



universidad
de León



**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y
AMBIENTALES**

**ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN
SISTEMA AGRARIO: ESTUDIO DE
CASO DE UNA PARCELA DE
TOMATES EN EL BAJO
GUADALQUIVIR.**

*ENERGY ANALYSIS OF AGRICULTURAL
SYSTEM: TOMATO PLOT RESEARCH IN THE
LOWER GUADALQUIVIR.*

Autora: Silvia Fernández del Reguero

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Julio, 2020

INDICE

1. Introducción	1
1.1. Objeto.....	2
1.2. Antecedentes	3
1.2.1. Estudios pioneros del análisis energético en la agricultura	3
1.2.2. Otros estudios de análisis energéticos.	4
2. Metodología	5
2.1. Estudio de caso y recopilación de datos primarios	5
2.2. Etapas del ciclo de vida.....	5
2.2.1. Definición de los límites del sistema	6
2.2.2. Descripción de los flujos de energía.....	7
2.2.3. Inventario y asignación de coeficientes energéticos.....	9
3. Estudio de caso.....	13
3.1. Resultados	13
3.2. Comparación con resultados de otros estudios	15
4. Conclusiones	16
5. Referencias	17
6. Anexos.....	20
6.1. Anexo I. Cuestionario.	20
6.2. Anexo II. Ubicación de la finca.	21

RESUMEN

Andalucía representa la principal comunidad autónoma productora de tomate para industria y consumo en España. Los análisis energéticos permiten demostrar la dependencia energética de la producción de alimentos, así como diseñar estrategias para mejorar la eficiencia energética. El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la elaboración de un análisis energético a partir de un estudio de caso de un sistema de cultivo de tomates en la zona del Bajo Guadalquivir (Sevilla). Para ello, se obtuvieron datos primarios a través de un cuestionario al propietario de la finca y se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida desde un enfoque desde “la cuna a la puerta de la granja” dentro de la categoría de impacto. Los resultados obtenidos mostraron que la finca obtuvo un rendimiento de 33 toneladas por hectárea, que corresponden a un output energético total de 26,6 GJ ha⁻¹. Los puntos críticos del input energético corresponden a la electricidad por irrigación (62%) y al combustible utilizado directamente en finca (22%). La eficiencia energética de la finca fue de 0,199 que, en comparación con otros estudios, es baja. Por lo tanto, se recomienda un mejor uso de los insumos energéticos directos mediante el uso de energías renovables para el riego.

PALABRAS CLAVE: Análisis Energético, Análisis de Ciclo de Vida, Cultivo de tomate, Eficiencia Energética, Input energético, Output energético.

ABSTRACT

Andalusia represents the main industry and consumption tomato producer region in Spain. Energy Analysis allows showing energy dependence on food production, as well as designing strategies to improve energy efficiency. The aim of this final degree project is the development of an energy analysis based on a case study of a tomato growing system in de Lower Guadalquivir area (Seville). Primary data have been collected from a survey to the farm owner and for the development of energy analysis was used the Life Cycle Analysis methodology, from an approach “from de cradle to the grave”, within the energy impact rank. The results showed that the farm obtained a yield of 33 tonne per hectare, corresponding to a total energy output of 26,6 GJ ha⁻¹. Energy input break-even points concert to irrigation electricity (62%) and fuel used directly on the farm (22%). Farm energy efficiency was 0,199 that compared with other studies it is low. Therefore, it's advisable a better use of direct energy inputs took on renewable energy for irrigation.

KEY WORDS: Energy Analysis, Life Cycle Analysis, Tomato farming, Energy Efficiency, Energy Input, Energy Output.

1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Lycopersicon esculentum*), es uno de los cultivos hortícolas más habituales a nivel global (Jadidi *et al.*, 2012). En el año 2018 se cultivaron en España 4 706 000 toneladas de tomate, de las cuales el 42% fue cultivado en Andalucía (Statista, 2018). De esta forma, Andalucía representa la principal comunidad autónoma de España productora de tomate (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2019; Red de Alerta e Información Fitosanitaria de Andalucía, 2019). Esto es debido a que la región se encuentra en el área mediterránea, con veranos cálidos e inviernos templados, favorable para el cultivo de hortalizas (Martínez-Blanco *et al.*, 2011).

El incremento desmesurado de la agricultura intensiva en este último período, provocado especialmente por el crecimiento demográfico, la disminución de tierras cultivables y el deseo de una mayor calidad de vida, ha generado impactos negativos tanto ambientales como en la salud pública, donde el uso intensivo de energía en los agrosistemas ha repercutido considerablemente (Jadidi *et al.*, 2012).

Los Análisis del Ciclo de Vida (ACV) surgieron en la década de los 70 a raíz de la preocupación de dichos impactos y de la crisis energética por la elevación del precio de los combustibles fósiles, que hizo plantearse la escasez de recursos naturales energéticos, aunque aún hoy en día no se ha conseguido llegar a una reestructuración significativa de los sistemas agrarios en la utilización de energías renovables (Carpintero Redondo and Naredo, 2006; Payen *et al.*, 2015). Los Análisis del Ciclo de Vida son una herramienta metodológica que mide el impacto de los productos a lo largo de toda su vida es decir “de la cuna a la tumba” y sigue los criterios de la norma estandarizada ISO 14040:2006 (International Organization for Standardization., 2006a; Payen *et al.*, 2015). La principal característica que define estos análisis es su enfoque holístico, es decir, se basa en la idea de que el sistema no se puede determinar de forma individual por las partes que lo componen, sino que se deberán integrar todos sus aspectos. De modo que, el Análisis del Ciclo de Vida incluye tanto las entradas como las salidas de los procesos que forman parte del ciclo (Lamana and Aja, 2010).

Siguiendo este marco, un integrante del Análisis del Ciclo de Vida es el Análisis Energético. Dicho análisis, aplicado en sistemas agrarios, juega un papel importante para impulsar una agricultura sostenible, económicamente viable y más saludable (Jadidi *et al.*, 2012).

En este sentido, la energía es un tema importante de estudio para conseguir una reducción de los impactos ambientales energéticos en los agrosistemas (Pervanchon *et al.*, 2002).

