70 kg/ha de nitrato amónico (NPK 33,5), y en el otro 100 kg/ha de NPK 15-15-15. En cuanto a los herbicidas, sólo dos de los entrevistados afirman utilizarlos, como post-emergencia. Ambos aplican 2 litros/ha de Basagran (Bentazona 40% + MCPA 6%), pero uno sólo lo emplea aproximadamente 1/4 de los años. Ninguno de los agricultores convencionales utiliza otro tipo de pesticidas, excepto el oxiclورو de cobre con que viene tratada la semilla. La cosecha se realiza en julio, y le sigue el empacado y recogida de la paja, cuando merece la pena.

A continuación se muestra el diagrama correspondiente al manejo convencional (Escenario 0c)



3.2.2 SELECCIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL

La mayoría de balances energéticos de agrocombustibles pertenecen a estudios de ACV cuya unidad funcional se presenta como MJ/km recorrido, o gr CO₂/km recorrido (por ejemplo, Lechón et al., 2005; 2006). Esta unidad funcional responde a los objetivos de tales estudios, en los que se trata de comparar las emisiones de los combustibles fósiles con las de los alternativos. Pero está vinculada al uso del producto como carburante en el transporte individual motorizado, ya que los "kilómetros recorridos" se calculan a partir del gasto de combustible de automóviles modelo. Por tanto, esa unidad no es aplicable en este trabajo. Mirando otros estudios con objetivos más próximos al nuestro, vemos que en su trabajo anteriormente reseñado –también un estudio de ACV- Friedriksson et al. (2006) toman como unidad funcional la cantidad de combustible que satisfaría las necesidades de combustible del cultivo durante un año de mil hectáreas en una rotación de siete años. La razón por la que eligen este tamaño tan grande de finca es que se corresponde aproximadamente con el tamaño mínimo requerido para el funcionamiento de las plantas de elaboración de combustible. En nuestro caso es posible que ese tamaño mínimo sea similar, pues si bien la productividad es bastante menor, también es más corta la rotación (dos años frente a siete), lo que incrementa el número de cosechas.

Pero hemos preferido definir una unidad funcional de una hectárea cultivada durante los dos años de rotación (cereal-barbecho), por varios motivos: en primer lugar, no existen fincas tan grandes en Orce (al menos en la muestra que hemos recogido), por lo que en cualquier caso la producción de biocombustibles tendría que ser en forma de cooperativas que permitan asociarse a varios agricultores. Por otro lado, nos parece que mostrar los resultados en hectáreas (como la producción en kilogramos por hectárea) resulta más fácil de interpretar. La selección del ciclo bienal como unidad temporal, en lugar del año, es debida a que, como se ha comentado, la rotación más ampliamente extendida es el cultivo de año y vez, en el que de un año a otro el barbecho se alterna con cultivo de cereal y, por tanto, la cosecha en una misma hectárea de terreno se realiza cada dos años. Aquí hay que aclarar que en los casos en que la rotación no es estrictamente de año y vez la energía relacionada con los insumos y la producción se ha multiplicado por el factor correspondiente. Por ejemplo, si cultivan un 60% de la superficie (en lugar del 50%), la producción de grano ajustada a la unidad funcional se obtendría de multiplicar el rendimiento de

grano (en kilogramos por hectárea y cosecha) por 0,6 (hectáreas cosechadas/hectáreas totales) por 2 (años en un ciclo bienal).

Nuestra unidad funcional, por tanto, sería una hectárea por ciclo bienal. Esta misma unidad se aplicará a todos los escenarios estudiados. Ejemplos de las unidades empleadas en los indicadores sería $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ciclo bienal}^{-1}$ o $\text{kg cereal} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ciclo bienal}^{-1}$.

3.2.3 PARÁMETROS ESTUDIADOS

3.2.3.1 ENTRADAS DE ENERGÍA

Se han distinguido varios tipos de entradas energéticas, que nos permiten calcular distintos indicadores. Al conjunto total de entradas se le denomina **consumo energético bruto (CB)**, e incluye la energía importada en forma de insumos, más la mano de obra, más los reempleos. El valor de estos **reempleos** también ha sido incluido en los resultados. La suma de la energía importada más la mano de obra es el **consumo energético neto (CN)**. Este consumo ha sido representado en todos los escenarios estudiados, mediante tablas en las que se distingue la naturaleza de los distintos insumos. Por último, dentro de la energía importada existe una parte –que en nuestro caso es mayoritaria- de origen no renovable, que ha sido cuantificada como **consumo de energía no renovable (ENR)**. Para el cálculo de la energía no renovable hay que saber el porcentaje de renovables en los medios de producción. Según el MARM (2008), la energía renovable alcanzó en 2005 el 6% del total de energía primaria consumido en España. Por tanto, para calcular el consumo de energía no renovable, hemos multiplicado el consumo de energía primaria correspondiente a la manufactura de los insumos por un factor de 0,94. Se ha excluido del cálculo la energía inherente de las semillas, el cual es completamente renovable, pero sí se ha incluido el coste de producción de las mismas, al cual se ha aplicado el mismo factor que al resto.

3.2.3.2 SALIDAS DE ENERGÍA

La **producción primaria neta (PPN)** del agroecosistema ha sido calculada, e incluiría toda la producción de grano y paja de cereal, la biomasa del barbecho, y el grano y la paja de cardo. De esta producción, una parte es reutilizada en el sistema (reempleos) y otra es exportada (en algunos casos previa transformación), ya sea a través de productos comercializados, o a través de la extracción que se produce durante el pastoreo de las rastrojeras. Esta producción exportada es la **producción neta (PN)**, de la que también se muestra la importancia relativa de cada producto. Finalmente, se ha calculado la **producción de grano (PG)**, que es el producto principal del agroecosistema (no tanto por su valor energético, cuantitativamente hablando, sino económico).

3.2.3.3 BALANCES ENERGÉTICOS

A partir de los indicadores de producción y consumo se han calculado una serie de índices que los relacionan. Hay que aclarar que estos índices son adimensionales, por lo que en ellos no se aplica la unidad funcional, así que pueden ser comparados sin problemas con otros estudios que usan otras unidades. En primer lugar tenemos la **eficiencia energética bruta (EEB)**, que se obtiene de dividir la PPN por el CB. Este es un indicador muy grosero de la eficiencia del sistema, porque incluye los procesos internos que se dan en el sistema. El siguiente índice es muy importante, la **eficiencia energética neta (EEN)**, que nos dice cuánta energía se exporta por cada unidad de energía invertida en forma de mano de obra e importaciones (PN/CN). Este indicador es el que más se aproximaría a la TRE que hemos explicado en el marco teórico. Se han calculado tres índices distintos relacionados con la energía no renovable. La **eficiencia de la energía no renovable (EENR)** nos indica cuánta energía exporta el sistema por cada unidad de ENR que introducimos (PN/ENR). El segundo es la **eficiencia de la energía no renovable en relación a la producción de grano (EENRG)**, que nos da una idea de cuánta energía en forma de grano obtenemos por cada unidad de ENR introducida (PG/ENR), obviando el resto de salidas energéticas. Por último tenemos la **intensidad energética del grano (IE)**, en el que de nuevo se obvian el resto de salidas para estimar cuánta ENR se ha invertido por cada kilogramo de grano obtenido. Además de estos indicadores de eficiencia, hemos calculado dos parámetros más, que nos ayudan a completar la imagen que obtenemos del funcionamiento del agroecosistema. El primero es el **grado de autonomía (GA)**, que representa el porcentaje del total de energía utilizada que viene del exterior ($100 \cdot \text{importaciones} / \text{CN}$). El segundo es la **capacidad de carga ganadera ovina (CCG)** estimada para la producción exportada, que nos ha parecido conveniente incluir dado que el agroecosistema cerealista está muy vinculado al ganadero, por lo que en ocasiones puede tener más importancia la cantidad de ovejas que pueden mantenerse con una hectárea que la producción de energía. El procedimiento de cálculo se explica en el apartado 4.4.4.1.

3.2.4 ENERGÍA CONTENIDA EN LOS INSUMOS Y PRODUCTOS

A continuación se detalla la metodología empleada para la asignación de un valor energético a los insumos y productos empleados en el cultivo de cereal. Hay que aclarar que no se ha incluido la energía relacionada con el **transporte** de los insumos ni el de los productos fuera de la finca, a pesar de reconocer que de este modo se estaría favoreciendo de alguna manera a los insumos transportados de más lejos frente a los producidos localmente. Lo hemos hecho así debido principalmente a dos razones. En primer lugar, hemos encontrado problemas metodológicos, ya que no conocemos la procedencia de varios de los insumos empleados, así que cualquier intento de estimación habría de tener un fuerte componente de arbitrariedad. Por tanto, y para que los datos sean coherentes, se ha optado por eliminar el factor transporte de todos los insumos y productos. El segundo motivo tiene que ver también con la coherencia de los datos, esta vez en relación a la literatura publicada sobre el tema, en la que en raras ocasiones se contabiliza el transporte de los insumos hasta pie de finca, por lo que es conveniente proceder de la misma forma para obtener unos resultados comparables.

Tampoco se ha incluido la energía de las **construcciones e infraestructuras**, por motivos parecidos. La mayoría de autores revisados no cuentan las construcciones necesarias para la realización de la actividad agrícola. Según Bernesson (2004), la energía correspondiente a edificios e infraestructuras en biocombustibles producidos en sistemas autosuficientes representa entre unas décimas y un dos por ciento de la energía total consumida. Tampoco representarían una porción muy significativa en la ganadería: Pellizi (1992) calcula que la energía de las construcciones supone apenas un 1-2% del consumo energético en la ganadería ovina de carne extensiva. Estos bajos porcentajes relativos de energía, unido a la dificultad de calcular la energía correspondiente a construcciones de las que no se conocen bien sus características, nos lleva a ser cautelosos y no incluirlas en el análisis.

3.2.4.1 ENERGÍA DE LA TRACCIÓN MECÁNICA

La tracción mecánica es el trabajo realizado por la maquinaria en las labores agrícolas. Este factor representa una porción muy importante del gasto energético en la agricultura española, como vimos en el marco teórico (apartado 2.1.6, figura 2.2). Esta importancia es más acusada en el cultivo en el cultivo de secano en los ambientes semiáridos peninsulares bajo manejo ecológico (Lacasta y Meco, 2000; Meco y Lacasta, 2006; Lacasta et al., 2008; CIFAED, 2008), ya que la ausencia de gasto en fertilizantes inorgánicos elimina otro factor dominante en el consumo energético agrícola. El tercer factor que genera un gasto energético importante en la agricultura mediterránea, el riego, aquí no existe por tratarse de secano. La energía consumida en la tracción mecánica corresponde al gasto energético de fabricación y mantenimiento la maquinaria más el del combustible utilizado.

3.2.4.1.1 ENERGÍA DE LA MAQUINARIA

Los requerimientos de energía de cada máquina se calculan multiplicando su peso por el coste energético asociado a cada kilogramo. Este se debe a tres factores: producción de materias primas, fabricación, y reparación y mantenimiento. De acuerdo con estos aspectos, y siguiendo a Audsley et al. (1997), la maquinaria usada en Orce puede clasificarse en dos grupos: autopropulsada (tractores y cosechadoras) y aperos. La energía asociada a cada factor puede verse en tabla 3.4. En ella el coste de las materias primas y el de fabricación se presenta en MJ/kg, y la de reparación y mantenimiento como porcentaje de la suma de las anteriores. Para la maquinaria autopropulsada habría que añadir un cuarto aspecto, el más importante cuantitativamente, la energía del combustible, que se considerará aparte.

Tabla 3.4 Requerimientos energéticos de la maquinaria

| Maquinaria | Materias primas (MJ/kg) | Fabricación (MJ/kg) | Reparación y mantenimiento (%) |
|----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Autopropulsada | 49,2 | 14,6 | 49 |
| Aperos | 62,5 | 8,6 | 30 |

Fuente: Audsley et al., 1997

Si dividimos la energía de la maquinaria (E) por las horas de vida útil (VU), obtenemos el coste energético horario de la maquinaria (CETH). Las horas de vida útil se han consultado en catálogos de las casas comerciales. Finalmente, la energía gastada por hectárea en la maquinaria se calcula multiplicando el coste energético horario de cada tipo de maquinaria por el número de horas (H) que se ha usado. La energía asociada a los distintos tipos de maquinaria autopropulsada y aperos presentes en el sistema puede consultarse en el Anexo II. Los cálculos que hemos descrito se pueden resumir en las siguientes expresiones:

$$M = GH * H$$

$$CETH = E / VU$$

$$E = P * (MP + F + ((MP + F) * RM / 100)) ; \quad \text{donde:}$$

M (MJ/ha): Coste energético bienal por hectárea de la maquinaria.

H (horas): Horas de uso de la maquinaria por ciclo bienal.

CETH (MJ/h): Coste energético total horario de la maquinaria.

E (MJ): Energía contenida en la maquinaria.

VU (h): Horas de vida útil de la maquinaria.

P (kg): Peso de la maquinaria.

MP (MJ/kg): Energía contenida en las materias primas.

F (MJ/kg): Energía correspondiente a la fabricación de la maquinaria.

RM (%): Energía de la reparación y el mantenimiento.

(Reelaborado a partir de Audsley et al., 1997 y Alonso, 2008)

Se observó que existían muchas diferencias entre los agricultores en el tiempo empleado en cada labor, que además no se correspondían muy bien con la potencia de los tractores. Debido al pequeño tamaño de la muestra, esas diferencias podían ser determinantes en el consumo final. Asumimos que son debidas a factores independientes de que el manejo sea ecológico o convencional (estos factores se comentarán más adelante en el apartado del combustible). Por tanto, podían enmascarar las diferencias debidas al manejo entre agricultores convencionales y ecológicos, que es lo que tratamos de estudiar. Se buscó, pues, una forma de eliminar ruido que facilitara la comparación de datos con muestras tan pequeñas.

Finalmente se ha optado por calcular la media del consumo energético de cada labor de todos los agricultores. A partir de estos valores energéticos medios se recalcula la energía total que gasta cada agricultor, dependiendo ahora su consumo final ya sólo de la naturaleza y número de labores que realiza, no de cuánto tiempo tarde o de la potencia de su tractor. Los resultados de estos cálculos se muestran en el apartado 3.3.1.

Ha sido muy difícil obtener información sobre la tarea de recogida de la paja. Esta tarea suele realizarse con tractor y empacadora, que va dejando las alpacas en el campo para después ser recogidas por unas tres personas con tractor, pala y remolque. Muchos agricultores contrataban a otras personas para realizar esta tarea, por lo que no poseían información directa. También muchos señalaron la alta variación que había en esta tarea de un año a otro, porque muchos años no se recogía porque era tan poca que no resultaba rentable. Pero todos, ecológicos y convencionales, confirmaron que siempre que había suficiente, se recogía. Por tanto, para calcular la energía de la recogida de la paja se han tenido que hacer algunas suposiciones. Hemos asumido que se recoge una vez cada 3 cosechas (cada 3 ciclos bienales cereal-barbecho). La energía asignada a la tarea de recolección de la paja será la misma para todos los agricultores y corresponderá a un tercio de la media de la energía gastada por los agricultores que ofrecen datos.

3.2.4.1.2 ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE

El gasto de combustible representa en estos agroecosistemas de mínimos insumos una parte muy importante del consumo energético total. Además, bajo manejo ecológico, el combustible es la única entrada de energía fósil que puede ser sustituida por otra de origen propio y renovable. Por ese motivo examinaremos más detenidamente la energía relacionada con este insumo.

La energía gastada en forma de combustible se halla multiplicando el número de litros empleados por el valor energético del carburante. A su vez, el número de litros en un ciclo de cultivo se calcula a partir del gasto horario de combustible de cada maquinaria, multiplicado por el número de horas que se ha usado.

- **GASTO HORARIO DE COMBUSTIBLE**

El consumo de combustible es difícil de obtener directamente a partir de la información que proveen los agricultores (Pervanchon, 2002). Este consumo puede depender de muy diversos factores, como el porcentaje de carga, estado del terreno, tecnología, potencia y estado de mantenimiento de la máquina, condiciones meteorológicas, condición del conductor, etc. (Gil, 1992). Además de estos factores, el consumo de gasoil registrado en una operación agrícola puede variar por encima de un 30% según se tengan en consideración los siguientes aspectos (IDAE, 2005): régimen del motor y relación de cambio (18-20%), adecuación y mantenimiento de los aperos (5-10%), neumáticos, doble tracción y bloqueo diferencial (5-10%), reducir el patinamiento (5%), mantenimiento del motor (5-10%).

El elevado número de variables implicadas, y la imposibilidad de obtener información empírica sobre la mayoría de ellas, obligan a recurrir a aproximaciones simplificadas. Algunos ejemplos en este sentido son

las aproximaciones de Jahns et al (1987), Gil (1992) o Donaldson et al. (1994). Esta necesaria simplificación parece ser la causa de la notable diferencia de los valores de consumo de combustible por labor obtenidos con otros estudios revisados (ver apartado 3.3.1). En este trabajo, siguiendo a Alonso (2008), se ha seguido la metodología propuesta por Gil (1992) para el cálculo del gasto en combustible de la maquinaria pesada autopropulsada. En ella el consumo aparece básicamente como función de la potencia del tractor y de valores estimados de la carga.

$Cc = 0,35 * P * R$; donde:

Cc (l/h) es el consumo de combustible en litros por hora.

0,35 (litros/Kwh) se utiliza cuando se considera que el tractor va trabajando con una carga media, con condiciones de suelo medias, y teniendo en cuenta una densidad de gasoil de 0,845 l/kg. Hay que señalar que cada tarea requiere una potencia media diferente, tal y como señalan las tablas en Gil (1992), pero debido a la complejidad que esto acarrearía, hemos adoptado un valor medio de trabajo, correspondiente al coeficiente de 0,35.

P (Kw) es la potencia del tractor.

R (tanto por 1) es el porcentaje de carga, que en nuestro caso hemos considerado un 75% para los tractores.

• VALOR ENERGÉTICO DEL COMBUSTIBLE

El valor energético de los carburantes es igual a la suma del gasto energético de su elaboración industrial más el contenido energético (energía inherente) del propio carburante (Naredo y Campos, 1980). Algunos autores consideran solamente la energía inherente, es decir, el valor en MJ/kg de la energía que se libera cuando lo quemamos. Pero si observamos que ese carburante ha necesitado de un largo y costoso proceso desde que el yacimiento de petróleo es descubierto hasta que el gasóleo sale del surtidor y llena el tanque del tractor, habremos de sumar a esa energía inherente el coste energético del refino del diésel, y de la extracción y distribución del crudo del que proviene. Asimismo, existiría todo un espectro entre ambas opciones dependiendo de qué eslabones de la cadena queramos o podamos tener en cuenta. También se podría ir aún más allá: al percatarnos de que en última instancia la energía del crudo proviene también del sol, que proporcionó la energía para que crecieran los organismos que luego se convertirían en petróleo, podríamos calcular la energía solar total que ha sido necesaria para la existencia de cada kilogramo de diésel. En este caso estaríamos hablando de la "energía" del diésel (Scienceman, 1987; Odum, 1996).

En este trabajo, se ha optado por usar la energía inherente o la total según el índice que estemos calculando. Para calcular el gasto de energía y la eficiencia energética del agrosistema actual se empleará la energía total, ya que partimos de la base de que cuando hablamos de sostenibilidad, debemos adoptar una perspectiva lo más holística posible, y por tanto habremos de proyectar el estudio del impacto de nuestra actividad más allá de los límites de la unidad de producción (Gliessman, 2002; Gliessmann et al., 2007). En nuestro caso, eso significa mirar cuánta energía se gasta en producir el gasóleo utilizado.

El valor que usaremos para la energía total del diésel lo calcularemos a partir de los datos del CIEMAT (Lechón et al., 2006), por ser el estudio más reciente y exhaustivo sobre el asunto en el ámbito español. Según este estudio y Lechón (2008), a partir de datos de la refinería de Algeciras, la energía total del diésel sería de 48.01 MJ/kg, que se distribuyen de la siguiente manera:

-ENERGÍA GASTADA EN LA PRODUCCIÓN DE CRUDO Y SU TRANSPORTE A LA REFINERÍA: 2.23 MJ/kg diésel (2.68 MJ/kg crudo*2.97 kg crudo/kg diésel*0.2804 de asignación al diésel).

-ENERGÍA DEL CRUDO QUE ENTRA EN LA PRODUCCIÓN DE DIÉSEL: 35.39 MJ/kg diésel.

-ENERGÍA DEL PROCESO EN LA REFINERÍA (sin tener en cuenta los procesos internos de la refinería cuya energía proviene del propio crudo): 8.93 MJ/kg diésel.

-ENERGÍA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL COMBUSTIBLE: 1,46 MJ/kg diésel.

-ENERGÍA TOTAL DIÉSEL: 2.23 + 35.39 + 8.93 = 46,55 MJ/kg diésel (el transporte no se ha incluido: véase apartado 3.2.4).

Sin embargo, como uno de los objetivos del trabajo es calcular la proporción de tierra que sería necesaria para cubrir las necesidades de combustible del sistema, necesitamos conocer también el consumo de energía inherente que está teniendo lugar, ya que esa será la energía que tendremos que sustituir por biocombustible. Por tanto, se calculará aparte el consumo de la energía inherente del combustible por hectárea y año, para usar más adelante ese dato en el cálculo del área. Para ello se usará un valor de la energía inherente del diésel de 41,85 MJ/kg (Lechón, 2008).

En general, existe bastante falta de información en los balances energéticos de sistemas agrarios y agrocombustibles consultados en la bibliografía respecto a cuál de estos valores usan (energía inherente

o energía total). Además, el asunto se complica si tenemos en cuenta que el gasóleo, al estar mezclado con trazas de agua, presenta dos valores caloríficos distintos, según se aproveche la energía de ese agua o no: el HHV (Valor Calorífico Alto) si se aprovecha, y el LHV (Valor Calorífico Bajo) si no (Patzek, 2004). Hay que señalar que ese calor del agua no es aprovechado por los motores de los tractores convencionales. Los datos de la bibliografía examinada muestran un rango de la energía asignada al diésel que va desde los 42,36 MJ/kg de Pervanchon (2002) a los 67,0 MJ/kg de Gündogmus (2006).

3.2.4.2 FERTILIZACIÓN

Los fertilizantes empleados en Orce pueden dividirse en dos categorías: los fertilizantes químicos o minerales y la materia orgánica en bruto (estiércol y compost). Ninguno de los agricultores ecológicos entrevistados utiliza fertilizantes orgánicos elaborados, por lo que no se considerarán.

3.2.4.2.1 FERTILIZANTES QUÍMICOS

La mayoría de fertilizantes químicos empleados en el sistema se hace en la forma de NPK 15-15-15, utilizado como abonado de fondo antes de la siembra. Además, algunos agricultores usan nitrato amónico (33,5% N) como abono de cobertera. Hay que decir que las dosis habitualmente empleadas son muy bajas. También se usan fertilizantes químicos en el cultivo convencional del cardo, en este caso en cantidades mucho mayores, por la mayor producción de biomasa.

- **NITRÓGENO**

El nitrógeno es uno de los componentes principales en los tejidos de los seres vivos, destacando su papel en la composición de los aminoácidos o los ácidos nucleicos. De ahí su importancia para la producción agrícola. El **amonio** (NH_3) es el compuesto químico que comúnmente sirve de base para la fabricación de fertilizantes nitrogenados. Los agricultores de Orce lo emplean como abonado de fondo, formando parte del NPK. Se obtiene industrialmente a partir de nitrógeno atmosférico (N_2) e hidrógeno (H_2) en el proceso Haber-Bosch. El H_2 se obtiene a partir del metano del gas natural, que previamente ha tenido que ser purificado, comprimido y transportado (Patzek, 2004). Es por esta razón que la síntesis artificial de nitrógeno para la agricultura es un proceso muy costoso energéticamente y basado en energía no renovable. La eficiencia energética del proceso Haber-Bosch ha ido mejorando en las últimas décadas, desde los 47 MJ/kg Nitrógeno de las fábricas de 30 años de antigüedad a los 34,5 MJ/kg N de las fábricas modernas (Kongshaug, 1998, en Patzek, 2004). Pero la energía bruta contenida en el amonio incluiría, además de la invertida en la fijación química de nitrógeno, la gastada durante el procesado del gas natural, más la correspondiente al granulado y empaquetado del fertilizante. El **nitrato amónico** tiene un 33,5% de nitrógeno y es el otro fertilizante nitrogenado utilizado en el sistema. Se produce a partir de ácido nítrico y amonio. El ácido nítrico se obtiene quemando el amonio con un catalizador. Durante el proceso se genera óxido nitroso (N_2O) como residuo, que es un potente gas de efecto invernadero.

El valor energético medio asociado al nitrógeno que usemos en este trabajo será de 54,43 MJ/kg N, según lo estimado por Patzek (2004) tras comparar varias fuentes. Al nitrato amónico puro se le ha asignado una energía de 56,43 MJ/kg N, también de acuerdo con Patzek (2004).

- **FÓSFORO**

El fósforo es un importante componente de las membranas celulares y de los ácidos nucleicos, como el ADN y el ARN. También forma parte del adenosil trifosfato (ATP), la moneda energética de la célula, y tiene un papel fundamental en el funcionamiento de gran número de enzimas. Se extrae de la roca ígnea fluoroapatita, y de la sedimentaria francolita (Patzek, 2004). Se suele presentar como superfosfato simple (P_2O_5). Como valor energético se empleará el facilitado por la EFMA (European Fertilizers Manufacturers Association), de 15,8 MJ/kg P_2O_5 (Biermann et al., 1999, en Patzek, 2004), que corresponden a 36,16 MJ/kg Fósforo.

- **POTASIO**

Ayuda a mantener el contenido acuoso, y por tanto la turgencia, de las células vegetales. También activa enzimas que producen proteínas y azúcares. Se usará un valor de 9,3 MJ/kg K_2O , de acuerdo con la EFMA (Biermann et al., 1999, en Patzek, 2004).

3.2.4.2.2 MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica tiene un alto contenido energético, cumpliendo numerosas funciones en el suelo: incrementa la capacidad de intercambio catiónico y aniónico, regulariza la disponibilidad de nutrientes y agua, activa la edafogénesis (formación de suelo), contribuye a inactivar plaguicidas, incrementa el poder tampón del suelo (amortiguación de los cambios de pH), favorece la formación de agregados, mejora la

infiltración y reduce la evaporación de agua, intensifica la aireación del suelo (Guzmán, 2000, en Alonso, 2008). No es adecuado calcular la energía de la materia orgánica a partir de sus nutrientes; es preferible hacerlo a partir de su valor energético intrínseco, debido a que las funciones que cumple no son sólo relacionadas con la nutrición. La materia orgánica seca tiene un contenido energético de 16,67 MJ/kg (Naredo y Campos, 1980; Guzmán y Alonso, 2008). El compost es el único fertilizante orgánico empleado, y tiene un 20,4% de humedad, por lo que su energía asociada sería de 13,27 MJ/kg (Alonso, 2008). Lo elaboran los propios agricultores, en caso de que además sean ganaderos, lo cual se observó que era habitual. Como materia prima usan estiércol de oveja, dejándolo reposar alrededor de un año en montones al aire libre. Pero la mayoría de los agricultores que elaboran compost lo utilizan para sus propias tierras de riego. Sólo dos personas lo usaban en el cereal de secano, uno de ellos en cantidades muy bajas.

Ha sido difícil decidir en qué categoría incluir la materia orgánica para su cuantificación en el balance energético. Esta dificultad proviene de haber estudiado únicamente el cereal de secano, que en realidad es un subsistema del agroecosistema más amplio que existe en Orce, que incluiría también los subsistemas ganadero, de regadío, humano, etcétera. Así, por un lado, tenemos la estrecha vinculación existente en Orce entre el subsistema agrícola y el ganadero. De hecho, además del esporádico aporte de compost, el otro aporte de materia orgánica que se produce en el cultivo de cereal, esta vez general a todos los agricultores, es el estiércol producido in situ por las ovejas durante los meses de rastrojeo. Estas consideraciones nos llevan a estimar inadecuada la inclusión de la materia orgánica como una entrada de energía. En realidad, muchos estudios no incluyen el estiércol y el compost como entrada de energía por considerarlos residuos del sistema ganadero (Fluck, 1992; Audsley et al., 1997). Pero por otro lado, tampoco ha sido posible incluirla como un reemplazo –sí lo hubiera sido en caso de haber estudiado el agroecosistema completo–, porque los reemplazos, por definición, deben restarse a la producción energética final, y obviamente la producción de cereal no incluye ningún estiércol que restar. Finalmente hemos decidido no contabilizar el estiércol en el balance energético de los escenarios estudiados.

3.2.4.3 PRODUCTOS FITOSANITARIOS

La energía necesaria para los procesos de fabricación de los productos fitosanitarios aplicados (herbicidas y fungicidas, en nuestro caso) ha sido tomada de Green (1987), excepto el cobre en polvo, para el que se ha tomado el dato de Fluck (1992, en Alonso, 2008). Por las razones ya comentadas, los agricultores de Orce emplean muy pocos productos químicos. En concreto sólo hay dos substancias que hayan aparecido en las encuestas. Una es el oxiclورو de cobre en polvo, utilizado para desinfectar la semilla tanto por algunos agricultores ecológicos como por todos los convencionales. Este producto tiene un energía asociada de 6,25 MJ/kg. La otra sustancia es el herbicida Basalgrán, empleado en postemergencia, y compuesto por Bentazona al 40% y MCPA al 6%, con un valor energético de 181,1 MJ/l. En el cultivo de cardo convencional se usa otro herbicida, el Duvaster 48 CQ, compuesto por Alacloro en un 48%, y con una energía asociada de 133,2 MJ/l.

3.2.4.4 ENERGÍA DE LAS SEMILLAS

El valor energético que se le da a las semillas es muy variable en la literatura, dependiendo de los criterios que se establezcan en su determinación. Hasta hace poco tiempo se ha considerado como energía de la semilla aquella contenida en ella misma (su energía inherente) y su carácter era renovable. Actualmente, se tiende a tener en cuenta la energía necesaria para cultivar la superficie equivalente a la producción de esa semilla. En realidad, al tratarse en muchos casos de semillas mejoradas, cuentan con una inversión energética añadida en el proceso de selección y mejora, que requiere de unas instalaciones exclusivas para ello, y el transporte de la semilla desde donde se produce a donde se cultiva (no olvidemos que la semilla representa en los secanos semiáridos un 5-10% del peso final de la cosecha). Algunos autores han valorado los aspectos relacionados con la mejora (Lambert, 1996, citado en Pervanchon et al., 2002). En CIEMAT solventan el problema asumiendo un rendimiento del 80% por unidad de superficie en la producción de las semillas (Lechón et al., 2005; 2006). Luego calculan la superficie extra que habría que sembrar para producir la semilla y agregan las cargas ambientales asociadas a esa superficie extra a la producción de cereal. Muchos autores sólo agregan el coste de producción de la semilla y no su energía inherente (Baali y Owerkerk, 2005; Lechón et al., 2005; 2006). Y por último, otros consideran que este coste de producción es despreciable y no tienen en cuenta ninguna energía de la semilla (Pervanchon et al., 2002). La mayoría de autores no especifica de dónde procede la energía que asignan a la semilla.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la energía asociada a las semillas va a depender de su origen y del parámetro que estemos calculando. Para lo que aquí nos interesa, la energía de producción de la semilla tendría un carácter parcial o totalmente renovable en función de la tecnología empleada para su producción y transporte. En cuanto a su energía inherente, obviamente será renovable por tratarse de un producto vegetal. A la hora de su cuantificación en el balance energético, también será importante si las semillas proceden del mercado o si son producidas por los propios agricultores. A continuación se resume la metodología empleada en este trabajo para valorar la energía de las semillas:

-Las **semillas propias**: En nuestro balance la semilla propia se ha tratado como reemplazo, es decir, en el cálculo de la EEN no se ha considerado en el apartado de los insumos sino restando su peso al de la producción. Este procedimiento sería el que más se correspondería con lo que sucede en realidad: el agricultor guarda una parte de su cosecha para la siembra del año siguiente, por lo que para él la semilla no supone un insumo, sino una cantidad de la producción que debe retirar. En el cálculo de la EEB sí que se tienen en cuenta, imputando como valor energético su energía inherente.

-Las **semillas comerciales**: para los agricultores que compran la semilla, ésta se ha contabilizado en el apartado de los insumos, asignándole un contenido energético que sería igual a la energía inherente del grano más la parte correspondiente al gasto energético de su producción. Esta parte se calcularía en base al gasto energético medio y la productividad del sistema cerealista en Orce, distinguiendo entre el manejo ecológico y el convencional. Por tanto, la fórmula para calcular la energía total contenida en las semillas empleadas por un agricultor sería:

Es = (Eg + (CEN/Pm))*Da ; donde:

Es (MJ/ha): Energía total contenida en las semillas

Eg (MJ/kg): Energía inherente del grano

CEN (MJ/ha): Consumo energético neto medio en el modo de manejo del agricultor (ecológico o convencional)

Pm (kg/ha): Producción media en el modo de manejo

Da (kg/ha): Dosis de semilla empleada por el agricultor

Este método tiene una debilidad importante: se asume que las condiciones de cultivo en el lugar donde se han producido las semillas comerciales son similares a las de Orce, cuando el sentido común nos dicta que deben ser bien distintas, por lo peculiar de las condiciones agroclimáticas de este municipio. Así, parece una opción más recomendable usar los valores reales del balance energético en los lugares de producción de la semilla. Sin embargo encontramos serias dificultades para llevarlo a cabo, sobre todo porque no sabemos de dónde proceden las semillas, ya que los agricultores sólo facilitaron información sobre la variedad, no sobre la casa comercial. Y aún si supiésemos la casa comercial, seguiría siendo muy difícil conocer todos los detalles del manejo realizado. Es posible que se produzcan en zonas de mayor productividad de la tierra, por ejemplo en el valle del Guadalquivir. En estas condiciones la producción sería mayor, pero también lo sería probablemente el gasto de insumos, especialmente en el manejo convencional, por el empleo de dosis mayores de fertilizantes, agrotóxicos y, probablemente, el riego de apoyo.

