



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de Doctorat Enginyeria Ambiental

**UTILIZACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EN
LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL
CULTIVO BAJO INVERNADERO MEDITERRÁNEO**

M^a Assumpció Antón Vallejo

TESI DOCTORAL

Directors:

Dr. Francesc Castells

Dr. Juan I. Montero

Tutor:

Dr. Jose M^a Baldasano

Barcelona, Gener 2004



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de Doctorat Enginyeria Ambiental

**UTILIZACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA EN LA
EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL CULTIVO
BAJO INVERNADERO MEDITERRÁNEO.**

**Memòria presentada per M^a Assumpció Antón Vallejo per optar al títol de Doctor
per la Universitat Politècnica de Catalunya en el programa d'Enginyeria Ambiental.**

Directors:

Dr. Francesc Castells (ETSEQ, URV)

Dr. Juan I. Montero (IRTA)

Tutor:

Dr. José M^a Baldasano (ETSEIB, UPC)

Barcelona, Gener 2004

Ahir, Avui, Demà

Memòria, Esforç, Esperança

Pares, Nosaltres, Ells

Per a l'Oleguer i l'Elisenda

ÍNDICE

RESUMEN / RESUM / SUMMARY	1
AGRADECIMIENTOS	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1 PLANTEAMIENTO	11
1.2 ANTECEDENTES	14
1.2.1 Agricultura y Medio Ambiente.....	14
1.2.2 ACV y la Agricultura.....	17
1.3 OBJETIVOS	20
CAPÍTULO 2. EL INVERNADERO MEDITERRÁNEO	21
2.1 INTRODUCCIÓN	23
2.2 HISTORIA	24
2.3 SUPERFICIE CULTIVADA	25
2.4 IMPORTANCIA ECONÓMICA	28
2.5 DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO MEDITERRÁNEO	28
2.5.1 Tipo de Estructura.....	28
2.5.2 Cultivo en suelo	31
2.5.2.1 Fertilizantes	32
2.5.3 Cultivo en sustrato	33
2.5.3.1 Recirculación	34
2.5.3.2 Necesidades de riego.....	36
2.5.3.3 Fertilizantes	38
2.5.4 Control fitosanitario.....	39
2.6 LISTA DE SÍMBOLOS	42
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	43
3.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	45
3.2 METODOLOGÍA	47
3.2.1 Objetivo y alcance del estudio	47
3.2.2 Inventario (ICV)	48
3.2.3 Análisis del Impacto (AICV).....	48
3.2.4 Interpretación.....	52
3.3 ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (ICV).....	52
3.3.1 Validez y representatividad de los datos obtenidos	54
3.4 ACV SOFTWARE.....	54
3.5 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA	56

3.5.1	Introducción.....	56
3.5.2	Categorías de impactos.....	58
3.5.2.1	Agotamiento recursos abióticos.....	58
3.5.2.2	Uso del suelo.....	59
3.5.2.3	Cambio climático.....	60
3.5.2.4	Agotamiento del ozono estratosférico.....	61
3.5.2.5	Formación oxidantes foto-químicos.....	62
3.5.2.6	Acidificación.....	64
3.5.2.7	Eutrofización.....	66
3.5.2.8	Toxicidad.....	68
3.6	LIMITACIONES DE LOS ESTUDIOS DE ACV.....	71
3.6.1	Perspectivas culturales.....	71
3.6.2	Impacto real e impacto potencial.....	73
3.6.3	Dimensión temporal.....	74
3.6.4	Dimensión espacial.....	75
3.6.4.1	Factor destino.....	76
3.6.4.2	Factor exposición.....	76
3.6.4.3	Factor efecto.....	77
3.7	LISTA DE SÍMBOLOS.....	78
	CAPÍTULO 4. ACV DEL INVERNADERO INDUSTRIAL MEDITERRÁNEO.....	81
4.1	INTRODUCCIÓN.....	83
4.2	DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO.....	84
4.2.1	Objetivo.....	84
4.2.2	Alcance del estudio.....	86
4.2.3	Unidad Funcional.....	86
4.3	ANÁLISIS DEL INVENTARIO.....	87
4.3.1	Producción de la infraestructura.....	88
4.3.1.1	Estructura del invernadero.....	88
4.3.1.2	Materiales sistema fertirrigación.....	90
4.3.2	Producción de tomate.....	93
4.3.2.1	Manejo del invernadero.....	93
4.3.2.2	Producción de fertilizantes.....	94
4.3.2.3	Producción de plaguicidas.....	95
4.3.2.4	Fertirrigación.....	97
4.3.2.4.1	Consumo de agua.....	97
4.3.2.4.2	Consumo de fertilizantes.....	98