Con el análisis energético se busca cuantificar la demanda de entrada y salida de energía de un determinado sistema, en este caso de un sistema agrario (Neira *et al.*, 2013). La creciente demanda de alimentos por parte de la sociedad, ha llevado a un aumento continuo de la producción, con las consecuencias de un uso intensivo de los recursos naturales, pesticidas y fertilizantes químicos y maquinaria agrícola, lo que conlleva un uso desmesurado e ineficiente de los recursos (Jadidi *et al.*, 2012). Pero no solamente están cambiando las cantidades y cualidades de estos insumos, sino también la energía que se requiere para su producción (Aguilera *et al.*, 2015). Por este motivo, los análisis energéticos son fundamentales en los estudios agrarios, ya que fortalecen la toma de decisiones técnicas y productivas aportando a la agricultura posibilidades de alternativas con mayores rendimientos energéticos, necesarias debido al incremento de los impactos ambientales que la agricultura convencional está generando. Sin embargo, para que la eficiencia energética sea trascendente, la metodología de un análisis energético deberá realizarse a través de un enfoque holístico del sistema agroalimentario, esto es, vinculando el output energético total y el input energético total (Neira *et al.*, 2013).

1.1. Objeto

El objeto de este Trabajo de Fin de Grado ha sido la cuantificación de la eficiencia energética de un sistema de cultivo de tomates realizando un Análisis de Ciclo de Vida cuyos límites del sistema fueron “desde la cuna a la puerta de la granja”, es decir, incluyendo todos los insumos energéticos desde la producción de tomate hasta su venta.

Asimismo, se han analizado los puntos críticos de energía para plantear mejoras en la eficiencia energética del agrosistema.

El estudio de caso se ha enfocado en una parcela de seis hectáreas en la localidad de Lebrija (Sevilla), en la zona del bajo Guadalquivir, dentro del sector regable B-XII.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Estudios pioneros del análisis energético en la agricultura

A lo largo de las últimas décadas, ha surgido un debate teórico vinculado a la agricultura sobre la escasez de recursos naturales energéticos. La modernización de la agricultura supuso un mayor uso de energía no renovable y una creciente demanda energética, provocando una disminución de la eficiencia energética. Así mismo, la crisis energética de los años 70 hizo que investigadores, economistas e ingenieros de todo el mundo se plantearan el cálculo de la eficiencia energética de los agrosistemas (Carpintero Redondo and Naredo, 2006; Neira *et al.*, 2013).

En 1980, Campos y Naredo, en el libro *Los balances energéticos de la agricultura española*, realizaron balances energéticos agrícolas para contrastar la eficiencia energética entre varios períodos de referencia: 1950-1951 y 1977-1978.

El balance resultado de los años 1950-1951, desveló que los agrosistemas se autoabastecían en un 94,3% de inputs energéticos procedentes de reemplazos de los desechos de cultivos, aportes de materia orgánica y estiércol (fuentes renovables) reestableciendo de esta manera casi el total de energía utilizada. Por otro lado, la comparación de este período con el de 1977-1978, desveló una disminución de reemplazos a un 59%, es decir, que se produjo un consumo masivo de inputs de combustibles fósiles (no renovables), de forma tanto directa como indirecta (Carpintero Redondo and Naredo, 2006).

De este modo, los balances de energía demostraron que se produjo un gran incremento del gasto energético entre ambos períodos. Campos y Naredo, midieron energéticamente la producción total y final agrícola y lo compararon en términos energéticos con las entradas totales al sistema. De esta forma demostraron la menor eficiencia energética del último período estudiado, cuyo principal motivo es la mayor dependencia de insumos de productos externos, en su mayoría recursos no renovables. Este dato pone de manifiesto que la agricultura tradicional, basada en el trabajo humano y tracción animal es mucho más eficiente energéticamente hablando que la agricultura moderna, haciendo evidente el cambio estructural y tecnológico que aconteció a este siglo (Pimentel and Pimentel, 1979; Carpintero Redondo and Naredo, 2006).

Otros autores como Simón Fernández, 1999, demostraron que, a partir de la década de los 90, la eficiencia energética en los sistemas agrícolas mejoró ligeramente. Se produjo un aumento del rendimiento energético debido a los grandes avances de la energía eléctrica y una disminución del uso de combustibles fósiles, producto de un intento de adaptación del sistema

a las nuevas condiciones de mercado. Esta adaptación duró poco tiempo ya que, los mismos autores demostraron que, a partir de 1995 la eficiencia energética en los agrosistemas vuelve a decaer.

1.2.2. Otros estudios de análisis energéticos.

Además de indicar la eficiencia energética de un sistema, los análisis energéticos, permiten analizar los sistemas agrícolas para diversos fines.

En el caso de Neira *et al.*, 2013, han utilizado los análisis energéticos con el fin de demostrar que existe una alternativa rentable y beneficiosa, la agroecología. Según (Neira *et al.*, 2013) “Una de las características más relevantes de la agricultura es su capacidad para transformar energía y generar un excedente (...) que tiene usos muy diversos (alimentación humana, alimentación animal, fertilización, etc.). Este excedente de energía es potencialmente mayor en la agricultura ecológica” (p. 231). En este sentido, se crea la necesidad de demostrar que la agricultura ecológica es una alternativa más sostenible energéticamente hablando, mediante evaluaciones empíricas (Neira *et al.*, 2013).

Otro objetivo de los análisis energéticos es la comparación entre la agricultura convencional y la agricultura ecológica. Un estudio realizado por (Kc, 2014), demostró mediante análisis energéticos, que las zanahorias cultivadas convencionalmente consumen 0,55MJ más que las zanahorias ecológicas.

Por otro lado, algunos autores como Jadidi *et al.*, 2012, han realizado análisis energéticos con la finalidad de comprobar la productividad de los cultivos de tomate del estudio, relacionando los insumos energéticos con su rendimiento. Los resultados demostraron que, utilizando reemplazos y energías renovables, el rendimiento del tomate puede aumentar entre un 30% y un 45% dependiendo del tamaño de la finca. De esta manera, se busca un procedimiento para optimizar los input energéticos y así evitar impactos ambientales negativos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estudio de caso y recopilación de datos primarios

El análisis energético mostrado en este trabajo se basa en datos empíricos procedentes de una finca de cultivo hortícola, concretamente de tomate, en la localidad de Lebrija (Sevilla), dentro del sector regable B-XII del Bajo Guadalquivir.