3.2.4.5 ENERGÍA DE LA MANO DE OBRA

La energía que se le asigna a la mano de obra también es muy variable entre los distintos autores revisados, en un rango que va desde los 0,27 MJ/h de la mano de obra leve de Campos y Naredo (1980), o los 2,2 MJ/h que calculan Kaltsas et al. (2007) o Guzmán y Alonso (2008), los 2,3 MJ/h de Lacasta (2000), hasta los 183,3 MJ/h de Patzek (2006) o los 182,6 MJ/h que calculan Shapouri et al. (2002). Esta diferencia tan espectacular entre un grupo de autores y otro depende principalmente de que incluyan o no la energía gastada por la sociedad en mantener a los trabajadores. Este procedimiento fue desarrollado por Giampietro y Pimentel (1990), y se basa en agregar al consumo energético del cuerpo humano una estima (traducida a coste energético horario) de toda la energía que gasta el trabajador en su vida, a partir del consumo energético per cápita en su sociedad. Este método no está basado más que en la aplicación al cálculo de la energía de la mano de obra de las mismas premisas que al resto de los insumos. Permite valorar en el agroecosistema las diferencias en el nivel energético de las sociedades, para reconocer, por ejemplo, por qué los países ricos minimizan la mano de obra: el coste energético oculto de mantener cada trabajador es muy elevado.

Campos y Naredo (1980) estiman la energía de la mano de obra a partir de la energía consumida durante el trabajo realizado, mientras que el otro grupo de autores, que están en el rango de los 2,2 MJ/h, la calculan a partir del consumo calórico diario del cuerpo humano. Esta es la opción que se ha elegido en este trabajo, porque se considera que el ser humano es un fin en sí mismo y que, por tanto, su consumo energético fuera del trabajo es independiente de éste. Dicho de otro modo, el trabajador tendría que vivir de todas formas en la sociedad que le ha tocado vivir, sea trabajando el campo o haciendo cualquier otra actividad. En esto se diferencia del resto de los insumos empleados, que se fabrican con el fin para el que son utilizados en la finca, y en los que, por tanto, sí debe tenerse en cuenta el coste energético de su ciclo de vida. En concreto, se usará el valor de 2,2 MJ/h, calculado según Fluck et al. (1992:33).

3.2.4.7 ENERGÍA DEL GRANO

El contenido energético del grano producido se ha tomado de Mataix y Mañas (1998). Estos autores hacen una distinción entre la parte comestible y no comestible de los alimentos que analizan, pero como

en el grano de cereales la parte comestible representa un 100% del peso, esa distinción no es aplicable aquí. En concreto, tenemos 14,00 MJ/kg de avena, 12,59 MJ/kg de cebada y 12,27 MJ/kg de trigo.

En cuanto a la producción, se ha calculado la media anual a partir de los datos obtenidos para cada agricultor de los rendimientos de los últimos cuatro años. En el grupo de agricultores “en transición”, en cambio, sólo se han incluido los últimos tres años, pues en todos los casos era su tercer año de transición. Se ha asumido que el rendimiento de las tres especies de cereal es el mismo, ya que en la mayoría de las encuestas realizadas los agricultores afirmaron que no había grandes diferencias entre ellas. Algunos agricultores afirmaban que la avena suele dar mejores cosechas y, en general, que el rendimiento del trigo es algo menor. Pero estas diferencias se compensan otorgando a los cultivos menos favorecidos una posición preferente en la rotación (cebada tras el barbecho, por ejemplo) u ocupando la zona más fértil del terreno (trigo). En cualquier caso, no supieron decir el valor concreto de esas diferencias cuando las había. Así pues, el valor energético de la producción de grano se ha calculado según los porcentajes de terreno ocupados por cada cultivo y el contenido energético de cada tipo de grano.

3.2.4.8 ENERGÍA DE LA PAJA Y EL RASTROJO

La energía contenida en la paja se halla, igualmente, multiplicando el peso de la paja producida por el valor energético de la paja. Para adjudicar un valor energético a la paja se ha acudido a Glez. de Molina y Guzmán (2006), que lo estimaban en 14,095 MJ/kg asumiendo un contenido energético de la biomasa seca de 16,6 MJ/kg y una humedad relativa del 15,5 %. Para el cálculo de la producción energética debida a la paja se considerarán todos los años, a diferencia del apartado de los insumos necesarios para la labor de recogida y empacado, en que se consideró sólo un tercio de las cosechas (véase apartado 3.2.4.1.1). Este procedimiento se justifica porque lo que no se recoge lo aprovecha el ganado a diente durante el rastreo. La producción total de paja se calculará a partir del índice de cosecha. El índice de cosecha es igual a la producción de grano dividida por la producción de paja más grano. Este se ha considerado de 0,4 para los cultivos poco mejorados (cebada y la avena), y de 0,5 para el trigo, basándonos en González de Molina y Guzmán (2006: 444). Aquí podemos señalar que, según los datos del MAPA recogidos en Carpintero (2005:304), el índice de cosecha medio de los cereales en España habría pasado de 0,43 en 1955 a 0,61 en 2000. Sin embargo, esos datos se refieren a la biomasa cosechada, y por tanto no son aplicables en este caso.

En resumen, en este apartado estaríamos contabilizando la paja recogida, la no recogida (en los años en que el grano sí se cosecha), y el rastreo que aprovecha el ganado en el campo. Sólo quedaría fuera de nuestro análisis la paja, y también el grano, producida en los años en que los agricultores no cosechan la producción, como ha ocurrido este año en muchos casos, debido a que ésta es tan escasa que no justifica el gasto de la cosechadora. En estos casos, no tenemos referencias sobre el valor cuantitativo de la producción, y por tanto no podemos contabilizarlo.

3.2.4.9 ENERGÍA DE LA BIOMASA PRODUCIDA DURANTE EL BARBECHO

Tras la cosecha, durante los meses que van desde las primeras lluvias hasta el periodo de febrero a mayo en que se labra con el arado de vertedera, existe una producción de hierba en los barbechos que formaría también parte de la Producción Primaria Neta del agroecosistema, y que además tiene un aprovechamiento humano a través del ganado ovino que la consume en el campo durante esos meses. Por tanto, hemos decidido incluir esta producción en el balance energético.

Para estimar el valor de esa biomasa, hemos recurrido a Foraster et al. (2006), que estudiaron la producción de biomasa espontánea desde las primeras lluvias hasta su incorporación en abril en un ensayo en olivar ecológico en condiciones similares a las del municipio de Orce. El citado ensayo tiene lugar en el municipio de Castril, situado también en la comarca de Huéscar. Los suelos se clasifican como Calciorthid, uno de los grupos dominantes en Orce. La pluviometría fue de 418 mm el primer año de ensayo y de 166 mm el segundo año. En este trabajo usaremos el valor medio de ambos años. La producción media de materia fresca fue de 1595,35 kg/ha, y la de materia seca de 302,7 kg/ha. Asumiendo un contenido energético de la materia orgánica de 16,67 MJ/kg m.s., podemos estimar la producción energética del barbecho en 5046 MJ/ha. En cada caso, dependiendo de la proporción de la superficie que esté en barbecho, aplicaremos el factor correspondiente para ajustarnos a la unidad funcional.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 ENERGÍA DE LAS LABORES AGRÍCOLAS

La energía implicada en cada labor agrícola se ha estandarizado para todos los agricultores, mediante el cálculo de la media de consumo de todos los agricultores que realizan una determinada labor, según se explicó en el apartado 3.2.4.1 en la metodología.

La energía correspondiente a los diferentes insumos de cada una de las labores agrícolas se muestra en la siguiente tabla. Los datos del empacado corresponden a la media obtenida, sin aplicar la reducción a un tercio. El tiempo que aparece en la tabla representa las horas de mano de obra requeridas por cada tarea. Así, en los casos en que ésta sea realizada por más de una persona (empacado y cosecha), el tiempo de la tarea se habrá multiplicado por el número de operarios.

Tabla 3.5 Energía de las labores agrícolas

| Labor | Tiempo (h/ha) | Mano de obra (MJ/ha) | Maquinaria (MJ/ha) | Combustible (MJ/ha) | Combustible (l/ha) | Energía total (MJ/ha) |
|-----------------------|---------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Vertedera | 1,49 | 3,28 | 138,13 | 1283,58 | 31,64 | 1385,97 |
| Cultivador | 0,64 | 1,42 | 38,37 | 535,71 | 13,62 | 575,5 |
| Siembra | 0,79 | 1,74 | 50,45 | 636,21 | 16,17 | 688,4 |
| Abonado | 0,39 | 0,85 | 38,74 | 242,4 | 6,16 | 281,99 |
| Aplicación herbicidas | 0,32 | 0,69 | 15,15 | 213,39 | 5,43 | 229,23 |
| Rulo | 0,33 | 0,73 | 15,56 | 225,39 | 5,73 | 241,67 |
| Cosecha | 0,62 | 2,71 | 82,36 | 1407,07 | 35,77 | 1492,14 |
| Empacado | 1,47 | 3,24 | 53,59 | 587,67 | 14,94 | 644,49 |

Fuente: elaboración propia

Se puede observar que el arado de vertedera y la cosecha son las tareas que requieren más energía, de modo que en cada una se consumen más de 30 litros de combustible por hectárea. El pase de cultivador y la siembra son tareas muy consumidoras de tiempo y, consecuentemente, también de energía. El empacado también es muy intensivo energéticamente, pues se requieren unos 15 litros de combustible por hectárea, aunque este valor habría que dividirlo por 3 para obtener el consumo bienal.

Examinemos los resultados obtenidos a la luz de otros casos de la literatura. Por ejemplo, el pase de cultivador supone 13,62 litros por hectárea en nuestros resultados, frente a los 9 litros de Lacasta y Meco (2000), 8-13 litros en Witney (1988, en Weidema y Meeusen, 2000) o 5 litros en FAT (en Audsley, 1997). Los 16,17 litros obtenidos para la labor de siembra contrastan con los 5 litros de Lacasta y Meco, los 21 l/ha en Witney, 34-38 en FAT, o los 4,6 en siembra directa según Pick et al. (1988, en Weidema y Meeusen, 2000). Y para la cosecha obtenemos 35,77 litros de gasóleo por hectárea, mientras que Witney ofrece el dato de 11 litros por hectárea, FAT 28-37 y Lacasta y Meco 19 litros. En este punto hay que recordar que nuestro dato de cosecha incluye el combustible gastado por la cosechadora más el del tractor que va recogiendo el grano y transportándolo al almacén.

En general, observamos que los valores obtenidos son más elevados que los de la literatura consultada, aunque no en todos los casos. Probablemente, en parte esto se deba a que los cálculos realizados en este trabajo están hechos a partir de estimaciones del tiempo empleado en cada labor ofrecidas por los agricultores, que incluían el tiempo dedicado a superar las irregularidades del terreno o a sortear obstáculos (como setos, arroyos, desniveles), o las tareas realizadas en condiciones meteorológicas más o menos adversas. En cambio, en la bibliografía examinada se suele estimar el consumo de combustible a partir de ensayos realizados en condiciones óptimas, lo que puede llevar a imputarles un coste horario – que redundaría directamente en el coste energético final– algo inferior al que tiene lugar en la práctica. No obstante, no se puede concluir nada con seguridad en este sentido ya que los resultados obtenidos en las encuestas muestran una amplia dispersión; tareas como un pase de cultivador pueden llevar entre veinte minutos y una hora según el agricultor consultado.

Podemos comprobar, también, una gran variabilidad en los resultados ofrecidos por la literatura, lo que demostraría la aludida dificultad de cálculo de este concepto (véase apartado 3.2.4.1.b, y una discusión más detallada en Weidema y Meeusen, 2000), apuntando a la necesidad de incrementar las investigaciones en este sentido, dada la importancia del combustible como input energético agrario (apartado 2.1.6). También nos pondría en guardia respecto al grado de precisión que podemos otorgar a los balances energéticos y los Análisis de Ciclo de Vida, pues si se parte de fuentes tan diversas en los datos primarios, obviamente los resultados serán muy variables y difícilmente comparables entre sí. Se

hace necesario, pues, llegar a un mínimo consenso en los valores utilizados para poder equiparar los resultados de los distintos estudios.

A un nivel práctico, parece adecuada la iniciativa del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino de implantar un etiquetado energético en los tractores –análogo al ya existente en electrodomésticos, edificios o automóviles–, discriminando positivamente a los más eficientes. Esta clasificación ha sido recientemente realizada por el IDAE (2008). También parece necesaria la facilitación de información a los agricultores en cuanto a posibilidades de mejora de eficiencia en el manejo del tractor, en la línea del manual también elaborado por el IDAE (2005). En este punto es posible que la difusión de la información no se esté produciendo adecuadamente.

Del mismo modo, la promoción de estilos de manejo más ahorradores en tareas mecánicas aparece como un aspecto muy importante para la reducción del consumo, como se comentó en el marco teórico (apartado 2.3.3). Aquí tendríamos la siembra directa, o agricultura de conservación, que ya comentamos en aquel apartado, como el ejemplo más radical de reducción de tareas agrícolas. Es conveniente, por tanto, el diseño de patrones de laboreo que reduzcan el número de pasadas en agricultura ecológica, aunque no sabemos qué potencial de ahorro existiría sin comprometer la productividad.

3.3.2 BALANCES ENERGÉTICOS

3.3.2.1 ENTRADAS DE ENERGÍA

Las entradas de energía (GJ/ha) al sistema de cultivo de cereal se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.6 Entrada neta de energía en el cultivo de cereal de secano en Orce (Escenario 0) (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal¹)

| Escenario | Manejo | Total (CN) | Mano de Obra | Semillas* | | Maquinaria | Combustible | | Fertilizantes | Agrotóxicos |
|-----------|----------------------|------------|--------------|-----------|------|------------|-------------|------|---------------|-------------|
| | | | | EI | EP | | EI | EP | | |
| 0a | Ecológico | 5714 | 14 | 0 | 0 | 426 | 4741 | 532 | 0 | 0 |
| | (%) | 100 | 0,22 | 0 | 0 | 7,41 | 83,09 | 9,28 | 0 | 0 |
| 0b | En transición | 5673 | 12 | 472 | 156 | 388 | 4176 | 469 | 0 | 0 |
| | (%) | 100 | 0,22 | 8,34 | 2,76 | 6,84 | 73,61 | 8,27 | 0 | 0 |
| 0c | Convencional | 9371 | 14 | 1288 | 714 | 446 | 4612 | 518 | 1667 | 113 |
| | (%) | 100 | 0,14 | 13,75 | 7,62 | 4,76 | 49,22 | 5,54 | 17,8 | 1,07 |

Notas: EI: Energía Inherente; EP: Energía en la Producción

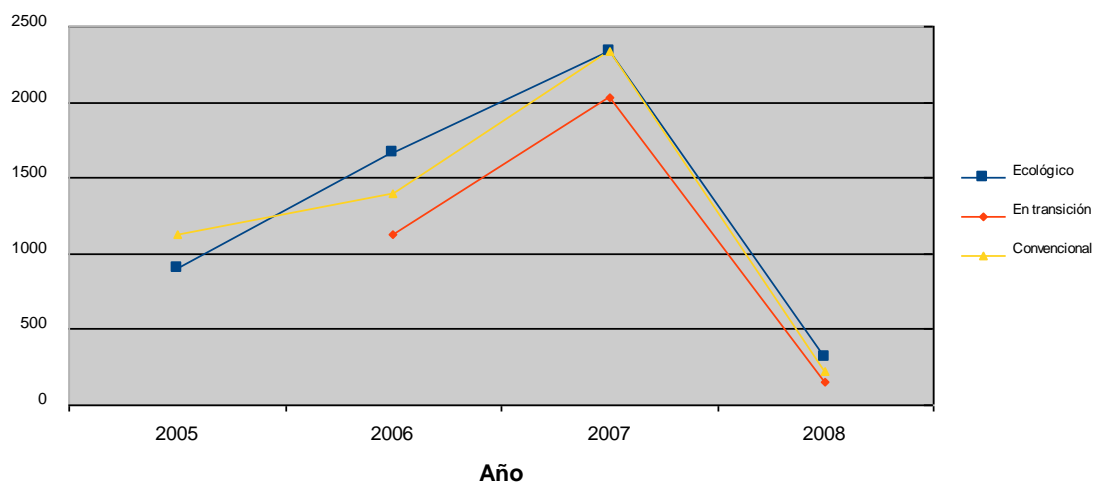
Fuente: elaboración propia

El consumo energético en las fincas ecológicas y en transición es muy similar, denotando un mismo estilo de manejo (ecológico). La mayor parte del consumo corresponde al combustible, entre el 82% (en transición) y el 92% (ecológicos) de la energía neta consumida. Las semillas no son consideradas en los agricultores ecológicos porque son de origen propio. Uno de los agricultores en transición adquiriría la semilla en el mercado, lo que aparece reflejado en el valor medio que se observa en la tabla. Pero las mayores diferencias aparecen cuando comparamos los dos grupos ecológicos con el convencional. En éste último, la importación de fertilizantes y de semillas hacen que se dispare el consumo energético hasta un 64,5% más que la media de los anteriores. Pese a contribuir significativamente a este aumento, cabe señalar que las dosis de fertilizantes empleadas son muy inferiores a las de otros sistemas parecidos como los estudiados por Lacasta y Meco (2000), donde la energía asociada a este factor es de 9520 MJ/ha*año, en contraste con los 1667 MJ/ha*ciclo bienal de nuestros resultados. Los agrotóxicos representan una fracción muy pequeña del consumo en el manejo convencional, a pesar de su alta energía inherente (véase apartado 3.2.4.1), debido en parte a su menor volumen en relación a otros insumos, y en parte a la escasa cantidad que se utiliza en este caso, por las razones ya explicadas. Hay que destacar que, aunque las semillas suponen una fracción muy importante de la energía importada en el manejo convencional, su energía inherente es de origen renovable y, por tanto, su contribución a la insostenibilidad no sería tan elevada. Por su parte, la energía asociada a la mano de obra es casi despreciable en relación al resto de insumos. De los valores obtenidos, y recordando que corresponden a 2,2 MJ/hora, podemos deducir que el número bienal de horas de mano de obra en el manejo ecológico y convencional es de 6,4 horas, o lo que es lo mismo, 3,2 horas anuales por hectárea.

3.3.2.2 PRODUCCIÓN

En la figura 3.1 y la tabla 3.4 se muestra la producción bruta de grano y paja en kilogramos por hectárea cosechada. Se ha preferido no ajustar este valor a la unidad funcional para facilitar la comparación de los rendimientos del cereal con otros estudios. La producción bruta de grano y paja ajustada a la unidad funcional se puede ver en la tabla 4.1, pues es la misma que en el Escenario 1.

Figura 3.1 Rendimiento de grano 2005-2008 (kg*ha⁻¹)



Fuente: elaboración propia

Se observa una alta correlación entre todos los estilos de manejo, no existiendo diferencias apreciables entre el ecológico y el convencional. Hay que destacar las fuertes variaciones interanuales en los rendimientos, provocadas por las oscilaciones en las condiciones agroclimáticas, y muy especialmente por el régimen de precipitaciones. También hay que señalar que el pico que se observa en la cosecha de 2007, donde todos los grupos sobrepasan los 2000 kg/ha, es una situación excepcional, que muchos agricultores afirmaban no haber visto anteriormente. Por su parte, la situación de 2008, en la que la mayor parte de la cosecha se echó a perder por la sequía (muchos agricultores cosecharon sólo las partes de la finca más productivas, y algunos no llegaron a recoger nada), sí que sería recurrente cada varios años, según los entrevistados. Por otro lado, la producción en el grupo "en transición" es ligeramente inferior al de los otros dos, probablemente debido a la caída del rendimiento que suele producirse durante este período, motivada por el abandono de insumos químicos, y la lenta recuperación del agroecosistema, hasta alcanzar un nuevo equilibrio en los ciclos biológicos que va acompañado de una elevación de los rendimientos (Guzmán, 2008). En cualquier caso, sería aventurado afirmarlo con seguridad para este caso sin un análisis estadístico.

Tabla 3.7 Rendimiento medio de grano y paja en el cultivo de cereal de secano en Orce (Escenario 0) (kg*ha⁻¹)

| Escenario | Manejo | Grano | Paja |
|-----------|---------------|---------|---------|
| 0a | Ecológico | 1308,65 | 1911,58 |
| 0b | En transición | 1105 | 1607,17 |
| 0c | Convencional | 1271,88 | 1907,81 |

Fuente: elaboración propia

Es interesante comparar estos resultados, obtenidos a partir de la media de la producción de los 4 últimos años, con el rendimiento medio según la percepción de los propios agricultores. En el caso de los ecológicos, éstos afirmaban que la producción media era de 1430 kg/ha. Los agricultores en transición 1160 kg/ha, y los convencionales 1512 kg/ha. Varios agricultores, tanto ecológicos como convencionales, afirmaron además que la producción era algo mayor en el manejo convencional. Otros, que la producción era similar. Nuestros datos, obtenidos a partir de la información proporcionada por los mismos agricultores, apoyarían más bien esta segunda opción.

Como vemos, la producción es relativamente pequeña en relación a la de la meseta castellana, donde Meco y Lacasta (2006) obtenían rendimientos medios de 2147 kg/ha para la cebada ecológica en rotación de año y vez y de 1592 kg/ha para la cebada convencional cultivada todos los años, frente a los 1308 y

1272 kg/ha obtenidos respectivamente en el manejo ecológico y convencional de año y vez (en los dos casos) en Orce.

En la tabla 3. se muestra la producción energética exportada (PN) en cada grupo de agricultores, ajustada a la unidad funcional. Esta producción corresponde al grano y la paja de cereal producidos, más la producción de biomasa en el barbecho, menos la producción de grano reemplazado para semilla.

Tabla 3.8 Salida neta de energía en el cultivo de cereal de secano en Orce (Escenario 0) (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹)

| Escenario | Manejo | PN | Grano | Paja | Biomasa Barbecho |
|-----------|----------------------|-------|-------|-------|------------------|
| 0a | Ecológico | 49460 | 16308 | 28541 | 4610 |
| | (%) | 100 | 32,97 | 57,7 | 9,32 |
| 0b | En transición | 44415 | 14723 | 25291 | 4401 |
| | (%) | 100 | 33,15 | 56,94 | 9,91 |
| 0c | Convencional | 48345 | 16437 | 26862 | 5046 |
| | (%) | 100 | 34 | 55,56 | 10,44 |

Fuente: elaboración propia

En convencional se observa una mayor producción de biomasa en el barbecho. Esto no significa que el barbecho produzca más por unidad de superficie en este manejo, pues se ha asumido la misma producción en todos los casos (véase apartado 3.2.4.9), sino que existe una mayor superficie media destinada al barbecho entre los agricultores convencionales. De hecho, los 4 entrevistados practicaban estrictamente el cultivo de año y vez, cultivando la mitad de la superficie cada año y dejando la otra mitad en barbecho. En cambio, varios agricultores ecológicos dejaban sólo el 35-45%. Este incremento en el barbecho se corresponde con una menor producción de cereal, que sin embargo apenas se aprecia en la tabla en relación al manejo ecológico porque la producción en este último está disminuida por el reemplazo de las semillas. Por lo demás, los valores absolutos son muy similares en todos los grupos. Por último, cabe preguntarse por qué la energía asociada al grano es ligeramente mayor en convencional, mientras que su peso es ligeramente inferior (véase tabla 3.4). Esto no es un error de cálculo, sino que se debe a que los distintos tipos de grano (cebada, avena y trigo) tienen distintos valores energéticos (véase apartado 3.2.4.7), y por tanto la cantidad relativa de cada tipo puede modificar, aunque levemente, el valor de la energía final.

3.2.2.3 BALANCE ENERGÉTICO

A continuación se muestran los parámetros generales que hemos calculado del balance energético, y una estima de la carga ganadera.

Tabla 3.9 Balance energético del cultivo de cereal de secano en Orce (Escenario 0)

| Manejo | PPN (GJ/ha) | Reempleos (GJ/ha) | CB (GJ/ha) | EEB (GJ/GJ) | PN (GJ/ha) | CN (GJ/ha) | EEN (GJ/GJ) | EG (GJ/ha) | GA (%) | CCG (nº) |
|---------------------|-------------|-------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|--------|----------|
| Ecológico | 51,25 | 1,74 | 7,45 | 6,88 | 49,46 | 5,71 | 8,66 | 16,31 | 23,43 | 2,20 |
| Transición | 45,74 | 1,34 | 7,01 | 6,52 | 44,41 | 5,67 | 7,83 | 14,72 | 20,16 | 2,00 |
| Convencional | 48,74 | 0,39 | 9,76 | 4,99 | 48,34 | 9,37 | 5,16 | 16,44 | 4,71 | 2,10 |

PPN: Producción Primaria Neta (Grano + Paja + Biomasa barbecho); Reempleos (Grano para Semillas); CB: Consumo Bruto (Reempleos + Mano de obra + Importaciones); EEB: Eficiencia Energética Bruta (PPN/CB); PN: Producción Neta (PPN – Reempleos); CN: Consumo Neto (Mano de obra + Importaciones); EEN: Eficiencia Energética Neta (PN/CN); EG: Energía Neta del Grano (Grano – Reemplazo Semillas); GA: Grado de Autonomía (100*Importaciones/CB); CCG: Capacidad de Carga Ganadera ovina.

Fuente: elaboración propia

La PPN es muy similar en todos los tipos, de acuerdo con el similar rendimiento de grano. Los reempleos en este escenario corresponden a las semillas. Ningún agricultor ecológico y sólo uno entre los 5 en transición entrevistados adquiriría este insumo en el mercado, mientras que en el caso de los convencionales la situación era a la inversa: 3 de los 4 entrevistados las compraba. Tanto el CB como el CN es superior en el manejo convencional, pero la diferencia es más marcada en el CN por el distinto origen de las semillas. Las cifras de CB (equiparables al consumo estudiado por Meco y Lacasta (2006), pues ellos incluían la semilla) son algo mayores que en el citado estudio en el caso del ecológico, 7,45 GJ/ha frente a 5,75 GJ/ha, y muy inferiores en el caso del convencional, 9,36 GJ/ha en Orce frente a

29,87 GJ/ha en La Mancha, debido principalmente a la dosis de fertilizantes (ver apartado 3.3.2.1) y la intensidad del manejo, pues en su caso se cultiva todos los años y en el nuestro cada dos. La EEB es algo superior en los grupos ecológicos, pero este índice no aporta información sobre la dependencia de la energía externa. Sí lo hace la EEN, donde estas diferencias se marcan más, llegando a una eficiencia un 68% superior en el manejo ecológico frente al convencional. En la autonomía también destaca el manejo ecológico, donde el 23,43% de la energía es de origen propio, frente al 4,61% del convencional, gracias de nuevo al reemplazo de las semillas. No obstante, hay que señalar la baja autonomía de ambos tipos de manejo, que es más preocupante si cabe en el ecológico, pues supuestamente este estilo de agricultura debe basar su funcionamiento principalmente en recursos propios. La capacidad de carga ganadera, por último, es similar en todos los grupos.

Tabla 3.10 Energía no renovable en el cultivo de cereal en Orce

| Manejo | ENR (GJ/ha) | EENR (GJ/GJ) | ENRG (GJ/GJ) | IE (MJ/kg) |
|--------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Ecológico | 5,64 | 8,77 | 2,71 | 4,51 |
| Transición | 5,13 | 8,66 | 2,54 | 4,53 |
| Convencional | 7,99 | 6,07 | 2,01 | 6,42 |

ENR: Consumo de Energía No Renovable; EENR: Eficiencia de la Energía No Renovable (PN/ENR); ENRG: Eficiencia de la Energía No Renovable en relación a la Producción de Grano (EG/ENR); IE: Intensidad Energética (ENR/kg Grano)

Fuente: elaboración propia

Los indicadores relacionados con la ENR son los más relevantes para la evaluación de la sostenibilidad. Debido a que los medios de producción en nuestro país están dominados por este tipo de energía, representando un 94% de la producción de energía primaria, los valores obtenidos son parecidos a los de la EEN. El consumo de ENR es un 41,7% superior en el manejo convencional en relación al ecológico. Esto se ve reflejado en el resto de indicadores, donde la proporción es similar, debido a que la producción es muy parecida entre todos los grupos. Los indicadores ENRG e IE miden el consumo de ENR en relación a la producción de grano. Así, vemos que, aunque se obtienen balances positivos, reflejan una dependencia muy fuerte de los combustibles fósiles, pues cada MJ de energía fósil invertida en el sistema apenas rinde 2 MJ de grano en el manejo convencional y 2,7 en el ecológico. O, visto mediante la intensidad energética, hacen falta entre 4,5 MJ (ecológico) y 6,4 MJ (convencional) para producir un kg de cereal, que tiene en torno a 13 MJ.

3.4 CONCLUSIONES

Como puede apreciarse, las diferencias entre ambos tipos de manejo no son tan acusadas como en otros estudios de cereal en condiciones semi-áridas (Lacasta et al., 2008), que están realizados sobre ensayos de investigación y, por tanto, menos sometidos a la idiosincrasia y costumbres de cada productor, y bajo condiciones agroclimáticas menos extremas. Estas condiciones menos extremas permiten intensificar, evitando el barbecho, y diversificar más las rotaciones. Por ello, las diferencias entre ecológico y convencional se hacen mayores. En Orce el cultivo de año y vez, con pequeñas variaciones, es practicado por todos los agricultores entrevistados, tanto ecológicos como convencionales. También los son las rotaciones, de modo que muy pocos agricultores siembra un cultivo en el mismo lugar dos veces seguidas. No existen apenas distinciones en las labores del suelo entre el convencional y el ecológico, destacándose, por ejemplo, la utilización de arado de vertedera también en ecológico, frente al laboreo de conservación (gradas de discos) propuesto por Lacasta y Meco (2000). Los agrotóxicos no son usados o lo son en muy baja medida en el sistema convencional. La paja es habitualmente cosechada en los dos, a diferencia también de la propuesta de Lacasta y Meco (2000) para el manejo ecológico de picarla e incorporarla al terreno. La única diferencia apreciable es el uso de abono químico, aunque en pequeñas cantidades, en el cultivo convencional frente a la no aportación de abono o a veces el uso de estiércol en ecológico, y también puede mencionarse la utilización eventual de herbicidas en el primero.

Desde la perspectiva agroecológica, estos hechos nos llevarían a varias conclusiones. Por un lado, destaca la dificultad de definir "estilos de manejo" cuando nos enfrentamos a la complejidad del mundo rural. Frente a los modelos de agricultura que se establecen desde la academia, la realidad de los sistemas agrarios aparece con la diversidad y la mezcla propias de la interacción entre la naturaleza y la sociedad, difuminándose las fronteras artificialmente creadas. En el proceso de coevolución de los agroecosistemas (Nogaard, 1985:25-28, en Ottmann, 2005), los agricultores han adaptado sus faenas a las condiciones de la zona en la que viven. En el caso de Orce, las escasas precipitaciones, que disminuyen la respuesta de los cultivos a los agroquímicos y reducen la incidencia de plagas y malas hierbas, han contribuido a la generalización de una agricultura "de mínimos insumos" practicada a

grandes rasgos tanto por los agricultores ecológicos como por los convencionales, en la que se respetan las rotaciones de año y vez y no existe control de plagas.

La realización de laboreo profundo y con volteo se explicaría en parte porque la normativa de certificación ecológica no exige o prohíbe ninguna práctica de laboreo. Por ello, aunque se considera que la estructura y la calidad del suelo se ven dañadas por el volteo del suelo, los agricultores hacen esta labor por tradición. En concreto lo que los motiva es la creencia de que "si no se labra, la tierra no se chupa el agua" (Ángel Valero). Esta convicción se ve ya reflejada en un refrán de la zona: "el que siembra sobre rastrojo, se desengaña por su propio ojo" (Jesús Gómez). Por otro lado, la vocación en última instancia ganadera de la mayoría de las explotaciones, donde el ganado ovino pasa varios meses careando los rastrojos, podría generar problemas de compactación que quizá encuentren su solución en el laboreo profundo realizado por los agricultores, aunque éste podría ser también vertical, para evitar la rotura de la estructura del suelo que origina el volteo.

Algo parecido ocurre en el caso de la paja: el hecho de que se trate de una comarca en la que tiene gran importancia la actividad ganadera, condiciona el empleo de la paja y el rastrojo para alimentación del ganado, ya sea in situ o previo empacado y recogida, en lugar de picarla e incorporarla al terreno.

En suma, las peculiares condiciones climáticas de Orce han dificultado la introducción del paquete tecnológico propio de la modernización agraria, de manera que el poco calado que ha tenido el uso de estas tecnologías está facilitando ahora la transición a una agricultura ecológica, que les ofrece además incentivos económicos, vía subvención y precios.

En cuanto a los balances energéticos, hemos comprobado que existe una fuerte dependencia de la energía no renovable para el funcionamiento del sistema, que es mayor en el manejo convencional debido al uso de fertilizantes, pero muy marcada también en el manejo ecológico, en el cual el combustible supone el 92% del consumo energético neto. Por tanto, si se quiere reducir el gasto de energía fósil en este agroecosistema, de manera que sea más autónomo y contribuya menos al cambio climático, habrá que empezar por una transición agroecológica que elimine la dependencia a los agroquímicos, pero aún nos quedaría por resolver el importante gasto debido al combustible, para lo cual hemos diseñado los escenarios alternativos que veremos a continuación.

4. PROPUESTAS DE MEJORA DE LA SUSTENTABILIDAD BASADAS EN EL APROVECHAMIENTO DE RECURSOS LOCALES PARA LA TRACCIÓN

En el capítulo anterior hemos comprobado cómo la energía de la tracción supone la mayor parte del total de energía no renovable consumida en el agroecosistema. Frente a esta situación, hemos buscado posibles opciones para sustituir esta energía por otra de origen renovable. En los siguientes apartados se analizarán las alternativas propuestas siguiendo aproximadamente un mismo esquema básico. Primero se hará una introducción general sobre el vector energético en cuestión, reseñando algunos datos relevantes sobre su historia y su situación global y local en la actualidad. Luego se describirá el proceso de obtención, incluyendo un balance energético realizado a partir de datos propios del cultivo de cereal en Orce y/o datos procedentes de la bibliografía. A continuación se mostrará un esquema con una visión general del escenario, donde se vean reflejados los principales flujos energéticos. Por último se mostrarán los balances energéticos del escenario, a partir del cálculo de la proporción de la superficie del agroecosistema que habría que dedicar a cada vector energético para abastecer las necesidades de combustible en el cultivo de cereal.