4.3.2.4.3 Emisión de nutrientes	99
4.3.3 Control fitosanitario.....	101
4.3.4 Gestión de los residuos.....	103
4.4 ANÁLISIS DEL IMPACTO.....	106
4.4.1 Eutrofización, EI.....	110
4.4.2 Agotamiento recursos abióticos, AR.....	112
4.4.3 Acidificación, AI.....	112
4.4.4 Cambio climático, CCI.....	112
4.4.5 Agotamiento del ozono estratosférico, ODI.....	113
4.4.6 Formación foto-oxidantes, POI.....	113
4.4.7 Toxicidad Humana, HTI.....	114
4.4.8 Toxicidad Ecosistema Acuático, ATI.....	114
4.4.9 Toxicidad Ecosistema Terrestre, TTI.....	114
4.4.10 Deseccación, WR.....	115
4.4.11 Uso del suelo.....	115
4.5 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	115
4.5.1 Influencia del sistema de cultivo.....	116
4.5.2 Influencia de la gestión de los residuos.....	121
4.5.3 Influencia del material de cubierta.....	126
4.5.4 Influencia del tipo de fertilización.....	129
4.5.5 Influencia del transporte de la estructura.....	130
4.5.6 Valores de referencia.....	132
4.6 INTERPRETACIÓN.....	134
4.6.1 Recomendaciones.....	137
CAPÍTULO 5. CÁLCULO DE LA TOXICIDAD DE LOS PLAGUICIDAS EN EL ACV.....	139
5.1 PRESENTACIÓN.....	141
5.2 INTRODUCCIÓN.....	141
5.3 REVISIÓN DE LOS MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA TOXICIDAD POTENCIAL DE LOS PLAGUICIDAS.....	144
5.4 METODOLOGÍA.....	146
5.4.1 Aplicación de los métodos USES-LCA y CST.....	146
5.4.2 Cálculo de los impactos.....	147
5.4.3 Dosis de aplicación, M.....	148
5.4.4 Factores de transporte en el invernadero.....	149
5.4.4.1 Volatilización, f_{gh-air}	150
5.4.4.2 Escorrentía, $f_{gh-runoff}$	152

5.4.4.3 Flujo vertical, $f_{gh-leaching}$	153
5.4.4.4 Fracción ecosistemas, f_{env}	154
5.4.4.5 Fracción en fruto, $f_{gh \rightarrow fruit}$	154
5.4.5 Factores destino y exposición	155
5.4.5.1 USES-LCA	155
5.4.5.2 Critical Surface Time, CST	156
5.4.6 Factor efecto	157
5.5 RESULTADOS	159
5.5.1 Factores transporte y efecto	159
5.5.2 USES-LCA	161
5.5.3 CST	163
5.5.4 Aplicación	167
5.5 DISCUSIÓN	168
5.6 CONCLUSIONES	171
5.7 LISTA DE SÍMBOLOS	172
5.8 ANEXOS	174
CAPÍTULO 6. INDICADORES DE USO DEL SUELO	177
6.1 INTRODUCCIÓN	179
6.2 REVISIÓN DE LOS INDICADORES DEL USO DEL SUELO	180
6.2.1 Primeras aproximaciones a la cuantificación de la ocupación y transformación del suelo	182
6.2.2 El suelo como recurso productivo	183
6.2.3 Métodos basados en indicadores de Calidad	185
6.2.3.1 Indicadores relacionados con la productividad del ecosistema	185
6.2.3.2 Indicadores de Biodiversidad	187
6.3 APLICACIÓN AL ESTUDIO DEL IMPACTO EN EL USO DEL SUELO DE LOS INVERNADEROS DEL MARESME	192
6.3.1 Material y Métodos	192
6.3.1.1 Localización Geográfica	192
6.3.1.2 Métodos empleados	194
6.3.1.2.1 Método EDP (Köllner 2001)	195
6.3.1.2.2 Método PHF (Cowell 1998)	195
6.3.1.2.3 Método LCAGAPS (Weidema y col. 2001)	196
6.4 RESULTADOS	197
6.4.1 Método EDP (Köllner 2001)	197
6.4.2 Método <i>PHF</i> (Cowell 1998)	200
6.4.3 Método LCAGAPS (Weidema y col. 2001)	201

6.5 DISCUSIÓN.....	202
6.6 CONCLUSIONES.....	204
6.7 LISTA DE SÍMBOLOS	206
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	209
7.1 PRESENTACIÓN	211
7.2 CONCLUSIONES.....	212
7.2.1 Objetivo A.....	212
7.2.2 Objetivo B.....	214
7.3 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	216
7.4 PUBLICACIONES Y PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS	217
BIBLIOGRAFÍA.....	219
GLOSARIO	231

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Principales cultivos bajo invernadero (MAPA, 2000)

Figura 2.2 a) acolchado; b) túneles bajos; c) túnel y d) multitúnel

Figura 2.3 a) invernadero de madera; b) invernadero parral

Figura 2.4 Esquema y dimensiones de un invernadero industrial

Figura 2.5 Esquema de un sistema cerrado o de recirculación

Figura 2.6 a) sacos colocados sobre las banquetas de drenaje; b) tubos de recogida de lixiviados; c) depósitos de almacenamiento de lixiviados y d) depósitos de abonos y autómatas de riego

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Las fases de un ACV de acuerdo a ISO 14040

Figura 3.2 Elementos obligatorios y opcionales del AICV de acuerdo (ISO, 2000a)

Figura 3.3 Esquema de la clasificación y caracterización en la fase del AICV. Ejemplo para la categoría de acidificación

