

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**  
**Y OBJETIVOS**



---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



*Concierto para clarinete en la mayor, K 622*

*Wolfgang Amadeus Mozart*

---

### 1.1 PLANTEAMIENTO

La agricultura como toda actividad humana implica una explotación del medio natural. En concreto la agricultura intensiva pretende producir el máximo con la menor ocupación posible del suelo, para ello se recurre a una serie de técnicas con el objetivo de forzar la producción. Un ejemplo de este tipo de producción lo tenemos en el cultivo bajo invernadero. Éste se orienta a obtener el más alto rendimiento, a costa de aislarlo de las condiciones naturales mediante el forzado del cultivo a través de técnicas de climatización (calefacción, humidificación, iluminación,...) y técnicas culturales (sustratos, fertirrigación,...) para rentabilizar al máximo la ocupación del terreno. Esta rentabilización implica una mejora en la utilización de los recursos naturales, agua y suelo.

Tradicionalmente, en la mayoría de los trabajos de investigación, que tratan de la influencia que la agricultura tiene sobre el medio ambiente, se ha cuantificado el consumo de energía. En los últimos años la preocupación se ha centrado en temas más específicos, contaminación de suelo y agua por agroquímicos, principalmente nitratos e influencia de los plaguicidas. En los estudios del cultivo en invernadero han predominado los temas relacionados con los residuos generados, especialmente a partir de los plásticos utilizados como materiales de cubierta y sustratos y

tratamiento del residuo verde. No obstante, no existen trabajos que consideren en su totalidad el proceso productivo en invernadero.

Cabe añadir que la mayoría de trabajos de tipo ambiental relacionados con invernaderos se han realizado en el Norte y Centro de Europa (Alemania, Dinamarca, Holanda,...) donde por sus condiciones climáticas el invernadero utilizado es el de vidrio y resulta esencial la utilización de la calefacción, otorgándose por tanto una gran importancia al consumo energético. En la zona Mediterránea, la mayoría de los invernaderos no utiliza calefacción o tiene un sistema de emergencia para días especialmente fríos. Por tanto, serán otros los principales efectos ambientales adversos, que en muchos casos pueden y deben solucionarse con una mejora de la gestión y de las técnicas culturales empleadas.

Por otra parte, la valoración actual de la calidad ambiental de los productos agrícolas está sujeta a menudo a confusión. Confusión debida a que no existen parámetros de medida aceptados de manera general por la sociedad, productores y consumidores. El concepto de producto ecológico es interpretado de diversas maneras usándose en diferentes contextos. Existe una opinión generalizada de que los productos artesanales o aquellos en los que no se han utilizado plaguicidas son más ecológicos y poseen unas propiedades organolépticas superiores en contraposición a una agricultura de tipo industrial. Desde un punto de vista de calidad ambiental esto no tiene porque ser así.

Para poder valorar la calidad ambiental de un producto agrícola deberán establecerse unos parámetros transparentes, cuantificables y objetivos al máximo. Estos parámetros deberán incluir aspectos como el consumo de recursos bióticos y abióticos, consumo de energía, uso del suelo, emisiones nocivas al aire, agua y suelo y toxicidad potencial para los seres humanos y ecosistemas. Esto supone aceptar que la calidad ambiental de un producto no se puede definir con un solo parámetro, sino con una serie de valores o indicadores que el usuario y/o la administración deberán priorizar.

La metodología propuesta por el análisis del ciclo de vida, ACV, que tiene en cuenta los procesos de forma global, resulta una herramienta muy adecuada, puesto que una buena gestión ambiental implica una acción integrada sobre los posibles daños ambientales.

Esta metodología se ha venido utilizando principalmente en productos industriales, o para evaluar la manipulación de los productos alimentarios, y aunque existe una preocupación importante por la adaptación de la metodología del ACV a los procesos agrarios, existe poca información sobre los indicadores ambientales más adecuados en general y la aplicación en particular en invernaderos mediterráneos, haciéndose necesaria por tanto una adaptación de dicha herramienta.