Sin embargo, dada la heterogeneidad de las alternativas, no podremos ajustarnos del todo a este esquema. En el caso del biodiésel de cardo tendremos, además, que describir las características del cultivo de cardo, tanto el convencional, del que disponemos de datos, como el ecológico, del cual habrá que hacer una propuesta de manejo. El caso del biogás es también distinto: como este combustible se obtiene del estiércol de oveja, hay que ampliar el sistema para incluir al ganado. El número de ovejas productoras de estiércol se determinará a partir de la capacidad de carga del agroecosistema. Este número, la producción de estiércol por oveja, y el rendimiento de metano a partir del estiércol, serán los factores que condicionen la producción posible de biogás. En esta alternativa, por tanto, no calcularemos la superficie ocupada en la producción de biogás, que será despreciable, sino el porcentaje de combustible que puede ser sustituido con el biogás producido por las ovejas existentes.

Hay que aclarar que no se ha tenido en cuenta la energía implicada en la mano de obra, las infraestructuras y el transporte necesarios para los procesos específicos que se dan en cada una de las alternativas. Los motivos que justifican la no inclusión de las infraestructuras y el transporte ya se

comentaron en un apartado anterior (3.2.4). En cuanto a la mano de obra, se debe a la carencia de información suficiente para realizar estimaciones adecuadas.

4.1 ESCENARIO 1: BIOETANOL DE CEREAL COMO COMBUSTIBLE

4.1.1 GENERALIDADES SOBRE EL ETANOL COMO COMBUSTIBLE

A pesar de la baja productividad por unidad de superficie los balances han sido positivos, gracias en parte a la reducida cantidad de insumos que se utiliza. Por tanto cabe pensar en el empleo de parte de la producción para fabricar el combustible necesario para mover el sistema. Nos encontramos aquí con la primera alternativa, la de la transformación del grano en etanol.

El etanol fue uno de los primeros compuestos químicos de los que se conoció sus propiedades. Es un líquido volátil, inflamable, transparente e incoloro que puede usarse como solvente y que los humanos han utilizado desde la prehistoria como el compuesto intoxicante de las bebidas alcohólicas. Se puede producir eficientemente mediante síntesis química a partir de materias primas basadas en el petróleo o el carbón, pero también mediante la fermentación de materiales orgánicos (Power, 2007).

Henry Ford diseñó su primer automóvil Model T en 1908, esperando utilizar etanol como combustible. De hecho, de 1920 a 1924, la Standard Oil Company comercializó un 25 % de etanol en la gasolina vendida en el área de Baltimore. Pero la competencia de los bajos precios del petróleo obligó al cierre de la única planta de producción de etanol a mediados de los años cuarenta. Como consecuencia, se acabó el negocio de los granjeros americanos y el gasohol (mezcla de gasolina y etanol) fue sustituido definitivamente por derivados del petróleo. A raíz de la primera crisis del petróleo, en la década de los 70, se recuperó la utilización de la mezcla de etanol con bencina tanto en los Estados Unidos como en Brasil. Estos programas tuvieron mucho éxito y han durado hasta la actualidad (Romero y Miralles, 2002).

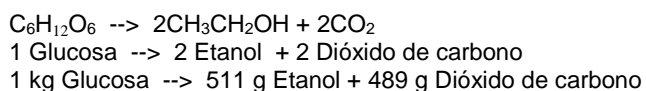
En este momento, los cultivos más extendidos a nivel mundial para producir etanol son la caña de azúcar, principalmente en Brasil, y el maíz, con Estados Unidos como primera potencia. Estos países producen más de 15.000 millones de litros de etanol al año cada uno, mientras que el siguiente país por volumen de producción es China con menos de 5.000 millones (Licht, 2006, en Ballenilla, 2007). A nivel europeo, son los cereales, junto con la remolacha azucarera, los cultivos que representan la mayor parte de la materia prima empleada para la elaboración de etanol. En Andalucía no existe ninguna planta en funcionamiento de producción de bioetanol, y sólo existe una en proyecto o en construcción, en la Azucarera del Guadalfeo, en Salobreña, con capacidad estimada para producir 38.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep) anuales (AAE, 2008).

Como se comentó en el marco teórico, el etanol ha sido objeto de numerosos estudios desde la perspectiva energética, con resultados muy variados dependiendo de las condiciones particulares de la producción, así como de los insumos y su energía asociada que hayan tenido en cuenta los autores (véase apartado 2.1.7).

También es posible la producción de etanol, aunque con menores rendimientos, mediante las tecnologías de segunda generación, con las que se aplican procesos de hidrólisis o gasificación a materiales lignocelulósicos como la paja (Giampietro y Pimentel, 1997; AAE, 2008). Pero consideramos que se trata de una tecnología que por el momento es más cara y está poco consolidada (ver la figura 2.9, en el apartado 2.2.2), y de la que por tanto vamos a prescindir para el análisis que nos ocupa, si bien la AAE (2008) la califica como una tecnología promisoría para la producción de etanol en Andalucía.

4.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE GRANO DE CEREAL

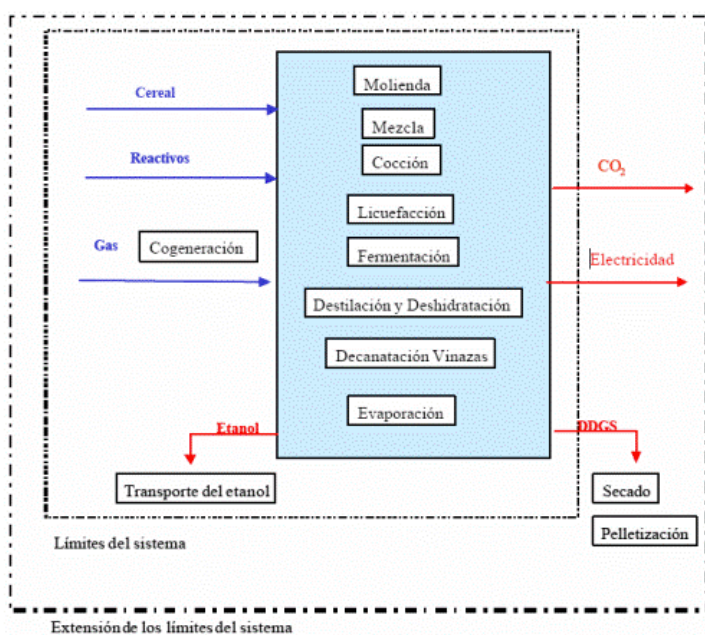
Este proceso se basa en la conocida fermentación alcohólica que realizan numerosos hongos, y muy en especial la levadura *Saccaromyces cerevisiae*, durante la producción de vino o cerveza, en la que los azúcares del material vegetal son transformados en etanol, mediante la siguiente reacción química (Power, 2007):



El producto fermentado obtenido, o "cerveza industrial", que tiene una baja graduación alcohólica, es sometido a una destilación y deshidratación mediante la aplicación de calor, para obtener un producto de

alta graduación. Este es el proceso más costoso energéticamente. Las actividades implicadas en la producción de etanol se muestran en el siguiente esquema:

Figura 4.1 Proceso de elaboración de etanol



Fuente: Lechón et al., 2005

Los datos que hemos utilizado para realizar el balance energético son los presentes en el estudio de ACV sobre el etanol del CIEMAT (Lechón et al., 2005; Lechón, 2008), y en concreto se corresponden con la planta Biocarburantes de Cartagena. Es una planta de grandes dimensiones, lo que facilita la integración de procesos, de manera que los residuos generados por unos procesos son aprovechados por otros. Esto incrementa la eficiencia energética global del sistema, en relación con las plantas pequeñas, lo que compensa el mayor gasto de transporte en las plantas grandes (Bernesson, 2004). Por este motivo habrá que considerar que los resultados de eficiencia que obtengamos en este trabajo estarán estimados al alza, pues partimos del supuesto de que la elaboración del etanol y el resto de combustibles se realizará a pequeña escala.

La elección de plantas pequeñas para Orce se basa en su mayor potencial para utilizar tecnologías más simples e incrementar el empleo rural, así como para mejorar la autonomía del sistema. Se asume que cuantos más pasos de los procesos implicados en la actividad agrícola se den dentro del agroecosistema, mayor será su capacidad para afrontar cambios que vengan del exterior, y en mayor medida se habrán reducido los vínculos que lo hacen dependiente del sistema dominante.

4.1.3 ENTRADAS DE ENERGÍA EN LA ELABORACIÓN DE ETANOL PARA LOS TRACTORES

Como hemos visto en el esquema, las entradas de energía para la elaboración de etanol son grano de cereal, reactivos y gas natural. El **grano** provendrá, obviamente, de la producción de cereal del agroecosistema. La energía asociada a los reactivos se ha considerado no significativa (Lechón et al., 2005). El gas natural representa la fuente de energía térmica en el esquema anterior. En nuestro caso usaremos la **paja** del cereal, para evitar la importación al sistema de energía no renovable.

El uso del etanol en motores diesel, como los de los tractores, es posible si se realizan modificaciones que mejoren las propiedades de ignición del etanol, mediante la adición de un pequeño porcentaje de **mejorador de ignición**, que incrementa el número de cetano (Haupt et al., 1999, en Bernesson, 2004). Hemos cuantificado la aportación del mejorador de ignición a la energía consumida en la elaboración del etanol a partir de Bernesson (2004), que estima que la adición de este mejorador supone un 26,37% de los 0,36 MJ de energía primaria consumidos por cada MJ de etanol producido. Según estos datos, el mejorador de ignición supone 0,095 MJ por cada MJ de etanol, o lo que es lo mismo, 2,54 MJ/kg etanol. El porcentaje de energía de origen no renovable de este aditivo sería el de los medios de producción, un 94% (MARM, 2008).

Además, es necesario modificar el motor para incrementar el flujo de combustible, debido al menor poder calorífico del etanol respecto al diésel (Bernesson, 2004). En el presente trabajo se ha considerado que los ajustes en el motor tienen una energía asociada muy pequeña pues, como vimos en la metodología, la energía de la maquinaria viene determinada por su peso, y en nuestro caso las piezas del motor que hay que cambiar no tienen un peso apreciable en relación al del tractor. Por tanto, estos cambios serían minoritarios y no afectarían al balance energético final, por lo que no han sido incluidos en los cálculos.

4.1.4 COPRODUCTOS: DDGS Y ELECTRICIDAD

La energía de los coproductos se ha incorporado al balance energético de este sistema. Los subproductos del proceso de obtención de etanol son DDGS (Dry Distilled Grain Solids) y electricidad.

Como subproducto del proceso de obtención de etanol, se generan **DDGS**. Como los azúcares y almidones del cereal se han convertido en etanol, se reduce significativamente en los DDGS el contenido en hidratos de carbono no estructurales, almidón y azúcares, y se concentra proporcionalmente el porcentaje del resto de nutrientes (entre 2 y 3 veces). Así se origina un subproducto que se emplea principalmente como fuente de proteína con un contenido de hasta un 32% de proteína bruta (PB). También son una fuente de fibra y grasa, y tienen un alto contenido en levaduras, minerales y vitaminas del grupo B. El proceso industrial de obtención incorpora un tratamiento térmico para la desecación del producto (menos del 10% de humedad) y posterior peletización para optimizar su manipulación, transporte y conservación (Lechón et al., 2005). Esta energía está incorporada en los datos de consumo energético que hemos utilizado en nuestro balance. Sin embargo, la utilización en finca de los DDGS no requiere deshidratación (Fredriksson et al., 2006), por lo que teóricamente estaríamos sobreestimando el consumo energético total. Por otro lado, como se ha comentado, las plantas grandes tienen una eficiencia mayor que las pequeñas, lo que de alguna manera compensaría el error anterior. También ha sido necesario calcular el peso de los DDGS, para lo que se ha usado el dato de 120000 t DDGS / 78900 t etanol producidas en la planta Ecocarburantes, estudiada en Lechón et al. (2005). Por tanto, obtendríamos 1,52 kg DDGS / kg etanol. Se ha asumido que su humedad relativa es del 10%, y el contenido de PB del 32%. Estos datos serán necesarios para el cálculo de la capacidad de carga ganadera en este escenario.

El otro subproducto obtenido de la fermentación y destilación del cereal es **electricidad**, en caso de que se use una planta de cogeneración para aprovechar parte de la energía térmica residual que de otro modo se perdería, tal como se hace en las plantas del citado estudio de referencia (ver figura 4.1). La cogeneración no es considerada en los estudios sobre producción en finca de etanol para autoconsumo revisados (Bernesson et al., 2004; Fredriksson et al., 2006), pero tampoco lo es en los casos estudiados por los mismos autores de producción de etanol a gran escala (Fredriksson et al., 2006; Hansson et al., 2007), por lo que este dato no es muy significativo. Finalmente, a pesar de la mayor inversión económica que supondría, hemos incluido la cogeneración, para mostrar el potencial de esta tecnología en el aprovechamiento de los recursos. En cualquier caso, la superficie necesaria para etanol no resulta afectada, ni tampoco la carga ganadera estimada, y el balance energético final sufre modificaciones muy leves debido a la baja proporción de electricidad en relación al resto de salidas energéticas. En la práctica, el proceso de cogeneración no hace sino reducir las pérdidas de energía en forma de calor que se producen en cualquier proceso de transformación de la energía –segunda ley de la termodinámica–, recuperando parte de estas pérdidas en una forma útil como la electricidad, de forma que la producción del agroecosistema se diversifica y aumenta sin ninguna repercusión sobre su dinámica interna.

También se obtiene CO₂, que es difícilmente aprovechable en plantas pequeñas, por lo que no será contabilizado.

4.1.5 BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CEREAL

Los parámetros energéticos básicos de la planta de Cartagena se muestran a continuación (Lechón et al., 2005; 2008), junto con la energía del mejorador (Bernesson, 2004).

CONSUMO ENERGÍA TÉRMICA: 27,19 MJ/kg etanol
CONSUMO GRANO DE CEBADA: 56,68 MJ/kg etanol
CONSUMO ÁCIDO SULFÚRICO: despreciable
CONSUMO ÁCIDO FOSFÓRICO: despreciable
CONSUMO UREA: despreciable
CONSUMO MEJORADOR IGNICIÓN: 2,54 MJ/kg etanol

CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL: 27,19 MJ térmica + 56,68 MJ grano cebada + sulfúrico + fosfórico + urea + 2,54 MJ mejorador = **86,31 MJ/kg etanol**

PRODUCCIÓN ETANOL (energía inherente): 26,8 MJ etanol/kg etanol
PRODUCCIÓN DDGS: 7,87 MJ DDGS/kg etanol
PRODUCCIÓN ELECTRICIDAD: 15,32 MJ electricidad/kg etanol

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA TOTAL: 26,8 MJ etanol + 7,87 MJ DDGS + 15,32 MJ electricidad = **49,99 MJ/kg etanol**

En el CIEMAT asumen 13,51 MJ/kg grano de cebada. Este valor es distinto al que hemos utilizado nosotros en los cálculos del balance energético del cereal, de 12,59 MJ/kg grano de cebada (Mataix y Mañas, 1998). Como en la elaboración de este escenario tenemos que trabajar con ambas fuentes, nuestro balance de cereal y la eficiencia de la producción de etanol del CIEMAT, hemos tenido que transformar los datos para hacerlos comparables. Para ello hemos calculado cuántos kilogramos de cebada serían necesarios por cada kilogramo de etanol obtenido de acuerdo con los datos del CIEMAT:

$56,68 \text{ MJ ceb/kg etanol} / 13,51 \text{ MJ ceb/kg ceb} = \mathbf{4,19 \text{ kg grano cebada / kg etanol}}$

A continuación, calculamos cuánta energía (según nuestros datos) sería necesaria en forma de cebada por cada kilogramo de etanol:

$4,19 \text{ kg cebada} * 12,59 \text{ MJ/kg ceb en datos propios} = \mathbf{52,75 \text{ MJ grano cebada / kg etanol}}$

Este nuevo dato de energía contenida en la cebada que entra en el proceso nos obliga a recalcular los parámetros anteriores:

ENERGÍA DE LOS INSUMOS Y PRODUCTOS DE LA ELABORACIÓN DE ETANOL A PARTIR DE DATOS DE LA PLANTA ABENGOA CARTAGENA Y DATOS DE MATAIX Y MAÑAS (1998) DE ENERGÍA DE LA CEBADA

CONSUMO ENERGÍA TÉRMICA: 27,19 MJ/kg etanol
CONSUMO GRANO DE CEBADA: 52,75 MJ/kg etanol
CONSUMO ÁCIDO SULFÚRICO: despreciable
CONSUMO ÁCIDO FOSFÓRICO: despreciable
CONSUMO UREA: despreciable
CONSUMO MEJORADOR IGNICIÓN: 2,54 MJ/kg etanol

CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL: 27,19 MJ térmica (gas) + 52,75 MJ grano cebada + sulfúrico + fosfórico + urea + 2,54 MJ mejorador = **82,48 MJ/kg etanol**

PRODUCCIÓN ETANOL: 26,8 MJ etanol/kg Etanol
PRODUCCIÓN DDGS: 7,87 MJ DDGS/kg etanol
PRODUCCIÓN ELECTRICIDAD: 15,32 MJ electricidad/kg etanol

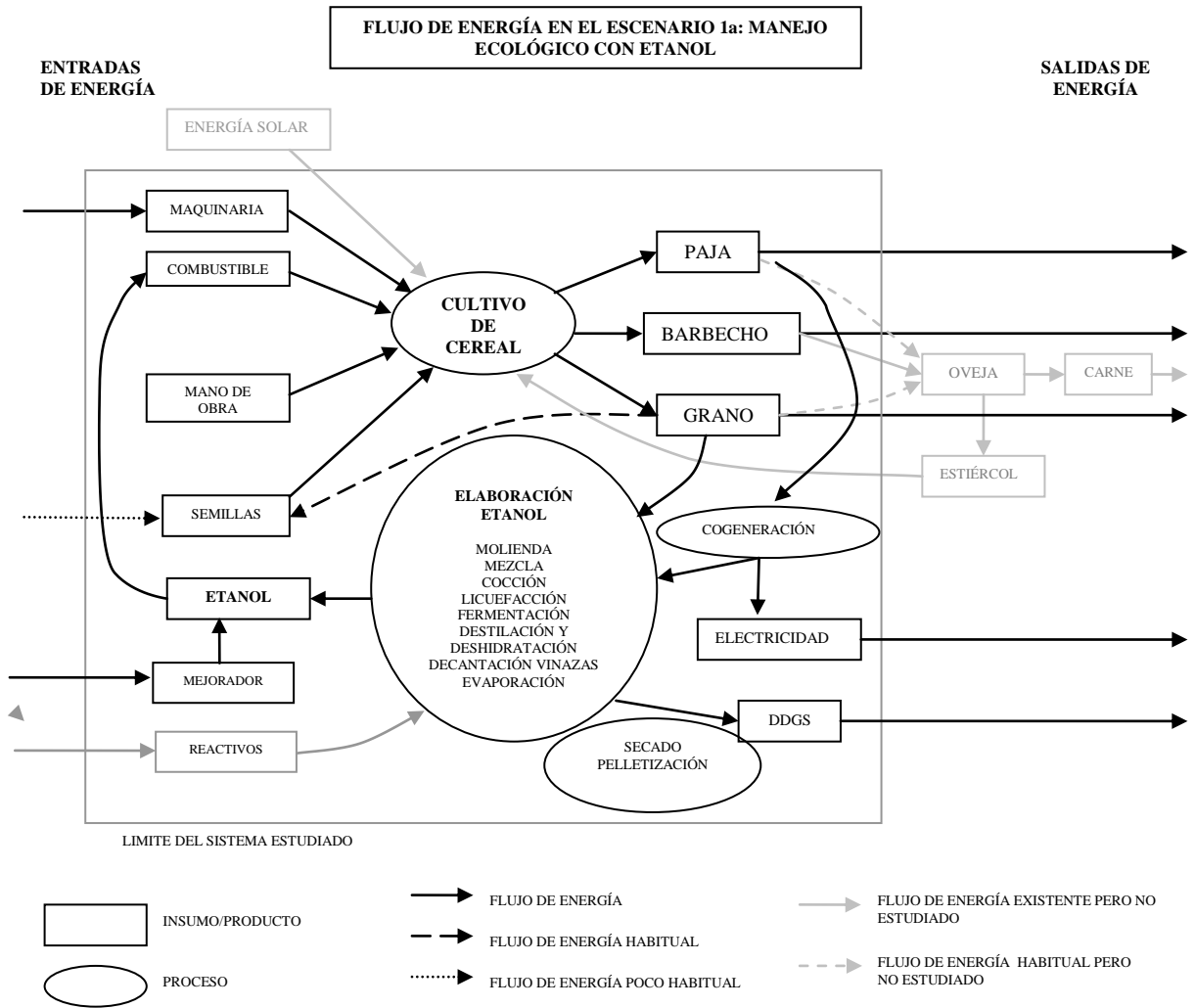
PRODUCCIÓN ENERGÉTICA TOTAL: 26,8 MJ etanol + 7,87 MJ DDGS + 15,32 MJ electricidad = **49,99 MJ/kg etanol**

Ahora podemos calcular la eficiencia energética del proceso:

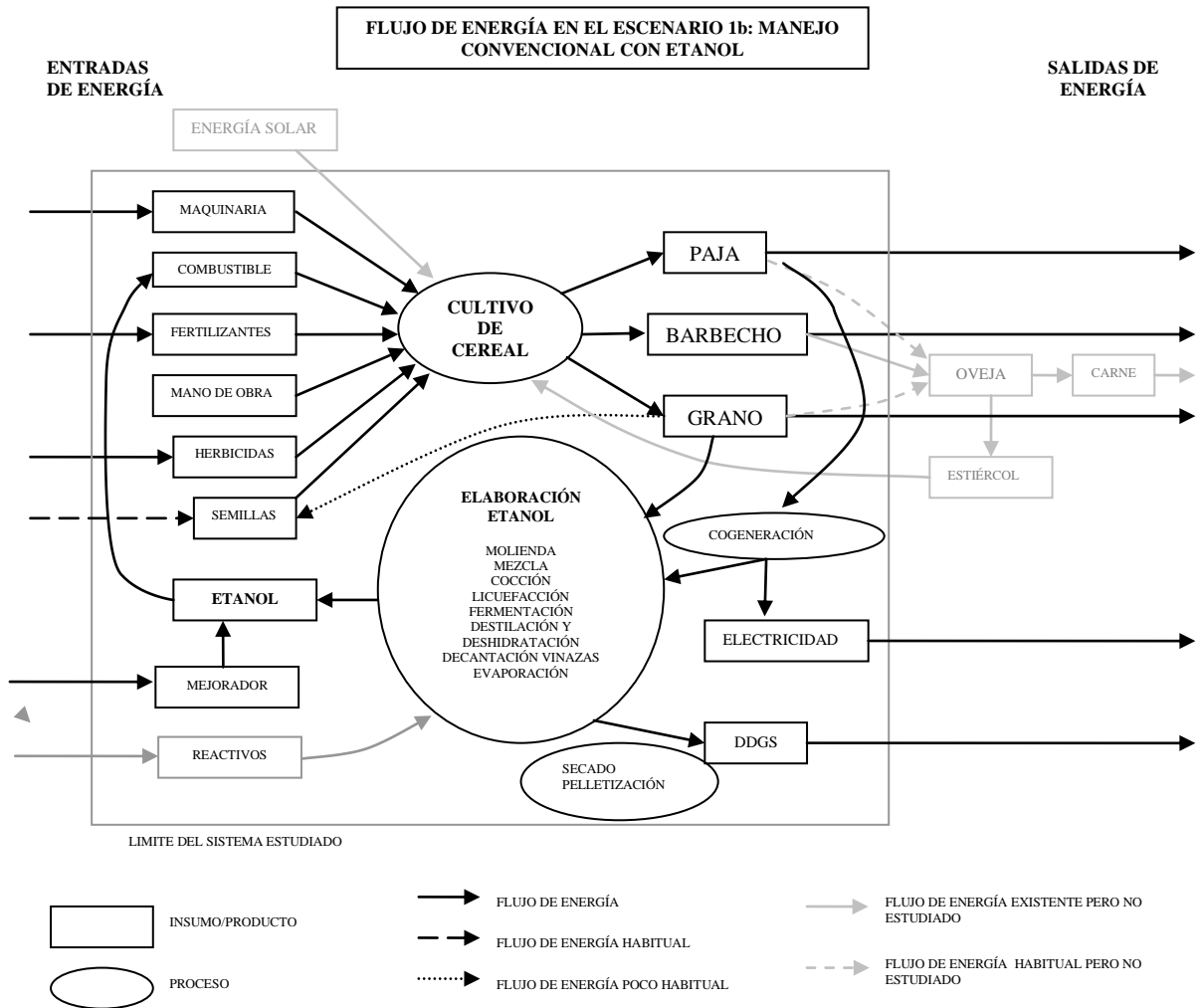
EFICIENCIA TOTAL DEL PROCESO: $50/82,48 = \mathbf{0,61}$
EFICIENCIA DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA DEL GRANO EN ENERGÍA DEL ETANOL:
 $26,8/52,75 = \mathbf{0,51}$

4.1.5 ESQUEMA GENERAL DEL ESCENARIO 1: BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE

4.1.5.1 ESCENARIO 1a: BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE CON MANEJO ECOLÓGICO



4.1.5.2 ESQUEMA GENERAL DEL ESCENARIO 1b: BIOETANOL COMO COMBUSTIBLE CON MANEJO CONVENCIONAL



4.1.7 BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE CEREAL EN EL ESCENARIO 1

4.1.6.1 SUPERFICIE NECESARIA PARA EL AUTOABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE ETANOL

Para calcular el porcentaje de la superficie de cultivo que habría que destinar a la elaboración de etanol para lograr el autoabastecimiento de combustible hemos partido del grano necesario para fabricar el etanol suficiente para sustituir al diésel. Sin embargo, la cantidad de paja sería distinta, por lo que se ha calculado aparte. Para la realización de estos cálculos se han tenido en cuenta varios datos. Como ejemplo, a continuación se detallan los cálculos realizados para el manejo ecológico:

RELACIÓN GRANO/ETANOL: 4,19 kg grano cereal/kg etanol (apartado 4.1.5)
 ENERGÍA INHERENTE DEL ETANOL: 26,8 MJ/kg etanol (Lechón et al., 2005)
 ENERGÍA INHERENTE DEL DIÉSEL: 41,85 MJ/kg diésel (Lechón et al., 2005)
 CONSUMO BIENAL DE ENERGÍA INHERENTE DEL DIÉSEL EN EL MANEJO ECOLÓGICO: 4741,25 MJ diésel/ha (datos propios)
 PRODUCCIÓN BIENAL DE GRANO ECOLÓGICO: 1386,78 kg/ha (datos propios)
 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN DEL ETANOL EN MOTORES DIÉSEL: 0,89 MJ etanol/MJ equivalentes diésel (Fredriksson et al., 2006)

KILOGRAMOS DE ETANOL NECESARIO PARA AUTOABASTECIMIENTO: $4741 \text{ MJ diésel/ha} \times 0,89 \text{ MJ etanol/MJ eq. diésel} / 26,8 \text{ MJ/kg etanol} = 157,45 \text{ kg etanol / ha}$

KILOGRAMOS DE GRANO NECESARIO PARA EL AUTOABASTECIMIENTO: 157,45 kg etanol/ha * 4,19 kg grano/kg etanol = **659,72 kg grano / ha**
PORCENTAJE DE GRANO EMPLEADO: $100 * 659,72 \text{ kg grano combustible/ha} / 1386,7 \text{ kg grano producidos/ha} = 47,57 \%$ del grano reemplado para combustible.

ENERGÍA TÉRMICA EN LA ELABORACIÓN DE ETANOL: 27,17 MJ térmica/kg etanol (Lechón et al., 2005)

ENERGÍA INHERENTE DE LA PAJA: 14,09 MJ/kg paja (Naredo y Campos, 1980)

PRODUCCIÓN BIENAL DE PAJA EN EL MANEJO ECOLÓGICO: 2027,06 kg/ha (datos propios)

KILOGRAMOS DE PAJA NECESARIA COMO ENERGÍA TÉRMICA PARA LA ELABORACIÓN DEL ETANOL: $157,45 \text{ kg etanol/ha} * 27,17 \text{ MJ térmica/kg etanol} / 14,09 \text{ MJ/kg paja} = 303,62 \text{ kg paja / ha}$
PORCENTAJE DE PAJA EMPLEADA: $100 * 303,62 \text{ kg paja combustible} / 2027,06 \text{ kg paja producida} = 14,98 \%$ de la paja reemplada como energía térmica para la elaboración de etanol.

Haciendo un cálculo análogo en el manejo convencional, y teniendo en cuenta los reemplazos existentes en el escenario de referencia, el destino de la producción en este escenario quedaría como muestra la tabla 4.1. En ella se han obviado la producción del barbecho, y la exportación electricidad, cuyo peso no es posible cuantificar.

Tabla 4.1 Destino de la producción de grano y paja en el Escenario 1 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ciclo bienal}^{-1}$ y % sobre Producción Bruta)

| Manejo | Producto | Producción Bruta | | Reemplazos | | | | Producción Neta | | | |
|---------------------|----------|------------------|-----|---------------------|------|---------------------|-------|-----------------|-------|--------|-------|
| | | kg/ha | % | Grano para semillas | | Elaboración etanol* | | Grano/Paja | | DDGS | |
| | | | | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % | kg/ha | % |
| Ecológico | Grano | 1386,7 | 100 | 136,8 | 9,87 | 420,42 | 30,32 | 590,28 | 42,57 | 239,32 | 17,26 |
| | Paja | 2027,1 | 100 | - | - | 303,6 | 14,98 | 1723,2 | 85,02 | - | - |
| Convencional | Grano | 1271,9 | 100 | 29,6 | 2,33 | 409 | 32,16 | 600,17 | 47,19 | 232,79 | 18,3 |
| | Paja | 1907,8 | 100 | - | - | 295,3 | 15,5 | 1612,2 | 84,5 | - | - |

Notas: *En el caso del grano, correspondería al Grano empleado para etanol - DDGS

Fuente: Elaboración propia

Para cubrir las necesidades propias de combustible, en el manejo ecológico es necesario dedicar 659,7 kg de grano de los 1386,7 cosechados, es decir, un 47,57 % de la producción de grano. Sin embargo, además del etanol que moverá los tractores, se producen DDGS, que pueden utilizarse para alimentar el ganado, por lo que este porcentaje baja al 30,32 %. De hecho, como veremos más adelante, este reemplazo apenas afecta a la capacidad de carga ganadera del sistema, debido a la alta concentración de nutrientes de los DDGS. También podemos apreciar que la paja utilizada para obtener la energía térmica necesaria para la destilación supone en torno al 15% de la producción de paja. Es importante para la sustentabilidad del sistema que este valor sea relativamente bajo, como es nuestro caso, porque mediante la combustión de la paja, además de calor, se generan gases y cenizas, que además de haber perdido el nitrógeno, tienen un carácter inorgánico y consecuentemente no pueden volver al sistema en forma de compost o estiércol. En el caso del grano, en cambio, se generan DDGS que acaban transformados en estiércol (y también carne) tras pasar por el tracto digestivo del ganado, y por tanto, al menos teóricamente, la mayor parte de los nutrientes pueden volver al sistema como abono orgánico.

4.1.6.2 ENTRADAS DE ENERGÍA

Tabla 4.2 Entrada neta de energía en el Escenario 1 ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ciclo bienal}^{-1}$ y %)

| Escenario | Manejo | Total (CN) | Mano de Obra | Semillas* | | Maquinaria | Fertilizantes | Agrotóxicos | Mejorador Ignición |
|-----------|---------------------|------------|--------------|-----------|------------------|------------|---------------|-------------|--------------------|
| | | | | EI | EP | | | | |
| | | | | 1a | Ecológico | | | | |
| | (%) | 100 | 1,72 | 0 | 0 | 50,71 | 0 | 0 | 47,57 |
| 1b | Convencional | 4630 | 14 | 1288 | 714 | 446 | 1667 | 113 | 389 |
| | (%) | 100 | 0,29 | 27,8 | 15,4 | 9,65 | 36,11 | 2,45 | 8,42 |

Notas: * Sólo incluye la semilla comprada; EI: Energía Inherente; EP: Energía en la Producción

Fuente: elaboración propia

Podemos comprobar cómo la eliminación de la entrada de combustible al sistema ha supuesto una reducción drástica del consumo energético del mismo. Ahora las diferencias los dos estilos de manejo se hacen mucho más patentes, siendo el gasto de energía en el manejo convencional 5,5 veces superior al del ecológico. En este último el grueso de la energía importada viene de la maquinaria y del mejorador de ignición, a partes aproximadamente iguales. La energía de la mano de obra cobra en el escenario 1a un valor relativo apreciable, aunque sigue siendo pequeño, del 1,7 % respecto al consumo energético neto, en contraste con el 0,2 % del escenario base. En el manejo convencional los fertilizantes, que en el análisis del agroecosistema actual tenían poca importancia relativa, pasan a representar el factor más importante junto con las semillas, suponiendo entre ambos el 79,3% de la energía neta consumida.