Figura 3.4 Esquemización de las relaciones entre intervenciones ambientales, impactos de efectos intermedios “midpoints”, impactos de efectos finales “endpoints” y áreas de Protección (Udo de Haes y col., 1999b)

Figura 3.5 Clasificación grupos sociales con relación a su actitud cultural frente a la sumisión al grupo y a la normativa. Adaptada de (Cowell, 1998)

Figura 3.6 Relación entre concentración-efecto. Línea A representa la relación real. Línea B significa el resultado que se obtendría de aplicar un único factor de equivalencia en el AICV (Potting y col., 1997)

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Proceso de producción de tomate bajo invernadero

Figura 4.2 Diagrama de los procesos considerados para la evaluación del sistema productivo de cultivo de tomate en invernadero

Figura 4.3 Esquema de las bombas en el circuito de recirculación. RD: recogida de lixiviado, DS: Lixiviado sucio; DL: Lixiviado limpio; B1: solución nutritiva; B2: impulsión drenaje; B3: bombeo desinfección; B4: bombeo lixiviados; B5: agua

Figura 4.4 N acumulado en planta a lo largo del ciclo de cultivo. DDT: días después del transplante

Figura 4.5 Valores y porcentaje de contribución para cada una de las categorías consideradas de los tres sistemas del cultivo hidropónico con recirculación de tomate. Sistema de fabricación de la infraestructura del invernadero, FAB, de la producción del cultivo, USO y del depósito de los residuos en vertedero, RES

Figura 4.6 Comparación Indicadores ambientales de cultivo hidropónico con recirculación para diferentes subsistemas: Fabricación materiales de la estructura del invernadero (E), Producción de materiales para el sistema de fertirrigación (R), Manejo del invernadero durante la producción de tomates (ME), Producción de fertilizantes (F), Fertirrigación (FR), Producción de plaguicidas (P), Control fitosanitario (CF), Gestión de residuos (RES). El material de cubierta es PE y el control fitosanitario es integrado, los residuos se depositan en vertedero excepto el residuo verde que se lleva a compostar. Contribuciones $\leq 1\%$ no rotuladas

Figura 4.7 Contribución a las diferentes categorías de la fabricación de los diferentes materiales que componen la estructura del invernadero y material de riego y sustrato. Los resultados están expresados en el indicador de la categoría por unidad de masa del material utilizado para la producción de un kilo de tomate, UF

Figura 4.8 Influencia del sistema de cultivo: suelo, recirculación con drenaje libre y recirculación. Resultados expresados como ratios entre ABIERTO y RECIR y SUELO versus RECIR para las diferentes categorías en el proceso global de producción de tomate bajo invernadero

Figura 4.9 Influencia del sistema de cultivo en suelo e hidropónico con drenaje libre versus recirculación para las diferentes categorías en los subsistemas de a) fabricación de los materiales auxiliares de riego, R, b) fertilizantes, F, y c) manejo de la fertirrigación FR

Figura 4.10 Porcentaje de contribución en el total del cultivo según el tipo de gestión del residuo. (FAB: fabricación infraestructura invernadero, USO, producción tomate y RES gestión de los residuos)

Figura 4.11 Influencia en las diferentes categorías del tratamiento dado a los residuos en el subsistema RES. Los valores se expresan como ratio entre incineración de todo el residuo respecto a depósito en vertedero de todo los residuos (INC/VERT) y compostaje de la biomasa, resto a vertedero respecto a todo el residuo depositado en vertedero (COM/VERT)

Figura 4.12 Emisiones principales de los diferentes materiales que intervienen en el cultivo según sea su gestión en incineradora, en vertedero o compostaje. BIO: biomasa, LDPE: polietileno baja densidad, PE polietileno, PS: poliestireno, INC: incineradora, VERT: vertedero, COMP: compostaje

Figura 4.13 Influencia del material de cubierta PC versus film LDPE para las diferentes categorías en el proceso global de producción de tomate

Figura 4.14 Influencia del material de cubierta Policarbonato versus film de polietileno para diferentes categorías en el subsistema de fabricación de la estructura E y en el de gestión de los residuos, RES

Figura 4.15 Influencia en el impacto global de producción de tomate de la distancia del transporte de material que compone la estructura. Ratios de una distancia de 1600, 800 y 400 respecto a 0 Km (no transporte)

Figura 4.16 Influencia en el subsistema E para las diferentes categorías de la distancia de la factoría del material de la estructura. Ratios de una distancia de 1600, 800 y 400 respecto a 0 Km (no transporte)

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Factores a considerar en el análisis final de la toxicidad de determinada substancia

Figura 5.2 Esquema de las rutas de dispersión de un plaguicida aplicado en un invernadero (adaptación de (Hauschild, 2000))

Figura 5.3 Fracción de plaguicida que llega al suelo y a la planta en función del índice de área foliar

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 Esquemización de los impactos de ocupación y transformación causados por el uso del suelo (Weidema y col., 2001)

Figura 6.2 Correlación entre especies de plantas vasculares y otras especies (Barthlott y col. 1999)

Figura 6.3 Tipo de vegetación de la comarca del Maresme

Figura 6.4 Mapa de distribución de número de especies vasculares en Catalunya. Fuente: banco de datos de biodiversidad (Font y col., 1999)