Para realizar la investigación, basándose en una información lo más real y universal posible, se optó por la elección de un cultivo altamente representativo como es el cultivo del tomate. A escala mundial existen cerca de cuatro millones de hectáreas, ha, de superficie cultivada, lo que significa una producción de más de 108,5 millones de kg de tomates (FAO, 2002). Dentro de la horticultura intensiva española la producción de tomate es la más importante con más de 63.000 ha dedicadas a su cultivo, de las cuales un 25%, 15.552 ha, se realizan bajo invernadero. La producción de tomate fue en el año 2001 de cerca de tres millones setecientas mil de toneladas, con un valor superior a 1.250 millones de €. Un 28% de esta producción se destinó a la exportación. En Catalunya una tercera parte del cultivo de plantas bajo invernadero se dedican al tomate, en total 338 ha (MAPA, 2001).

Por ser ésta una producción tan extendida está sujeta a diferentes técnicas de cultivo, desde invernaderos muy sencillos cultivando directamente en suelo, hasta invernaderos altamente tecnificados mediante calefacción, aporte de humedad, fertilización carbónica, fertirrigación, cultivados en substrato y en algún caso extremo con recirculación de nutrientes.

En esta tesis se partirá de datos correspondientes al cultivo de tomate bajo invernadero en el área geográfica del Maresme. Evidentemente, se pretende, que una vez realizada la puesta a punto de dicha técnica, la metodología sea fácilmente extensiva a otras zonas geográficas y cultivos.

En este trabajo se pretende calcular mediante el ACV las cargas ambientales asociadas al cultivo de tomate bajo invernadero mediante la identificación y cuantificación de la energía y materiales usados y los residuos emitidos al entorno, con el fin de analizar los impactos de éstos sobre el medio ambiente y evaluar e implementar posibles mejoras.

El trabajo se ha estructurado en siete capítulos, este primero a modo de presentación de la cuestión. Le siguen dos capítulos también de carácter introductorio. En el capítulo 2 se hace una breve reseña histórica del uso de los invernaderos, se explica el funcionamiento y las técnicas más comunes de cultivo en ellos y se destaca la importancia económica de su cultivo. El capítulo 3 consiste en una descripción de la metodología propia de los estudios de ACV. Se detallan las categorías de impacto e indicadores que se utilizarán y las limitaciones que conlleva la utilización de esta metodología aún en fase de desarrollo.

El capítulo 4 es el núcleo central de esta tesis y en ella se realiza el ACV del proceso de cultivo de tomate en invernadero, comparándose diferentes técnicas: cultivo en suelo, cultivo hidropónico con y sin recirculación de nutrientes, tipo de material de cubierta de la estructura, gestión de residuos, fertilización y localización de la fabricación de suministros.

Los siguientes capítulos se dedican a aspectos metodológicos. El capítulo 5 se detiene en el análisis de la toxicidad potencial de los plaguicidas, comparando diferentes modelos usados para su

cálculo. Posteriormente se aplican dichos modelos en la evaluación de explotaciones gestionadas siguiendo criterios de control químico o integrado. El capítulo 6 analiza con profundidad la problemática que se deriva de la aplicación de los indicadores de uso del suelo. Por último en el capítulo 7 se recogen las conclusiones finales del trabajo.

### 1.2 ANTECEDENTES

#### 1.2.1 Agricultura y Medio Ambiente

Si por un lado la intensificación de las prácticas agrícolas, estimuladas por la política agrícola, ha tenido un efecto perjudicial sobre el ambiente, por otro, cabe reconocer la contribución significativa de la agricultura a la conservación del medio ambiente (Smith, 1995). Dos actuaciones de la técnica agronómica son paradigmáticas en términos de su incidencia ambiental: las grandes transformaciones en regadío y la concentración parcelaria (Mateo Box, 1996). Los problemas más graves, desde un punto de vista ambiental, que produce la práctica agrícola atañen a la calidad del suelo, su degradación y posible desertización, especialmente en regiones donde el agua es un bien limitado como es el caso del área mediterránea. Debe tenerse en cuenta que la agricultura de regadío utiliza cerca del 80% del agua en España.