4.1.6.3 SALIDAS DE ENERGÍA

Tabla 4.3 Salida neta de energía en el Escenario 1 (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹ y %)

| Escenario | Manejo | PN | Grano | Paja | Biomasa Barbecho | DDGS | Electricidad |
|----------------|---------------------|-------|-------|-------|------------------|------|--------------|
| 1 ^a | Ecológico | 40256 | 7732 | 24262 | 4610 | 1239 | 2412 |
| | (%) | 100 | 19,21 | 60,27 | 11,45 | 3,08 | 5,99 |
| 1 ^b | Convencional | 39245 | 7948 | 22700 | 5046 | 1205 | 2346 |
| | (%) | 100 | 20,25 | 57,84 | 12,86 | 3,07 | 5,98 |

Fuente: elaboración propia

Como vemos, la producción neta es menor que en el escenario base -un 18,6% menor en ecológico y un 18,8% menor en convencional-, lo cual se debe a que parte de la energía se ha utilizado para la elaboración de etanol. De esa energía, una fracción se ha transformado efectivamente en etanol (que es reemplazado), DDGS y electricidad (que son exportados), y otra parte se ha perdido en forma de calor residual, como sabemos por la segunda ley de la termodinámica que ocurre en cualquier transformación de la energía. En el manejo ecológico, por ejemplo, se exportan en este escenario 9204 MJ menos que en el escenario base, mientras que se producen 4612 MJ de etanol (que corresponden a la energía inherente del diésel que hemos sustituido, véase apartado 4.1.6.1), 1239 de DDGS y 2412 de electricidad, así que se están perdiendo 941 MJ en forma de calor no aprovechable. Así pues, la reducción tan drástica en las entradas de energía que vimos en el apartado anterior tiene un coste, en forma de reemplazos y pérdidas, que repercute sobre la producción energética final. Pero mientras el consumo en este manejo se redujo 6,8 veces, la producción sólo lo ha hecho un 18,6 %, y esta asimetría se verá reflejada en la ganancia de eficiencia energética que observaremos en el siguiente apartado. Por otro lado, aunque la producción es menor -y de hecho esta reducción es muy grande en el caso del grano, un 47%- , también está más diversificada, de forma que se obtiene, además de los productos anteriores, DDGS y electricidad. Por último, comprobamos que los valores de la producción no muestran diferencias apreciables entre los dos estilos de manejo en este escenario.

4.1.6.4 BALANCE ENERGÉTICO

Hay que hacer una aclaración previa en lo que respecta a los reemplazos. Existen ciertos flujos que son en parte reemplazados y en parte exportados. Tal sería el caso de la paja y el grano utilizados para elaborar etanol. La paja proporciona la energía térmica, y el grano la materia prima que se transformará en etanol, que será reemplazado, pero también DDGS y electricidad, que se exportarán. Ahora bien, tenemos que el consumo bruto es la suma de la mano de obra más importaciones, más reemplazos, pero también que la producción neta es la producción bruta menos los reemplazos. Así, si consideramos la paja y el grano en su conjunto retirados para etanol como reemplazos, la producción neta resultante será menor que la real. Pero si sólo consideramos la energía inherente del etanol, será mayor, porque no se habrán tenido en cuenta las pérdidas por calor. Una posible vía para solucionar este problema, que es la que hemos tomado, sería asumir como reemplazos la paja y grano retirados para etanol menos la producción exportada debida al proceso (DDGS y electricidad).

Tabla 4.4 Balance energético del Escenario 1

| Manejo | PPN (GJ/ha) | Reemplazos (GJ/ha) | CB (GJ/ha) | EEB (GJ/GJ) | PN (GJ/ha) | CN (GJ/ha) | EEN (GJ/GJ) | EG (GJ/ha) | GA (%) | CCG (nº) |
|---------------------|-------------|--------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|--------|----------|
| Ecológico | 51,25 | 10,94 | 11,78 | 4,4 | 40,26 | 0,84 | 49,20 | 7,73 | 92,97 | 2,1 |
| Convencional | 48,74 | 9,5 | 14,13 | 3,45 | 39,25 | 4,63 | 9,53 | 7,95 | 67,87 | 2,1 |

PPN: Producción Primaria Neta (Grano + Paja + Biomasa barbecho); Reemplazos (Grano para semillas + Grano y Paja para combustible - DDGS - electricidad); CB: Consumo Bruto (Reemplazos + Mano de obra + Importaciones); EEB: Eficiencia Energética Bruta (PPN/CB); PN: Producción Neta (PPN - Reemplazos); CN: Consumo Neto (Mano de obra + Importaciones); EEN: Eficiencia Energética Neta (PN/CN); EG: Energía Neta del Grano (Grano - Reemplazo para

semillas – Reemplazo para combustible); GA: Grado de Autonomía (100*Importaciones/CB); CCG: Capacidad de Carga Ganadera ovina.

Fuente: elaboración propia

Aquí podemos comprobar cómo la eliminación de la importación de combustible significa para el manejo ecológico alcanzar una EEN de 49 unidades de energía obtenidas por cada una invertida, lo que ya la sitúa en el rango de los agroecosistemas tradicionales, destacando, por ejemplo, bien por encima de las 23 obtenidas por Campos y Naredo (1980) en el cultivo al tercio en el valle del Guadalquivir. Paralelamente, la autonomía ha experimentado otra subida muy importante, llegando a un 93% de energía propia respecto al total utilizado. El manejo convencional, en contraste, sólo alcanza una EEN de 9,5%, lo que significa que en este escenario las diferencias en la eficiencia energética se han amplificado respecto al escenario 0, pues si en aquél el ecológico era un 68% más eficiente, en éste lo es un 416%. La reducción de la energía exportada, tanto neta (PN) como del grano (PG) es, sin embargo, similar en ambos tipos de manejo. La capacidad de carga ganadera apenas resulta afectada por la reducción de grano, debido a que los DDGS contienen la mayor parte de la proteína bruta (que era el limitante de la capacidad de carga en el escenario 0) del grano utilizado para etanol. Este hecho apunta a que el mantenimiento de los niveles de productividad en este escenario pueda estar asociado a la vocación ganadera de la producción.

Tabla 4.5 Energía no renovable en el Escenario 1

| Manejo | ENR (GJ/ha) | EENR (GJ/GJ) | ENRG (GJ/GJ) | IE (MJ/kg) |
|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Ecológico | 0,78 | 51,83 | 9,96 | 1,32 |
| Convencional | 3,13 | 12,54 | 2,54 | 5,21 |

ENR: Consumo de Energía No Renovables; EENR: Eficiencia de la Energía No Renovables (PN/ENR); ENRG: Eficiencia de la Energía No Renovables en relación a la Producción de Grano (EG/ENR); IE: Intensidad Energética (ENR/kg Grano)

Fuente: elaboración propia

Observamos una reducción muy acusada del consumo de ENR, que se sitúa en niveles singularmente bajos en el manejo ecológico, de 0,78 GJ/ha. Para hacernos una idea del potencial de ahorro de ENR de una agricultura ecológica con autabastecimiento de combustible, hay que recordar que el consumo energético neto medio -del cual la mayor parte es ENR- de la agricultura española es de 17 GJ/ha (Carpintero y Naredo, 2006). El manejo convencional también ha experimentado una reducción importante en la ENR, llegando a 3,1 GJ/ha, pero hay que recordar que el consumo de agroquímicos en este agroecosistema particular es singularmente bajo. La eficiencia de la ENR (EENR y EENRG) experimenta subidas similares a la EEN, de nuevo magnificándose las diferencias entre ecológicos y convencionales. La ENRG y la IE en el manejo convencional en este escenario son inferiores a las del manejo ecológico en el cultivo actual, y la EENR muy similar. Si tenemos en cuenta la reducción de la producción en este escenario, vemos que para los agricultores convencionales la conversión a agricultura ecológica sería mucho más aconsejable que la elaboración de combustible para consumo propio, si el objetivo es la reducción de la dependencia de la ENR. En realidad, lo que sucede es que este tipo de objetivos no son los propios de un estilo de agricultura cuya finalidad principal es la maximización de la productividad a corto plazo.

4.2 ESCENARIO 2: ACEITE DE CARDO COMO COMBUSTIBLE

4.2.1 EL USO DE ACEITES VEGETALES O SUS DERIVADOS COMO COMBUSTIBLE

El biodiésel es el más común de los derivados de aceites vegetales usados como combustible. Es un líquido que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales, combinados con un alcohol. Es biodegradable y no tóxico. Sus propiedades físico químicas son similares a las del gasóleo. De hecho, con los orígenes del uso de aceites vegetales como combustible de los motores ocurre algo análogo a la historia del etanol. Los primeros prototipos del motor diesel, diseñados por Rudolph Diesel a finales del siglo XIX y principios del XX, funcionaban con aceite de cacahuete, y la idea del creador era que funcionasen con cualquier tipo de combustible. Pero la irrupción del petróleo barato inundó el mercado de keroseno y luego gasóleo, que borró del mapa a los combustibles derivados de vegetales hasta la crisis energética de los 70 (Pahl, 2005).

Alemania es el primer productor mundial de biodiésel, con casi 2.000 millones de litros anuales, seguida de lejos por Francia, con unos 500 millones (Licht, 2006, en Ballenilla, 2007). El biodiésel es el agrocarburante más ampliamente producido en Europa, donde las materias primas más comunes son girasol y colza. En España sólo el 11,2% de las materias primas usadas para la elaboración de biodiésel son de producción nacional. Además de girasol y colza se emplean soja y palma africana importadas

(CIEMAT, 2006). En Andalucía existen tres plantas en funcionamiento que producen biodiésel a partir de aceites vegetales crudos. En total tienen capacidad para procesar 190.000 toneladas anuales. Además, hay 18 plantas más, incluyendo de aceites crudos y usados, en fase de construcción o proyecto, que sumarían una capacidad de producción de 2.337.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep) anuales (AAE, 2008).

El aceite crudo que se emplea como materia prima se puede obtener por prensado o por separación química a partir de una variedad de cultivos oleaginosos. Aquí aparece el principal escollo: la producción de aceite implicaría un cambio en los cultivos empleados, porque que en el secano de Orce no se cultiva ningún tipo de oleaginosa, excepto 55 hectáreas de olivar (DAP, 2001), cuyo aceite sería descabellado usar como combustible. El principal problema sería encontrar el cultivo más adecuado para la zona, y comprobar si sería energéticamente rentable su cosecha, ya que las restricciones climáticas son muy fuertes en Orce. Precisamente esa rigurosidad climática nos hace dudar de la aptitud del girasol y la colza. La soja y la palma tampoco sería posible cultivarlas en el secano del altiplano granadino. Por tanto habría que recurrir a cultivos menos comunes. La jatrofa (*Jatropha curcas*) está teniendo una gran expansión en terrenos marginales de todo el mundo, pero su sensibilidad a las heladas la hace también inviable en nuestro caso. De los restantes el cardo (*Cynara cardunculus* L.) y puede que también el cártamo (*Carthamus tinctorius*) aparecen como los más promisorios por su tolerancia al frío y a la sequía, y su elevada producción de biomasa y semillas oleaginosas. Así pues, podemos proponer la inclusión del cardo en el agroecosistema como una forma de diversificación productiva con potencial de mejorar su balance energético y su autonomía.

4.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO DEL CARDO

Cynara cardunculus es una especie herbácea perenne que según estudios recientes incluye a la alcachofa y a variedades silvestres y cultivadas de cardo (Fernández, 2006). Pertenece a la familia de las compuestas (Asteraceae), como la manzanilla, la lechuga, el cártamo o el girasol. Es originaria de la región mediterránea, pero puede adaptarse a zonas de clima más continentalizado. Durante su ciclo natural brota en otoño y pasa el invierno en un estado de roseta, que resiste bastante bien las heladas. El cardo presenta una buena capacidad para realizar la fotosíntesis a bajas temperaturas, lo que le permite almacenar los hidratos de carbono como sustancias de reserva y para el desarrollo radicular. En primavera desarrolla un tallo floral ramificado de hasta tres metros de altura que se seca en verano, permaneciendo vivas las raíces. Al comenzar un nuevo otoño los brotes de la parte superior de las raíces generan una nueva roseta, continuándose de este modo el ciclo durante varios años sin que sea necesario efectuar nuevas siembras. Tiene un sistema radicular pivotante profundo, formado por varias raíces principales que pueden penetrar a varios metros de profundidad, que le permite alcanzar altas productividades en climas semiáridos. Requiere suelos calizos y profundos, con capacidad para retener agua en la zona del subsuelo, entre los 1,5 y los 3 metros (Verissimo, 1999; Fernández, 2006). Estas características parecen corresponderse bien con las condiciones de Orce.

Como dato que quizá tenga cierta relevancia, en Orce observé unos cardos de 1,5-2 metros de altura en los bordes de los caminos que cruzaban los campos de cereal, muchos de los cuales estaban sin cosechar por la sequía de este año. Estos cardos eran de una especie parecida, el cardo borriquero, *Onopordum nervosum* Boiss., la cual es una especie bienal, endémica de la península ibérica y que tiene una productividad algo menor que *Cynara cardunculus*, de 8,9-14,5 t m.s. por hectárea (Fernández et al., 1985, en Verissimo, 1999). A pesar de no ser la misma especie, su presencia allí nos indica que algunas plantas de la tribu Cardue son capaces de producir grandes cantidades de biomasa en condiciones tan severas para el cereal como las de Orce. Además, estudios realizados en Sicilia muestran que hay poblaciones silvestres con una amplia variabilidad en la tolerancia a la salinidad y al estrés hídrico, por lo que tienen un gran potencial para servir como material genético para la selección de líneas que puedan servir para el cultivo en esas condiciones (Raccuia et al., 2002).



Onopordum nervosum Boiss. en Orce

El cardo presenta otras ventajas: al ser un cultivo perenne, protege el suelo de la erosión durante todo el año. También tiene otros usos que pueden complementar su empleo directamente energético. En concreto, produce fibras que pueden tener múltiples aplicaciones en la industria, constituyendo potencialmente una fuente de ingresos adicional para los agricultores. Las flores inmaduras, pecíolos y raíces son comestibles, y esta planta se usa además como fermento en la elaboración de quesos. El aceite contenido en las semillas también es comestible, así como la torta obtenida tras su extracción, que puede ser empleada como alimento del ganado (Portis, 2005). También pueden utilizarse en la alimentación del ganado las hojas y tallos, especialmente frescos (Carjaville, 1996). Tanto los tallos y ramas como la médula de su interior son ricos en celulosa y hemicelulosa, por lo que son adecuados para la fabricación de pasta de papel. Asimismo, los vilanos plumosos adheridos a la semilla y los pelos del receptáculo de los capítulos pueden emplearse como materia prima para fabricar papel de alta calidad (Fernández, 1992, en Falasca, 2004).

Como inconvenientes, señalaremos la baja proporción de la biomasa total que suponen los aquenios de los que se extrae el aceite, lo que significa que la mayor parte de la energía contenida en la biomasa de cardo está en forma de biomasa lignocelulósica, y no de aceite, que es la materia prima que nos interesa en nuestro estudio por su potencial como carburante. También es importante la relativa dificultad de recolección con la maquinaria presente en el mercado. La disposición de los capítulos, a diferentes alturas (entre 1 y 3 metros), supone un problema para su recogida mediante cosechadora de cereales, lo que implica que parte de la cosecha se pierda durante esta tarea. Si bien se están realizando investigaciones prometedoras en este sentido (Fernández et al., 2007), lo cierto es que todavía no hay maquinaria especializada en el mercado.

El aprovechamiento directamente energético será el único que consideremos en este trabajo. La producción de biomasa en el secano mediterráneo es muy elevada: el rendimiento medio con una pluviometría de 450-550 mm es de 15 toneladas de materia seca por hectárea (AAE, 2008). Esto contrasta, por ejemplo, con la producción convencional de cebada en similares condiciones, que rinde 1,6 toneladas anuales de grano por hectárea (Meco y Lacasta, 2006). Asumiendo un 15,5% de humedad en el grano y la paja de cebada, y un índice de cosecha de 0,4, esto supone 3 t m. s. por hectárea, es decir, una productividad cinco veces menor que la del cardo.

Las inflorescencias o capítulos, que en realidad son un conjunto de flores, representan aproximadamente un tercio del peso de la biomasa aérea total. Los aquenios (frutos, o también denominados, aunque erróneamente, semillas) representan el 8-10% de la biomasa aérea (Fernández et al., 2007). Esto significaría unas producciones medias de frutos de 1200-1500 kg/ha en estas condiciones. Los aquenios contienen un 25% de aceite (Encinar et al., 2002; Fernández y Curt, 2006), que puede ser fácilmente

extraído mediante el prensado en frío de los frutos (Fernández y Curt, 2006), por lo que a producción media de aceite en estas condiciones sería de unos 300-375 litros por hectárea.

4.2.3 CULTIVO DE CARDO BAJO MANEJO CONVENCIONAL

El manejo convencional es el único del que disponemos de datos experimentales de productividad del cardo. Es por eso que se ha decidido su inclusión, a pesar de que su aportación a la mejora de la sustentabilidad del sistema estaría bastante limitada. Los datos de manejo que se describen a continuación están tomados de Fernández (2006). Para el cálculo del balance energético, se han tomado los valores medios de cada labor obtenidos en el apartado 3.3.1. Las labores que se realizan en el cultivo de cardo y que no tienen una correspondencia directa con ninguna de las efectuadas en el cereal se han equiparado energéticamente a la labor más parecida, como se comentará en cada caso. Se ha asumido una duración del cultivo de 7 años. La siembra y el abonado de fondo sólo se realizan una vez. El primer año la cosecha es menor que en el resto, así que asumiremos un rendimiento del 50% ese año.

La siembra se realiza normalmente en otoño. Para que las heladas no dañen las plántulas, se recomienda sembrar 1-2 meses antes de los primeros helos, de manera que haya tiempo suficiente para que se forme la roseta. Como abonado de fondo, se recomiendan de forma orientativa 500 kg/ha de NPK 9:18:27. Antes de la siembra, se recomienda dar previamente una labor de subsolado para facilitar la penetración de las raíces hacia las zonas profundas del suelo. La labor de subsolado la equipararemos energéticamente a una de vertedera. A continuación se puede realizar la operación de alzar el rastrojo de la cosecha anterior (que equipararemos a un pase de cultivador), seguida de un par de pases cruzados de cultivador o de grada para preparar el terreno para la siembra. Esta se realiza en líneas separadas 75-80 cm aproximadamente, con una distancia entre plantas variable según la densidad requerida. Es recomendable realizar la siembra con una sembradora de precisión colocando los golpes bastante próximos (unos 10 cm) con un consumo aproximado de semilla de unos 4-5 kg/ha. Normalmente las plantas más vigorosas sobreviven a sus vecinas de la línea, quedando al final a una densidad aproximada de unas 15.000-20.000 plantas/ha. Tras la siembra se da un pase de rulo.

En este trabajo no consideraremos ningún tratamiento insecticida del suelo, si bien podría ser necesario en caso de que existan insectos que ataquen al cultivo en estado de plántula (rosquillas). El tratamiento herbicida se aplicaría tras la siembra y antes de la emergencia del cultivo, y estaría en función de la flora presente en el lugar, teniendo en cuenta que la sensibilidad del cardo a los herbicidas en la nascencia es similar a la del girasol. Se ha asumido que se aplican 2 litros de Duvaster 48 (Alacloro, 48%), que tiene una energía asociada de 133,2 MJ/l. En el segundo año del cultivo, si éste está bien implantado, el rápido desarrollo de la roseta de hojas basales hace innecesario el control de las malas hierbas. Los cardos pueden ser atacados por diferentes plagas, entre las que cabe citar los pulgones (*Aphis* spp.), casida (*Cassida deflorata* Suff.), vanesa de los cardos (*Pyrameis cardui* L.), taladro o barrenador (*Gortyna xantenes* Germ.), pulguilla (*Sphaeroderma rubidum* Graells) y apión (*Apion carduorum* Kirb.), entre otras, así como los gusanos grises del suelo (*Agrostis segetum*) y la rosquilla negra (*Spodoptera litoralis*), también del suelo. Entre las principales enfermedades posibles causadas por hongos cabe citar el mildiú, el oidio, la viruela de las hojas y la podredumbre gris, aunque no son frecuentes. No hemos incluido en nuestro balance ningún tratamiento insecticida o fungicida, en consonancia con el cultivo convencional de cereal en Orce.

A partir del segundo año, se deben dar abonados de restitución en otoño principalmente. A veces, la acumulación de nutrientes procedentes de la lixiviación del abonado de cultivos anteriores puede evitar durante algunos años la operación de abonado. Según cifras medias obtenidas experimentalmente, una cosecha de biomasa integral de cardo extrae por cada tonelada (con el 15% de humedad) 9 kg de N, 1,4 kg de fósforo (equivalente a 3,22 kg de P₂O₅) y 12,7 kg de potasio (equivalente a 15,24 kg de K₂O). La dosis anual de abono se ha calculado en función de estos datos y de la producción estimada de biomasa. Este último parámetro puede ser conflictivo, porque la ausencia de estudios en el terreno implica un fuerte grado de incertidumbre. Finalmente, se ha estimado en 13,56 t m.s./ha, a partir del rendimiento medio obtenido en años con pluviometrías inferiores a 400 mm en los experimentos realizados en varios países mediterráneos reseñados en Fernández (2006). Esta producción de materia seca equivale a 15,6 t/ha de biomasa con un 15% de humedad. La dosis de abono en nuestro caso, por lo tanto, sería de 140,4 kg/ha de nitrógeno, 21,84 kg/ha de fósforo y 198,12 kg/ha de potasio. Después del abonado se entierra el fertilizante con un pase de cultivador y a continuación se da un pase de rulo para enterrar las piedras, si las hubiere.

En el manejo convencional se asume que se cosecha toda la biomasa para la obtención de energía eléctrica, lo que se realiza con una eficiencia del 30%. En la cosecha, considerando que se quiere la semilla separada para extraer el aceite, hay que efectuar las siguientes operaciones: a) pase de cosechadora, b) pase de rastrillo hilerador de la biomasa y c) empacado.

4.2.4 CULTIVO DE CARDO BAJO MANEJO ECOLÓGICO

La ausencia de datos bibliográficos respecto al cultivo ecológico del cardo nos obliga a proponer un manejo para poder realizar el balance energético. En este caso de nuevo nos encontramos con que el principal problema, y esta vez agravado, es la estima de la productividad: la ausencia de referencias implica que cualquier estimación corre el riesgo de chocar con una realidad distinta. Hemos supuesto un descenso en la productividad del 30,6% en el cultivo ecológico frente al convencional, de acuerdo con los resultados obtenidos por Alonso et al. (2009) en un estudio que compara cultivos extensivos convencionales y ecológicos en toda España.

La producción de biomasa tan elevada en relación con el cereal hace dudar de la posibilidad de un manejo sin fertilización exógena y con escaso reciclaje de biomasa como el que se realiza actualmente en la rotación cerealista. Nos encontraríamos, pues, con el problema añadido de encontrar un método adecuado de fertilización. Descartamos la fertilización química, por razones obvias en un sistema ecológico, y también los fertilizantes orgánicos comerciales, por ser demasiado caros para cultivos extensivos de estas características. Podríamos pensar en el estiércol de oveja, pero su distribución es energéticamente costosa, en especial en cuanto a consumo de combustible. Esto implicaría una mayor superficie de cardo para lograr la autosuficiencia en este insumo. La opción que queda es el aprovechamiento de la biomasa del cardo como fuente de fertilización. Esta estrategia puede ser insostenible a largo plazo, como también lo es el cultivo tradicional de cereal de año y vez tal como se realiza actualmente en Orce en el manejo ecológico, donde existe una extracción neta de nutrientes del suelo que no es suficientemente compensada por las aportaciones –en el caso del cereal estas aportaciones se limitan al estiércol excretado por las ovejas durante el rastrojeo-. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta extracción es muy pequeña en relación a la cantidad total de nutrientes en el suelo, por lo que estos efectos no se aprecian a corto-medio plazo. Como ejemplo, vemos que en los citados experimentos de larga duración en La Mancha la productividad se mantiene en el manejo sin fertilización exógena durante los más de 10 años de duración del experimento (Lacasta et al., 2008). En el caso del manejo propuesto para el cultivo ecológico de cardo, la extracción se limitaría a la semilla –cuyo aceite se usará para los tractores y la torta para alimentar el ganado–, que representa apenas el 10% del total de biomasa producida. Así pues, vamos a suponer que tras la cosecha de los capítulos la biomasa se pica in situ y se entierra superficialmente. La decisión de no cosechar la biomasa, que podría comprometer en cierta medida el balance energético final, sería una apuesta por mejorar la fertilidad a largo plazo del suelo en el agroecosistema de secano en su conjunto, asumiendo que el cardo se cultiva como un bloque dentro de la finca, cuyo uso queda inmovilizado durante el tiempo de cultivo del cardo, pero que se va rotando tras esos siete años dejando a su paso un suelo enormemente enriquecido de materia orgánica. Esta labor de fertilización se vería facilitada por disposiciones espaciales del cultivo que permitiesen repartir la materia orgánica con el cereal adyacente.

El resto del manejo muy similar al convencional, excepto por la no aplicación de herbicidas en este caso. Un pase de subsolador, alzado de los rastrojos y dos cruzados de cultivador para preparar el terreno, siembra con sembradora de precisión y pase de rulo tras la siembra el primer otoño. En los sucesivos veranos, la biomasa no cosechada se picaría y se enterraría con un pase de cultivador. En cuanto a la operación de cosecha, se realizaría mediante un pase de cosechadora y otro de picadora. La energía de la tarea de picado de biomasa la equipararemos a la del empaçado.

4.2.5 BALANCE ENERGÉTICO DEL CULTIVO CONVENCIONAL Y ECOLÓGICO DE CARDO

4.2.5.1 ENTRADAS DE ENERGÍA

Tabla 4.6 Entrada neta de energía en el cultivo de cardo ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ciclo bienal}^{-1}$)

| Escenario | Manejo | Total (CN) | Mano de Obra | Maquinaria | Combustible | | Fertilizantes | Agrotóxicos |
|-----------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|------|---------------|-------------|
| | | | | | EI | EP | | |
| 0a | Ecológico | 6829 | 18 | 456 | 5713 | 642 | 0 | 0 |
| | (%) | 100 | 0,27 | 6,67 | 83,66 | 9,4 | 0 | 0 |
| 0c | Convencional | 27250 | 20 | 537 | 6204 | 697 | 19715 | 76 |
| | (%) | 100 | 0,07 | 1,97 | 22,77 | 2,56 | 72,35 | 0,28 |

Notas: EI: Energía Inherente; EP: Energía en la Producción
Fuente: elaboración propia

El consumo energético en el manejo ecológico es muy similar al del cereal, con una distribución entre sus factores también análoga: a grosso modo un 93% de combustible y 7% de maquinaria. En el manejo convencional que hemos propuesto para el cultivo de cardo, en cambio, llama la atención, en relación a los niveles de consumo energético que hemos visto en el cultivo de cereal, la energía asociada al fertilizante que obtenemos, de 19,7 GJ/ha. Esto se debe a que la extracción de biomasa es mucho mayor, lo que, en un manejo que no internaliza sus flujos de nutrientes, obliga a reponerlos mediante la aportación de otros de origen sintético.

4.2.5.2 SALIDAS DE ENERGÍA

En el cultivo ecológico la paja se incorpora al terreno y no constituye una salida. En el convencional se transforma en electricidad con una eficiencia del 30%. La energía de los aquenios se ha calculado a partir del contenido energético del aceite (37 MJ/kg), que constituye un 25% del peso del aquenio, y de la proteína (17 MJ/kg), que representa un 20%. El resultado es una energía contenida en los aquenios de 12,65 MJ/kg. Esta energía está subestimada, porque sólo contiene las fracciones anteriormente mencionadas, pero como no teníamos datos específicos hemos preferido ser conservadores y hacer el cálculo a partir de las fracciones del fruto que seguro que serán aprovechadas: el aceite por los tractores y la proteína por las ovejas.

Tabla 4.7 Salida neta de energía en el cultivo de cardo (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹ y %)

| Manejo | PN | Aquenios | Electricidad |
|---------------------|---------|----------|--------------|
| Ecológico | 19.897 | 19.897 | 0 |
| (%) | 100 | 100 | 0 |
| Convencional | 142.423 | 28.671 | 113.769 |
| (%) | 100 | 20,2 | 79,8 |

Fuente: elaboración propia

La producción de aquenios constituye la única salida en el manejo ecológico. A pesar de su baja proporción relativa en el total de la biomasa producida, y de la reducción del 30,6% que hemos asumido en este manejo respecto al convencional, la producción es mayor que la de grano de cereal (escenario 1a), con la ventaja para el tema que nos ocupa de contener aceite que puede emplearse sin transformaciones como combustible. Por su parte, la producción en el manejo convencional destaca muy por encima de la del cereal, incluso habiendo asumido que no se exporta la biomasa tal cual, sino que se transforma previamente en electricidad con pérdidas del 70%, poniendo de manifiesto la aptitud del cardo como cultivo energético

4.2.5.3 BALANCE ENERGÉTICO

Tabla 4.8 Balance energético del Cultivo de Cardo

| Manejo | PPN (GJ/ha) | Reempleos (GJ/ha) | CB (GJ/ha) | EEB (GJ/GJ) | PN (GJ/ha) | CN (GJ/ha) | EEN (GJ/GJ) | EG (GJ/ha) | GA (%) | CCG (nº) |
|---------------------|-------------|-------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|--------|----------|
| Ecológico | 283,08 | 263,2 | 270 | 1,04 | 19,9 | 6,83 | 2,91 | 19,9 | 97,48 | - |
| Convencional | 407,9 | 0,02 | 27,27 | 14,96 | 142,42 | 27,25 | 5,23 | 28,65 | 0,27 | - |

PPN: Producción Primaria Neta (Grano + Paja); Reempleos (Grano para semillas + Biomasa incorporada); CB: Consumo Bruto (Reempleos + Mano de obra + Importaciones); EEB: Eficiencia Energética Bruta (PPN/CB); PN: Producción Neta (PPN – Reempleos – Pérdidas); CN: Consumo Neto (Mano de obra + Importaciones); EEN: Eficiencia Energética Neta (PN/CN); EG: Energía Neta del Grano (Grano – Reemplazo para semillas); GA: Grado de Autonomía (100*Importaciones/CB); CCG: Capacidad de Carga Ganadera ovina.

Fuente: elaboración propia

Para el cálculo de la PN en el manejo convencional, se le ha restado a la PPN las pérdidas debidas a la generación de electricidad, además de los reempleos. La PPN nos da una idea de la productividad de este cultivo obviando la generación de electricidad si, por ejemplo, se fuese a usar con fines térmicos u otros. En este caso, para el manejo convencional, la eficiencia energética neta correspondería aproximadamente al valor de EEB que aparece en la tabla, dado que apenas existen reempleos. En el indicador de PPN queda reflejada también la reducción de cosecha que hemos supuesto para el manejo ecológico.

Podemos apreciar que las diferencias entre ecológico y convencional son muy grandes en todos los indicadores, debido a la distinta configuración de los flujos físicos existente entre ambos. La elevada productividad condiciona una alta extracción de nutrientes del suelo que en el manejo convencional son

repuestos mediante su importación del exterior, y en el manejo ecológico mediante el reciclado de la mayor parte de la biomasa. A resultas de esta situación, los reempleos son casi inexistentes en el convencional (únicamente la semilla, cuyo valor cuantitativo es insignificante en este cultivo), mientras que alcanzan cifras que se acercan a la propia PPN en ecológico, lo que provoca que en este manejo la EEB se aproxime a 1. Del mismo modo el CN es relativamente bajo en ecológico, y muy elevado en convencional, y la producción muy pequeña en el primero en relación al segundo. En términos de EEN, la situación se resuelve a favor del convencional, pero vemos que la dependencia de este manejo del exterior es muy fuerte, pues su autonomía no alcanza el 0,5% mientras que la del ecológico llega al 97,5%. Aquí hay que aclarar que esta autonomía tan elevada en el manejo ecológico está enmascarando su dependencia del combustible, cuyo valor queda empequeñecido en términos relativos al relacionarlo con la gran cantidad de biomasa reempleada, pero que sigue siendo elevado en términos absolutos. La capacidad de carga ganadera no es aplicable al cultivo de cardo en las condiciones que hemos propuesto, porque no sería posible alimentar a las ovejas únicamente con aquenios. Por tanto, para ver la influencia del cultivo de cardo sobre la capacidad de carga, habremos de mirar los balances del este escenario (apartado 4.2.9.4), donde se combina el cultivo de cardo con el de cereal.

Tabla 4.9 Energía no renovable en el Cultivo de Cardo

| Manejo | ENR (GJ/ha) | EENR (GJ/GJ) | ENRG (GJ/GJ) | IE (MJ/kg) |
|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Ecológico | 6,74 | 3,4 | 3,4 | 3,72 |
| Convencional | 25,97 | 5,48 | 1,1 | 11,46 |

ENR: Consumo de Energía No Renovable; EENR: Eficiencia de la Energía No Renovable (PN/ENR); ENRG: Eficiencia de la Energía No Renovable en relación a la Producción de Grano (EG/ENR); IE: Intensidad Energética (ENR/kg Grano)

Fuente: elaboración propia

En los indicadores relacionados con la ENR no sale tan bien parado el manejo convencional, a pesar de su gran exportación de energía, debido a que consume casi 26 GJ/ha de ENR (de los que 18,5 GJ corresponden a los fertilizantes). Así, en el indicador que relaciona este factor con la PN (EENR), el resultado es algo superior para el convencional, pero en los dos indicadores que la relacionan con la producción de grano (ENRG e IE), el manejo ecológico resulta ser más ahorrador de este recurso.

4.2.6 ¿ACEITE CRUDO O BIODIÉSEL COMO COMBUSTIBLE?

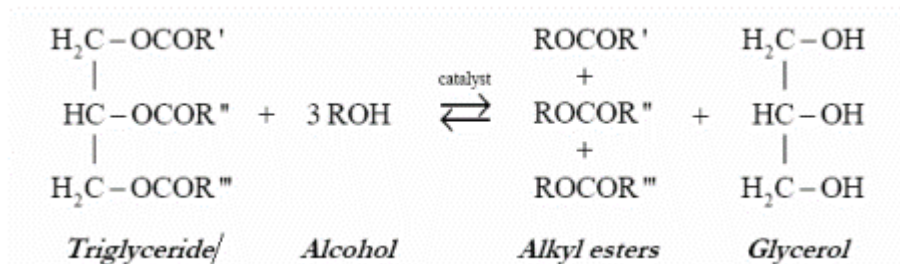
Hay dos alternativas para el aprovechamiento en la tracción agrícola del aceite de la semilla del cardo, entre las que hay que escoger para nuestra propuesta: la transesterificación del aceite para producir biodiésel, y el uso directo del aceite en los motores. Hemos escogido esta última opción para la realización del balance energético del cardo. No obstante, hemos creído conveniente comentar también, aunque sea brevemente, el proceso de producción de biodiésel.