Figura 6.5 Mapa de la Productividad Primaria Neta obtenido por imágenes de satélite. (GLO-PEM, 2000)

Figura 6.6 Riqueza de las especies de plantas vasculares (Barthlott y col., 1999)

Figura 6.7 Normalización del número de especies utilizando la regresión propuesta por Köllner (2001)

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

- Tabla 2.1 Superficie cubierta por algún tipo de protección a escala mundial. Elaboración propia a partir de (Papaseit y col., 1997, Pérez Parra y col., 2002)
- Tabla 2.2 Comparación superficie cubierta en el área Mediterránea, incluye N de África y Oriente próximo, respecto al resto de Europa. (Elaboración propia a partir de (Wittwer y col., 1995)
- Tabla 2.3 Superficie cultivada al aire libre y en invernadero para hortaliza y ornamentales en España. (MAPA, 2000)
- Tabla 2.4 Nutrientes a aportar según las fases de cultivo. (ADV, 2001)
- Tabla 2.5 Propiedades químicas de la perlita en estado natural
- Tabla 2.6 Propiedades de la perlita expandida (Orozco, 1995)
- Tabla 2.7 Necesidades de riego en función de la transpiración
- Tabla 2.8 Nutrientes a aportar según las fases de cultivo. Fase I: Estado vegetativo, Fase II: Floración, Fase III: Cosecha

CAPÍTULO 3

- Tabla 3.1 Principales herramientas utilizadas en la elaboración de ACV
- Tabla 3.2 Clasificación de las diferentes categorías de impacto atendiendo al área de protección que corresponden, unidades equivalentes, escala geográfica y obligatoriedad de incluirlas según CML. Adaptación a partir de Guinée y col. (2002) y Audsley (1997)
- Tabla 3.3 Factor de caracterización del agotamiento de recursos abióticos, F (TEAM, 1999), y ADF (Guinée, 2001)
- Tabla 3.4 Factores de caracterización, GWP , en $\text{kg CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$, para el cálculo de la categoría de cambio climático, IPCC, para diferentes gases invernadero y períodos de integración de 20, 100 y 500 años
- Tabla 3.5 Factores de caracterización, ODP en $\text{g CFC-11}\cdot\text{g}^{-1}$ para la categoría Agotamiento de ozono estratosférico, ODI (TEAM, 1999)
- Tabla 3.6 Factores de equivalencia, $POCP$, $\text{g eq. etileno}\cdot\text{g}^{-1}$ en función de la concentración de NO_x en el área de emisión. (TEAM, 1999)
- Tabla 3.7 Factores de equivalencia, AP , $\text{g eq. H}^+\cdot\text{g}^{-1}$ utilizados en la categoría de acidificación (TEAM, 1999)
- Tabla 3.8 Factores de equivalencia en g eq. de SO_2 para el cálculo de la Acidificación (Huijbregts, 2001)

Tabla 3.9 Factores de equivalencia, *EP* g eq. PO₄ g⁻¹ utilizados en la categoría de eutrofización (TEAM, 1999)

Tabla 3.10 Factores de equivalencia, *HTP*, *ATP* y *TTP* utilizados en la categorías de toxicidad humana, ecotoxicidad acuática y terrestre según el método CST (Jolliet y col., 1996)

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Dimensiones del invernadero utilizado

Tabla 4.2 Material utilizado en la construcción de la estructura del invernadero

Tabla 4.3 Datos de la maquinaria utilizada en la construcción del invernadero

Tabla 4.4 Material utilizado en el sistema de distribución de fertirrigación

Tabla 4.5 Datos correspondientes a la energía de fabricación y mantenimiento de las diferentes bombas utilizadas en el cultivo en suelo, hidropónico con drenaje libre y recirculación

Tabla 4.6 Material utilizado como sustrato

Tabla 4.7 Datos de la maquinaria utilizada en la preparación del terreno para un sistema hidropónico con recirculación

Tabla 4.8 Datos de la energía requerida en el manejo del tractor

Tabla 4.9 Energía consumida en la fabricación de los plaguicidas utilizados, MJ kg⁻¹

Tabla 4.10 Riego aplicado en los diferentes sistemas, suelo, drenaje libre y recirculación

Tabla 4.11 Funcionamiento de la bomba de riego en cultivo de tomate en suelo bajo invernadero (ADV, 2001)

Tabla 4.12 Funcionamiento de las bombas de riego en cultivo hidropónico con y sin recirculación

Tabla 4.13 Fertilizantes aportados en cultivo de tomate en suelo. Finca 1 se ha tomado como muestra representativa más tres ejemplos procedentes de diferentes fincas

Tabla 4.14 Consumo total de fertilizantes durante todo el período de cultivo

Tabla 4.15 Concentración iónica en la solución nutritiva, absorbida por el cultivo y en el drenaje

Tabla 4.16 Emisiones de N y P para cultivo en suelo e hidropónico con drenaje libre

Tabla 4.17 Plaguicidas y dosis utilizadas durante una campaña de tomate en invernadero utilizando control integrado

Tabla 4.18 Datos de la energía requerida en el manejo del tractor

Tabla 4.19 Distribución peso seco de fruto y planta

Tabla 4.20 Composición compost de referencia, datos expresados como materia seca (AGA, 2002)