Los primeros estudios sobre la influencia de la agricultura en el medio ambiente se inician en 1973 coincidiendo con la crisis energética, y se basan en los análisis de la energía utilizada. Entre diversos trabajos cabe destacar la obra de Pimentel (1980). En ella se recogen las entradas energéticas para varios trabajos agrícolas (formulación de plaguicidas, irrigación, fabricación y transporte de fertilizantes y plaguicidas, propagación, transporte de materiales,...), así como, la evaluación de entradas y salidas energéticas para diferentes cultivos extensivos, hortícolas (col, lechuga, melón, pimientos, espinacas) siempre al aire libre, frutales, ganadería, piscicultura y forestales. Específico de aplicación a cultivo en invernaderos es el trabajo de Stanhill (1980) en que se evalúa el costo de energético de la producción de tomate en invernadero.

Más próximos a nuestros días son los estudios que relacionan consumo energético y transporte a mercados. El transporte de los productos significa un factor importante a tener en cuenta desde un punto de vista ambiental. El transporte se ha convertido en una parte fundamental del “sistema agroalimentario” al aparecer una creciente especialización de los usos de la tierra en zonas de producción y zonas de consumo, regiones industrializadas muy pobladas que dependen de suministros externos de alimentos (Rodríguez Murillo, 1994) citando a (Pimentel, 1980). Este fenómeno tiende a acentuarse con la mejora de las comunicaciones y la globalización de la economía.

Rodríguez Murillo (1994) estudió como afecta al medio ambiente el transporte de diferentes clases de productos agrícolas (arroz, trigo, maíz y diversas hortalizas). Sus datos sobre lechuga y tomate ilustran una vez más el efecto de la producción y consumo locales frente al alejamiento de las zonas de producción respecto a las zonas de los consumidores. La distancia media recorrida por las lechugas antes de llegar a MercaMadrid es para este autor una tercera parte de la que recorren los tomates (datos de 1987) con la consiguiente reducción del transporte y del consumo energético y los impactos ambientales ligados a éste.

Jungbluth (2000) concluye en su tesis que el transporte transoceánico es uno de los factores que implican una mayor carga ambiental.

Otro de los problemas más graves es la contaminación de las aguas subterráneas, producida por los productos agroquímicos, revistiendo especial importancia el elevado contenido de nitratos, que en muchas zonas están por encima del nivel de potabilidad.

El uso de abonos químicos es relativamente reciente en la escala temporal de la agricultura. A partir de 1863 comienza a desarrollarse en Catalunya la industria de fertilizantes (Boixadera y col., 1999) que permiten un incremento de la fertilidad química de los suelos; sin embargo es a partir de 1950 cuando se incrementa en Catalunya, y a escala mundial el consumo de abonos minerales, consumo que se estabilizará hacia los años 80.

La directiva EU sobre Nitratos especifica que a partir del año 2000 no deben aplicarse más de  $170 \text{ kg N ha}^{-1}$  al suelo procedentes de estiércol (91/676/EEC, 1991). La directiva de la Generalitat de Catalunya (DOGC, 2000) establece las áreas vulnerables y las dosis de  $\text{kg de N ha}^{-1}$  máximas admitidas para los cultivos más representativos. En el caso del Maresme y para el cultivo de tomate, ésta está cifrada en  $450 \text{ kg N total ha}^{-1}$ .

La contaminación de las aguas subterráneas por plaguicidas ha pasado a ser un tema de gran interés a partir de la Directiva de la Unión Europea sobre calidad de aguas potables (98/83/CE, 1998), en la que se limita la concentración máxima por plaguicida o "producto relacionado" a  $0,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  y de  $0,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para el conjunto de ellos. El concepto de "plaguicida y producto relacionado" debe entenderse, según el Manual de Procedimientos de la Comisión del CODEX Alimentario, extendida a reguladores del crecimiento, defoliantes y cualquier otra sustancia adicionada a cultivos, pre o post-cosecha para proteger su deterioro durante almacenamiento y transporte.