En Sevilla (Andalucía), se cultiva al año una media de 6 000 hectáreas de tomate tanto para la transformación industrial como para el consumo. Este cultivo se sitúa fundamentalmente en la comarca del Bajo Guadalquivir, en los municipios de Lebrija, Las Cabezas de San Juan, Utrera y Los Palacios, en la llamada Zona regable del Bajo Guadalquivir. El sector regable B-XII, localizado en el municipio de Lebrija, con una extensión de 14 643 hectáreas regables ocupa el 71% del total de dicho municipio. El 15% corresponde a la producción de tomate, que aporta un rendimiento anual de 115 toneladas por hectárea.

La siembra se realiza repartida en el tiempo durante los meses de marzo y abril, presentando un ciclo de cuatro meses aproximadamente, de esta forma, la recolección comienza a finales de junio o principios de julio y termina en septiembre. El riego se lleva a cabo por goteo en un 98% y mediante surcos en un 2%. Todos los datos anteriormente citados demuestran que se trata de un terreno agrícola intensivo con evidencias de impacto ambiental (Caraballo, no date; Junta de Andalucía, no date; Sampedro Sánchez *et al.*, 2005; Gavilán *et al.*, 2007; Puertas Hernando, 2018).

Para la búsqueda de los datos primarios relativos al ciclo de producción del año 2019 de la finca del estudio de caso, se ha elaborado un cuestionario entre los meses de marzo y abril. En principio, se trata de un cuestionario cara a cara con el propietario de la finca, no obstante, debido al estado de alarma provocado por el Covid-19, se ha tenido que elaborar un cuestionario a través de videoconferencias y envío de datos vía e-mail. Dicho cuestionario se muestra en el Anexo I del apartado Anexos.

2.2. Etapas del ciclo de vida

El concepto de análisis del ciclo de vida, evaluación de ciclo de vida o ecobalance, es una herramienta estandarizada regulada por la norma ISO 14040:2006 (International Organization for Standardization., 2006b). Se trata de una metodología de evaluación de impacto ambiental de los productos que abarca todos los impactos ambientales en todas las

etapas de vida del producto, desde la extracción de materia prima para su producción, hasta su distribución y gestión de residuos (“de la cuna a la tumba”)(Payen *et al.*, 2015; Muralikrishna and Manickam, 2017).

Una evaluación integrada de la sostenibilidad permite estudiar el sistema como un todo y, teniendo en cuenta que los agrosistemas tienen un elevado impacto ambiental a lo largo de todas las fases de producción, se hace estrictamente necesaria una metodología basada en estos análisis (Del Borghi *et al.*, 2014).

Para la elaboración del análisis energético aplicado al estudio de caso que corresponde a este Trabajo de Fin de Grado, se seleccionó un patrón metodológico centrado en las cuatro etapas del ciclo de vida, reflejadas en la siguiente figura:



Figura 1. Etapas del ciclo de vida del tomate según la normativa ISO 14040. Elaboración propia.

2.2.1. Definición de los límites del sistema

Para realizar un buen análisis energético, se ha definido, en primer lugar, los límites del sistema, estudiando el Análisis del Ciclo de Vida del tomate (ACV). En este caso, se ha adoptado una perspectiva parcial de ACV, dentro de la cual se tomará en consideración

únicamente la fase del proceso de producción del tomate, es decir, “de la cuna a la puerta de la granja” (Muralikrishna and Manickam, 2017), descartando así el gasto energético procedente de la fabricación de productos del tomate, empaquetado, transporte y residuos.

2.2.2. Descripción de los flujos de energía

Para el análisis energético se han incluido tanto los outputs energéticos totales, medidos por la producción bruta del tomate en la finca, como los inputs energéticos totales, diferenciados en varios niveles.

El nivel cero atañe al output energético, es decir, a la producción bruta (o neta) de tomates en la finca a estudiar (Neira *et al.*, 2013).

Los niveles sucesivos corresponden a los insumos agrícolas, tomados en consideración en términos energéticos (Aguilera *et al.*, 2015).

El nivel uno representa el consumo de energía directa (E.D). Hace referencia al combustible y electricidad que se consume directamente en los campos de cultivo. Esta energía se utiliza sobre todo para maquinaria y riego, aunque no se debe olvidar el gasto energético en vehículos profesionales y la mano de obra o labor humana (Neira *et al.*, 2013).

Respecto al insumo de energía para el riego, se deberá tener en cuenta el sistema de riego utilizado en la finca. El riego por goteo o por aspersión, son sistemas de riego modernos con un requerimiento mayor de energía, debido a la necesidad de presurizar el agua a través de bombas eléctricas o de combustible diésel, pero, en casos de aumento de costos del agua, a los agricultores les resulta más rentable ya que estos sistemas disminuyen el exceso de agua utilizada para riego. El consumo directo de combustible y electricidad en la finca deberá expresarse en unidades de energía (Aguilera *et al.*, 2015).

En relación a la labor humana, existe un debate a nivel histórico dentro de los estudios de análisis energéticos agrícolas. La gran parte de los análisis de energía agrícola que han incluido la labor humana como insumo energético indispensable, lo han estimado según la dieta de los trabajadores, es decir, la cantidad de energía que hay en los alimentos que han consumido. Según los cálculos de algunos autores, en dietas de 2000 kcal/día hay un consumo de energía de 0,35 MJ/h y en dietas de 3500 Kcal/día, 0,61 MJ/h(Aguilera *et al.*, 2015).

En el segundo nivel se incluye el consumo de energía indirecta (E.I). Ésta ha de tenerse en cuenta si se desea obtener una visión global de los impactos que genera el sistema en el

medio ambiente. La energía indirecta es aquella que no se utiliza directamente en el campo de cultivo, pero es necesaria para la producción.