4.2.6.1 BIODIÉSEL: TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE CARDO

Como se ha comentado, el comportamiento en los motores del biodiésel es muy similar al del diesel convencional, por lo que puede ser usado directamente como sustituto sin necesidad de mezclas ni de modificaciones en el motor. El biodiésel no se inventó hasta hace relativamente poco, en 1973, en un intento de adaptar los aceites vegetales a los motores diesel convencionales (Pahl, 2005).

El biodiésel es un combustible líquido que se obtiene mediante la transesterificación de los ácidos grasos de los aceites vegetales o grasas animales con un alcohol de cadena corta (normalmente metanol) en presencia de un catalizador, que suele ser NaOH o KOH. El aceite se compone principalmente de triglicéridos, que están formados por un esqueleto de glicerina con radicales ácidos grasos en el lugar de los grupos hidroxilos. La transesterificación es una reacción entre los triglicéridos y el alcohol de cadena corta, que libera glicerol y los ésteres de ácido graso del respectivo alcohol, conocidos como biodiésel. Durante la reacción de transesterificación, un mol de triglicérido reacciona con tres moles de alcohol para formar un mol de glicerol y tres moles de los respectivos ésteres de ácidos grasos (Pascualino, 2007). La reacción general se muestra a continuación:

Figura 4. Reacción de transesterificación



Fuente: Pascualino, 2007

Normalmente se usa metanol en exceso, concretamente una proporción molar de 6:1, el doble de su relación estequiométrica en la reacción. El metanol sobrante se recupera y se reutiliza (Pascualino, 2007). El metanol se puede destilar a partir de la fermentación de la madera, con una eficiencia de 0,53 (Giampietro et al., 1997). Sin embargo, la mayoría del metanol usado para elaborar biodiésel es de origen fósil (Lechón et al., 2005). Como coproducto se genera glicerina, que tiene múltiples usos en la industria, aunque actualmente la demanda está limitada y es cinco veces inferior a la producción potencial asumiendo que se cumpliera el objetivo europeo del 5,75% de consumo de biodiésel en 2010 (Mata, 2006).

El aceite de cardo sin refinar tiene un rendimiento en la producción de biodiésel de sólo el 88%, debido a que el alto contenido de FFA interfiere en el proceso de transesterificación. Además, la formación de jabones dificulta el proceso. Se recomienda, por tanto, una fase de pretratamiento, que constaría de dos etapas. En la primera, de *deguming*, se eliminan los fosfolípidos mediante la adición de agua en agitación a 60° C, y una centrifugación para retirar los fosfolípidos disueltos. Luego se elimina el agua restante mediante calentamiento a 105° durante una hora. En la segunda, de *pre-esterificación*, se reduce la FFA mediante la adición de un 0,5% de ácido sulfúrico (H₂SO₄) en agitación a 60° C. El H₂SO₄ y el exceso de metanol se lavan con agua destilada, que de nuevo se elimina mediante centrifugación y calentamiento (Pascualino, 2007). Se podría calcular si este paso es energéticamente más o menos rentable que la utilización directa del aceite sin refinar.

4.2.6.1 UTILIZACIÓN DIRECTA DEL ACEITE: PRENSADO Y MODIFICACIONES EN EL MOTOR

La utilización directa del aceite evita la necesidad de fabricar el biodiésel, por lo que se simplifica el procesado del cardo desde la cosecha. Este procesado se limitaría a la separación de los aquenios del resto del capítulo y su prensado para obtener el aceite. Se ha asumido que la energía asociada al **prensado** es electricidad, a razón de 0,36 MJ/kg semilla, de acuerdo con Bernesson et al. (2004, en Friedriksson et al., 2006). Esto equivaldría a 1,44 MJ/kg aceite, a partir de un contenido de aceite en la semilla del 25%.

Los aceites vegetales tienen propiedades distintas a las de los combustibles diésel, como se puede ver en la tabla.

Tabla 4.10 Algunas propiedades físico-químicas del aceite vegetal, biodiésel y diésel

| Propiedad | Aceite vegetal | Biodiésel | Diésel |
|-------------------------------|----------------|------------|--------|
| Densidad (kg/m ³) | 916-924 | 880 | 835 |
| Viscosidad (cp-20°C) | 65,8-77,8 | 7,5-8,0 | 5,1 |
| Visosidad (cp-50°C) | 25,7-34,9 | 3,8-4,2 | 2,6 |
| Número de Cetano | 33-51 | 45-56 | >45 |
| Residuo de Carbono % | 0,25-0,42 | 0,02-0,05 | 0,15 |
| Sulfuro % | 0,0001-0,01 | 0,002-0,01 | 0,29 |

Fuente: Pascualino, 2007

Algunos datos relevantes son su mayor densidad, viscosidad y punto de ignición, y un menor número de cetano, contenido de azufre y valor calorífico. De estos aspectos, destaca especialmente la mayor viscosidad. Su uso directo en los motores genera problemas a largo plazo. Existen problemas de inyección, de baja atomización del combustible, combustión incompleta, formación de depósitos, dilución y degradación del lubricante, etc. (Srivastava, 2000). Por tanto es necesario modificar el aceite o el motor para hacerlos compatibles. La modificación del aceite ya vimos que consistía en la elaboración de

biodiésel, que implicaría la importación de un alcohol (metanol o etanol). La modificación en el motor, según una empresa que realiza esta operación (Elsbett, 2008) debe incluir los siguientes puntos para adaptarlo a las características del aceite:

- Pre calentamiento del combustible, conducciones de combustible o motor
- Modificaciones del sistema de combustible/bombas
- Filtros adicionales
- Ajuste del control electrónico del motor
- En caso de conversión de un tanque, posible modificación del sistema de inyección
- Elementos de control y relés

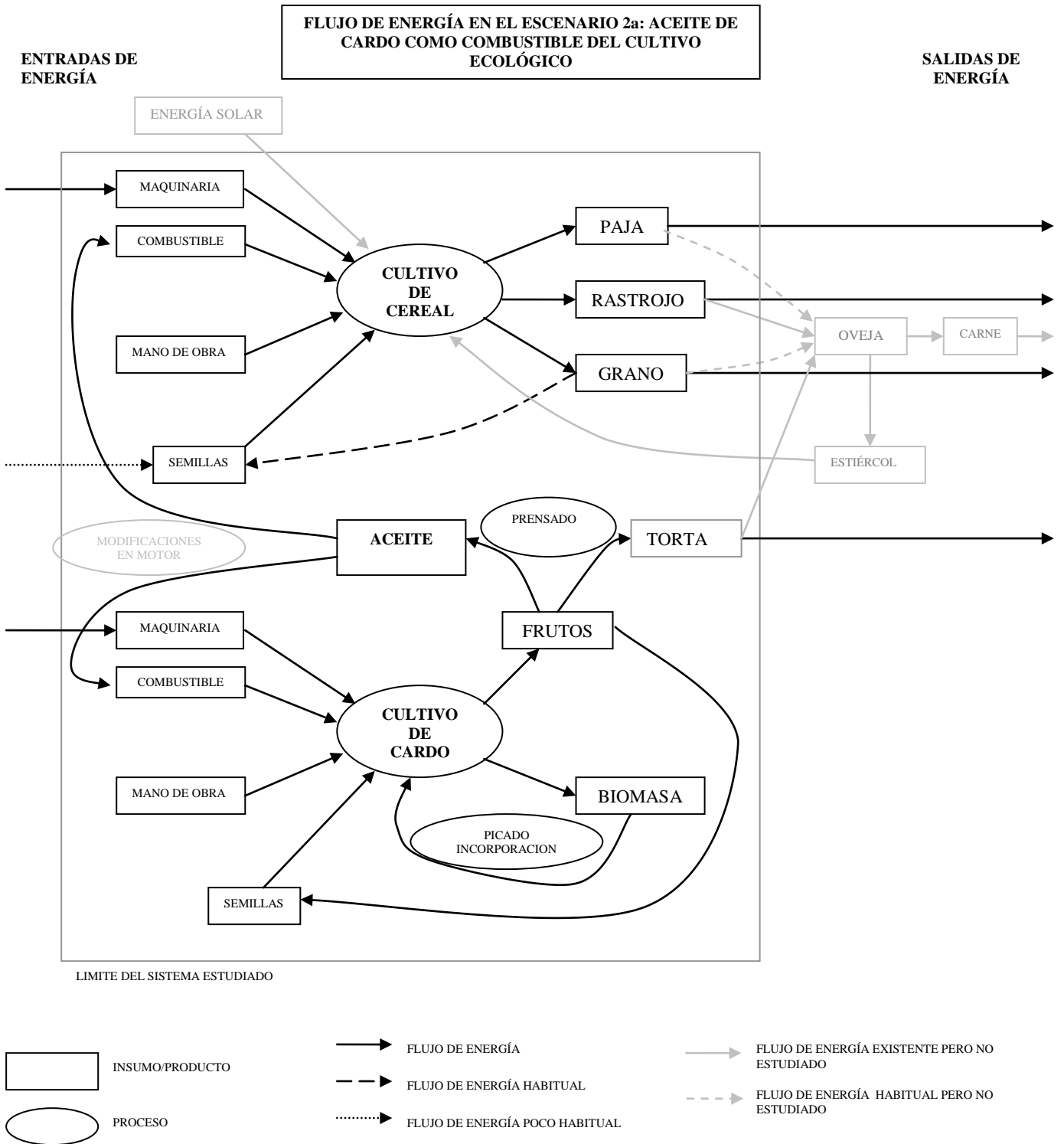
Así, la empresa anteriormente citada ofrece un "kit de conversión para aceite vegetal con las características técnicas específicas para casi todos los modelos agrícolas populares", que incluye una guía de montaje y necesitaría para su instalación de dos o tres días de trabajo de un montador entrenado. Esta modificación usa un sistema de dos tanques de combustible, lo que haría necesaria la adquisición por el agricultor de un tanque suplementario, además del kit ofrecido por la empresa. Este kit consistiría en:

- Bomba eléctrica de combustible
- Intercambiador de calor par precalentar el combustible
- Unidad de filtrado de combustible y filtro
- Válvula de control con regulador de presión
- Relés de carga pesada
- Set de tubos
- Cableado
- Instrucciones de usuario y de montaje

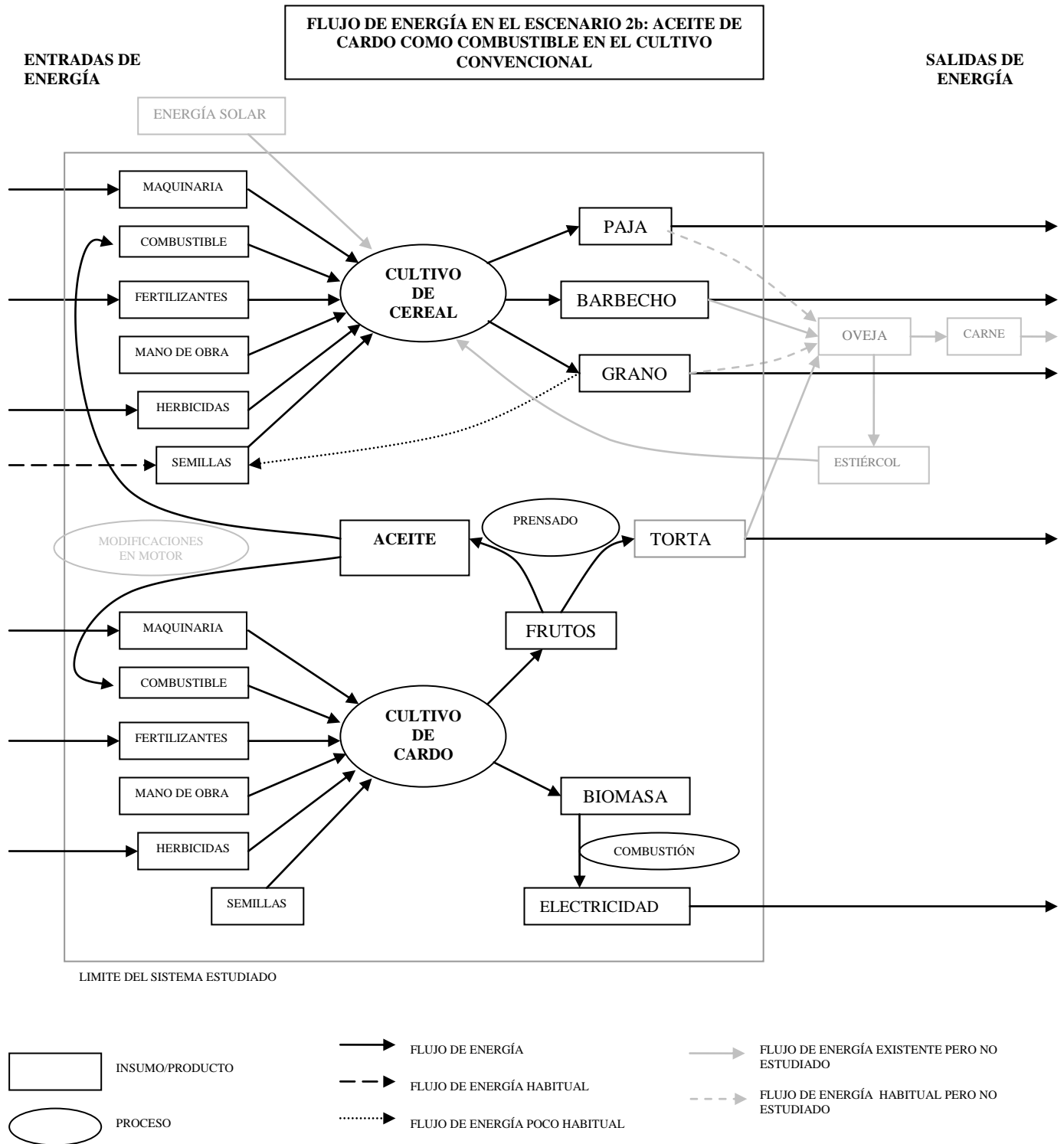
Desde el punto de vista económico, esta modificación rondaría los 3.000-4.000 euros por tractor. Desde la perspectiva energética, hemos considerado que los cambios introducidos son despreciables en el balance final, dado el escaso peso de los materiales utilizados en relación al peso final de los tractores, como en el caso de las modificaciones para el funcionamiento con etanol.

4.2.7 ESQUEMA GENERAL DEL ESCENARIO

4.2.7.1 ESCENARIO 2a: ACEITE DE CARDO COMO COMBUSTIBLE EN EL MANEJO ECOLÓGICO



4.2.7.2 ESCENARIO 2b: ACEITE DE CARDO COMO COMBUSTIBLE EN EL MANEJO CONVENCIONAL



4.2.8 BALANCE ENERGÉTICO DEL ESCENARIO 2

4.2.8.1 SUPERFICIE NECESARIA PARA EL AUTOABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE ACEITE DE CARDO

La superficie de cardo necesaria para cubrir las necesidades de combustible del cultivo de cereal y del propio cardo se calcula a partir de la energía inherente del combustible consumida en el escenario y de la producción de aceite en el cultivo de cardo. Ahora bien, esa energía del combustible dependerá del consumo en cada cultivo (cereal y cardo), pero también de la proporción de la superficie total que ocupe cada uno. Esto nos introduce en un bucle, en el que la incógnita se encuentra también en la solución, como vemos en las siguientes expresiones:

$$Sca = 100 * CC / PA \quad (1)$$

$$CC = (CCce * Sce + CCca * Sca) / 100 \quad (2) ; \quad \text{donde:}$$

Sca (%): Superficie dedicada al cardo en el escenario 2 (?)

CC (MJ/ha): Consumo de combustible en el escenario 2 (?)

PA (MJ/ha): Producción de aceite de cardo

CCce (MJ/ha): Consumo de combustible en el cultivo de cereal

CCca (MJ/ha): Consumo de combustible en el cultivo de cardo

Sca (%): Superficie dedicada a cereal en el escenario 2 (?)

Por tanto, para poder calcular la superficie de cardo, hemos tenido que recurrir a un proceso iterativo. Introduciendo un valor al azar para cada superficie (teniendo en cuenta que son complementarias) en la ecuación (2), obtenemos un valor para el CC, que introducimos en la ecuación (1), la cual nos devuelve un valor distinto de Sca. Este valor lo utilizamos en la ecuación (2), y repetimos el proceso hasta que el valor de Sca obtenido en la ecuación (1) no cambie significativamente el valor de CC al introducirlo en la ecuación (2). La realización de esos cálculos para el manejo ecológico y el convencional, nos ofrece los siguientes resultados:

Tabla 4.11 Superficie relativa de cardo y cereal y consumo de combustible en el escenario 2

| Escenario | Manejo | Superficie de cardo (%) | Superficie de cereal (%) | Consumo de combustible (MJ/ha) |
|-----------|---------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 2a | Ecológico | 60,38 | 39,62 | 5328 |
| 2b | Convencional | 35,05 | 64,95 | 5170 |

Fuente: elaboración propia

Mientras que el consumo de combustible es similar en los dos estilos de manejo, la superficie que cada uno tiene que dedicar al cultivo de cardo para autoabastecerse es muy distinta. Esto se debe a que la producción de aceite en el manejo ecológico de cardo (PA, en la ecuación (1)) es un 30,6% menor a la del convencional y, por tanto, necesita dedicar más superficie para producir la misma cantidad de aceite.

4.2.8.2 ENTRADAS DE ENERGÍA

Tabla 4.11 Entrada neta de energía en el escenario 2 (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹ y %)

| Escenario | Manejo | Total (CN) | Mano de Obra | Semillas* | | Maquinaria | Fertilizantes | Agrotóxicos | Prensado |
|-----------|---------------------|------------|--------------|-----------|------|------------|---------------|-------------|----------|
| | | | | EI | EP | | | | |
| 2a | Ecológico | 659 | 16 | 0 | 0 | 478 | 0 | 0 | 202 |
| | (%) | 100 | 2,48 | 0 | 0 | 66,8 | 0 | 0 | 30,71 |
| 2b | Convencional | 10088 | 16 | 1004 | 556 | 440 | 7993 | 100,2 | 201 |
| | (%) | 100 | 0,16 | 10,2 | 5,62 | 4,74 | 79,23 | 0,99 | 1,99 |

Notas: EI: Energía Inherente; EP: Energía en la Producción

Fuente: elaboración propia

El CN en el manejo ecológico ha experimentado una reducción respecto al escenario de referencia similar a la ocurrida en el escenario 1, e incluso se han alcanzado valores menores. El prensado supone en este caso el factor que complementa a la maquinaria agrícola como los mayores consumidores de energía en este manejo. El caso del manejo convencional es muy distinto. A pesar de haber eliminado el diésel del sistema, el CN ha *subido* respecto al escenario de referencia, pues si en aquél se consumían 9,37 GJ/ha, en éste son 10,09 GJ/ha. Esto se debe a la importación masiva de fertilizantes para el cultivo del cardo, que constituyen el 79,23% de la energía neta consumida en el escenario 2b.

4.2.8.3 SALIDAS DE ENERGÍA

Tabla 4.12 Salida neta de energía en el Escenario 2 (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹ y %)

| Escenario | Manejo | PN | Grano Cereal | Paja Cereal | Biomasa Barbecho | Torta de Cardo | Electricidad |
|-----------|---------------------|-------|--------------|-------------|------------------|----------------|--------------|
| 2a | Ecológico | 21562 | 6461 | 11316 | 1827 | 1959 | 0 |
| | (%) | 100 | 29,97 | 52,48 | 8,47 | 9,08 | 0 |
| 2b | Convencional | 76256 | 10676 | 17459 | 3227 | 1900 | 42943 |
| | (%) | 100 | 14 | 22,9 | 4,3 | 2,49 | 56,31 |

Fuente: elaboración propia

La producción neta en el manejo convencional se ha logrado incrementar un 58% respecto al escenario de referencia (0c), pero la mayor parte (un 56%) corresponde a la electricidad obtenida a partir de la biomasa del cardo. Esta PN en convencional es muy superior a la del ecológico, debido a que el segundo reemplaza esta biomasa. En ambos casos se ha experimentado una reducción importante de las producciones del sistema cerealista (grano, paja y barbecho), pero ésta ha sido mucho más patente en el caso del ecológico, donde la superficie de cardo es del 65%, y por tanto estas producciones han resultado ese porcentaje inferiores a las del escenario de referencia. La cantidad de torta de cardo, en cambio, no es mayor en el ecológico (por ser mayor la superficie de cardo), sino igual en ambos tipos, porque depende de la cantidad de aceite, que a su vez depende de la cantidad de combustible utilizada, que vimos que era similar en ambos estilos de manejo. En suma, el manejo ecológico ha experimentado un descenso importante en la producción exportada, mientras que la del convencional se ha incrementado gracias a la producción de electricidad.

4.2.8.4 BALANCE ENERGÉTICO

Tabla 4.13 Balance energético del Escenario 2

| Manejo | PPN (GJ/ha) | Reempleos (GJ/ha) | CB (GJ/ha) | EEB (GJ/GJ) | PN (GJ/ha) | CN (GJ/ha) | EEN (GJ/GJ) | EG (GJ/ha) | GA (%) | CCG (n°) |
|---------------------|-------------|-------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|--------|----------|
| Ecológico | 191,23 | 164,94 | 165,61 | 1,15 | 21,56 | 0,67 | 32,27 | 6,46 | 99,61 | 1,80 |
| Convencional | 174,63 | 5,43 | 15,52 | 11,25 | 76,26 | 10,09 | 7,56 | 10,68 | 35,09 | 2,50 |

PPN: Producción Primaria Neta (Grano cereal + Paja cereal + Biomasa barbecho + Grano cardo + Paja cardo); Reempleos (Grano para semillas + Biomasa incorporada + Aceite para combustible); CB: Consumo Bruto (Reempleos + Mano de obra + Importaciones); EEB: Eficiencia Energética Bruta (PPN/CB); PN: Producción Neta (PPN – Reempleos – Pérdidas); CN: Consumo Neto (Mano de obra + Importaciones); EEN: Eficiencia Energética Neta (PN/CN); EG: Energía Neta del Grano (Grano – Reemplazo para semillas); GA: Grado de Autonomía (100*Importaciones/CB); CCG: Capacidad de Carga Ganadera ovina.

Fuente: elaboración propia

El primer dato que llama la atención es que la PPN sea mayor en el manejo ecológico que en el convencional, pese a que, como hemos visto, el rendimiento de biomasa en el cardo ecológico es menor, y la PN en este escenario también es menor. Esto se debe a que la superficie ocupada por el cardo es mucho mayor en ecológico, y como el rendimiento de éste es mayor que el rendimiento del cereal, compensa la reducción del rendimiento respecto al cardo convencional. Pero como la mayor parte de la biomasa del cardo es reciclada, resulta una PN menor en el manejo ecológico (y paralelamente unos reempleos mucho mayores). La EEB es menor en el manejo ecológico que en el convencional, por las mismas razones que en el caso del cultivo de cardo (véase apartado 4.2.5.3). Pero en el CN y en la EEN destaca el ecológico que, gracias a que logra disminuir radicalmente sus importaciones de energía, alcanza una EEN de 33 unidades de energía obtenidas por cada una invertida. La producción de grano es un 34,4% menor en el manejo ecológico respecto al convencional (2b) en este escenario, y un 60% menor que la del escenario de referencia (0a). Sin embargo, la autonomía ha subido al 99,6%, y la capacidad de carga ganadera sólo ha descendido un 18,2%. Aquí hay que remarcar que la capacidad de carga en el convencional ha subido de 2,1 a 2,5 ovejas/ha, a pesar de la disminución de la producción de cereal, gracias al alto contenido en proteína bruta de la torta de cardo, que permite superar el que era el limitante de la capacidad de carga en el escenario de referencia.

Tabla 4.14 Energía no renovable en el Escenario 2

| Manejo | ENR (GJ/ha) | EENR (GJ/GJ) | ENRG (GJ/GJ) | IE (MJ/kg) |
|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Ecológico | 0,63 | 35,46 | 11,41 | 1,14 |
| Convencional | 8,68 | 8,81 | 1,26 | 10,51 |

ENR: Consumo de Energía No Renovable; EENR: Eficiencia de la Energía No Renovable (PN/ENR); ENRG: Eficiencia de la Energía No Renovable en relación a la Producción de Grano (EG/ENR); IE: Intensidad Energética (ENR/kg Grano cereal)

El resultado aquí es muy parecido al del escenario 1, destacando el alto consumo de ENR en el manejo convencional, que en este caso supera al del escenario de referencia (0b) y se impone como el mayor de todos los casos estudiados, mientras que el CN del ecológico alcanza aquí su mínimo. La EENR es muy alta en el ecológico (2a), así como la ENRG, mientras que en el convencional (2b) este último indicador da un valor próximo a la unidad, debido a la pérdida de importancia relativa del grano en la producción de este escenario. Esto condiciona una IE muy alta para este manejo, la mayor de todos los escenarios. Comprobamos, en este caso extremo, que los sistemas más eficientes en el uso de la energía no renovable son los menos productivos en términos de rendimientos por hectárea, y viceversa. Pero, como veremos más adelante, esta afirmación puede ser matizada.

4.3 BIOGÁS DE ESTIÉRCOL DE OVEJA

4.3.1 GENERALIDADES SOBRE EL USO DE BIOGÁS COMO COMBUSTIBLE

Gran parte del cereal producido en Orce se destina a la alimentación del ganado local. No sólo el grano, sino también la paja y los rastrojos acaban en última instancia transformados en su mayoría en carne de cordero y estiércol. Precisamente ese estiércol, como sabemos, tiene un elevadísimo poder calorífico. Además tiene un peso y un volumen muy grandes en comparación con los fertilizantes químicos, lo que lo coloca en clara desventaja a la hora de aplicarlo, porque requiere más maquinaria y mano de obra. Estos problemas podrían convertirse en ventajas si fermentamos el estiércol en condiciones anaeróbicas para producir biogás y biofertilizante líquido. El biogás puede mezclarse con el diesel en los motores, lo que permitiría reducir la utilización de combustible fósil.

La tecnología data de mediados del siglo XIX. En el año 1890 se construye el primer biodigestor en la India y ya en 1896 las lámparas de alumbrado público de Exeter, Inglaterra, eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad. En la primera mitad del siglo XX ya se extendieron los biodigestores en gran parte de Europa, empleándose incluso para mover vehículos y tractores, si bien su uso decayó con la difusión de la energía fósil barata. No obstante, actualmente la digestión en finca de los residuos orgánicos es una práctica común en muchas partes de Europa (Odlare, 2005). Los biodigestores están experimentando una fuerte expansión en países como India, donde cada año 200.000 familias instalan una planta casera de biogás, amparadas por ayudas estatales (Karotki y Olesen, 2002, en Ho, 2006). En Andalucía la tecnología no es desconocida. En la actualidad existen en nuestra comunidad 17 plantas con una potencia total instalada de 16,17 MW de energía eléctrica obtenida a partir de biogás, que proviene de la biodigestión de aguas residuales y residuos sólidos urbanos (AAE, 2008).

Las ventajas son claras: tecnologías baratas y fácilmente accesibles, valorización energética de residuos, producción de biofertilizante, aprovechamiento de recursos locales renovables, ahorro de energías fósiles, o generación de empleo local. También existen inconvenientes. En concreto, existen tres factores que son especialmente relevantes, ya que pueden comprometer el balance energético del biogás: la posible necesidad de calefacción, el elevado volumen que ocupa, y los compuestos que acompañan al metano. Estos aspectos se contemplarán con más detalle en el siguiente apartado.

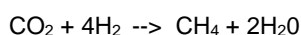
También se puede extraer biogás a partir de grano y paja, principalmente mediante dos métodos: la gasificación y la fermentación. En este estudio se descarta el primer método por considerar que usa una tecnología más costosa y menos consolidada, y por tanto con mayor dificultad de implantación a pequeña escala. El segundo es el mismo método que para el estiércol. Aunque pueden generar cantidades más grandes de biogás, debido a que tiene una mayor proporción de carbono que el estiércol, el principal problema asociado al uso de biomasa vegetal es la mayor dificultad para la fermentación, debido precisamente a la alta relación C:N. Una posible solución es la mezcla de paja con estiércol, que facilitaría la digestión de la paja, pudiendo incrementar la producción final de metano. Esta sería una opción interesante en caso de que hubiera un superávit de paja en el sistema de producción de carne a partir de

cereal. Sin embargo, si la paja fuera escasa, se vería comprometida la producción de carne. Esta opción, no obstante, no ha sido considerada en esta propuesta.

4.3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE METANO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL ESTIÉRCOL

El gas combustible conocido como biogás se genera cuando ciertas bacterias que existen de forma natural en el estiércol digieren anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno) la materia orgánica. El biogás está formado por un 50-70% de metano (CH₄), un 30-50% de dióxido de carbono (CO₂) y trazas de nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). La digestión anaeróbica de la materia orgánica incluye numerosas reacciones y complejas rutas metabólicas, pero a grandes rasgos se puede decir que implica dos fases en las que intervienen dos tipos de bacterias. La Fase I, o acidogénica, es llevada a cabo por bacterias anaerobias facultativas, esto es, que pueden tolerar el oxígeno. Esta fase incluye una primera etapa de hidrólisis y otra de reducción de compuestos ácidos. En la etapa de hidrólisis, o de producción de ácidos, ciertas bacterias rompen los polímeros orgánicos para dar monómeros como los ácidos grasos, o los aminoácidos. En la segunda etapa, las bacterias acetogénicas reducen los compuestos ácidos previamente formados para generar principalmente ácido acético.

En la Fase II, o metanogénica, el segundo grupo de bacterias, las metanógenas, rompen los ácidos orgánicos y generan metano, mediante las siguientes reacciones químicas:



Las bacterias metanógenas no toleran el oxígeno, de manera que mueren si son expuestas a él. Por eso se las encuentra allá donde el oxígeno esté agotado, como en suelos de humedales, sedimentos acuáticos o el tracto digestivo de los animales. Esta es la razón por la que las emisiones de metano generadas en el cultivo del arroz o en la cría de ganado son tan elevadas. Gracias a la ausencia de oxígeno las bacterias metanógenas pueden usar los productos finales de la fermentación, como dióxido de carbono, hidrógeno o los ácidos orgánicos, para obtener la energía para vivir y generar metano como co-producto. La formación de metano supone, de este modo, el paso final en la degradación de la materia orgánica cuando se acumulan el dióxido de carbono y el hidrógeno, y todo el oxígeno y otros aceptores de electrones han sido usados (Ho, 2006).

Las bacterias metanógenas son muy sensibles a los cambios ambientales, por lo que la temperatura del digestor debe mantenerse aproximadamente constante. Esto nos lleva al primer limitante anteriormente citado: la posible necesidad de calefacción. En principio la construcción del biodigestor bajo tierra puede paliar este problema, pero en épocas frías podría no ser suficiente y puede que haya que calentarlo artificialmente, empleando para ello bien parte de la energía obtenida en el gas, lo que disminuiría la eficiencia final, o bien energía proveniente de otra fuente. Pero esta fuente podría ser local. Por ejemplo, mediante colectores solares que capten la energía térmica del sol, o aprovechando la energía liberada en una previa digestión aeróbica del estiércol. En cuanto a la temperatura óptima de funcionamiento, a menudo se cita la de 35° C, pero si hay que calentar el digestor, puede que no compense energéticamente mantenerlo tan caliente, y por tanto podría ser menor. En general, temperaturas menores de 15°C ocasionan una reducción significativa de la producción de biogás, aunque en algunos países simplemente dejan que se pare su funcionamiento en invierno (Nijaguna, 2006). La elevada radiación solar en Orce, que permitiría el aprovechamiento térmico de esta energía en caso de necesidad, nos lleva a no contabilizar este factor en el cálculo del balance energético del biogás.

Una vez obtenido el biogás, nos encontramos con problemas relacionados con su utilización. Por un lado está el elevado volumen que ocupa, que dificulta enormemente su uso en máquinas móviles como el tractor. Una posible solución sería comprimir el gas, para luego emplearlo en tractores especialmente adaptados, mediante modificaciones importantes en los motores y la instalación de tanques de almacenamiento del biogás en el vehículo (Frankhauser y Mosser, 1983, en Fredriksson, 2006). Esta es la opción que consideraremos en este trabajo, para lo que contabilizaremos el gasto de energía relacionado con la compresión del biogás, pero no el derivado de las modificaciones del motor.

Por último están los compuestos que acompañan al metano. El CO₂, al mezclarse con agua, genera ácido carbónico, que produce corrosión en el metal. Y el H₂S, que también forma parte del biogás, tiene efectos corrosivos todavía mayores. Esto implica que el uso del biogás directamente en los motores significaría su deterioro a medio plazo, lo que obliga a filtrar el biogás antes de utilizarlo. Esta filtración implicaría un gasto añadido de energía, en forma de electricidad y de pérdidas de metano (Persson, 2003, en Fredriksson, 2006). Estos gastos también serán contabilizados.

4.3.4 COPRODUCTOS: BIOFERTILIZANTE

No existe homogeneidad en la literatura respecto al efecto del biofertilizante sobre el suelo, si bien los resultados que hay son en general positivos. Por ejemplo Noyola y Monroy (1994, en Soria et al., 2001), afirman que los efluentes procedentes de la biodegradación anaerobia (la que produce biogás) tienen mayor riqueza nutricional que los de la biodegradación aerobia, ya que no se pierden nutrientes durante el proceso. Por otro lado, durante la fermentación se eliminan los coliformes y estreptococos fecales presentes en las excretas, lo que constituye una ventaja respecto a la aplicación de estiércol fresco (Soria et al., 2001). Sin embargo, algunos autores han encontrado que estos biofertilizantes pueden disminuir a corto plazo el metabolismo microbiano del suelo y las poblaciones de algunas especies de lombrices (Ernst 2007), aunque estudios a más largo plazo muestran que la actividad microbiana aumenta (Odlare, 2005; Odlare et al., 2007). Pero los efectos sobre la ecología del suelo están determinados en gran medida por las condiciones edafoclimáticas locales, que en nuestro caso son muy distintas de la de los estudios del centro y norte de Europa reseñados. Esto nos indica que conocer estos efectos requeriría de estudios específicos. Esta falta de información detallada, tanto en el aspecto del efecto sobre el subsuelo como en el de la posible ganancia neta de nitrógeno respecto al proceso de compostaje aerobio, nos lleva a dejar fuera de nuestra contabilidad energética al biofertilizante.