Uno de los primeros intentos de compendiar los efectos ambientales de los plaguicidas fue el de Metcalf (1975), resumiendo dichos efectos en un solo número, número basado en datos cualitativos de persistencia, toxicidad para los mamíferos y los organismos no perjudiciales para el cultivo. Higley (1992) desarrolló un modelo para evaluar el riesgo ambiental asociado al uso de

plaguicidas. El modelo proporciona un método para “clasificar” los riesgos ambientales, estimar los costos ambientales e incorporar dichos costos a las decisiones en la lucha integrada a través de niveles de costo ambiental y daños económicos (Economic Injury Levels, EILs). Kovach y col (1992) establecieron el cociente de impacto ambiental (Environmental Impact Quotient, EIQ), con el fin de proporcionar a los agricultores e interesados una información fácil de usar acerca de los efectos adversos de los plaguicidas. Dushoff y col (1994) cuestionan este cociente sugiriendo una aproximación en forma de tabla en donde se presenta una clasificación por categorías cualitativas que incluye el efecto sobre los agricultores, consumidores, aguas subterráneas y organismos no perjudiciales.

Otro tipo de estudios ambientales hacen referencia a la generación de residuos, especialmente en horticultura intensiva (Calatrava, 2000), tanto por lo que se refiere a residuos verdes, parte del cultivo no aprovechado, como residuos sólidos plásticos y sustratos.

Stanghellini y col. (2003) hacen un balance de los diferentes residuos generados en el cultivo en invernadero. Citando diversos estudios estima en  $1,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  los residuos plásticos procedentes de la renovación del material de cubierta. El residuo plástico derivado de las tuberías de riego, containers, etc, suma  $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . A estos se deben añadir unos  $112 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  de plástico diverso derivado de material para entutorar y  $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  procedente de las trampas para insectos. Los sustratos generan  $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  de residuo mineral (lana de roca o perlita) y finalmente hay que añadir la biomasa no productiva que se estima en valores cercanos a las  $250 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ .

Ren (2003) analiza detalladamente las oportunidades y problemática que se derivan del uso de materiales plásticos biodegradables insistiendo en la necesidad de incluir diferentes aspectos como un etiquetaje bien definido, una política de separación de residuos, de compostaje y de aplicación de este compost, defendiendo la necesidad de una aproximación al ciclo de vida completo de estos materiales para su difusión y utilización a escala comercial.

Los gobiernos participantes en la cumbre de Río de Janeiro (1992), proclamaron los principios de un desarrollo sostenible, principios que se basan en el derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza y en la colaboración internacional con el objetivo de igualar los desequilibrios económicos y asegurar las necesidades de las generaciones futuras. Este desarrollo sostenible hace especial hincapié en la agricultura. También en la reforma de la PAC (política agraria comunitaria) de 1992 se incluyen instrumentos específicos para reducir la presión ambiental de la agricultura. La posterior reforma de la PAC, que forma parte de la Agenda 2000, especifica la necesidad de establecer indicadores ambientales para la evaluación de los efectos positivos y negativos de la agricultura sobre el medio ambiente.



Existen varios trabajos que intentan definir diferentes indicadores o índices de impacto ambiental. Kelly y col. (1996) utilizan la metodología EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) para simular y evaluar siete rotaciones con diferentes prácticas culturales (maíz, trigo, soja ...) buscando un compromiso entre factores económicos y ambientales. Las variables ambientales analizadas son: erosión del suelo, emisiones de nitrógeno, fósforo, y herbicidas.

Bailey y col. (1999) establecen una comparación económica y ambiental de un sistema de cultivo integrado y otro convencional para una rotación de cultivos extensivos (*Brassica napus*, *triticum aestivum*, *hordeum vulgare*). En este estudio se repasan los diferentes modelos económicos y ambientales (amplia bibliografía) para pasar a analizar un caso práctico en que se comparan los dos sistemas. Como indicadores ambientales se utilizan: residuos de nitrato en suelos, cambios en la biomasa producida por gusanos de tierra, comparación del número de invertebrados (escarabajos y arañas) comparación de fertilizantes y plaguicidas. Como conclusión desde un punto de vista financiero el sistema de agricultura integrada representa un margen neto mayor, a pesar de que la producción descienda, porque se reducen los gastos de cultivo. Desde un punto de vista ambiental hay ciertas dudas porque resulta difícil de precisar el beneficio a largo plazo.