Los elementos principales son los fertilizantes, semillas, pesticidas, fitosanitarios y otros elementos de protección de cultivo. También se deberá contabilizar el consumo de combustible y electricidad invertidos en extracción, transporte y transformación de los recursos necesarios para la producción del tomate en la finca, así como los materiales metálicos (acero, hierro, etc.) y no metálicos (plásticos) que se utilizan en los sistemas agrícolas (Carpintero Redondo and Naredo, 2006; Aguilera *et al.*, 2015)

Para conocer el consumo de energía indirecta derivada de los fertilizantes, ha de tenerse en cuenta el contenido en nutrientes de cada fertilizante y su cantidad. Para calcular los input energéticos relacionados con los fitosanitarios, será necesario conocer los kilogramos de materia activa de cada producto, en base a la cantidad de producto que se aplica en la finca y al porcentaje de sustancia activa de cada producto (Aguilera *et al.*, 2015).

Para el cálculo de la energía indirecta relacionada con las semillas, se tiene en cuenta la energía que ha sido necesaria para su producción, es decir, el gasto generado en investigación (básica y aplicada), ingeniería genética, transporte de semillas, cultivo en condiciones controladas, costos de cosechas (Carpintero Redondo and Naredo, 2006; Aguilera *et al.*, 2015).

Por último, en los niveles 3 y 4 se incluyen los insumos relacionados con el consumo energético del capital fijo (E.C). El tercer nivel hace referencia al consumo energético vinculado a la amortización de la maquinaria, mientras que el cuarto nivel contabiliza el consumo energético de reparación y mantenimiento (Neira *et al.*, 2013; Aguilera *et al.*, 2015).

En la siguiente figura se representan dichos flujos:

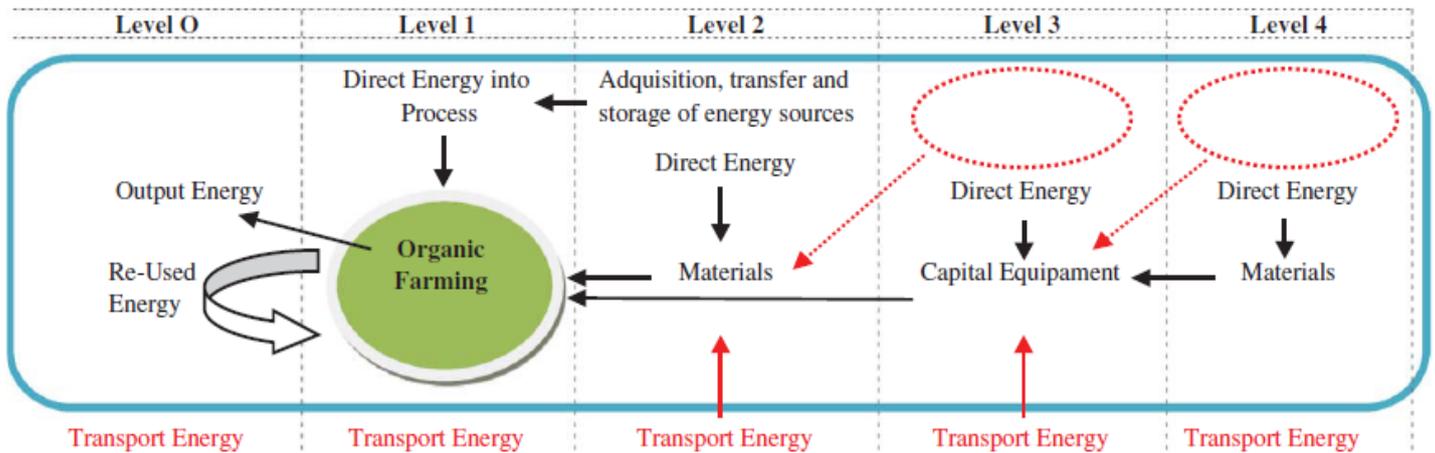


Figura 2. Límites energéticos del agrosistema. Fuente: (Neira *et al.*, 2013)

2.2.3. Inventario y asignación de coeficientes energéticos

El Output Energético (O.E) del tomate, se ha estimado a partir de la producción bruta de tomate en la finca, aplicando el coeficiente α^{-1} , un conversor que relaciona el peso del producto con el contenido energético. Al mismo tiempo, el output energético neto se ha calculado a partir de la producción neta de tomate (el rendimiento menos las pérdidas), aplicando el mismo conversor. (Tabla 1)

En el caso del cultivo de tomate, este coeficiente tiene un valor de $0,80 \text{ MJ Kg}^{-1}$ (Ecuación 1).

$$O.E_{(t)} \text{ (MJ)} = \sum \text{Output agrícola}_{(t)} \text{ (Kg)} \times \alpha^{-1} \text{ (MJ. Kg}^{-1}\text{)}$$

donde (t) corresponde al cultivo de tomate.

Tabla 1. Producción bruta, pérdidas y producción neta de la finca. Coeficientes energéticos y referencia de los mismos. Fuente: Elaboración propia.

Items	Unidad	Cultivo por ha	Coefficiente energético (Mj kg ⁻¹)	Referencia
Rendimiento	Kg	33.300,0	0,8	(Neira <i>et al.</i> , 2013; Aguilera <i>et al.</i> , 2015)
Pérdidas	%	7,5		
Venta	Kg	30802,5		

La estimación de Input Energético (I.E) se realiza calculando el consumo total de energía, es decir, el sumatorio de la energía directa, energía indirecta y capital fijo. Desde el enfoque de “el sistema como un todo” expuesto anteriormente en este trabajo, el input energético hace referencia a la Demanda Energética Acumulada (CED) que, en la literatura académica también se denomina Energía incorporada (Embodied Energy) (Aguilera *et al.*, 2015). Para medir dichos insumos se utilizarán los coeficientes de energía β^{-1} .(Ecuación 2).

$$I.E_{(t)} (KJ) = \sum Input_{(i)} (u.f) \times \beta^{-1}_{(i)} (MJ. u.f)$$

Donde (t) corresponde al cultivo de tomate, (i) corresponde a los diferentes input y u.f son unidades físicas.