Tabla 4.21 Valores de cada una de las categorías de impacto para el total y cada uno de los subsistemas en los cultivos hidropónicos con recirculación

- Tabla 4.22 Porcentaje de las emisiones más importantes sobre el total de la categoría y contribución de cada subsistema en un cultivo hidropónico con recirculación, cubierta de LDPE, control fitosanitario integrado y depósito de residuos en vertedero a excepción del residuos verde que se destina a compostaje
- Tabla 4.23 Promedio, coeficiente de variación y percentiles 5 y 95 de las principales categorías afectadas por el tipo de sistema de cultivo, RECIR, SUELO o ABIERTO
- Tabla 4.24 Subsistemas y correspondientes valores de emisiones y recursos principales en los tres sistema de cultivos, RECIR, ABIERTO y SUELO y principales categorías afectadas
- Tabla 4.25 Emisiones de las principales sustancias en $\text{g}\cdot\text{kg}_{\text{tom}}^{-1}$ para diferentes materiales según depósito en vertedero, quema en incineradora o compostaje y categorías de impacto a las que afecta
- Tabla 4.26 Subsistemas y correspondientes valores de emisiones y recursos principales en los dos materiales de cubierta, ratio y principales categorías afectadas
- Tabla 4.27 Datos de las principales emisiones en la fabricación del policarbonato, variación del 10% para su aplicación en el análisis de sensibilidad
- Tabla 4.28 Resultados globales y para el subsistema **E** de las principales categorías afectadas por una variación del 10% en las principales sustancias del inventario de fabricación del policarbonato
- Tabla 4.29 Resultados globales y para los subsistemas **F** y **FR** de las principales categorías afectadas por diferentes dosis de fertilizantes
- Tabla 4.30 Resultados globales y para el subsistema **E** de las principales categorías afectadas por la distancia de la factoría del material de la estructura
- Tabla 4.31 Subsistema y correspondientes valores de emisiones comparando el transporte del material utilizado en la estructura, y principales categorías afectadas
- Tabla 4.32 Comparación del impacto ambiental del ciclo de producción de un kilo de tomate en invernadero con el impacto ambiental que produce la circulación de un coche diesel
- Tabla 4.33 Principales sustancias, categoría afectada, valores de las emisiones por UF, ($\text{g}\cdot\text{kg}_{\text{tom}}$), por producción total de tomate bajo invernadero en España ($\text{g P N}_{\text{tom}}$), total de las emisiones de dicha sustancia en Europa Occidental y total mundial. Ratio de la producción de tomate bajo invernadero en España respecto a la emisión total Europea, % P/E y la total Mundial, % P/M

CAPÍTULO 5

- Tabla 5.1 Listado de materias activas utilizadas en los invernaderos estudiados y dosis de aplicación, $\text{kg}_{\text{ma}} \text{FU}^{-1}$, en cultivo de tomate de ciclo primavera-verano

Tabla 5.2 Pérdida diaria por evaporación de plaguicida, a , días⁻¹, desde el suelo y el cultivo determinada a partir de la volatilidad de la sustancia. (Hauschild, 2000)

Tabla 5.3 Parámetros fijos considerados en ambos métodos

Tabla 5.4 Cálculo para CAPTAN de los factores de transporte y ejemplo para factor destino e impacto final mediante modelo CST y USES-LCA

Tabla 5.5 Valores de los factores de transporte para un índice de área foliar, LAI= 4

Tabla 5.6 Valores de los factores efecto para la población humana, ecosistemas acuáticos y terrestres.

Tabla 5.7 Valores de los factores destino y exposición calculados mediante el método USES-LCA

Tabla 5.8 Valores de los potenciales de toxicidad para seres humanos, HTI, ecosistemas acuáticos, ATI y terrestres, TTI calculados según el método USES-LCA para los diferentes plaguicidas

Tabla 5.9 Valores de los Factores destino calculados según el método CST

Tabla 5.10 Potenciales de toxicidad para seres humanos, HTI, ecosistemas acuáticos, ATI y terrestres, TTI calculados según el método CST para los diferentes plaguicidas

Tabla 5.11 Valores del impacto potencial para insecticidas y acaricidas para toxicidad de los seres humanos, acuática y terrestre calculada según CST y USES-LCA para cultivo desarrollado

Tabla 5.12 Clasificación atendiendo al impacto potencial de los fungicidas para toxicidad de los seres humanos, acuática y terrestre calculada según CST y USES-LCA para cultivo desarrollado

Tabla 5.13 Media, desviación y coeficiente de variación para las categorías de toxicidad de los seres humanos, HTI, expresada como $\text{kg eq Pb}_{\text{air}} \text{ kg}^{-1}$; acuática, ATI, $\text{kg eq Zn water kg}^{-1}$ y ecotoxicidad terrestre, TTI, $\text{kg eq Zn soil kg}^{-1}$ calculada para control integrado, IPM, y control químico, CPM utilizando la metodología USES-LCA y CST

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Distribución de la superficie de la comarca y clasificación del tipo de uso del suelo de acuerdo con CORINE (EEA 2000). Datos del CCM (CCM, 2001) y (DARP, 1998)