Pero si tenemos en cuenta que durante el proceso de compostaje aeróbico (que es el proceso habitual y el que se emplea en Orce) se volatiliza en forma de amoníaco y otros compuestos una gran parte del nitrógeno original, vemos que la biodigestión anaeróbica supone una ganancia neta de nitrógeno para uso agrícola. En un sistema ecológico, esto significaría el empleo de menores extensiones de tierra como abono verde, mientras que desde la agricultura convencional podríamos verlo como un ahorro de fertilizantes sintéticos. Dado el elevado coste energético de la síntesis artificial de compuestos nitrogenados, y el coste territorial del cultivo de abonos verdes, es de suponer que este ahorro puede ser significativo.

4.4.4 LA NECESIDAD DE LA INTEGRACIÓN GANADERA: AMPLIACIÓN DEL SISTEMA

El sistema base (Escenario 0), estudiado en el Capítulo 3, y que nos sirve de punto de partida en la construcción de los demás escenarios, contempla exclusivamente el cultivo de cereal en secano, dejando de lado los demás usos del territorio que se producen en Orce. Pero la alternativa que ahora estamos considerando, la producción de biogás a partir de estiércol de oveja, utiliza una materia prima que no se deriva directamente del sistema cerealista. Esta elección, no obstante, está justificada. La presencia de ganadería en Orce y toda la comarca de Huéscar es muy importante, en especial la ganadería ovina. Es representativo el hecho de que el cordero segureño se haya convertido en una de las señas de identidad de la comarca, con Huéscar como sede de la Asociación Nacional de Criadores de Ovino Segureño (Ancos), y de una feria nacional anual del cordero segureño. El ganado ovino ecológico, que será el único que consideremos en este escenario, se alimenta principalmente de grano y paja de cereal y rastrojos también de cereal. Muchos de los agricultores entrevistados eran también ganaderos cuyas ovejas alimentaban con el propio cereal que producían. Esto nos ha llevado a considerar plausible la ampliación del sistema cerealista para incluir al ganado ovino. Como veremos, esta ampliación será sólo parcial.

4.4.4.1 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA GANADERA

Vamos, pues, a definir de qué modo hemos hecho esta operación. En primer lugar nos hemos limitado al ganado ovino para simplificar los cálculos, a pesar de no ser el único presente en Orce. También porque el otro tipo de ganado con una presencia apreciable en el municipio, el caprino, tiene unas características muy parecidas. El número de ovejas presentes en el sistema ampliado, que nos permitirá conocer la cantidad de estiércol que se puede usar para elaborar biogás, lo hemos estimado a partir de la producción de grano y paja de cereal y de barbecho. Para ajustarnos a la unidad funcional, que es una hectárea de cereal durante los dos años de una rotación cereal-barbecho, hemos calculado cuántas ovejas pueden mantenerse durante esos dos años con la producción de cereal ecológica, a partir de los resultados obtenidos en el balance energético del agroecosistema cerealista y de datos de la bibliografía sobre la alimentación del ganado ovino. Se ha asumido un peso medio de 45 kg para las ovejas. Según González Molina y Guzmán (2006:451) la energía metabolizable de la paja de cereal es de 5,46 MJ/kg. La energía metabolizable del grano es de 2662 Kcal/Kg m.s. para la cebada de dos carreras, 2739 Kcal/kg m.s. para el trigo y 2414 Kcal/kg m.s. para la avena (Piat, 1989). Se ha considerado que estos cultivos representan un 40%, un 20% y un 40% respectivamente de la superficie de cereal cultivada en el sistema, por lo que la energía metabolizable del grano se ha estimado en 2578,2 Kcal/kg m.s., lo que representa 10,72 MJ/kg m.s.. El grano tiene un contenido de materia seca del 86%. El contenido de proteína bruta del grano de cereal se ha estimado en un 10,9% m.s., y el de la paja en un 3,4% a partir de los datos de la FEDNA (2003). A la carga ganadera estimada a partir del grano y la paja de cereal se le ha sumado la de la producción de biomasa del barbecho, tomada de Foraster et al. (2008) (véase apartado 3.2.4.9). Para ello, hemos tenido en cuenta que los agricultores ecológicos entrevistados dejaban como media un 45% de la superficie para barbecho, y cultivaban el otro 55%. Como resultado, hemos obtenido una capacidad

de carga de **2,2 ovejas/ha**, que estaría limitada por el contenido total de Proteína Bruta. Hemos calculado la capacidad de carga ganadera por el mismo procedimiento para el resto de los escenarios.

Con este número de ovejas estimaremos el estiércol producido, pero en la evaluación final del escenario no consideraremos como salida la carne, sino la producción de cereal original. Hemos preferido mantener esta unidad de output para facilitar la comparación con los otros escenarios. En realidad, sería inadecuado hacerlo de otro modo, dado que como hemos visto la transformación de la energía del cereal en carne es muy costosa energéticamente, y al fin y al cabo gran parte del cereal producido en el sistema base se destina en última instancia a la alimentación del ganado ovino

4.4.4.2 PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL POR OVEJA

A continuación vamos a estimar la producción aprovechable de estiércol y orina por oveja. Las plantas de biogás más sencillas funcionan con una mezcla de estiércol y orina, porque dicho substrato habitualmente fermenta bien y produce buenos rendimientos de biogás. La composición y la cantidad del estiércol dependen principalmente de la cantidad y digestibilidad del alimento (habitualmente reaparece un 40-80% del contenido orgánico del alimento), así como del peso de los animales (Werner et al., 1989). Las tasas de producción de excrementos sufren una amplia variación, y por tanto es difícil ofrecer aproximaciones para un determinado tipo de animal. El método del cálculo de de la producción de estiércol a partir del peso del animal parece ajustarse bien a la medición directa (Werner et al., 1989), luego será el que usemos. También tendremos en cuenta que no todo el estiércol producido por las ovejas criadas en extensivo puede ser aprovechado, pues sólo podremos recolectar el que produzcan mientras estén estabuladas. Hemos asumido que están estabuladas 1/3 del tiempo, por lo que multiplicaremos la producción total de estiércol por 1/3 para saber el estiércol finalmente cosechado.

PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL Y ORINA POR OVEJA ASUMIENDO UN PESO DE 45 KG Y UN TIEMPO DE ESTABULACIÓN DE 1/3, CON DATOS DE WERNER ET AL. (1989):

PRODUCCIÓN DIARIA DE ESTIÉRCOL: 3% del peso de la oveja

PRODUCCIÓN DIARIA DE ORINA: 1-1,5% de su peso. Asumiremos un 1,25%.

ESTIÉRCOL DIARIO POR OVEJA: 45 kg oveja * 3/100 peso oveja * 1/3 estabulación = **0,45 kg/día**

ORINA DIARIA POR OVEJA: 45 kg oveja * 1,25/100 peso oveja * 1/3 estabulación = 0,19 kg día

MEZCLA DIARIA POR OVEJA: 0,45 kg estiércol/día + 0,19 kg orina/día = 0,64 kg mezcla/día

Según Nijaguna (2006:28), cada oveja produce 0,75 kg de estiércol/día, de los cuales se pueden recuperar 0,25 kg de estiércol. Según Glez de Molina y Guzmán (2006) cada oveja produce 126 kg de estiércol al año, es decir, 0,34 kg/día. Por tanto, nuestros resultados estarían dentro del rango de datos revisados.

4.3.5 RENDIMIENTO DE METANO APROVECHADO EN LOS TRACTORES A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE ESTIÉRCOL Y ORINA DE OVEJA

El biogás se produce a partir de los sólidos volátiles contenidos en la materia prima empleada. Sabiendo el porcentaje de sólidos volátiles de nuestra mezcla de estiércol y orina, y la producción diaria de mezcla, calculamos la producción de sólidos volátiles diarios por oveja, que multiplicaremos por el número de litros de biogás por kilogramo de sólidos volátiles para saber el volumen de biogás por oveja en litros por día. Esta producción la pasaremos a metros cúbicos por ciclo bienal para ajustarnos a la unidad funcional. A continuación, estimamos la energía total producida por ciclo bienal, a partir del porcentaje de metano del biogás y el contenido energético del metano. Después hay que saber la energía neta obtenida en el biogás purificado y comprimido, para lo que hemos de incorporar a nuestros cálculos las pérdidas relacionadas con estos procesos, que se corresponden con la electricidad consumida más las pérdidas de gas metano. Si asumimos que la energía de la electricidad viene del propio biogás mediante un grupo electrógeno, hemos de tener en cuenta la eficiencia con la que trabaja este grupo electrógeno. Por último, a la energía contenida en el metano purificado final hay que aplicarle un factor de conversión, para equipararla a la del diésel convencional, al igual que hicimos con el biodiésel y el etanol, ya que estos combustibles no se queman con la misma eficiencia en los motores de los tractores. Los cálculos se muestran a continuación.

MEZCLA DIARIA POR OVEJA: 0,64 kg/día (calculado en apartado anterior)

SÓLIDOS EN LA MEZCLA: 20 % Sólidos Volátiles (VS) y 30% Sólidos Totales (TS) (Kaltwasser 1980 y Williamson y Payne 1980, en Werner et al., 1989)

VOLUMEN DE BIOGÁS POR KG DE SÓLIDOS VOLÁTILES: 200 litros biogás/kg VS (Kaltwasser 1980 y Williamson y Payne 1980, en Werner et al., 1989)

VOLUMEN DIARIO DE BIOGÁS POR OVEJA: 0,64 kg mezcla/día * 0,2 kg VS/kg mezcla * 200 litros biogás/kg VS = **25,6 litros biogás/día por oveja**

VOLUMEN BIENAL DE BIOGÁS POR OVEJA: 25,6 litros biogás día * 365 días/año * 2 años/ciclo bienal * 1 m³/1000 litros = **18,69 m³ biogás/oveja*ciclo bienal**.

METANO EN EL BIOGÁS: 55% = 0,55 m³ metano/m³ biogás (Power et al., 2007)
ENERGÍA EN EL METANO: 37,8 MJ/m³ (Power et al., 2007)

ENERGÍA BIENAL DEL BIOGÁS POR OVEJA: 0,55 m³ metano/m³ biogás * 37,8 MJ/m³ metano * 18,69 m³ biogás/oveja*ciclo bienal = **388,57 MJ biogás/oveja*ciclo bienal**

ENERGÍA BIENAL DEL BIOGÁS EN EL MANEJO ECOLÓGICO: 388,57 MJ biogás/oveja*ciclo bienal * 2,2 ovejas/ha = **854,85 MJ biogás/ciclo bienal**

ELECTRICIDAD INVERTIDA EN LA PURIFICACIÓN Y COMPRESIÓN: 6% de la energía en el biogás = 0,06 MJ electricidad/MJ biogás (Persson, 2003, en Fredriksson et al., 2006)

EFICIENCIA DE LA TRANSFORMACIÓN DEL BIOGÁS EN ELECTRICIDAD: 30% = 0,3 MJ electricidad/MJ biogás consumido

PÉRDIDAS DE METANO EN LA PURIFICACIÓN Y COMPRESIÓN: 3% de la energía en el biogás = 0,03 MJ metano perdido/MJ biogás (Persson, 2003, en Fredriksson et al., 2006)

EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS EN MOTORES DIÉSEL: 1,36 MJ biogás/MJ equivalentes diésel (Fredriksson et al., 2006)

ENERGÍA DEL BIOGÁS PERDIDA COMO ELECTRICIDAD CONSUMIDA: 0,06 MJ electricidad/MJ biogás * 1 MJ biogás consumido/0,3 MJ electricidad = 0,2 MJ biogás consumidos/MJ biogás

ENERGÍA EN EL METANO PURIFICADO Y COMPRIMIDO: 388,57 MJ biogás/oveja*ciclo - (388,57 MJ biogás * (0,2 MJ biogás consumido/MJ biogás + 0,03 MJ biogás perdido/MJ biogás)) = **299,2 MJ metano**

ENERGÍA BIENAL DE BIOGÁS POR OVEJA APROVECHADA POR LOS TRACTORES: 299,2 MJ biogás/oveja*ciclo bienal * 1 MJ diésel/1,36 MJ biogás = **219 MJ equivalentes diésel/oveja*ciclo bienal**

ENERGÍA BIENAL DEL BIOGÁS APROVECHADA POR LOS TRACTORES EN EL ESCENARIO 3: 219 MJ equivalentes diésel/oveja*ciclo bienal * 2,2 ovejas/ha = **418,8 MJ/ha**

Con estos resultados podemos calcular la eficiencia de la transformación de la energía del estiércol de oveja en energía del biogás y en energía útil para la tracción mecánica:

ENERGÍA EN EL ESTIÉRCOL: 0,45 kg estiércol/oveja*día * 365 días/año * 2 años/ciclo bienal * 0,66 kg MS/kg estiércol * 16,67 MJ/kg MS = 3614,22 MJ estiércol/oveja*ciclo bienal

ENERGÍA EN EL BIOGÁS: 388,57 MJ biogás/oveja*ciclo bienal

ENERGÍA APROVECHADA POR LOS TRACTORES EN EL BIOGÁS: 219 MJ equivalentes diésel/oveja*ciclo bienal

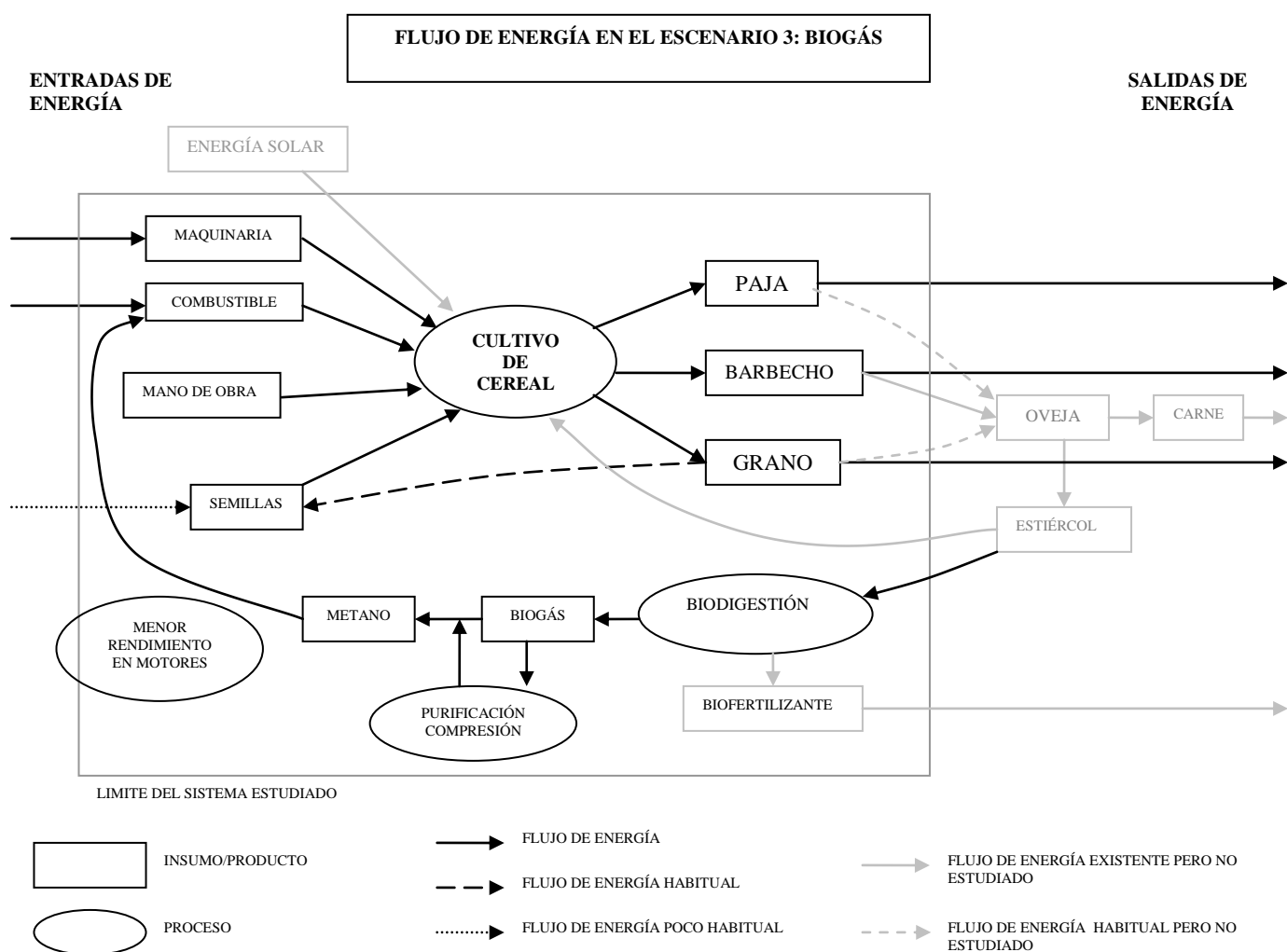
EFICIENCIA DE LA CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL ESTIÉRCOL EN ENERGÍA DEL BIOGÁS: 388,57/3614,22 = **0,11 MJ biogás/MJ estiércol**

EFICIENCIA DE LA TRANSFORMACIÓN DEL BIOGÁS EN SUSTITUTO DEL DIÉSEL: 219 MJ eq. diésel/388,57 MJ biogás = **0,56 MJ eq. diésel/MJ biogás**

EFICIENCIA DE LA CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL ESTIÉRCOL EN SUSTITUTO DEL DIÉSEL: 219 MJ eq. diésel/3614,22 MJ estiércol = **0,061 MJ equivalentes diésel/MJ estiércol**

La eficiencia energética del biogás se vería mejorada si valorizásemos la pérdida de nitrógeno ahorrada. Otro punto con un potencial de ahorro muy importante, como podemos observar, son las etapas que van desde la obtención del biogás al aprovechamiento en los tractores, donde se pierde un 43,38% de la energía. Pero si consideramos el sistema desde una perspectiva más amplia, en el que no sólo se incluya el cultivo en sí, con su manejo, sino el contexto socioeconómico en que se inscribe, tenemos que la utilización directa del biogás para otros usos que no requieran su compresión y purificación, y que permitan aprovecharlo con una eficiencia mayor que la de los motores diésel convencionales, significaría una importante reducción de la factura energética de las familias de los agricultores, o del municipio en general, por la gran variedad de usos que se le pueden dar en el hogar (calefacción, cocina, iluminación), además de en la propia explotación pecuaria (calefacción, iluminación).

4.3.6 ESQUEMA GENERAL DEL ESCENARIO 3: BIOGÁS



4.3.7 BALANCE ENERGÉTICO DEL ESCENARIO 3

4.3.7.1 GRADO DE COBERTURA DE LAS NECESIDADES DE COMBUSTIBLE MEDIANTE BIOGÁS

El consumo de energía inherente de combustible en el manejo ecológico es de 4741,25 MJ/ha*ciclo bienal, y la producción de biogás de 219 MJ/oveja*ciclo bienal, así que harían falta $4741,25/219 = 21,64$ ovejas para cubrir las necesidades de combustible de un ciclo de rotación cereal-barbecho en una hectárea. O lo que es lo mismo, cada oveja cubriría un $100 \cdot 219/4741,25 = 4,62$ % del gasto de combustible de cada hectárea. Luego la producción de biogás ajustada a la capacidad de carga de 2,2 ovejas/ha cubriría un **10,16 % del gasto de combustible** del sistema ecológico.

4.3.7.2 ENTRADAS DE ENERGÍA

Tabla 4.14 Entrada neta de energía en el Escenario 3 (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹ y %)

| Escenario | Manejo | Total (CN) | Mano de Obra | Maquinaria | Combustible | |
|-----------|-----------|------------|--------------|------------|-------------|-----|
| | | | | | EI | EP |
| 3 | Ecológico | 5179 | 14 | 426 | 4260 | 478 |

| | | | | | | |
|---|-----|-----|------|------|-------|------|
| 3 | (%) | 100 | 0,28 | 8,23 | 82,26 | 9,23 |
|---|-----|-----|------|------|-------|------|

Fuente: elaboración propia

Las entradas son las mismas que en el escenario de referencia (Escenario 0a) excepto un 10,16% menos de consumo de combustible, que se refleja tanto en su energía inherente como en la energía de su producción, gracias a la sustitución de esta fracción por biogás de estiércol de oveja.

4.4.7.3 SALIDAS DE ENERGÍA

Tabla 4.15 Salida neta de energía en el Escenario 3 (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal⁻¹ y %)

| Escenario | Manejo | PN | Grano | Paja | Biomasa Barbecho |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|------------------|
| 3 | Ecológico | 49506 | 15321 | 28541 | 4610 |
| 3 | (%) | 100 | 30,94 | 57,65 | 9,31 |

Fuente: elaboración propia

Las salidas de energía son en este escenarios iguales a las del escenario de referencia, ya que la materia prima para la elaboración del biogás no procede de este sistema, sino del ganadero.

4.4.7.4 BALANCE ENERGÉTICO

Tabla 4.16 Balance energético del Escenario 3

| Manejo | PPN (GJ/ha) | Reempleos (GJ/ha) | CB (GJ/ha) | EEB (GJ/GJ) | PN (GJ/ha) | CN (GJ/ha) | EEN (GJ/GJ) | EG (GJ/ha) | GA (%) | CCG (n°) |
|-----------|-------------|-------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|--------|----------|
| Ecológico | 51,25 | 1,74 | 6,92 | 7,41 | 49,46 | 5,18 | 9,55 | 16,31 | 25,35 | 2,20 |

PPN: Producción Primaria Neta (Grano + Paja + Biomasa barbecho); Reempleos (Grano para Semillas); CB: Consumo Bruto (Reempleos + Mano de obra + Importaciones); EEB: Eficiencia Energética Bruta (PPN/CB); PN: Producción Neta (PPN – Reempleos); CN: Consumo Neto (Mano de obra + Importaciones); EEN: Eficiencia Energética Neta (PN/CN); EG: Energía Neta del Grano (Grano – Reempleo Semillas); GA: Grado de Autonomía (100*Importaciones/CB); CCG: Capacidad de Carga Ganadera ovina.

Fuente: elaboración propia

Los parámetros estudiados en el balance energético han sufrido pocos cambios respecto al escenario de referencia, debido a que la producción es la misma (sus indicadores, PPN, PN, EG y CCG no se ven afectados) y el consumo ha variado poco. El CN es ahora un 9,1% menor. La EEN ha subido de 8,9 a 9,55. No obstante, podemos deducir que, dado que la elaboración de biogás no modifica la producción, y por tanto es constante, su proporción relativa podría ser mayor si se alcanzase un menor consumo de combustible en las labores agrícolas.

Tabla 4.17 Energía no renovable en el Escenario 3

| Manejo | ENR (GJ/ha) | EENR (GJ/GJ) | ENRG (GJ/GJ) | IE (MJ/kg) |
|-----------|-------------|--------------|--------------|------------|
| Ecológico | 5,11 | 9,68 | 3,19 | 4,09 |

ENR: Consumo de Energía No Renovable; EENR: Eficiencia de la Energía No Renovable (PN/ENR); ENRG: Eficiencia de la Energía No Renovable en relación a la Producción de Grano (EG/ENR); IE: Intensidad Energética (ENR/kg Grano)

Los indicadores de ENR son también parecidos a los del escenario de partida, habiéndose logrado pequeñas ganancias en la eficiencia en el uso de este tipo de energía.

5. COMPARATIVA DE LOS ESCENARIOS ESTUDIADOS

5.1 INDICADORES Y ATRIBUTOS DE SUSTENTABILIDAD

Como apuntan Fredriksson et al. (2006), el biodiésel, el etanol y el biogás están basados en recursos renovables, y sin embargo, que tengan un origen renovable no significa necesariamente que sean

amigables con el entorno o sostenibles. Por ese motivo, se hace necesaria una evaluación de la sostenibilidad que permita comparar estas alternativas. Desafortunadamente, por cuestiones de tiempo y recursos no hemos podido llevar a cabo un análisis más amplio, que nos permitiese valorar todas las dimensiones de la sustentabilidad. Por este motivo, nos hemos limitado a calcular los indicadores, la mayoría de ellos relacionados con la energía, que pueden afectar más directamente al problema que nos hemos planteado.

La vinculación de cada indicador a un atributo concreto de sustentabilidad se ha mostrado problemática en nuestro caso. En general, podemos asociar los indicadores relacionados con la energía principalmente a los atributos de productividad y autonomía. Por ejemplo, la energía exportada (en MJ/ha), representa un indicador de productividad. Por otro lado, la proporción de energía que proviene de dentro del sistema respecto a la energía total empleada nos está informando sobre su grado de autonomía en el uso de los insumos. Pero en otros casos esta relación no es tan unívoca: por ejemplo, la eficiencia energética neta suele ser empleada como indicador de productividad (productividad energética), pero también, al cuantificar únicamente como insumo la energía proveniente de fuera del sistema, podría verse como un indicador de autonomía. Del mismo modo, otros atributos también se verían afectados. Por ejemplo, los indicadores relacionados con la energía no renovable nos estarían aportando información sobre el grado de dependencia de ésta (falta de autonomía), o sobre lo productiva que resulta esta energía respecto a la obtenida, pero también nos informarían sobre la resiliencia del sistema frente al probable evento de una subida brusca del precio del carburante o un corte de suministro. También sobre la equidad externa: la consecución de una mayor autonomía en el ámbito productivo significaría la ruptura con las formas de dominación basadas en la dependencia a los insumos; y sobre la equidad intergeneracional, porque mediante el uso de ENR estamos dilapidando en un instante histórico los recursos acumulados durante millones de años, a la vez que generamos residuos cuyos efectos tendrán que soportar las futuras generaciones.

5.2 METODOLOGÍA

5.2.1 SELECCIÓN DE LOS INDICADORES

Todos los indicadores empleados han sido ya estimados en apartados previos de este trabajo, así que no vamos a describir la metodología de cálculo. El empleo de largas listas de indicadores es poco práctico (López Ridaura et al., 2002; Martínez Alier, 2004b), por lo tanto hemos procurado reducir la cantidad de parámetros que habíamos calculado en los distintos escenarios. A la hora de hacer la selección, hemos considerado que la insustentabilidad de nuestro agroecosistema en relación al problema estudiado, a tenor de los resultados obtenidos en el estudio energético de los escenarios, puede venir por dos frentes: desde el consumo, y desde la producción. Por tanto, hemos hecho una selección que trate de atender de la forma más completa pero sintética posible estos dos aspectos, así como la relación entre ellos. Además, previamente a la presentación de los resultados obtenidos en los indicadores seleccionados, hemos mostrado tanto las entradas como las salidas netas de energía en todos los escenarios, como hemos hecho en cada apartado, pero representándolas gráficamente para facilitar su comparación.

5.2.1.1 CONSUMO

Si bien el concepto de energía es universal, es posible -y operativamente deseable, en nuestro caso-, diferenciar varios tipos según su origen. Hemos recurrido, dentro de la idea agroecológica de sostenibilidad esquematizada en el marco teórico, a dos clasificaciones distintas de la energía empleada como insumo en el sistema:

- **Energía Renovable - Energía No Renovable:** Como se ha dicho, los indicadores relacionados con el consumo de energía no renovable son los más importantes desde el punto de vista de la sustentabilidad del agroecosistema. Por un lado la renovabilidad de la energía es un requisito indispensable en los sistemas sustentables, y por otro, las operaciones de extracción, distribución y combustión de las materias primas no renovables llevan asociadas importantes impactos socioambientales ocultos, como el cambio climático, los conflictos por los recursos o los vertidos tóxicos. Los indicadores relacionados con la ENR que hemos estudiados son el **consumo de energía no renovable (ENR, en GJ/ha)** y la **eficiencia de la energía no renovable (EENR, GJ/GJ)**. El primero da una idea del consumo de este tipo de energía por unidad de superficie, es decir, de la importancia cuantitativa del manejo en cuestión como consumidor de energía fósil. El segundo relaciona el parámetro anterior con la producción, indicándonos la dependencia del sistema respecto a este insumo.
- **Energía Interna - Energía Externa:** Los recursos internos son aquellos propios, de fácil acceso y costes reducidos, mientras que los externos son aquellos recursos ajenos, monetariamente costosos (Francis y King, 1988, en Simón, 1995) La diferenciación entre energía interna y externa, es decir, entre recursos locales y foráneos, nos permite medir la autonomía del sistema.

Como vimos, en general un agroecosistema será más sostenible cuanto más se apoye sobre recursos propios. Los indicadores relacionados con la energía externa, además, vendrían a completar las carencias que en la evaluación de la sostenibilidad podrían tener los relacionados con la ENR. En efecto, centrar la atención exclusivamente en estos últimos puede ocultar la dependencia a los insumos externos, aunque sean renovables, como en los casos de sustitución de insumos tan criticados desde la agroecología. De esta manera no se mostraría, si la hubiere, la necesidad de un elevado flujo de energía y materiales (en forma de semillas, abonos elaborados, fitosanitarios biológicos, transporte de los insumos, etc.) para el mantenimiento del sistema, que estaría comprometiendo su sostenibilidad general. El principal indicador de la relación entre energía interna y externa sería el de **autonomía** (expresado en %), pero también es indicativa la **eficiencia energética neta (EEN, GJ/GJ)**, que relaciona la energía neta consumida con la energía neta exportada. Este último indicador, aunque incluye la mano de obra como insumo, que es un recurso propio del sistema, en nuestro caso puede considerarse también como un indicador de la energía externa debido a la bajo valor energético relativo de la mano de obra, que hace que este factor pueda despreciarse en el resultado final.

5.2.1.2 PRODUCCIÓN

A pesar de que el análisis de los flujos energéticos se muestra indispensable a la hora de evaluar la viabilidad a largo plazo de alternativas relacionadas con el uso de la energía como las planteadas en el presente estudio, reconocemos que su carácter unidimensional posee grandes limitaciones. Hemos intentado paliar parcialmente esta carencia incluyendo dos indicadores que no incluyen la energía: el **rendimiento de grano (PNG, en kg/ha)** y la **capacidad de carga ganadera (CCG, en ovejas/ha)**. El primero se ha incluido porque es uno de los indicadores más comunes utilizados en agronomía, y porque el grano es el principal producto económico del sistema. La selección del segundo se debe a la vinculación en nuestro agroecosistema del subsistema cerealista estudiado con el ganadero, que implica que en muchos casos lo más importante para el agricultor, que a menudo también es ganadero, sea cuántas ovejas puede mantener con su producción de cereal. Además de estos indicadores, relacionados exclusivamente con la producción, los indicadores **EENR** y **EEN** también nos informan sobre la productividad del sistema, al relacionar la producción con la cantidad de insumos empleados.

5.2.2 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE DESEMPEÑO DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS EN CADA INDICADOR

Según Galván-Miyoshi (2008, en Astier et al., 2008) éste constituye el paso más importante en la construcción de un mapa multicriterio, puesto que es aquí donde los indicadores se expresan en función de un juicio de valor sobre lo que consideramos o no adecuado. A partir de medidas de desempeño podemos derivar valores normativos que pueden ser útiles en la planeación y diseño de sistemas sustentables, y además nos permiten tener los indicadores en un formato común, de forma que sean más fácilmente comparables. La función del índice de desempeño puede tomar cualquier forma, pero en nuestro caso todas tienen un comportamiento lineal. Para obtener los índices hemos recurrido al método de la *distancia al óptimo*, en la que el valor de referencia del índice de desempeño corresponde al nivel máximo u óptimo que puede alcanzar el indicador, así que lo que importa es la posición que ocupa nuestro sistema de manejo en relación con ese valor. Esta distancia se ha expresado en tanto por uno según la siguiente fórmula:

$$d = V / V_o ; \quad \text{donde:}$$

d (tanto por uno): distancia al máximo

V (unidades del indicador): valor del indicador en el escenario estudiado

V_o (unidades del indicador): valor máximo del indicador entre todos los escenarios

El caso del indicador ENR (consumo de energía no renovable, en GJ/ha) el valor óptimo no se corresponde con el máximo valor numérico, sino con el mínimo. En este caso, hemos recurrido al método del *intervalo de referencia*, en el que se establece un umbral crítico, o mínimo tolerable, además del valor óptimo, y se determina la posición del sistema estudiado dentro de ese intervalo acotado por ambos valores. En nuestro caso, esto se correspondería con la siguiente expresión:

$$d = (V_{max} - V) / (V_{max} - V_{min}) ; \quad \text{donde:}$$

d (tanto por uno): distancia al máximo

V_{max} (GJ/ha): valor máximo de ENR. Se ha establecido en 10, un poco por encima del máximo entre todos los escenarios

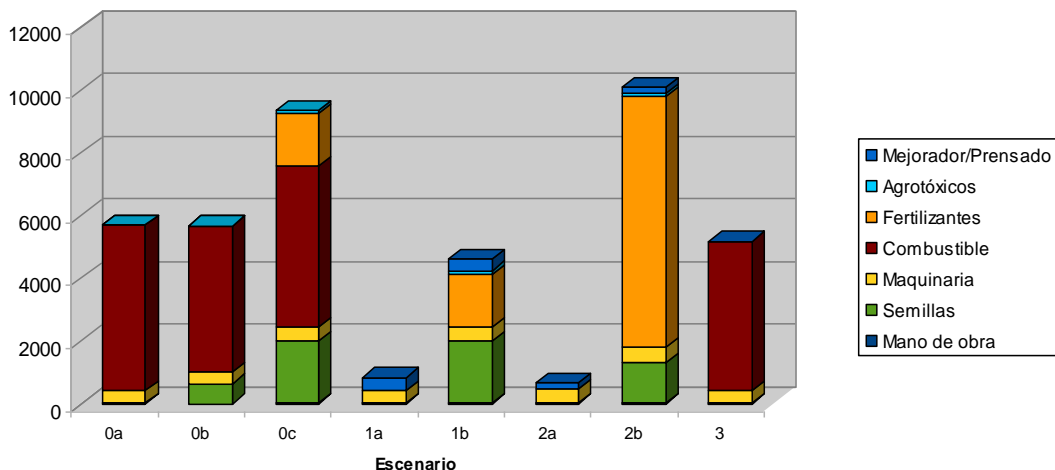
V (GJ/ha): valor de ENR en el escenario estudiado

V_{min} (GJ/ha): valor mínimo de ENR entre todos los escenarios

5.3 RESULTADOS

5.3.1 ENTRADAS DE ENERGÍA

Figura 5.1 Entradas de energía ($\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ciclo bienal}^{-1}$)



La figura 5.1 muestra la entrada neta de energía en todos los escenarios estudiados, que ya vimos desglosada en las tablas correspondientes. En ella se pueden apreciar gráficamente las grandes diferencias existentes entre las distintas opciones consideradas. Podemos destacar, para empezar, que a pesar de la similitud en el manejo y el escaso uso de agroquímicos, las diferencias son importantes entre agricultores ecológicos y convencionales en el escenario de partida, en gran parte debido a la importación de la semilla en convencional.