La mayoría de coeficientes utilizados para el análisis del estudio de caso del presente trabajo, se han obtenido de la base de datos realizada por (Aguilera *et al.*, 2015), que engloba la energía directa, indirecta y de capital fijo. Algunos autores como (Neira *et al.*, 2013) han adaptado dichos coeficientes (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Inventario de insumos en los niveles 1 y 2 y coeficientes energéticos (β^{-1}). Fuente: Elaboración propia.

Items	Unidad	Cultivo por ha	Coefficiente Energético (MJ ud. ⁻¹)	Referencia
1. Combustible				
Diésel para Maquinaria	Kg	263,72	56,81	(Aguilera <i>et al.</i> , 2015)
Diésel para Vehículos Profesionales	Kg	263,72	56,80	Adaptado de (Aguilera <i>et al.</i> , 2015)
2. Electricidad				
Irrigación	Kw	6.563	12,70	(Neira <i>et al.</i> , 2013)
3. Labor Humana				
	Horas	1.120,00	0,58	Adaptado de (Neira <i>et al.</i> , 2013)
4. Fertilizantes				
Compost	Kg	300,00	4,96	
K2o-Nk	Kg	160,00		
N	Kg	4,32	51,55	(Aguilera <i>et al.</i> , 2015)
K	Kg	48,00	12,84	(Neira <i>et al.</i> , 2013)
P2o5	Kg	156,71	16,55	(Neira <i>et al.</i> , 2013)
P	Kg	81,49	51,55	(Neira <i>et al.</i> , 2013)
5. Fitosanitarios				
Atrazina	Kg de materia activa	0,75	375,00	
Terbutrina	Kg de materia activa	0,75	375,00	
Pendimentalina	Kg de materia activa	0,75	375,00	(Aguilera <i>et al.</i> , 2015)
Glifosato	Kg de materia activa	1,65	375,00	
Teflutrina	Kg de materia activa	0,06	375,00	
Semillas Y Plántulas				
Semillas	Unidades	33.333,00	0,2	(Neira <i>et al.</i> , 2013)
Plásticos	Kg	50	51,8	(Aguilera <i>et al.</i> , 2015)

Tabla 3. Capital fijo en los niveles 3 y 4 y coeficientes energéticos. Fuente: Elaboración propia.

Items	Unidad	Cultivo por ha	Coefficiente energético (MJ ud. ⁻¹)	Referencia
1. Maquinaria				
John Deere 125hp	Horas	62	41,9	(Neira <i>et al.</i> , 2013)

Como el objetivo final del análisis energético es el cálculo de la eficiencia energética del agrosistema de tomates de la finca, en primera instancia se ha utilizado el Balance Energético (B.E) o tasa de retorno energético (EROI por sus siglas en inglés), indicador que mide la eficiencia del sistema de manera holística. Así la eficiencia energética es proporcional al cociente de los output energéticos totales entre los input energéticos totales (Ecuación 3).

$$\text{EROI} = \text{O.E (MJ. ha}^{-1}\text{)} / \text{I.E (MJ. ha}^{-1}\text{)}$$

Desde una perspectiva más económica, se ha calculado el Balance energético de ventas teniendo en cuenta el output socializado, es decir, que se toma en consideración únicamente el output energético relativo a las ventas y no al rendimiento energético total. Este indicador se ha calculado teniendo en cuenta las pérdidas del producto.

$$\text{EROI}_{(s)} = \text{O.E ventas (MJ. ha}^{-1}\text{)} / \text{I.E (MJ. ha}^{-1}\text{)}$$

Otro indicador importante que ha sido calculado en este trabajo es la Intensidad Energética, que corresponde a la cantidad de energía utilizada por cada kg de tomate producido (MJ/ kg de producto). En consecuencia, una elevada intensidad energética supone una baja eficiencia energética.

$$\text{Intensidad Energética} = \text{O.E (Kg ha}^{-1}\text{)} / \text{O.I (MJ Ha}^{-1}\text{)}$$

La productividad energética mide la relación que existe entre la producción de tomate en la finca y la utilización de los insumos energéticos. Es el inverso a la intensidad energética, por tanto, una elevada productividad energética supone una elevada eficiencia energética y, en consecuencia, una baja intensidad energética.

$$\text{Productividad Energética} = \text{producción (Kg. ha}^{-1}\text{)} / \text{I.E (MJ. Ha}^{-1}\text{)}$$

3. ESTUDIO DE CASO

3.1. Resultados

En la temporada correspondiente al año 2019, la finca estudiada, que cubre 6 hectáreas de cultivo de tomate, obtuvo un rendimiento de 33 000 Kg ha⁻¹. Esto supone una producción de energía bruta anual de 26,6 GJ ha⁻¹. De las energías producidas se vendieron 24,64 GJ ha⁻¹ (92,5%), perdiendo así un 7,5% de rendimiento.

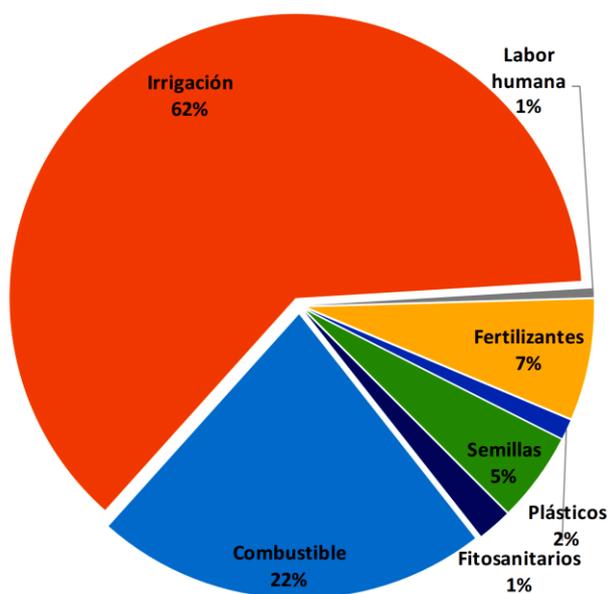
En cuanto a los insumos energéticos de la finca (Figura 3.a) el input energético se estima en 133,8 GJ ha⁻¹. Los puntos críticos son el consumo energético de electricidad por irrigación, que supone el 62% del input total (83,3 GJ ha⁻¹) y al combustible tanto en maquinaria como en vehículos profesionales que representa 22% del input energético en finca (29,9 GJ ha⁻¹).