Tabla 6.2 Datos utilizados para calcular el PHF según (Cowell, 1998)

Tabla 6.3 Número de especies contabilizadas en bosque tipo 3.1.3.1 de la clasificación CORINE a Catalunya a partir de (Font y col., 1999)

Tabla 6.4 Cálculo de los indicadores de impacto local de ocupación según (Köllner, 2000)

Tabla 6.5 Impacto de transformación, D_{tr} , para diferentes usos del suelo según (Köllner, 2000)

Tabla 6.6 Impacto de restauración, D_{res} , para diferentes usos del suelo según (Köllner, 2000)

Tabla 6.7 Resultados de aplicar PHF a escala regional y global para el área de invernaderos considerada a partir de Cowell (1998)

Tabla 6.8 Cálculo de los Impactos de ocupación y transformación. Comparación área de invernaderos y la misma área ocupada por asentamiento urbano. Weidema y Lindeijer (2001)

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es la identificación y cuantificación de las cargas ambientales asociadas al cultivo de tomate bajo invernadero. Para llevar a cabo esta cuantificación se utiliza la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El trabajo se ha estructurado en siete capítulos.

Los tres primeros tienen un carácter introductorio. En el **capítulo 1** se revisan los antecedentes y se especifican los objetivos. En el **capítulo 2** se hace una breve reseña histórica del uso de los invernaderos describiéndose su funcionamiento y las técnicas más comunes de cultivo en ellos. La investigación se centra en el invernadero llamado Mediterráneo que es aquel propio de regiones cálidas o templadas. Se caracteriza por presentar cubierta plástica y, normalmente, no dispone de calefacción. Se le denomina Mediterráneo para diferenciarlo del invernadero original de las regiones europeas más frías. Estos últimos acostumbran a tener como material de cubierta el vidrio y disponen de calefacción. El **capítulo 3** consiste en una descripción de la metodología propia de los estudios de ACV. De acuerdo con la normativa ISO 14040 un proyecto de ACV puede dividirse en cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, inventario, análisis del impacto e interpretación. Se analiza cada una de estas fases detallándose las categorías de impacto e indicadores que se utilizarán y las limitaciones que conlleva la utilización de esta metodología que se encuentra 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. El análisis de los resultados se ha estructurado en dos partes: en la primera se analizan las cargas ambientales del cultivo hidropónico con recirculación de lixiviados y se asocian a las diferentes categorías de impacto seleccionadas. Una segunda parte en la que se analizan diferentes alternativas de manejo de las técnicas de cultivo. Este análisis da lugar a la elaboración de unas recomendaciones destinadas a la mejora del cultivo en invernadero desde el punto de vista ambiental. Entre éstas, destacan las relativas al tipo de material usado en la estructura y equipos auxiliares, a la gestión de la fertilización y al tratamiento dado a los residuos generados.

Los dos 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 dichos modelos se aplican en la evaluación de explotaciones gestionadas siguiendo criterios de control químico o integrado. Se han utilizado dos métodos, CST y USES-LCA para evaluar el impacto de la aplicación de los plaguicidas. Una estrategia de control de plagas y enfermedades basada en control integrado presenta una tendencia más baja de toxicidad, que obedece, principalmente, al menor uso de insecticidas.

El **capítulo 6** se ha dedicado a los indicadores de impacto ambiental utilizados en el análisis del uso del suelo, para ello se han revisado las metodologías propuestas por diferentes autores analizándose la problemática que puede derivarse de su aplicación. Las metodologías presentadas evalúan este impacto de manera parcial y se hallan fuertemente condicionadas por la disponibilidad de datos.

Por último, en el **capítulo 7** se recogen las conclusiones generales del trabajo derivadas por un lado de la detección de los puntos ambientalmente débiles del cultivo en invernadero y, por el otro los correspondientes a la adaptación de la metodología del ACV para su uso en los procesos agrícolas en general y en la horticultura protegida en particular. Asimismo, se recomiendan líneas futuras de investigación.

RESUM

L'objectiu principal d'aquesta tesi és la identificació i quantificació de les càrregues ambientals associades al cultiu de tomàquet sota hivernacle. Per a dur a terme aquesta quantificació s'utilitza la metodologia de l'Anàlisi del Cicle de Vida (ACV). El treball s'ha estructurat en set capítols.

Els tres primers tenen un caràcter introductor. En el **capítol 1** es revisen els antecedents i s'especifiquen els objectius. En el **capítol 2** es fa una breu ressenya històrica de l'ús dels hivernacles descrivint el seu funcionament i les tècniques de conreu més comunes. La tesi es centra en l'hivernacle anomenat Mediterrani que és el propi de regions càlides o temperades. Es caracteritza per presentar coberta plàstica i, normalment, no disposa de calefacció. Rep aquest nom Mediterrani per a diferenciar-lo de l'hivernacle original de les regions europees més fredes. Aquests darrers acostumen a tenir com a material de coberta el vidre i disposen de calefacció. El **capítol 3** consisteix en una descripció de la metodologia pròpia dels estudis d'ACV. D'acord amb la normativa ISO 14040, un projecte d'ACV pot dividir-se en quatre fases: objectius i abast de l'estudi, inventari, anàlisi de l'impacte i interpretació. S'explica cadascuna d'aquestes fases, fent esment de les categories d'impacte i indicadors que s'utilitzaran i les limitacions que comporta l'ús d'aquesta metodologia encara en fase de desenvolupament.