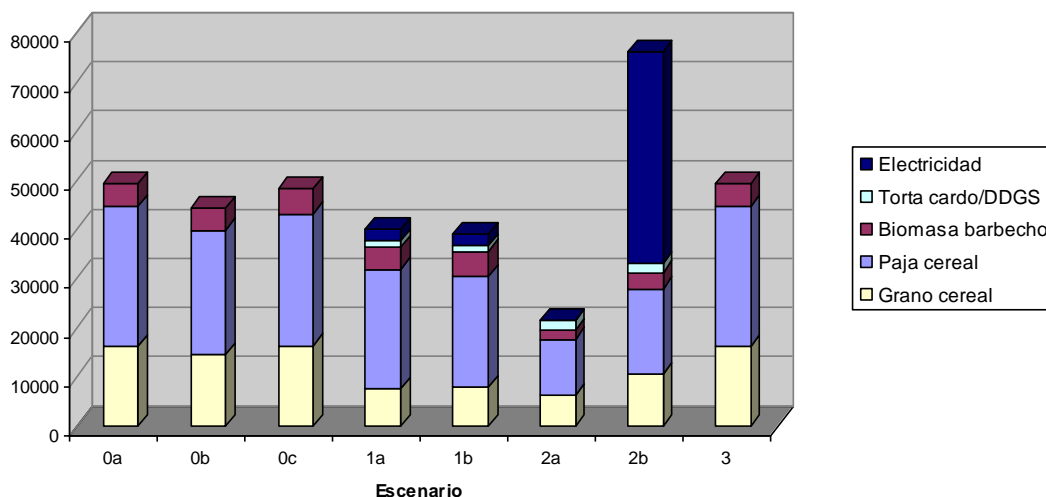
En el Escenario 1a se reduce drásticamente la entrada de energía, al sustituir el diésel por etanol, aunque se tenga que importar al sistema un mejorador de ignición para hacer posible esta sustitución. Esta reducción no es tan aparente, en cambio, en el manejo convencional, donde las características intrínsecas de este tipo de manejo, basado en la importación de insumos, lastran su potencial de reducción del consumo.

Estas diferencias se marcan más en el Escenario 2, basado en el aceite de cardo como combustible, en el que encontramos tanto el consumo mínimo como el máximo de entre todas las posibilidades estudiadas. El manejo ecológico en este escenario (2a) logra reducir las importaciones de energía hasta poco más de la décima parte de las existentes en mismo manejo en el agroecosistema actual (0a). La energía necesaria para el prensado y la secuestrada en la maquinaria son los únicos insumos existentes en esta opción. El manejo convencional (2b), en contraste con el anterior, supera en consumo energético al de referencia (0c), a pesar de haber eliminado el combustible, debido a que el cultivo convencional de cardo se basa en la importación de cantidades masivas de fertilizante.

En el Escenario 3, por último, puede apreciarse una reducción muy pequeña en el consumo respecto al de partida (0a), debido a que la cantidad biogás que puede elaborarse a partir del estiércol producido por la cantidad de ovejas que puede mantener el sistema es pequeña en comparación con la cantidad de combustible que hay que sustituir.

5.3.2 SALIDAS DE ENERGÍA

Figura 5.2 Salidas de energía (MJ*ha⁻¹*ciclo bienal-1)



Las salidas, a diferencia de las entradas, son muy similares entre los tres grupos estudiados en el escenario de referencia, donde sólo podemos apreciar una leve disminución en los agricultores en transición, probablemente asociada a que el sistema aún no ha alcanzado un equilibrio, pero es tan pequeña que podría tratarse también de un error de muestreo.

En términos globales, la reducción de la producción energética neta no ha sido muy importante en el Escenario 1 respecto al de referencia, pero si nos fijamos en los factores que más han acusado esta disminución, vemos que es la exportación de grano la que se ha visto más afectada (con una reducción cercana al 50%), pues éste constituye la principal materia prima para la elaboración del etanol usado como combustible en este escenario. Este es un dato preocupante en la medida en que el grano es el principal producto del sistema en términos económicos, aunque se ve parcialmente compensado por las nuevas producciones obtenidas en el escenario, DDGS y electricidad.

En el Escenario 2 es muy notable la diferencia entre el manejo ecológico y el convencional. Las razones de esta diferencia ya se han explicado en los apartados 4.2.8.1 y 4.2.8.3, pero resumiendo, se deben principalmente a dos motivos: por un lado, la reducción del 30,6% en el rendimiento del cardo que hemos asumido en el manejo ecológico frente al convencional, que obliga a destinar más superficie al cardo para obtener la misma cantidad de aceite, en detrimento de las producciones del cereal; por otro, la exportación de biomasa transformada en electricidad en el manejo convencional, una biomasa que en el manejo ecológico es utilizada como fuente de fertilización y, por tanto, no se exporta.

La mayor cantidad de energía exportada se alcanza, de hecho, en el Escenario 2b, pero como podemos ver, la mayor parte de esa energía está en forma de electricidad. En efecto, este sistema es muy bueno en relación al resto como productor de energía, pero hay que recordar que la eficiencia en la captación de la energía solar mediante la fotosíntesis es en torno a un orden de magnitud más baja que la de otras tecnologías de captación, como la solar fotovoltaica o termoelectrica (véase apartado 2.2.2.1), con lo cual, dada la dependencia a los insumos de este sistema que vimos en el apartado anterior, parecería más aconsejable apostar por esas otras tecnologías si el objetivo es producir electricidad o calor.

Por otro lado, la reducción que se ha producido en las producciones cerealistas en ambos casos del Escenario 2 respecto al escenario de referencia atañe a todas las producciones, y no sólo a la de grano, a diferencia de lo que vimos para el Escenario 1. Esto es debido a que en el Escenario 1 se utiliza un producto del sistema cerealista para la elaboración del combustible, mientras que en Escenario 2 se sustituye el propio cultivo de cereal, con todas sus producciones asociadas. Pero de nuevo, encontraríamos una compensación parcial en la nueva producción, el subproducto de la elaboración del aceite (la torta de cardo) que, aunque no es muy importante en términos energéticos, sí lo es para la capacidad de carga ganadera del sistema, por su alto contenido en proteínas.

Finalmente, encontramos que la producción en el Escenario 3 es la misma que en el de referencia (0a), debido a que la elaboración del biogás no implica a la producción de cereal.

5.3.3 VALORACIÓN DE LOS INDICADORES

Como se ha comentado, éste no pretende ser un análisis completo de la sustentabilidad de las alternativas estudiadas. Por este motivo, por la dificultad de la vinculación de los indicadores empleados a atributos concretos, y también porque el carácter multidimensional de la sustentabilidad hace desaconsejable una simplificación excesiva en su evaluación, hemos preferido no integrar los indicadores en forma de uno o pocos índices agregados. Tampoco hemos creído oportuna una representación gráfica, como la AMIBA que suele utilizarse en el MESMIS, debido al elevado número de opciones consideradas, que dificultaría su interpretación en un gráfico. A continuación se muestran los indicadores seleccionados en forma de valor absoluto y valor relativo respecto al óptimo alcanzado entre todos los escenarios.

Tabla 5.1 Valoración de los indicadores de sustentabilidad en los distintos escenarios

| Escenario | Energía Tracción | Manejo | EEN (GJ/GJ) | | ENR (GJ/ha) | | EENR (GJ/GJ) | | PNG (kg/ha) | | GA (%) | | CCG (nº) | |
|-----------|------------------|--------|-------------|------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|--------|------|----------|------|
| | | | VA | P | VA | P | VA | P | VA | P | VA | P | VA | P |
| 0a | Diésel | Eco | 8,66 | 0,18 | 5,64 | 0,46 | 8,77 | 0,17 | 1250 | 1 | 23,43 | 0,23 | 2,2 | 0,88 |
| 0b | Diésel | Tran | 7,83 | 0,16 | 5,13 | 0,52 | 8,66 | 0,17 | 1132 | 0,91 | 20,16 | 0,20 | 2,0 | 0,80 |
| 0c | Diésel | Conv | 5,16 | 0,10 | 7,97 | 0,22 | 6,07 | 0,12 | 1242 | 0,99 | 4,71 | 0,05 | 2,1 | 0,84 |
| 1a | Etanol | Eco | 49,2 | 1,00 | 0,78 | 0,98 | 51,83 | 1,00 | 590 | 0,47 | 92,97 | 0,93 | 2,1 | 0,84 |
| 1b | Etanol | Conv | 9,53 | 0,19 | 3,13 | 0,73 | 12,54 | 0,24 | 600 | 0,48 | 67,87 | 0,68 | 2,1 | 0,84 |
| 2a | Aceite | Eco | 32,27 | 0,66 | 0,63 | 1,00 | 35,46 | 0,66 | 549 | 0,44 | 99,61 | 1,00 | 1,8 | 0,72 |
| 2b | Aceite | Conv | 7,56 | 0,15 | 8,68 | 0,14 | 8,81 | 0,17 | 826 | 0,65 | 35,09 | 0,35 | 2,5 | 1,00 |
| 3 | Biogás Diésel | Eco | 9,55 | 0,19 | 5,11 | 0,52 | 9,69 | 0,19 | 1250 | 1 | 25,35 | 0,25 | 2,2 | 0,88 |

Notas: VA: Valor absoluto; P: tanto por 1; EEN: Eficiencia Energética Neta (PN/importaciones + mano de obra); ENR: Consumo de Energía No Renovable; EENR: Eficiencia de la Energía No Renovable (PN/ENR); ENRG: Eficiencia de la Energía No Renovable en relación a la Producción de Grano (EG/ENR); PNG: Producción Neta de Grano; GA: Grado de Autonomía (Importaciones/CB); CCG: Capacidad de Carga Ganadera ovina.

Fuente: elaboración propia

En la EEN destacan, muy por encima del resto, el Escenario 1a y 2a, donde se han alcanzado niveles de eficiencia de los recursos externos equiparables a los de las agriculturas tradicionales. El resto de escenarios quedan todos muy por debajo de su nivel potencial (establecido por el Escenario 1a, que alcanza el máximo valor), destacando el manejo convencional en el sistema actual (0c), que alcanza la mínima puntuación, lo que muestra su dependencia del exterior.

En el consumo de energía no renovable (ENR) de nuevo destacan el 1a y el 2a, que obtienen una puntuación bastante por encima del resto, debido a su frugal consumo de este tipo de energía, aunque en este caso el 2a queda ligeramente mejor situado. El peor desempeño aparece en el sistema convencional actual (0c) y con cardo (2b), que son los más importantes consumidores de energía fósil, si bien el manejo ecológico actual también tiene mucho potencial de mejora.

La EENR nos ofrece resultados parecidos a la EEN, con valores algo más elevados en todos los casos, debido a que, mientras el numerador es el mismo para ambos indicadores (PN), el denominador es siempre igual o inferior en la EENR, pues toda la ENR es importada, y no toda la energía importada es ENR. Hay que destacar que, mientras esta mejora respecto a la EEN ha sido muy pequeña en los escenarios ecológicos, en los convencionales sí ha sido algo más apreciable, lo que pone de manifiesto que en nuestro caso en ecológico casi toda la energía importada es no renovable, mientras que los convencionales, además de usar más ENR, necesitan también de la importación de energía renovable secuestrada en las semillas que compran.

En la PNG se sitúan por encima, obviamente, los escenarios de referencia (cuyos niveles de producción son similares entre sí), debido a que no emplean recursos internos para la elaboración del combustible. Pero también destaca el biogás, ya que no usa los recursos del sistema cerealista. La reducción de la PNG en los escenarios 1 y 2 es muy acusada, quedando en niveles por debajo de la mitad de los del sistema actual. Pero aquí hay que considerar la baja productividad relativa del agroecosistema que estamos estudiando, en torno a 1200 kg/ha*ciclo bienal, que contrasta con los más de 2000 kg/ha*ciclo bienal en el manejo similar estudiado por Meco y Lacasta (2006) en La Mancha, con un consumo de combustible parecido. Esto nos lleva a pensar que, si bien la reducción de grano puede ser muy drástica en condiciones como las del sistema estudiado, puede no serlo tanto en ambientes más productivos.

Respecto al grado de autonomía (GA), su mejor nivel de desempeño es de nuevo alcanzado por los escenarios 1a y 2a, en los que más del 90% de los insumos empleados provienen de dentro del sistema, mientras que es el manejo convencional actual el que se lleva la peor parte, pues no llega al 5% de la energía propia. Como se puede apreciar, el manejo convencional tiene un potencial de mejora de su autonomía mucho menor que el ecológico, ya que el máximo que alcanza es un 68% de energía propia, en el Escenario 1b.

Por último, comprobamos que ha sido acertado incluir la capacidad de carga ganadera en la evaluación. Este indicador muestra que la reducción radical del grano que habíamos observado en los escenarios 2 y 3 no es tan grave si la producción está vinculada a la cría de ganado ovino, como ocurre en muchos casos en Orce. Así, mientras que la PNG se reducía más de un 50% respecto al escenario de referencia, la CCG sufre una reducción de apenas el 18% en el peor de los casos (2a), y de hecho se incrementa en el manejo convencional (2b), debido a la mayor cantidad de proteína disponible.

5.4 CONCLUSIONES

En este apartado comentaremos las carencias más importantes que hemos detectado en este trabajo, y las posibilidades de mejora de la metodología y de complementación de los resultados con nuevos estudios. Nos ocuparemos primero de aspectos generales, para luego ocuparnos de cada alternativa por separado.

En primer lugar, hemos de reconocer que son necesarios más datos y un análisis estadístico para confirmar los resultados obtenidos en esta tesina. En este sentido, este trabajo se ha planteado más bien como una mera aproximación al problema de las alternativas al diésel en la agricultura del sudeste peninsular, que necesita ser completado por varios frentes.

Existe una limitación de los resultados obtenidos a las condiciones locales. La productividad del agroecosistema está por muy por debajo de la media española para sistemas similares (cereal ecológico y convencional), debido a las particulares condiciones edafoclimáticas de la zona. Esto condiciona que los resultados sean difícilmente extrapolables más allá de la cuenca del Guadiana Menor. En cualquier caso, cada agroecosistema presenta unas circunstancias particulares que lo hacen único, y por tanto, desde la agroecología se pone énfasis en las unidades geográficas pequeñas, desde el estudio de las interacciones entre la gente y los recursos de producción de alimentos en el interior de un predio o área específica (Altieri, 1999:47). Por lo tanto, las dificultades de extrapolación no deben verse como un fallo de este trabajo. De hecho, la elección de un sistema tan poco productivo fue intencionada: partimos de que si encontrábamos alternativas viables en sistemas poco productivos, en principio su aplicación a sistemas más productivos resultaría relativamente sencilla. En suma, para tener una idea global de las posibilidades de avanzar hacia la autosuficiencia energética en la agricultura peninsular, sería necesaria la elaboración de estudios similares en otras áreas, de forma que se obtenga una perspectiva global de este potencial en función de las condiciones locales. Obviamente, esto es extensible a otras regiones del planeta, especialmente en agricultura familiar -cuando está mecanizada- de zonas tropicales, con mayor producción de biomasa y más necesidades si cabe de desvinculación de los derivados del petróleo.

Otro punto a destacar es el de la conveniencia de ampliar el espectro de indicadores estudiados, para abarcar más atributos de la sustentabilidad. A continuación se enumeran algunos aspectos que sería interesante tener en cuenta. En primer lugar, un estudio de los flujos físicos que ocurren en un agroecosistema no debe limitarse al análisis energético, sino que debe ser complementado por el estudio de los flujos de materiales. En este sentido, el balance de nutrientes podría complementar al balance energético. Del mismo modo, la realización de un balance de CO₂ y otros gases de efecto invernadero sería también interesante. En el presente trabajo se han tratado los parámetros relacionados con la energía no renovable como indicadores de contribución al cambio climático. Sin embargo, en sistemas que, como los agrícolas, implican transformaciones en el uso del territorio, existe otro factor de gran relevancia para el balance de CO₂, que es la absorción de este gas en el suelo. Presumiblemente, los distintos niveles de reciclaje de biomasa entre escenarios generarían diferencias en el balance de CO₂, tanto entre sistemas ecológicos y convencionales como entre el cereal y el cardo, que sería muy interesante valorar.

La necesidad de un estudio económico resulta la más apremiante para conocer la viabilidad a corto plazo de las alternativas. Sin embargo, los balances económicos al uso, basados en la valoración monetaria como único indicador, adolecen de importantes limitaciones, relacionadas con la reducción de lo económico al mero valor de cambio. Un grave defecto es su incapacidad para sacar conclusiones fiables a largo plazo. La convulsiva oscilación en los precios de las materias primas de este último año 2008, por ejemplo, que llevó el precio del gasóleo agrícola desde más de un euro por litro en verano hasta poco más de 50 céntimos en enero de 2009, habría generado resultados completamente distintos en los balances económicos de los sistemas estudiados según se hubiera tomado el precio del gasóleo de uno u otro mes. Los indicadores físicos, en cambio, son herramientas mucho más potentes en el estudio de la

sustentabilidad a largo plazo. Pero precisamente ese factor temporal es clave, porque en el corto plazo, ninguna alternativa será sustentable si no es económicamente viable. De ahí que sea aconsejable realizar un balance económico que complemente el estudio de los flujos físicos. Del mismo modo, la cuantificación de las desigualdades en la distribución de la riqueza generada por el agroecosistema también serían un punto a tener en cuenta.

También es necesario aclarar que, aunque este trabajo ha sido realizado desde "la academia", la implementación real de las alternativas que hemos propuesto debe estar vinculada a procesos participativos, en los que los propios agricultores tomen parte de la investigación y puesta en marcha de los proyectos de desarrollo de tecnologías alternativas. Las dimensiones sociocultural y dialéctica son fundamentales desde la perspectiva agroecológica, como vimos en el marco teórico. El desarrollo debe ser endógeno para ser sostenible, ya que la imposición desde fuera de nuevas tecnologías, aunque sea de forma bienintencionada, socava las señas de identidad que han configurado históricamente los agroecosistemas. En este sentido, los parámetros que hemos calculado podrían servir como referencia en un proceso participativo a nivel local de reflexión y acción sobre el problema de la energía y las alternativas al diésel en la agricultura.

Pasando a un problema metodológico, señalaremos que una debilidad importante de este trabajo proviene de haber estudiado un subsistema en lugar del agroecosistema completo. Este hecho lleva a que pueda sobrevalorarse la energía exportada por el sistema, pues en nuestro caso hemos contabilizado salidas que, como la paja y la biomasa del barbecho, sólo pueden ser aprovechadas a través de otro subsistema -el ganadero-, y no suponen una salida de energía directamente aprovechable por los humanos. Pero también se podría argumentar que otras salidas, como la electricidad, tampoco pueden ser aprovechadas por la humanidad sin su transformación previa en un sistema como pueda ser un aparato eléctrico. De cualquier modo, una posible solución a este problema de contabilidad que cabría proponer para sistemas cerealistas vinculados a la ganadería -además, obviamente, de la inclusión en el estudio del subsistema ganadero- podría ser la cuantificación de la energía asociada a productos consumibles por el ganado mediante su energía metabolizable en lugar de su energía inherente.

La mayoría de problemas de carácter metodológico que han aparecido durante la elaboración de este trabajo están asociados a dificultades de cuantificación de la energía asociada a determinados insumos, y tienen como trasfondo la escasez de información disponible en este ámbito. Esto pone de manifiesto la necesidad de incrementar la investigación para generar ese conocimiento. Un claro ejemplo sería el de la cuantificación de la energía de edificios e infraestructura asociada a la producción de biocombustibles. En este sentido, hay que remarcar que el factor de escala, muy importante en cuanto a la eficiencia energética de los procesos, no ha podido ser cuantificado en nuestro caso, ya que, ante la ausencia de datos de plantas pequeñas, hemos tenido que recurrir a la bibliografía existente sobre plantas de gran tamaño. La potenciación de la investigación y producción de biocombustibles a nivel de finca o municipio debería estar en la primera línea de las agendas de los organismos competentes en desarrollo rural, debido a sus posibilidades en la mejora de la sustentabilidad de los agroecosistemas y, por tanto, del mundo rural en general. En contraste, el apoyo que está recibiendo la producción de agrocarburos para el transporte vimos que está teniendo consecuencias muy graves a nivel global.

El factor escala también es importante por otro aspecto: el tamaño mínimo para una producción de biocombustible con una eficiencia viable probablemente será mayor que la cantidad necesitada por un solo agricultor. En este caso, para evitar esta pérdida de eficiencia cabrían dos opciones: que los agricultores asuman colectivamente la tarea a través de una cooperativa, o que sea llevada a cabo por una empresa externa. Obviamente, la primera opción tendría mayor potencial de mejorar la autonomía del sistema, si bien la falta de tejido asociativo observada en los agricultores de Orce, que suponemos que es general a los productores de cereal, podría suponer un escollo a la hora de hacerla realidad.

5.3.1 ETANOL DE CEREAL

La alternativa de etanol como combustible en el manejo convencional ha obtenido una puntuación bastante baja en todos los indicadores. Como dijimos en su momento, la opción más aconsejable y viable para mejorar la sostenibilidad del manejo convencional de cereal en Orce es la de la transición agroecológica, mediante la que se consigue aumentar la autonomía del sistema sin menoscabo de su productividad.

En cuanto al manejo ecológico, hemos comprobado que su nivel de desempeño ha sido relativamente alto en todos los indicadores excepto en la producción de grano. Esto lleva a concluir que, en las condiciones existentes en la comarca estudiada, esta opción no sería muy recomendable si no existe una vinculación al sistema ganadero. Pero si la hubiera, mediante esta alternativa se conseguiría reducir drásticamente la importación de insumos, a la vez que se mantendría casi inalterada la capacidad de carga ganadera del sistema. Por tanto, podemos concluir que esta opción aparece como muy promisoría para mejorar la autosuficiencia de agroecosistemas cerealistas poco productivos vinculados a la ganadería.

5.3.2 CULTIVO DE CARDO

Hemos encontrados varios limitantes de gran importancia para el estudio de esta alternativa. Por un lado, la ausencia de bibliografía sobre su cultivo bajo manejo ecológico. Por otro, la ausencia de datos sobre los rendimientos del cultivo de cardo en zonas con condiciones similares a las de Orce. Dados los resultados obtenidos, en los que el cardo destaca como una de las alternativas más promisorias, el estudio del manejo ecológico de este cultivo aparece como un paso muy recomendable en la transición hacia agroecosistemas sustentables en condiciones mediterráneas. Y esto porque, como hemos visto, pese a su elevada productividad energética, el cultivo convencional de cardo requiere de la importación de cantidades masivas de energía de origen fósil en forma de fertilizantes y agrotóxicos. Para superar el otro limitante, sería necesario estudiar el comportamiento del cultivo del cardo en Orce o en otras zonas de características similares.

Respecto a los resultados obtenidos en nuestro trabajo, en primer lugar descartamos la viabilidad de su cultivo bajo manejo convencional a la hora de avanzar hacia los objetivos aquí propuestos de reducción de la dependencia a los insumos, ya que, como hemos visto, el consumo energético (medido en sus varios indicadores) en esta opción es mayor que en el escenario de referencia, y un orden de magnitud mayor que en las alternativas más ahorradoras. En cuanto al manejo ecológico, destaca la baja productividad energética por el reemplazo de casi toda la biomasa, así que cabría hacer algunas propuestas para su experimentación. En primer lugar, podría emplearse el estiércol producido en el cercano subsistema ganadero como fertilización suplementaria, que evitaría la necesidad del reciclaje de toda la biomasa. Aquí habría que tener en cuenta el uso actual de este estiércol, que por lo que sabemos se destina en su mayoría al regadío, así que su retirada de ese subsistema podría resultar problemática. También en relación con esta opción, otra línea de trabajo interesante relacionada con el cultivo de cardo sería el estudio de las posibilidades de aprovechamiento ganadero de parte de la biomasa generada. Esto sería posible mediante la utilización de variedades de cardo sin espinas, que permiten que el ganado consuma la fracción no lignocelulósica de la biomasa. Varios estudios muestran la viabilidad del cardo como forraje (Portis, 2005; Carjaville, 1996). La recolección de la biomasa, sin embargo, podría no ser recomendable en un sistema que, como el planteado, pretenda ser de mínimos insumos. Una alternativa a la cosecha podría ser el aprovechamiento in situ de esta biomasa por el ganado. La ventaja más clara sería la potenciación del reciclaje de nutrientes a través del estiércol. Esta opción podría estar limitada por la dificultad de acceso del ganado a las hojas más altas del cardo, debido al elevado porte de este cultivo en relación con los animales, especialmente ovejas. Otro limitante podría ser la compactación del suelo provocada por el ganado. La compactación puede llegar a ser bastante problemática en cultivos perennes como el cardo (Fernández et al., 1997).

5.3.3 BIOGÁS

El biogás ha resultado ser la alternativa más discreta de las consideradas, pues en ella los cambios respecto al escenario de referencia han sido más leves. Pero no por ello debemos minusvalorarla. En efecto, aunque claramente no es una alternativa que permita por sí misma eliminar el diésel de los insumos agrícolas, las ganancias energéticas observadas, por pequeñas que sean, tienen un coste territorial prácticamente nulo. Además, hay que considerar la pérdida de eficiencia debida al proceso de purificación y compresión del biogás, que podría evitarse si su uso no fuera como carburante de los tractores, sino en el hogar o en las instalaciones agropecuarias.

Un rasgo muy interesante de esta tecnología es su potencial de lograr sinergias con otros procesos. Por ejemplo, el biofertilizante obtenido se podría emplear en el cultivo de cardo, evitando tener que dejar toda la biomasa como fertilizante. En China, el biofertilizante a menudo se emplea para criar algas que luego alimentan a peces de agua dulce. Del mismo modo, la aplicación de esta tecnología a otras materias primas, y en concreto a los residuos sólidos urbanos y a las aguas fecales -como ya está ocurriendo en Andalucía-, elimina un grave problema de contaminación a la vez que proporciona energía y fertilizante. El biogás también podría emplearse, por ejemplo, para destilar el etanol en el Escenario 1, evitando el empleo de paja. Y el etanol se podría usar como sustituto del metanol para la elaboración de biodiésel con el aceite de cardo, lo que evitaría tener que realizar modificaciones en el motor.

5.3.4 REFLEXIONES FINALES

A raíz de lo comentado en el apartado anterior, podemos intuir que, si bien por separado cada una de las alternativas consideradas tiene cierto potencial para mejorar la sustentabilidad, si aprovechásemos la posible integración de los diferentes procesos que se dan en ellas, y que se dan también en los subsistemas ya existentes en el agroecosistema (especialmente el ganadero), la mejora de la autosuficiencia podría lograrse con un efecto sobre la productividad más pequeño e incluso positivo.

Desde la perspectiva de los flujos físicos podemos identificar, en definitiva, dos procesos paralelos que provocan la insustentabilidad en la agricultura. Por un lado, la *linealización* de los flujos, y por otro la *parcelación* o *segregación* de los procesos. La linealización se puede visualizar si imaginamos el agroecosistema como una caja en la que por un lado entran grandes cantidades de energía y por el otro el sistema exporta energía transformada. Esto es posible por la existencia de combustibles fósiles, que son la materia prima para la elaboración de los insumos empleados, y genera impactos sobre todo a ambos extremos del ciclo de vida de los insumos: por un lado agotamiento del recurso y presión ambiental derivada de su extracción, y por el otro contaminación derivada de su uso. La parcelación (física), consiste en la segregación espacial de las distintas actividades agrícolas, y es posible por la presencia en el sistema económico en que se inserta la agricultura de altos niveles de energía disponible - gracias también a la explotación de la energía no renovable-. Esta parcelación provoca la generación de residuos que antes no lo eran y de necesidades donde no las había. Frente a estos procesos, el paradigma ecológico, en consonancia con el funcionamiento de los ecosistemas naturales, propone la *circularización* de los flujos y la *integración* de los procesos.

En este sentido, la integración de ganadería y agricultura, junto con las nuevas tecnologías de aprovechamiento de la biomasa como carburante, hemos comprobado que pueden generar sistemas en los que los ciclos se hayan cerrado de tal forma que el grueso de la energía necesaria para los procesos existentes recaiga sobre el propio sistema, rompiendo de este modo algunos de los más importantes lazos de dependencia responsables de su insustentabilidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

AAE (Agencia Andaluza de la Energía) (2008) Situación de la biomasa en Andalucía. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. 43 pp.

AIE (Agencia Internacional de la Energía) (2007) Medium-term oil markets report. Julio 2007

ALONSO, A. M., GUZMÁN, G. I. (2006) Evaluación comparada de la sostenibilidad agraria en el olivar ecológico y convencional. *Agroecología* (1): 63-73

ALONSO, A. M. (2008) Metodología de cálculo de los impactos socioeconómico y ambiental. Material Didáctico Programa Interuniversitario Oficial de Posgrado: "Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica". Universidad Internacional de Andalucía. Baeza, Jaén.

ALONSO, A. M., GUZMÁN, G. I., FORASTER, L. (2008) Eficiencia energética y gasto de energía comparados de la agricultura ecológica *versus* convencional. Actas VIII Congreso SEAE. Bullas. Murcia.

ALONSO, A. M., GUZMÁN, G., FORASTER, L., LERA, R. (2009) Análisis de la agricultura ecológica en España. En: *Producción ecológica: influencia en el desarrollo rural*. Ed: MARM (en prensa).

ALTIERI, M. A. (1999) *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable*. Editorial Norman-Comunidad. Montevideo

APPA (Asociación de Productores de Energías Renovables) (2007) Biocarburantes y Desarrollo Sostenible Mitos y Realidades. Descargado el 05/11/2008 en:
http://www.appa.es/descargas/Doc_BIOCARBURANTES_1309.pdf

ARGOS (2008) Información del municipio de Orce. Descargado el 10/12/2008 en:
<http://www.juntadeandalucia.es/empleo/argos/indicadores3/municipio01.jsp?idMun=18146&idProv=18&idUTE=UTEDLThu%E9scar&mun=Orce&ind=1>

ASPO (Association for the Study of Peak Oil) (2008) Dossier VII annual international ASPO conference. Barcelona, 20-21 octubre 2008.

ASTIER, M., MASERA, O. R., GALVÁN-MIYOSHI, Y. (Coords) (2008) Evaluación de la sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. EAE/CIGA/ECOSUR/CIEco/UNAM/GIRA/Mundiprensa/ Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. Valencia, 200 p.

AUDSLEY, E., ALBER, S., CLIFT, R., COWELL, S., CRETZAZ, P., GAILLARD, G., HAUSHEER, J., JOLLIETT, O., KLEIJN, R., MORTESEN, B., PEARCE, D., ROGER, E., TEULON, H., WEIDEMA, B., VAN ZEIJTS, H., (1997) Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. Final Report of the Concerted Action AIR3-CT94-2028. Silsoe Research Inst., Silsoe, UK

- AUTORÍA COLECTIVA (2008) Declaración del Seminario Internacional Agrocombustibles como obstáculo a la construcción de la Soberanía Alimentaria y Energética. Sao Paulo.
- BAALI, E. H., OUWERKERK, E. (2005) Energy Balance of Wheat Production in Morocco. Deutscher Tropentag. International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development.
- BALLENILLA, M. (2007) Biocombustibles: mito o realidad. Practicum Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Miguel Hernández de Elche. Descargado en www.crisisenergetica.org
- BALLENILLA, M. y BALLENILLA, F. (2007) La tasa de retorno energético. *El Ecologista* 55:24-28.
- BEINTEMA, N., BOSSIO, D., DREYFUS, F., FERNÁNDEZ, M., KRANJAC-BERISAVLJEVIC, G., LEAKEY, R., OCHOLA, W., OSMAN-ELASHA, B., PLENCOVICH, C., ROLING, N., ROSEGRANT, M., ROSENTHAL, E. y SMITH, L. (2008) Evaluación Internacional del papel del Conocimiento, la Ciencia y la Tecnología en el Desarrollo Agrícola (IAASTD). Resumen de la evaluación mundial preparado para los responsables de la toma de decisiones. Johannesburgo, abril 2008.
- BERARDI, G. M. (1978) Organic and conventional wheat production: examination of energy and economics. *Agro-ecosystems*, 4:367-376
- BERNESSON, S. (2004) Farm-scale production of RME and ethanol for heavy diesel engines. -With emphasis on environmental assessment. Tesis Doctoral. Department of biometry and engineering. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala.
- BOCCARDI, F. y BOCCARDI, R. (2007) Soja en Argentina: Cosecha Amarga. En: www.ecoport.net/content/view/full/66464
- BULLON, F. (2006) El mundo ante el cémit del petróleo. AEREN. Descargado en www.crisisenergetica.org
- CAMPOS, P., y NAREDO, J. M. (1980) La energía en los sistemas agrarios. *Agricultura y Sociedad* 15:18-155
- CARJAVILLE, M. C. (1996) Estudio del valor nutritivo para rumiantes del *Cynara cardunculus*. Tesis Doctoral. Departamento de Producción Animal. Universidad de Lleida.
- CARPINTERO, O. (2005) El metabolismo de la economía española. Recursos naturales y huella ecológica (1955-2000). Fundación César Manrique. Madrid. 636 pp.
- CARPINTERO, O., y NAREDO, J. M. (2006) Sobre la evolución de los balances energéticos en la agricultura española. *Historia Agraria*, 41
- CARPINTERO, O. (2007) Biocombustibles y uso energético de la biomasa: un análisis crítico. *El ecologista*, 49.
- CIFAED (2008) Economía, limitaciones y potencialidades de los cultivos herbáceos en producción ecológica. Documento interno.
- CLEVELAND, C. J., CONSTANZA, R., HALL, C. A. S., KAUFFMANN, R. (1984) Energy and the U.S. Economy: a biophysical perspective. *Science* 225 (4665): 890-897
- CONWAY, G. R. (1985) Agroecosystem Analysis. *Agricultural Administration*, 20:31-55
- DAP (Empresa Pública de Desarrollo Agrario y Pesquero) (2001) Caracterización del territorio de la OCA altiplanicie norte
- DEIKE, S., PALLUTT, B., CHRISTEN, O. (2008) Investigations on the energy efficiency of organic and integrated farming with specific emphasis on pesticide use intensity. *European Journal of Agronomy*. 28 (3): 461-470
- DONALDSON, J.V.D, HUTCHTEON, J. A., JORDAN, V. W., y OSBORNE, N. J. (1994) Evaluation of energy usage for machinery operations in the development of more environmentally benign farming systems. *Aspects of Applied Biology, Arable farming under PAC reform* 40:87-91.
- ELBERSEN, B. S. y CAREY, P. (2007) Large-scale biomass production and potential effects on farmland habitats and related biodiversity. En: Bunce, R. G. H.; Jongman, R. H. G.; Hojas, L.; Weel, S., (eds.) 25

Years of Landscape Ecology: Scientific Principles in Practice. Proceedings of the 7th IALE World Congress 8-12 July Wageningen, The Netherlands. Wageningen, IALE (International Association for Landscape Ecology), 80-81.