El consumo energético procedente de la mano de obra, se estimó en 0,65 GJ ha⁻¹ y el procedente de todos los fertilizantes químicos, en 9,1 GJ ha⁻¹, siendo estos últimos el 6,8% del input total. El consumo energético relacionado con los fitosanitarios corresponde a 1,5 GJ ha⁻¹ y el de semillas de tomate a 6,6 GJ ha⁻¹. El uso energético relacionado con los plásticos procedentes en su mayoría de las cintas de goteo de la irrigación se estimó en 2,6 GJ ha⁻¹. El consumo de energía procedente del capital fijo corresponde a 2,6 GJ ha⁻¹. El total de los datos está representado en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis energético del cultivo de tomate en la finca de estudio, por hectárea y para 6 hectáreas. Fuente: Elaboración propia.

	MJ ha ⁻¹	MJ	%
1. Output Energético	26.640	159.840	100
Rendimiento	26.640	159.840	100
Pérdidas	1.998	11.988	7,5
Venta	24.642	147.852	92,5
2. Input Energético	133.818,22	802.909,32	100
Combustible	29.961,94	179.771,61	22
Electricidad	83.343,75	500.062,50	62
Labor Humana	649,60	3.897,60	0,5
Fertilizantes	9.121,33	54.728,01	6,8
Fitosanitarios	1.485	8.910	1,11
Semillas	6.666,60	39.999,60	5,0
Plásticos	2.590	15.540	1,9
3. Capital Fijo	2.597,8	15.586,8	100

a. Input Energético (%)



b. CED (%)

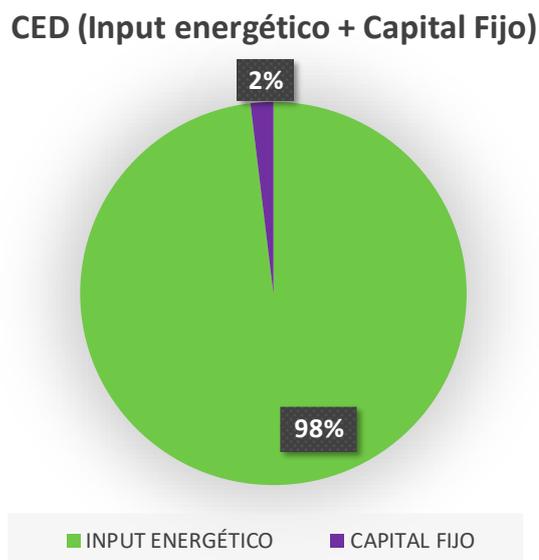


Figura 3. Estructura del uso energético de la finca. Figura 3.a) Estructura del uso de insumos energéticos para la producción de tomate. Figura 3.b) Estructura de la Demanda Energética Acumulada (Input Energético + Capital Fijo) de la producción de tomate.

El CED o energía incorporada es el sumatorio del input energético y el capital fijo. En la tabla 5, se muestra el consumo energético de cada ítem en relación al CED de la finca estudiada. Así, el input energético representa el 98,1% del CED, mientras que el capital fijo representa el 1,9%. (Figura 3.b)

Tabla 5. Energía de los insumos agrícolas y capital fijo de la finca (en MJ ha⁻¹, MJ para 6 ha y %) con respecto al CED o energía incorporada.

	MJ ha ⁻¹	MJ (Para 6ha)	%
CED (Input Energético + Capital Fijo)	136.416,02	818.496,12	100
Input Energético	133.818,22	802.909,32	98,1
Capital Fijo	2.597,80	15.586,80	1,9

En la tabla 6 se muestran los resultados relacionados con los indicadores energéticos del agrosistema. La tasa de retorno energético (EROI) o Balance energético, dio como resultado 0,199, teniendo en cuenta el output total y 0,184 considerando solamente las ventas; es decir, que por cada unidad de energía que entró en el sistema, se produjeron 0,199 unidades o 0,184 unidades teniendo en cuenta el output vendido.

La Intensidad energética indica que por cada Kg de tomate producido se demanda un consumo de energía de 4,02 MJ ha⁻¹; y por cada kg de tomate vendido, 4,34 MJ ha⁻¹

Finalmente, con la productividad energética, se demostró que, con un MJ de energía, se produjeron 0,25 Kg de tomate en la finca de cultivo.

Tabla 6. Indicadores energéticos. Fuente: Elaboración propia.

Indicadores	Unidad	Indicador
EROI (output total)	-	0,199
EROI (output socializado)	-	0,184
Intensidad Energética	MJ ha ⁻¹ kg ⁻¹	4,02
Intensidad Energética (por kg vendido)	MJ ha ⁻¹ kg ⁻¹	4,34
Productividad Energética	Kg I.E (MJ ⁻¹)	0,25

3.2. Comparación con resultados de otros estudios

En comparación con el estudio del uso de energía para la producción de tomate en Irán realizado por (Jadidi *et al.*, 2012), la eficiencia energética de la finca del Bajo Guadalquivir es menor que la de Irán (0,59). Esto es debido a que, en la finca estudiada por dichos autores, se ha obtenido un mayor rendimiento con un menor uso de insumos.

Otros estudios como el de Neira *et al.*, 2013, que tratan sobre análisis energéticos en fincas ecológicas en Andalucía, han obtenido una intensidad energética de 1,07 MJ ha⁻¹ kg⁻¹, es decir, que para producir un kg de un producto hortícola de la finca ecológica, hay una demanda de energía menor que en la finca estudiada en este trabajo.

El análisis energético de Sepat *et al.*, 2013, en el que compara las fincas de tomate en invernadero y en campo abierto, expone la mayor eficiencia energética para cultivos en campo abierto de los estudios citados en este trabajo, con un resultado de 2,74, en vista de un rendimiento mucho más elevado que los insumos para la finca.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la eficiencia energética de una finca de tomates de seis hectáreas en el sector regable B-XII de Lebrija (Sevilla), en el Bajo Guadalquivir, con el fin de cuantificar la energía en forma de input que se utiliza para la producción en intensivo de un cultivo hortícola.