El **capítol 4** és el nucli central d'aquesta tesi i en ell es realitza l'ACV del procés de cultiu de tomàquet sota hivernacle. L'anàlisi dels resultats s'ha estructurat en dues parts: en la primera s'analitzen les càrregues ambientals generades pel cultiu hidropònic amb recirculació de lixiviats. Aquestes càrregues s'associen a les diferents categories d'impacte seleccionades. En la segona s'avaluen diferents alternatives de maneig de les tècniques de cultiu. L'anàlisi ha donat lloc a l'elaboració d'unes recomanacions destinades a la millora del cultiu sota hivernacle des del punt de vista ambiental. Entre aquestes, destaquen les relatives al tipus de material emprat en l'estructura i en els equips auxiliars, a la gestió de la fertilització i al tractament dels residus generats.

Els dos següents capítols es dediquen a aspectes metodològics. En el **capítol 5** s'estudia la toxicitat potencial dels plaguicides, comparant diferents models emprats per al seu càlcul. Posteriorment aquests models s'apliquen a l'avaluació de explotacions gestionades seguint criteris de control químic o integrat. S'han utilitzat dos mètodes, CST i USES-LCA per avaluar l'impacte de l'aplicació dels plaguicides. Una estratègia de control de plagues i malalties basada en control integrat presenta una tendència més baixa de toxicitat, que obeeix, principalment, al menor ús d'insecticides.

El **capítol 6** s'ha dedicat als indicadors d'impacte ambiental utilitzats en l'anàlisi de l'ús del sòl. S'han revisat les metodologies proposades per diferents autors analitzant-se la problemàtica

que es pot derivar de la seva aplicació. Les metodologies descrites avaluen aquest impacte de manera parcial i es troben fortament condicionades per la disponibilitat de dades.

El **capítol 7** recull les conclusions generals referides, d'una banda a la detecció del aspectes ambientalment febles del cultiu en hivernacle i, de l'altra, a la adopció de la metodologia de l'ACV per al seu ús en els processos agrícoles, en general, i la horticultura protegida, en particular. Finalment es recomanen futures línies d'investigació.

SUMMARY

The aim of this thesis is the identification and quantitative evaluation of the environmental damages associate to greenhouse tomato crop. Life Cycle Assessment (LCA) is the tool used to identify the environmental burdens related to this process. This study has been structured in seven chapters.

The first three chapters are introductory. **Chapter 1** presents the state of the art and specify the main objectives of the research. **Chapter 2** provides an overview of the greenhouse history. Operations and more common crop techniques are explained. The research is focused in Mediterranean greenhouses, which are located in warm and temperate areas, and they are mainly based on low technology with a plastic cover and, usually, without heating. It is called Mediterranean to differentiate it of the glasshouse from Northern areas where glasshouses are made of glass and use heating systems. **Chapter 3** consists in the description of the methodology of LCA studies. According to ISO standardisation guidelines an LCA study can be divided into four steps: goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment, and interpretation. Each one of these steps is analysed. Impacts categories used are detailed and also limits of the proposed methodology are revised.

Chapter 4 outlines the core issue of this thesis. LCA is used to analyse and evaluate the process of greenhouse tomato crop. The assessment of the results have been structured in two parts: at the first one environmental loads generated by hydroponics closed systems are analysed. These loads are associated to the different impacts categories chosen. At the second part different greenhouse crop production systems are evaluated. Therefore, the most important environmental damages are found and consequently the best technologies can be applied in order to mitigate them. Improving the materials of structures and auxiliary materials are advised. More rational management criteria in the supply of nutrients to the crop will have to be found. And also wastes management is of extreme importance.

Two next chapters are dedicated to methodological aspects. **Chapter 5** evaluates the potential toxicity of pesticides comparing different models that are used in its calculation. Later on, these models are applied in the assessment of different tomato greenhouse crop settings that are using chemical (CPM) or integrated (IPM) pest management. Two methods, CST and USES-LCA, are used to calculate the impact of pesticides. Impact scores have in general shown a higher level of potential contamination in greenhouses treated with CPM compared to IPM. Nevertheless, relative impacts have been shown highly dependent on the selection of specific pesticides. This means that both CPM and IPM could be improved by a careful selection of pesticides.

Chapter 6 presents a review of different methods proposed to assess the environmental impacts of land use and analyse problems derived from their application. Methods applied solve the problem partially and are strongly conditioned by the availability of data.

Chapter 7 draw the general conclusions related on one side to the detection of the weak points from the environmental point of view of the greenhouse crops, and on the other side to the LCA methodology applied in agriculture process and protected horticulture specifically. Finally, recommendations for further research are given.