ERNST, G., MÜLLER, A., GÖHLER, H., EMMERLING, C. (2008) C and N turnover of fermented residues from biogas plants in soil in the presence of three different earthworm species (*Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea longa*, *Aporrectodea caliginosa*) Soil Biology and Biochemistry. 40(6):1413-1420

EUROPA PRESS (2008) El consumo de gasóleo creció un 5,5% en 2007 mientras que el de gasolina se redujo un 3,5%. En: www.eleconomista.es

FALASCA, S., ULBERICH, V. (2002) ¿Una plaga nacional utilizable como cultivo energético en áreas semidesérticas de Argentina? En: www.biodiesel.com.ar/download/cinea_plaganacional.pdf

FAO (2007) Situación de los Bosques del Mundo 2007.

FAO (2008) El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades.

FAOSTAT (2009) Datos de comercio por país. En: <http://faostat.fao.org/site/535/DesktopDefault.aspx?PageID=535>

FEDNA (2003) Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos (2ª Edición) C. de Blas, G. G. Mateos y P.. Gª. Rebollar (eds.) Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Madrid. 423 pp.

FERNÁNDEZ, J. (2006) El cardo, un cultivo de secano para la producción de biocombustibles. Vida Rural. Nº 240. 09-12-2006.

FERNÁNDEZ, J., CURT, M.D. (2006) State-of-the-art of *Cynara cardunculus* as an energy crop. Proceedings of the 14th European Biomass Conference.

FERNÁNDEZ, J., PARI, L., GARCÍA MÜLLER, M., MÁRQUEZ, L., FEDRIZZI, M., CURT, M. D. (2007) Strategies for the mechanical harvest of *Cynara*. Proceedings of the 15th European Biomass Conference. Berlin, Germany 1-11-2007

FLUCK, R. C. (ed.) (1992) Energy in farm production. En: Energy in World Agriculture, vol. 6, Elsevier. Amsterdam.

FORASTER, L., RODRIGUEZ, P., GUZMÁN, G. I., PUJADAS-SALVÁ, A. (2006) Ensayo de diferentes cubiertas vegetales en olivar ecológico en Castril (Granada). Actas VII Congreso SEAE Zaragoza 2006.

FREDRIKSSON, H., BAKY, A., BERNESSON, S., NORDBERG, A., NORÉN, O. y HANSSON, P. -A. (2006) Use of on-farm produced biofuels on organic farms - Evaluation of energy balances and environmental loads for three possible fuels. Agricultural Systems 89:184-203

FRIENDS OF THE EARTH, THE APE ALLIANCE, THE BORNEO ORANGUTAN SURVIVAL FOUNDATION, THE ORANGUTAN FOUNDATION (UK) y THE SUMATRAN ORANGUTAN SOCIETY (2005) The Oil for Ape Scandal: how palm oil is threatening orangutan survival. Research report. Descargado el 20/10/2008 en www.foe.co.uk/resource/reports/oil_for_ape_full.pdf

GEORGESCU-ROEGEN, N. (2007) Ensayos bioeconómicos. Los Libros de la Catarata. Madrid.

GIAMPIETRO, M. y PIMENTEL, D. (1990) Assessment of the energetics of human labor. Agriculture, Ecosystems and Environment. 32:257-272

GIAMPIETRO, M.; ULGIATI, S. y PIMENTEL, D. (1997) Feasibility of large-scale biofuel production. Bioscience; 47: 9.

GIAMPIETRO, M., MAYUMI, K., RAMOS-MARTIN, J. (2006) Can biofuels replace fossil energy fuels? A multi-scale integrated analysis based on the concept of societal and ecosystem metabolism: part 1. International Journal of Transdisciplinary Research. 1 (1): 51-87

GIL, J. A. (coord.) (1992) Conferencias. Gestión de la mecanización agraria en Córdoba. Universidad de Córdoba. Instituto de Ciencias de la Educación. O.T.R.I.

- GLIESSMANN, S. R. (2002) Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, C.R. : CATIE xiii, 359 p.
- GLIESSMANN, S. R., ROSADO-MAY, F. J., GUADARRAMA-ZUGASTI, C., JEDLICKA, J., COHN, A., MENDEZ, V. E., COHEN, R., TRUJILLO, L., BACON, C., JAFFE, R. (2007) Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistemas* 16 (1): 13-23
- GNANSOUNOU, E. y DAURIAT, A. (2005) Energy balance of corn ethanol: a synthesis. Presentado en: European Biomass Conference, Paris, Francia, Oct. 2005. Descargado en: http://www.etha-plus.ch/fileadmin/templates/main/pdf/argus/ENERS_EBCE_2005_Article.pdf
- GONZÁLEZ DE MOLINA, M. y GUZMÁN, G. I. (2006) Tras los pasos de la insustentabilidad. Agricultura y medio ambiente en perspectiva histórica (s. XVII-XX) Icaria Editorial. Barcelona. 502 pp.
- GREEN, M.B. (1987) Energy in Pesticide Manufacture, Distribution and Use. En: Helsel, Z.R. (Ed.), Energy in Plant Nutrition and Pest Control. Energy in World Agriculture, vol. 2. Elsevier, Amsterdam, pp. 165-177.
- GÜNDOGMUS, E. (2006) Energy use on organic farming: a comparative analysis on organic versus conventional apricot production on small holdings in Turkey. *Energy Conversion and Management* 47:3351:3359
- GUZMÁN, G. I. y GONZÁLEZ DE MOLINA, M., (2007) Agricultura tradicional versus agricultura ecológica. El coste territorial de la sustentabilidad. *Agroecología* 2:7-19
- GUZMÁN, G. I. y ALONSO, A. M. (2008) A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agricultural Systems*. 98:167-176
- GUZMÁN, G.I. (2008) Agricultura biológica y sustentabilidad. Material Didáctico Programa Interuniversitario Oficial de Posgrado: "Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica". Universidad Internacional de Andalucía. Baeza, Jaén.
- GUZMÁN, G. I. (2008) Transición agroecológica en finca. Material Didáctico Programa Interuniversitario Oficial de Posgrado: "Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica". Universidad Internacional de Andalucía. Baeza, Jaén.
- HANSSON, P.-A., NAKY, A., AHLGREN, S., BERNESSON, S., NORDBERG, A, NORÉN, O., PETTERSON, O. (2007) Self-sufficiency of motor fuels on organic farms - Evaluation of systems based on fuels produced in industrial-scale plants. *Agricultural Systems*, doi:10.1016/j.agsy.2007.02.010 En Prensa?
- HALL, C. (2008) Economic implications of a changing EROEI ratio. Ponencia en VII ASPO Conference. Barcelona 12-14 Octubre 2008. Disponible en <http://www.crisisenergetica.org>
- HECKERTOH, S. (1999) Comparing solar electric tractors to diesel tractors. En página consultada el 15/09/2008: www.renewables.com
- HO, M. W. (2006) Biogas bonanza for third world development. En: Which energy? 2006 Institute of Science in Society Energy Report.
- HUNTER, P. (2007) The impact of CO₂. *European Molecular Biology Organization Reports* 8 (12):1104-1106
- IDAE (2005) Ahorro de combustible en el tractor agrícola. Serie "Ahorro y eficiencia energética en la agricultura" Madrid, abril 2005.
- IDAE (2008) Clasificación energética de los tractores vendidos en España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- JAHNS, G., FÖRSTER, K.J., CLAAR II, P.W. (1987) Modeling diesel engine performance. En: International Off-highway and Powerplant Congress and Exposition, 14-17 September 1987, Milwaukee, Wisconsin.
- KALTSAS, A.M., MAMOLOS, A.P., TSATSARELIS, C.A., NANOS, G.D., KALBURTGI, K.L. (2007) Energy budget in organic and conventional olive groves. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122 (2):243-251.

- KLIMEKOVÁ, M. y LEHOČKÁ, Z. (2007) Comparison of organic and conventional farming systems in term of energy efficiency. Poster presentado en Zwischen Tradition und Globalisierung - 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland. 20-23.03.2007 Descargado En: <http://orgprints.org/view/projects/wissenschaftstagung-2007.html>
- LACASTA, C., MECO, R. (2000) Costes energéticos y económicos en agroecosistemas de cereales considerando manejos convencionales y ecológicos. En: Actas IV Congreso SEAE. Córdoba, 19–23 de septiembre de 2000. Fundació Càtedra Iberoamericana. Palma de Mallorca. Consultado en: http://www.uib.es/catedra_iberamericana/publicaciones/seae/mesa3/andalucia.html
- LACASTA, C.; R. MECO y L. MARTIN DE EUGENIO (2008) Cambio Climático y Cultivos en los Agrosistemas Semiáridos. Actas VIII Congreso SEAE. Bullas, Murcia.
- LEACH, G. (1976) Energy and Food Production. IPC Science and Technology. Londres.
- LECHÓN, Y., CABAL, H., LAGO, C., DE LA RÚA, C., SÁEZ, R., FERNÁNDEZ, M. (2005) Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase I. Análisis de ciclo de vida comparativo del etanol de cereales y la gasolina. Energía y Cambio Climático. CIEMAT. Ed. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente.
- LECHÓN, Y., CABAL, H., DE LA RÚA, C., LAGO, C., IZQUIERDO, L., SÁEZ, R., FERNÁNDEZ, M. (2006) Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase II. Análisis de ciclo de vida comparativo de biodiesel y diesel. Energía y Cambio Climático. CIEMAT. Ed. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente.
- LECHÓN, Y. (2008) Comunicación personal.
- LÓPEZ RIDAURA, S., MASERA, O., ASTIER, M. (2002) Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMI framework. Ecological indicators 35:1-14
- MARTINEZ ALIER, J. (2004a), Ecologismo de los pobres: conflictos ambientales y lenguajes de valoración. ICARIA Antrazit-FLACSO Ecología, Barcelona.
- MARTÍNEZ ALIER, J. (2004b) Los conflictos ecológico-distributivos y los indicadores de sustentabilidad. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica. Vol. 1: 21-30.
- MARTÍNEZ ALIER, J. (2005) Social metabolism and ecological distribution conflicts. Australian New Zealand Society for Ecological Economics, Massey University, Palmerston North.
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino) (2008) Banco público de indicadores ambientales del Ministerio de Medio Ambiente. Consumo de energía primaria.
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino) (2009) Balance de gestión conjunto de cereales en España. En: www.mapa.es/agricultura/pags/cereales/Nacional/ConjuntoCereales.htm
- MATA, F. (2006) ¿Qué hacemos con la glicerina? En: Fernández-Amaro, A., Herreras, Y., Lumbreras, J. Pons, G. (Eds) Ponencias del Taller Internacional sobre Biodiésel y Cooperación para el Desarrollo. Ingenieros Sin Fronteras. Universidad Politécnica de Madrid. 6-7 de marzo de 2006.
- McLAUGHLIN, N. B., HILBA, A., WALL, G. J. y KING, D. J. (2000) Comparison of energy inputs for organic fertilizer and manure based corn production. Canadian Agricultural Engineering. 42:009-017
- MECO, R. y LACASTA, C. (2006) Influencia de la rotación en la rentabilidad económica y energética de los agrosistemas cerealísticos de secano. Actas VII Congreso SEAE. Nº 61. Zaragoza.
- MONDAL, P., BASU, M., BALASUBRAMANIAN, N. (2008) Direct use of vegetable oil and animal fat as alternative fuel in internal combustion engine. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2(2):155-174
- MUÑIZ, M. (2008) Algunas reflexiones sobre energías renovables y conflicto. Ecología Política 34:14-17
- NAREDO, J. M., y P. CAMPOS (1980) Los balances energéticos de la agricultura española. Agricultura y sociedad 15:257-291
- NAREDO, J. M. (2003) La economía en evolución. 3ª Edición revisada y corregida. Siglo XXI. Madrid. 572 pp.
- NAREDO, J. M. (2006) Raíces económicas del deterioro ecológico y social. Siglo XXI. Madrid. 271 pp.

- NIJAGUNA, B. T. (2002) Biogas technology. New Age Publishers. New Delhi. 288 pp.
- NO TE COMAS EL MUNDO (2007) Cuando la ganadería española se come el mundo. La deuda de la soja. Documento 1. Accion Ecologista/Observatorio de la Deuda en la Globalización/Veterinarios Sin Fronteras/Xarxa de Consum Solidari
- ODLARE, M. (2005) Organic residues. A source for arable soils. Tesis doctoral. Sweddish University of Agricultural Sciences. Uppsala.
- ODLARE, M., PELL, M., SVENSSON, K. (2007) Changes in soil and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. Waste Management. 28 (7):1247-1253
- ODUM, H. T. (1996) Environmental accounting: Emery and environmental decision making. Wiley.
- OTTMANN, G. (2005) Agroecología y sociología histórica desde Latinoamérica. Servicio de Publicaciones Universidad de Córdoba. Córdoba. 224 pp.
- PAHL, G. (2005) Biodiesel. Growing a New Energy Economy. Chelsea Green Publishing. Canada. pp?
- PALMQVIST, P. y A. ARRIBAS (2008) Los grandes mamíferos del Pleistoceno inferior de Venta Micena (Orce, Granada). En web consultada el 1/12/2008: www.webpersonal.uma.es/ppb/Orce.html
- PASCUALINO, J. C. (2007) Cynara cardunculus as an Alternative Crop for Biofuel Production. Tesis Doctoral. Department of Chemical Engineering. Universitat Rovira i Virgili. ISBN: 978-84-690-8290-4
- PATZEK, T. W. (2004) Thermodynamis of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. Critical Reviews in Plant Sciences, 23(6):519-567
- PELLIZI, G. (1992) Use of energy and labour in Italian agriculture. Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, 52(2):111-119
- PERVANCHON, F., BOCKSTALLER, C., GIRARDIN, P. (2002) Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: the energy indicator. Agricultural Systems 72:149-172
- PIAT, D. M. C. (1989) Materias primas alternativas vegetales en la fabricación de piensos compuestos en España. En Gómez Cabrera, A., Molina alcaide, E. y Garrido Varo, A. (coords) Nuevas fuentes de alimentos para la producción animal III, Colección: Congresos y Jornadas, nº 12- 1989, DGIEA, Consejería de agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, pp 71-175
- PIRINGUER, G., STEINBERG, L. J. (2001) Reevaluation of energy use in wheat production in the United States. REVISTA?
- PIMENTEL, D., HURD, L. E., BELLOTTI, A.C., FORSTER, M.J., OKA, I.N., SHOLES, O.D. y WHITMAN, R. J. (1973) Food production and the energy crisis. Science 182 (4111):443-449
- PIMENTEL, D. (Ed) (1980) Handbook of Energy Utilization in Agriculture. CRC Press, Boca Raton, FL, 475 pp.
- PIMENTEL, D., BERARDI, G., FAST, S. (1983) Energy efficiency of farming systems: organic and conventional agriculture. Agriculture, Ecosystems and Environment, 9:359-372
- POWER, N. M., MURPHY, J. D., MCKEOGH, E. (2007). Which is the preferred method of generating transport biofuel from wheat; Ethanol or Biogas? Descargado el 15/11/2008 en: www.ucc.ie/serg/pub/Paper_berlin_Niamh
- PRIETO, P. (2006) La tasa de retorno energético (TRE): un concepto tan importante como evasivo. Descargado el 10/10/2008 en: www.crisisenergetica.org
- RACCUJA, S. A., V. CAVALLARO, M. G. MELILLI (2004) Intraespecific variability in Cynara cardunculus L. var sylvestris Lam. Sicilian populations: seed germination under salt and moisture stresses. Journal of Arid Environments. 56(1):107-116
- RAPPAPORT, R. A. (1967) Pigs for ancestors, Yale Univ Press, New Haven, Connecticut.
- RIECHMANN, J. (2006) Biomímesis. Los Libros de la Catarata. Madrid, 362 pp.

- RIECHMANN, J. (2007) Biomasa y agrocombustibles: veinte tesis. *Ecología Política* 34:19-26
- ROMERO, J., MIRALLES, J.. (2002). Biocombustibles. *Perspectiva Ambiental* 24. Fundación Tierra.
- SALAZAR, C., TORRES, J. A., MARCHAL, F. M. y CANO, E. (2002) La vegetación edafohigrófila del distrito Guadiciano-Bastetano (Granada-Jaén, España). *Lazaroa* 23: 45-64
- SALAZAR, C., TORRES, J. A. y CANO, E. (2001) Aspectos ecológicos y botánicos de la depresión del Gadiana Menor. *Boletín del Inst. de Estudios Giennenses*. 178:145-176
- SCIENCEMAN, D. M. (1987) Energy and Emery. En: G. Pillet y T. Murota (eds), *Environmental economics: the analysis of a major interface*. Ginebra. R. Leimgruber. pp. 257-276.
- SEISnet (2009) Atlas digital de comarcas de suelos. Comarca de Huéscar. Descargado el 20/01/2009 en: www.irnase.csic.es/users/microleis/mimam/atlas.htm
- SERRANO, C. (2005) Estudio comparativo sobre la sostenibilidad en el olivar en el municipio de Cambil (Jaén, España) según los manejos ecológico y convencional. Tesis de Maestría. VI Maestría en agroecología y desarrollo rural sostenible en América Latina y España (2002). Universidad Internacional de Andalucía.
- SEVILLA GUZMÁN, E., y OTTMANN, G. (1999) Los procesos de modernización y cientificación como forma de agresión a la biodiversidad sociocultural. CUHSO. Cultura, Hombre y sociedad. *Revista del Centro de Estudios Socioculturales de la Universidad Católica de Temuco, Chile*. 5 (1): 57-68.
- SEVILLA GUZMÁN, E. (2008) Una definición esquemática de Agroecología. Material Didáctico Programa Interuniversitario Oficial de Posgrado: "Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica". Universidad Internacional de Andalucía. Baeza, Jaén.
- SHAPOURI, H., DUFFIELD, J. A., WANG, M. (2002) The energy balance of corn ethanol: an update. U.S. Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses. *Agricultural Economic Report* N° 814
- SIMA (2007) Datos del municipio de Orce. En la página consultada el 5-12-2008: www.juntadeandalucia.es/institutodeestadistica/sima/hm/sm18146.htm
- SIMON, X. (1995) Economía ecológica, agroecología y desarrollo rural sostenible. *Agricultura y Sociedad* 77:199-236
- SMIL, V. (2001) *Energías, una guía ilustrada de la biosfera y la civilización*. Crítica. Barcelona. 408 pp.
- SORIA, M. J., FERRERA, R., ETCHEVERS, J., ALCÁNTAR, G., TRINIDAD, J., BORGES, L., PEREYDA, G. (2001) Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *TERRA Latinoamericana* 19(004):335-362
- SRIVASTAVA, A., PRASAD, R. (2000) Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4:111-133
- VERA, N. (2005) Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- VERISSIMO, L. A. (1999) Efectos de la Disponibilidad de Agua en el Suelo sobre la Productividad del Cardo (*Cynara cardunculus* L.). Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- WACKERNAGEL, M. y REES, W. (1996) Our ecological footprint, Philadelphia, Gabriola Island, BC.
- WEIDEMA, B. P. y MEEUSEN, M. J. G. (Eds) (2000) *Agricultural Data for Lyfe Cycle Assessments*. Vol 1. Report 2.00.01. Agricultural Economics Research Institute (LEI). La Haya.
- WEB ORCE (2009) Villa de Orce. Web oficial del ayuntamiento de Orce. www.orce.es
- WERNER, U., STOHR, U., HEES, N. (1987) Biogas plants in animal husbandry. *GATE/GTZ*. 157 pp.
- WIKIPEDIA (2009) Salsola kali. En: http://es.wikipedia.org/wiki/barrilla_pinchoda

7. ANEXOS

7.1 ANEXO I. MODELO DE ENTREVISTA

Titular:..... Entrevistado/a.....
Dirección:.....Teléfono:Fecha:.....

PARTE I. DATOS GENERALES

1. Cultivos herbáceos que siembra normalmente:

| | | | | | | | |
|--------|--|-----------|--|-----------|--|--|--|
| Trigo | | Maíz | | Guisantes | | | |
| Cebada | | Lentejas | | Haba | | | |
| Avena | | Garbanzos | | Soja | | | |

2. Aproximadamente ¿Cuántas especies distintas cultiva? _____ ¿y cuántas variedades?

3. ¿Realiza rotaciones de cultivos? (Explicar brevemente)

.....
.....
.....
.....
.....

4. ¿Realiza barbecho? No Sí (especificar labores, maquinaria, operarios y tiempo)

.....
.....
.....
.....
.....

PARTE II. MANEJO DEL CULTIVO

CULTIVO: _____, Superficie: _____ Ha

5. Variedades cultivadas, calendario de siembra-recolección

| Variedad | superficie | En | Fe | Mz | Ab | My | Jn | Jl | Ag | Sp | Oc | No | Di |
|----------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

II.1 MANEJO DEL SUELO

6. Labores de preparación del suelo

| Fecha | Maquinaria/apero | Tiempo Maq. (h/ha) | Operarios | Tiempo Op. (h/ha) |
|-------|------------------|--------------------|-----------|-------------------|
| | | | | |
| | | | | |

7. ¿Incorpora los restos de cosecha del cultivo anterior? Sí (rellenar en tabla anterior) No

II.2 ABONADO DE FONDO

8. Abonado de fondo: especificar fecha, maquinaria, operarios, tiempos y abonos (nombre, riqueza y dosis) empleados

.....
.....
.....

.....
.
.....
.
9. ¿Realiza compost de residuos? (explicar brevemente e indicar si es suficiente para toda su explotación)

.....
.
.....
.
10. ¿Prepara algún tipo de fertilizante casero? (Explicar proceso, empleo y costes)

.....
.
.....
.
Notas:

II.3 LABORES DE PRESIEMBRA

11. ¿Realiza alguna práctica previa a la siembra? Especificar maquinaria, operarios (tiempos) y productos (materia activa y cantidad) empleados: Falsa siembra, Tratamiento herbicida, Otro:

.....
.
.....
.
II.4 SIEMBRA

12. ¿Realiza alguna estrategia de siembra para reducir la competencia entre el cultivo y las hierbas?

No, Si => Adelantar fecha siembra, Aumentar dosis siembra, Otra:..... (explicar cada caso)

.....
.
.....
.
13. Características de las variedades sembradas

| Variedad | Fecha siembra | Dosis (kg/ha) |
|----------|---------------|---------------|
| | | |
| | | |
| | | |

14. ¿De alguna de las variedades indicadas guarda semilla propia?

No, Si => indicar si la trata para la siembra No la trato, Sí la trato, especificar proceso, producto y cantidad

.....
.
.....
.
15. ¿La semilla que compra viene tratada? (indicar lugar de compra:.....)

Si, No, en este caso indicar si la trata para la siembra No Sí (especificar proceso y producto, cantidad)

.....
.
.....
.
16. Indicar proceso de siembra con maquinaria/apero, operarios (tiempos).....

.....
.
.....
.
II.5 CONTROL DE HIERBAS

17. Labores realizadas al suelo para el control de hierbas

17.1. Labores mecánicas o manuales

| Fecha | Maquinaria/apero | Tiempo Maq. (h/ha) | Operarios | Tiempo Op. (h/ha) |
|-------|------------------|--------------------|-----------|-------------------|
| | | | | |
| | | | | |

17.2. Tratamientos herbicidas. Especificar fecha, maquinaria, operarios (tiempos) y productos (materia activa y dosis)

.....
.
.....
.
.....

II.6 ABONADO DE COBERTERA

18. Abonados de cobertera: especificar fecha, maquinaria, operarios (tiempos) y abonos (nombre, riqueza y dosis) empleados

.....
.
.....
.
.....
.
.....

II.7 CONTROL DE PLAGAS Y ENFERMEDADES

19. Medidas preventivas que lleva a cabo para el control de plagas y enfermedades

.....
.
.....
.
.....

Notas:

20. Medidas de control de plagas y enfermedades (exceptuando trampas), anotando el nombre a las que se dirigen, los medios y tiempos mecánicos y manuales empleados, así como los productos (nombre comercial, materia activa y dosis) utilizados (señalar además si se añaden otros productos no fitosanitarios)

Trat.1
.....
.....

Trat.2
.....
.....

Trat.3
.....
.....

Trat.4
.....
.....

21. Otros métodos de control de plagas y enfermedades. (explicar funcionamiento, atrayentes, aplicación, colocación y mantenimiento, e indicar fechas de empleo)

Trampas, Fauna auxiliar, Preparados naturales, Otro:

.....
.....
.....

II.9 OTRAS LABORES.

22. ¿Realiza alguna otra labor específica del cultivo? (Especificar época, labor, maquinaria, operarios, materiales y tiempos)

.....
.....

II.10 RECOLECCIÓN

23. Recolección y transporte. Especificar fecha, maquinaria, operarios y tiempos de recolección y transporte a almacén

.....
.....

24. ¿Realiza algún tipo de manipulación del grano antes de su venta? No Si, explicar ...

.....
.....

Notas

II.11 LABORES EN CAMPO POST-RECOLECCIÓN

25. ¿Realiza empacado de la paja? No Si, indicar fecha, maquinaria y operarios (tiempos)

.....
.....

26. ¿Cuál es el destino de los restos de cosecha?

Pastoreo => Ganado propio, Ajeno; especificar el ingreso (si procede): _____
Especie(s) animal(es): _____ Periodo de
pastoreo: _____

Descomposición en superficie

Quema ((Especificar operaciones, operarios y tiempos):

.....
.....

PARTE III. PRODUCCIÓN

27. Rendimientos totales obtenidos en los últimos años (kg/ha)

| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | Medio en un año normal |
|-------|------|------|------|------|------------------------|
| grano | | | | | |
| paja | | | | | |

28. SÓLO PARA ECOLÓGICOS. Considera que sus rendimientos medios son respecto a los convencionales

10% superiores, Similares, 10% inferiores, 15% inferiores, 20% inferiores, Otro:

.....

29. Del total producido ¿qué porcentaje medio no comercializa y por qué? (reempleo, autoconsumo, destrío...)

.....
.....

30. SÓLO PARA ECOLÓGICOS ¿Qué porcentaje de su producción comercial logra vender en el mercado ecológico? (explicar razones):.....

.....
.....

31. Canales comerciales utilizados (porcentajes aproximados): Cooperativa____, I. Privada____, Venta propia____

Explicar e indicar coste:

.....
.....

¿Conoce usted el destino final de sus productos? (porcentaje aproximado): Exportación:____, M. Interno: _____

Notas:

7.2 ANEXO II. ENERGÍA ASOCIADA A LA MAQUINARIA AGRÍCOLA

Tabla 7.1 Energía asociada a la maquinaria autopropulsada

| Elemento | Datos | | | | Energía fija | | | Energía variable | | | Energía total |
|---|-------|--------|--------|-------|--------------|---------|-------------|------------------|--------|----------------|----------------|
| | Pot | Vida | Peso | Pot | MP+M | MP+M | Ef | Combustible | Cram | Ev | Unitaria |
| | (CV) | (H) | (kg) | (Kw) | (Kcal/kg) | (MJ/kg) | (MJ/h) | (MJ/h) | (MJ/h) | (MJ/h) | (MJ/h) |
| Cosechadora cereales New Holland 170 CV | 170,0 | 16.000 | 8.100 | 125,0 | 15.312 | 64 | 32,4 | 1.290,2 | 15,9 | 1.306,0 | 1.338,4 |
| Cosechadora cereales 200 CV | 200,0 | 16.000 | 12.500 | 147,0 | 15.312 | 64 | 49,8 | 1.517,8 | 24,4 | 1.542,3 | 1.592,1 |
| Cosechadora Claas 240 CV | 240,0 | 16.000 | 14.200 | 176,4 | 15.312 | 64 | 56,6 | 1.821,4 | 27,7 | 1.849,1 | 1.905,8 |
| Tractor 60 CV | 60,0 | 16.000 | 2.300 | 44,1 | 15.312 | 64 | 9,2 | 455,3 | 4,5 | 459,8 | 469,0 |
| Tractor 90 CV | 90,0 | 16.000 | 4.040 | 66,2 | 15.312 | 64 | 16,1 | 683,0 | 7,9 | 690,9 | 707,0 |
| Tractor 120 CV | 120,0 | 16.000 | 4.200 | 88,2 | 15.312 | 64 | 16,7 | 910,7 | 8,2 | 918,9 | 935,7 |
| Tractor 140 CV | 140,0 | 16.000 | 5.300 | 102,9 | 15.312 | 64 | 21,1 | 1.062,5 | 10,4 | 1.072,8 | 1.094,0 |

Tabla 7.2 Energía asociada a los aperos

| Elemento | Datos | | | | Energía fija | | | Energía variable | | | Energía total |
|----------------------------------|-------|-------|------|------|--------------|---------|-------------|------------------|--------|-------------|---------------|
| | Pot | Vida | Peso | Pot | MP+M | MP+M | Ef | Combustible | Cram | Ev | Unitaria |
| | (CV) | (H) | (kg) | (Kw) | (MJ/kg) | (MJ/kg) | (MJ/h) | (MJ/h) | (MJ/h) | (MJ/h) | (MJ/h) |
| Abonadora centrífuga | 0 | 2.000 | 400 | 0 | 17.064 | 71,1 | 14,2 | 0,0 | 4,3 | 4,3 | 18,5 |
| Arado vertedera | 0 | 2.500 | 750 | 0 | 17.064 | 71,1 | 21,3 | 0,0 | 6,4 | 6,4 | 27,7 |
| Atomizador 1000 l | 0 | 2.500 | 500 | 0 | 17.064 | 71,1 | 14,2 | 0,0 | 4,3 | 4,3 | 18,5 |
| Chísel/Escarificador | 0 | 2.000 | 960 | 0 | 17.064 | 71,1 | 34,1 | 0,0 | 10,2 | 10,2 | 44,4 |
| Cultivador | 0 | 2.000 | 350 | 0 | 17.064 | 71,1 | 12,4 | 0,0 | 3,7 | 3,7 | 16,2 |
| Elevador tipo toro | 0 | 2.000 | 120 | 0 | 17.064 | 71,1 | 4,3 | 0,0 | 1,3 | 1,3 | 5,5 |
| Empacadora arrastrada | 0 | 7.500 | 3400 | 0 | 17.064 | 71,1 | 32,2 | 0,0 | 9,7 | 9,7 | 41,9 |
| Grada disco | 0 | 2.000 | 1100 | 0 | 17.064 | 71,1 | 39,1 | 0,0 | 11,7 | 11,7 | 50,8 |
| Pala cargadora | 0 | 2.000 | 200 | 0 | 17.064 | 71,1 | 7,1 | 0,0 | 2,1 | 2,1 | 9,2 |
| Pala esparcir estiércol | 0 | 2.000 | 200 | 0 | 17.064 | 71,1 | 7,1 | 0,0 | 2,1 | 2,1 | 9,2 |
| Pulverizador/Pulverizador barras | 0 | 2.000 | 400 | 0 | 17.064 | 71,1 | 14,2 | 0,0 | 4,3 | 4,3 | 18,5 |
| Remolque (1 t) | 0 | 5.000 | 300 | 0 | 17.064 | 71,1 | 4,3 | 0,0 | 1,3 | 1,3 | 5,5 |
| Remolque (3 t) | 0 | 5.000 | 800 | 0 | 17.064 | 71,1 | 11,4 | 0,0 | 3,4 | 3,4 | 14,8 |
| Remolque (6 t) | 0 | 5.000 | 1600 | 0 | 17.064 | 71,1 | 22,8 | 0,0 | 6,8 | 6,8 | 29,6 |
| Remolque autocargador | 0 | 7.500 | 3000 | 0 | 17.064 | 71,1 | 28,4 | 0,0 | 8,5 | 8,5 | 37,0 |
| Remolque esparcidor (1,5 t) | 0 | 5.000 | 670 | 0 | 17.064 | 71,1 | 9,5 | 0,0 | 2,9 | 2,9 | 12,4 |
| Remolque esparcidor (10 t) | 0 | 5.000 | 3200 | 0 | 17.064 | 71,1 | 45,5 | 0,0 | 13,7 | 13,7 | 59,2 |
| Remolque esparcidor (6,5 t) | 0 | 5.000 | 1650 | 0 | 17.064 | 71,1 | 23,5 | 0,0 | 7,0 | 7,0 | 30,5 |
| Rodillo/Rulo | 0 | 2.000 | 500 | 0 | 17.064 | 71,1 | 17,8 | 0,0 | 5,3 | 5,3 | 23,1 |
| Sembradora | 0 | 2.500 | 680 | 0 | 17.064 | 71,1 | 19,3 | 0,0 | 5,8 | 5,8 | 25,1 |
| Subsolador (3 brazos) | 0 | 2.000 | 450 | 0 | 17.064 | 71,1 | 16,0 | 0,0 | 4,8 | 4,8 | 20,8 |