Según los resultados obtenidos, para producir un kg de tomate en la finca estudiada, se consumen $4,02 \text{ MJ ha}^{-1}$. En ventas, el consumo energético es aún mayor teniendo en cuenta que las pérdidas del producto también ocasionan pérdida de energía. Como consecuencia, la intensidad energética de la producción de tomate para la industria es elevada y, por lo tanto, la eficiencia energética es menor.

La causa principal de la baja eficiencia energética de la finca es el uso de insumos relacionado con el sistema de riego por goteo, seguido del combustible utilizado directamente en finca, que, según los resultados, generan entre ambos $113.305,69 \text{ MJ ha}^{-1}$, es decir el 84% del input total. En este sentido, cabe destacar la elevada dependencia de insumos energéticos externos y no renovables como los combustibles fósiles o la electricidad para riego procedente de fuentes no renovables. En este contexto, un análisis del ciclo de vida completo “desde la cuna a la tumba”, desvelaría un gran incremento de dicha dependencia al incorporar los insumos derivados del empaque y transporte del tomate, la industria para su transformación, el empaque y transporte para el comercio o la gestión de residuos.

A tal efecto, se deberá considerar la mejora del uso de insumos energéticos utilizando energías renovables para los sistemas de riego que minimicen el requerimiento de energía sin aumentar el exceso de agua, como, por ejemplo, la energía solar. Además, se sugiere una sustitución parcial de los fertilizantes químicos por reemplazos orgánicos, como desechos de cultivo y estiércol (fuentes renovables), para reestablecer una parte del gasto energético de la finca.

Desde una perspectiva global, sería plausible una mejora en la gestión ambiental del territorio, enfocándose en un mayor uso de energías renovables y reemplazos de fitosanitarios y fertilizantes, tomando como referencia modelos como la economía circular, basada en la herramienta metodológica del Análisis del Ciclo de Vida. De esta forma, se conseguirá un agrosistema más eficiente que puede reducir notablemente el consumo de energía, sin comprometer el rendimiento de la finca, al mismo tiempo que se preserva el capital natural.

5. REFERENCIAS

- Aguilera, E., Guzmán, G. I., Infante-Amate, J., Soto, D., García-Ruiz, R., Herrera, A., Villa, I., Torremocha, E., Carranza, G. and González De Molina, M. (2015) "Embodied energy in agricultural inputs. Incorporating a historical perspective.", *Sociedad Española de Historia Agraria.*, 15(07).
- Del Borghi, A., Gallo, M., Strazza, C. and Del Borghi, M. (2014) "An evaluation of environmental sustainability in the food industry through Life Cycle Assessment: The case study of tomato products supply chain", *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 78, pp. 121–130. doi:10.1016/j.jclepro.2014.04.083.
- Campos, P. and Naredo, J. (1980) *Los balances energéticos de la agricultura española*. 15th ed, *Agricultura y sociedad*. 15th ed.
- Carballo, J. B. (no date) *Modernización de Regadíos Sector Regable B-XII (Lebrija) División de Telecontrol Modernización de Regadíos Sector Regable B-XII (Lebrija) Contenido*. Available at: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estrategias_Ambientales/Planes/Planes_tematicos/plan_andaluz_accion_clima/joaquin_bono_modernizacion_sector_b12_lebrija.pdf (Accessed: March 25, 2020).
- Carpintero Redondo, O. and Naredo, J. (2006) "Sobre la evolución de los balances energéticos de la agricultura española, 1950-2000", *Historia agraria: Revista de agricultura e historia rural*. Universidad de Murcia, (40), pp. 531–556.
- Gavilán, P., Cermeño, P. and Bellido Salvatierra, B. (2007) "Riego deficitario en tomate para industria", *Agricultura*, pp. 796–800.
- International Organization for Standardization. (2006a) "UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Principios y marco de referencia", p. 29. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es> (Accessed: June 18, 2020).
- International Organization for Standardization. (2006b) "UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Principios y marco de referencia", p. 29. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es> (Accessed: March 16, 2020).
- Jadidi, M. R., Sabuni, M. S., Homayounifar, M. and Mohammadi, A. (2012) *Assessment of energy use pattern for tomato production in Iran: A case study from the Marand region, Research in Agricultural Engineering*. doi:10.17221/32/2010-rae.

Junta de Andalucía (no date) *Balances anuales*. Available at: http://www.juntadeandalucia.es/agriculturapescayderos/rural/raif/balances-fitosanitarios?p_p_id=110_INSTANCE_H2xb9LD9JOwR&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_110_INSTANCE_H2xb9LD9JOwR_strut (Accessed: March 25, 2020).

Kc, R. (2014) *Comparative Lifecycle Assessment on organic and conventional carrots - case: Carrots from South - Savo and imported carrots from Italy*.

Lamana, N. R. and Aja, A. H. (2010) "Análisis del ciclo de vida", *Negocio*.

Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A. and Rieradevall, J. (2011) "Assessment of tomato Mediterranean production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse, with compost or mineral fertilizers, from an agricultural and environmental standpoint", *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 19(9–10), pp. 985–997. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.018.

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (2019) *Boletín Mensual de Estadística*. Available at: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/boletin-mensual/2019.aspx> (Accessed: June 4, 2020).

Muralikrishna, I. V. and Manickam, V. (2017) "Environmental Management Life Cycle Assessment", *Environmental Management*. Butterworth-Heinemann, pp. 57–75. doi:10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1.

Neira, D. P., Montiel, M. S. and Fernández, X. S. (2013) "Energy analysis of organic farming in Andalusia (Spain)", *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37(2), pp. 231–256. doi:10.1080/10440046.2012.734263.

Payen, S., Basset-Mens, C. and Perret, S. (2015) "LCA of local and imported tomato: an energy and water trade-off", *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 87, pp. 139–148. doi:10.1016/j.jclepro.2014.10.007.

Pervanchon, F., Bockstaller, C. and Girardin, P. (2002) "Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: The energy indicator", *Agricultural Systems*. doi:10.1016/S0308-521X(01)00073-7.