AGRADECIMIENTOS

La aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida requiere de la integración de numerosos conocimientos para obtener esta visión global sin la cual las especificidades se pierden en sí mismas. Esta necesidad de diversas disciplinas hace por tanto imprescindible que el desarrollo de un ACV sea un trabajo de equipo. Como tal esta tesis puede ver la luz gracias a la colaboración de numerosas personas que con su saber y apoyo me han orientado y ayudado.

Entre ellas debo destacar en primer lugar a ambos codirectores de tesis: el Dr. Juan Ignacio Montero, inspirador de la idea y sin duda una de las personas que mejor conoce el mundo de los invernaderos y el Dr. Francesc Castells su cordial entusiasmo y su guía en la metodología de los estudios ambientales y en el análisis del ciclo de vida en particular han resultado esenciales en la elaboración de esta tesis. Ambos resultan para mi un ejemplarizante modelo en su actividad profesional y debo agradecerles especialmente su alto grado de confianza en mi.

Ha facilitado la presentación de esta tesis los acertados consejos y la activa participación de su tutor, el Dr. José M^a Baldasano, del Departament de Projectes d'Enginyeria de la ETSEIB, y coordinador del Programa de Doctorado d'Enginyeria Ambiental, dentro del cual está incluido este trabajo.

Debo agradecer a los Drs. Santiago Gassó, Joan Rieradevall y Judit Arnó, miembros del tribunal que aprobó el proyecto de tesis, sus aportaciones y sugerencias para su mejora.

Al Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaria la autorización y facilidades para llevar a cabo el trabajo. Sin duda el interés y apoyo incondicional del cap del Departament de Tecnologia Hortícola, Robert Savé ha contribuido a ello.

Al grupo AGA (Análisis de Gestión Ambiental de l'URV) por acogerme y aceptarme entre ellos y poner a mi disposición sus conocimientos y material. De entre ellos me gustaría destacar a Julio Rodrigo del Servicio de Tecnología Química, a Marta Schumacher, Guido Sonnemann e Israel Herrera, sus explicaciones y observaciones en el campo de los estudios ambientales y en el uso del software han resultado cruciales.

Mark Huijbregts me ha cedido su programa, USES-LCA, guiándome en los cálculos del impacto de toxicidad, sus orientaciones han sido fundamentales en el desarrollo el capítulo 5. También han contribuido a clarificar y enriquecer este capítulo los comentarios de Judit Arnó, Marta Schumacher y Joaquim Adillón.

Joan Rieradevall y Llorenç Milà me han proporcionado información básica sobre la aplicación del ACV en agricultura y han influido en la necesidad de dedicar un capítulo al recurso suelo.

Pere Muñoz ha tenido la paciencia de revisar todo el texto, ha aportado sugerencias y se está esforzando en hacer llegar los resultados al sector.

A Oriol Marfà, sin duda precursor en la buena práctica ambiental, debo agradecerle sus orientaciones en la definición del proyecto, así como la numerosa bibliografía prestada sobre agricultura y medio ambiente.

Rafí Cáceres ha aportado su incondicional ayuda en cuantos problemas se han presentado, ya fueran de ampliación de conocimientos, revisiones, material bibliográfico o de carácter logístico.

Julio Rodrigo también ha aportado información sobre el tratamiento de los residuos y Montserrat Soliva ha repasado los cálculos y ha contribuido con su experiencia a una mejor aproximación al cálculo de la carga ambiental evitada por la utilización del compost.

Jordi Ariño y Montse Martí, de las ADV del Maresme, me han proporcionado información sobre la práctica hortícola en el sector. Los datos utilizados en el inventario de fertilizantes en suelo y los tratamientos fitosanitarios proceden de fincas gestionadas por estos técnicos.

Igualmente quiero agradecer el apoyo recibido por los colegas del arco Mediterráneo, Pilar Lorenzo, Jerónimo Pérez-Parra, M^a Cruz Sánchez Guerrero, Eva Medrano, Milagros Fernández, Nicolás Castilla, Teresa Soriano, Joaquín Hernández,... espero que este trabajo pueda ayudarles en el desarrollo de su quehacer diario.

Pepe Montero como experto en las tareas agronómicas me ha proporcionado información útil para el inventario. Beatriz Canovas contribuye con la organización del material administrativo a la rápida resolución de numerosos "problemas". También el Servicio de Documentación del IRTA, gestionado por Xantal Romaguera ha ayudado de manera significativa a la disposición del material bibliográfico. A Eulàlia Serra, Carme Biel y Sònia Guri por sus consejos y disposición a ayudarme. A Feli Herralde por su contribución en la corrección del vocabulario. Y en definitiva a todos aquellos compañeros, Pepa, Anna, M^a Carmen, Jordi, Jaume, Toni, Mireia, Roser, Xavier,... que con su apoyo, experiencia y comentarios me han ayudado en la elaboración de la tesis.

Por último destacar que este trabajo se ha enmarcado dentro del proyecto INCOMED, "Sustainable water in Mediterranean Horticulture" y que ha sido posible realizarlo gracias a los datos obtenidos en el proyecto INIA, SC00-080-C2, "Reducción del déficit hídrico en el ambiente del invernadero: un método para mejorar la eficiencia hídrica y la producción de los productos hortícolas" y del proyecto de demostración agriGas de la unidad mixta IRTA-Carburos Metálicos.