### **1.2.2 ACV y la Agricultura**

Los análisis de ciclo de vida (ACV) se desarrollaron, en un principio, para el estudio de proceso industriales. Dentro de la industria, los ACVs se han empleado, tradicionalmente, en el desarrollo de productos menos contaminantes. También se han utilizado para mejorar la política ambiental de la empresa. Asimismo, resulta un instrumento eficaz en el desarrollo de los criterios necesarios para el ecoetiquetaje (Milà, 2003).

Su aplicación a la agricultura requiere la aplicación sistemática de los métodos existentes así como nuevos métodos (Cowell y col., 1997). A escala europea se han realizado algunos proyectos de adaptación de la metodología del ACV. Mediante la acción concertada “Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture” (Audsley, 1997) se investigó como el ACV puede ser aplicado a la producción agraria, estableciendo las primeras pautas para su aplicación en agricultura e identificando las dificultades metodológicas que requieren una investigación más profunda.

El Ministerio de Agricultura de Holanda encargó un estudio que dió como resultado un suplemento (Wegener Sleeswijk y col., 1996) a la normativa “LCA Guide” (Heijungs y col., 1992) con el fin de ofrecer una metodología uniforme para analizar los impactos ambientales de los productos agrarios.

En noviembre de 1997 se inició con una duración de dos años, otra acción concertada en el ámbito europeo, “An Environmental Study –LCA network on Foods”, (Olsson, 1999) que dió lugar a la constitución del grupo LCA-NET-Food dedicado al estudio y promoción del ACV como metodología para su aplicación en los productos alimentarios, encontrándose entre sus objetivos la constitución de una red europea para la utilización del ACV en la cadena alimentaria y promover la formación de una base de datos europea para la aplicación del ACV en alimentación.

Olsson (1999) recoge en el documento final las conclusiones a las que se llegaron. Como parte de dicha acción concertada LCA-NET-Food, tuvo lugar en enero del 1999 en la Haya el 2º Seminario Europeo de expertos en ACV de productos alimentarios dedicado al tema “Datos de la Agricultura para ACV” (Weidema y col., 1999).

Igualmente existe una iniciativa que organiza conferencias internacionales sobre la aplicación del ACV en el sector agroalimentario, hasta el momento se han desarrollado cuatro Brussels, 1996 y 1998, Gothenberg, 2001 y Horsens, 2003. En ellos han predominado los temas relacionados son los sectores más extensivos, agricultura orgánica versus convencional (Geier y col., 1998) y productos elaborados, leche, (Cederberg y col., 1998, Hospido y col., 2003), pan, (Braschkat y col., 2003) margarina,... En los aspectos metodológicos destacan los trabajos sobre distribución de las cargas ambientales en el caso de co-productos y propuestas de indicadores a utilizar, principalmente aquellos que tienen en cuenta el uso del suelo (Junblught y col., 2003, Peters y col., 2003).

También en el ámbito metodológico cabe destacar las contribuciones de Cowell (1998) en el establecimiento de pautas para el desarrollo de ACVs en los productos agrarios y más recientemente Milà (2003) destaca la importancia del estudio de los factores locales en el ACV de los productos agrícolas.

Entre los primeros trabajos de aplicación de ACV en cultivos se puede mencionar el de Weidema y col (1996). En él se analiza el impacto ambiental que produce el cultivo de trigo comparando tres sistemas productivos, intensivo, orgánico e integrado, concluyendo que el tipo de cultivo orgánico de trigo es preferible desde el punto de vista de las categorías de impacto ambiental de calentamiento global, ecotoxicidad y toxicidad de agua potable, pero es peor para la eutrofización y la toxicidad humana del aire. El sistema intensivo es preferible teniendo en cuenta los indicadores fotoquímico y agotamiento de ozono.

También para la producción de trigo (Hansson y col., 1999) presentaron los resultados de ACV haciendo hincapié en la importancia de los datos de las emisiones de los tractores probando que éstas pueden cambiar los resultados.