Pimentel, D. and Pimentel, M. (1979) *Food, Energy and Society*. 3rd ed. Edited by E. Arnold. London.

Puertas Hernando, P. (2018) *Proyecto de un sistema de avenamiento de 13500 Ha. en el sector B-12 de las marismas del bajo Guadalquivir*. Trabajo de Fin de Carrera. Universidad

Politécnica de Madrid.

Red de Alerta e Información Fitosanitaria de Andalucía (2019) *Boletín Autonómico Campaña 2019*. Available at:

http://www.juntadeandalucia.es/agriculturapescayderosarrollorural/raif/balances-fitosanitarios?p_p_id=110_INSTANCE_H2xb9LD9JOwR&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_110_INSTANCE_H2xb9LD9JOwR_strut.

Sampedro Sánchez, D., Abreu Fernández, L., Guisado Muñiz, Á., Del Moral Ituarte, L., Pedregal Mateos, B. and Silva Pérez, R. (2005) "Crisis y reestructuración de grandes zonas regables de Andalucía: el caso del Bajo Guadalquivir", *Industria y minería*, (361), pp. 26–32.

Sepat, N. K., Sepat, S. R., Sepat, S. and Kumar, A. (2013) "Energy use efficiency and cost analysis of tomato under greenhouse and open field production system at Nubra valley of Jammu and Kashmir", *International Journal of Enviromental Science*, 3(4), pp. 1233–1241.

Simón Fernández, X. (1999) "El análisis de sistema agrarios: una aportación económico-ecológica a una realidad compleja", *Historia agraria: Revista de agricultura e historia rural*. Sociedad Española de Historia Agraria, (19), pp. 115–136.

Statista (2018) *Tomates: producción por autonomía en España*. Available at: <https://es.statista.com/estadisticas/510892/produccion-de-tomates-en-espana-por-comunidad-autonoma/> (Accessed: March 27, 2020).

6. ANEXOS

6.1. Anexo I. Cuestionario.

Tabla 7. Cuestionario

1. Perfil del encuestado			
Propietario, trabajador o gestor de la finca	Francisco Granado. Propietario		
Capacidad y experiencia tecnoproductivas	Posee varias fincas en el sector BXII del Bajo Guadalquivir con diferentes cultivos como guisantes, habas o algodón.		
2. Gestión del cultivo			
Cultivo extensivo o intensivo	Intensivo. Venta de tomates para la industria.		
Cultivo ecológico o convencional	Convencional		
Uso de invernadero	No. Los ciclos del cultivo son naturales.		
Tipo de cultivo	Hortícola		
Variedad	Tomate "pera" (<i>Solanum Lycopersicum</i>)		
3. Identificación de la finca			
Superficie total de la finca	12 ha		
Superficie agraria útil	6 ha para el tomate		
Años de la explotación	18 años		
4. Producción			
Rendimiento en toneladas	200 toneladas en 2019		
Pérdidas	7,5 %		
Reemplazo	No existe reutilización de la finca para otro fin y no utiliza ningún producto orgánico procedente de la misma.		
5. Insumos			
Tipo de combustible para la maquinaria agrícola	Gasoil tipo B (0,78€/L)		
Cuántos litros de combustible gasta al año	1500 L de gasoil en 2019		
Electricidad para irrigación	El gasto por ha fue de 140€ en 2019		
Personas trabajadoras	Para 120 días de trabajo, 7 personas trabajadoras eventuales, 8 horas/día.		
Cantidad y composición de fertilizantes	Fertilizante	Cantidad	Composición
	Compost	300 kg/ha	
	Abono a base de óxido de potasio (K ₂ O)	160kg/ha	N: 2,7% K: 30%
	Ácido fosfórico (P ₂ O ₅)	150L/ha	P:52%
Cantidad y porcentaje de materia activa de fitosanitarios	Fitosanitario	Cantidad	% Materia Activa
	Atrazina	3 kg/ha	
	Terbutrina	3 kg/ha	0,25
	Pendimentalina	2,5 kg/ha	0,25

	Glifosato	2,5 kg/ha	0,3
	Teflutrina	4 kg/ha	0,015
Cantidad de semillas	200.000 unidades		
Cantidad y procedencia de plásticos	50 kg de plásticos procedentes de la cinta por goteo.		
6. Capital fijo			
	Tractor John Deere 125 HP		
	Con grada de disco	8 horas	
	Con Conquilder	5 horas	
	Con GPS para lomos	3 horas	
	Con Subsolador	8 horas	
Maquinaria y horas de actividad	Con Tasquivero	6 horas	
	Con rulo compactador	6 horas	
	Con pulverizador	2 horas	
	Para Siembra	12 horas	
	Para Cosecha	12 horas	
	Total	62 horas	

6.2. Anexo II. Ubicación de la finca.



Figura 4. Ubicación de la finca de estudio dentro del sector B-XII en Lebrija (Sevilla).

La información de esta parcela es la vigente en SigPac a fecha 30/12/2019.

Fecha de vuelo: 07/2019

Fecha de la cartografía catastral (1): 22/11/2013

Provincia	Municipio	Agregado	Zona	Poligono	Parcela	Superficie (ha)	Referencia Catastral
41 - SEVILLA	53 - Lebrija	0	0	1	209	12,7749	41053A00100209YS

Recinto	Superficie (ha)	Pendiente (%)	Uso	Admisibilidad en pastos		Coef.Regadío	Incidencias	Región
				(%)	(ha)			
1	12,5067	0,70	TA			100	96	2201 (2)
2	0,0173	3,90	ED			0		
3	0,2509	4,70	IM			0		

Uso	Superficie (ha)	
	Total	Admisible en Pastos
ED	0,0173	
IM	0,2509	
TA	12,5067	

OPCIONES DE IMPRESIÓN	IMPRIMIR
<input checked="" type="checkbox"/> Etiquetas	
<input checked="" type="checkbox"/> Recintos	
<input checked="" type="checkbox"/> Árboles	
<input checked="" type="checkbox"/> Elementos del Paisaje	

Figura 5. Información catastral de la finca de estudio.