Otro gran campo en que se ha aplicado el ACV es el sector forestal y aprovechamiento de la madera. Por ejemplo, Esser y col (1998) publican un estudio para el desarrollo de una metodología que incorpore la extracción de recursos bióticos. Higham y col. (1998) discute las ventajas e inconvenientes del ACV aplicado en la producción forestal. Entre los primeros destaca la aproximación global que permite esta herramienta. Entre los segundos la gran cantidad de datos necesarios y el tiempo que debe invertirse en realizar los estudios. Richter y col. (1996) comparan la utilización de la madera en la construcción con otros materiales.

En la comparación entre cultivo integrado y orgánico de manzanas, Milà (2003) subraya como no necesariamente el cultivo orgánico resulta más ecológico. Las explotaciones orgánicas evaluadas, si bien reducen los impactos de toxicidad debido a la no utilización de plaguicidas, producen un mayor daño ambiental debido al uso de más maquinaria, y por lo tanto más energía consumida y emisiones producidas.

Basado en la metodología del ACV, Jungbluth (2000) lleva a cabo en su tesis una investigación en la que se propone ayudar al consumidor suizo a considerar los aspectos ambientales en la decisión del producto a comprar. Su estudio se centró en productos cárnicos y hortalizas. Las conclusiones a las que llega son que el transporte transoceánico y la calefacción de invernaderos son los factores que implican una mayor carga ambiental, por el contrario el empaquetado, método de conservación y consumo son de importancia menor frente al origen de los productos agrarios.

Otras aplicaciones de ACV en horticultura se encuentran en el trabajo de Jolliet (1993) para cultivo de tomates. En él se valoran varias técnicas de cultivo en invernadero: con calefacción, iluminación artificial y fertilización carbónica, cuantificando así mismo el transporte. Los resultados muestran que la calefacción y la iluminación son las técnicas que producen mayor impacto ambiental. Nienhuis y col. (1996) lo aplican en el estudio de la nutrición en cultivo de tomates y de rosas en Holanda comparando cultivo sin suelo, en sustrato libre y en sustrato con recirculación, destacando la importancia de este último en aspectos como la reducción de la eutrofización. Van Woerden (2001) aplica ACV a la horticultura de invernaderos holandesa para describir los efectos ambientales de desarrollos futuros en los sistemas de producción comparando sistema orgánicos y convencionales. También en este trabajo se muestra una vez más el impacto negativo del uso de la calefacción. Aunque no se utiliza la metodología del ACV cabe citar el trabajo de (Bucher y col., 1996) que compara las producciones de Holanda y España detectando los puntos débiles desde la perspectiva medioambiental. Para Holanda los impactos debidos a la utilización de la energía y en España los debidos al uso de fertilizantes y plaguicidas.

Las aplicaciones de ACV en la producción bajo invernadero en la zona Mediterránea son inexistentes. En este sentido, esta tesis pretende contribuir mediante esta herramienta al análisis y optimización de este tipo de cultivo, desde un punto de vista de impacto ambiental.

### 1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es la evaluación de las cargas ambientales que representa el cultivo de tomate bajo invernadero de tipo comercial mediterráneo. Para llevar a cabo esta cuantificación se utiliza la metodología propia del Análisis del Ciclo de Vida.

A partir de esta premisa se pueden distinguir dos objetivos generales y varios específicos:

A) Caracterizar los efectos ambientales derivados del proceso de cultivo. Cuantificar el consumo de materias primas y de energía, la emisión de contaminantes al aire, agua y suelo, así como los residuos generados en el proceso de cultivo de tomate en invernadero mediterráneo.

1. Estudio de diferentes alternativas utilizadas en dicho cultivo.
2. Detección de los puntos débiles desde un punto de vista ambiental a partir de dicha cuantificación.

B) Contribuir a la adaptación de la metodología del ACV para su aplicación en los procesos agrícolas.

1. Detección de los problemas que se plantean en la aplicación de dicha metodología.
2. Avance en el desarrollo de indicadores para el cálculo de la toxicidad potencial de los plaguicidas.
3. Aplicación de los indicadores de uso del suelo.