

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA  
VICERECTORÍA ACADÉMICA  
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales

**UTILIZACIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO EN LA EVALUACIÓN DE LA  
SOSTENIBILIDAD ECOLÓGICA DEL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*) EN  
CAMPO ABIERTO Y BAJO INVERNADERO EN CARTAGO, COSTA RICA**

Tesis sometida a la consideración del Tribunal Examinador  
del Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales de la  
Escuela de Ciencias Exactas y Naturales para optar al grado de:

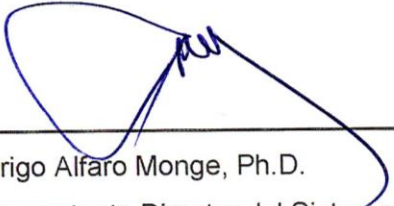
Magíster Scientiae en Manejo de Recursos Naturales  
con Mención en Gestión Ambiental

Por  
Marianela Alfaro Santamaría

San José, Costa Rica  
2011

Esta Tesis ha sido aceptada y aprobada en su forma presente, por el Tribunal Examinador del Programa de Estudios de la Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales de la UNED, como requisito parcial para optar al grado de :

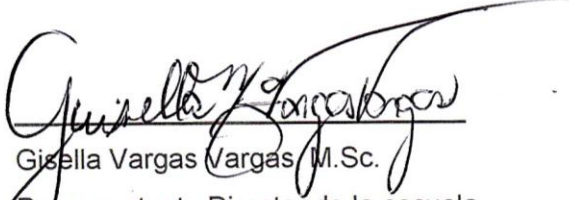
**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL**




Rodrigo Alfaro Monge, Ph.D.  
Representante Director del Sistema de Estudios de Postgrado



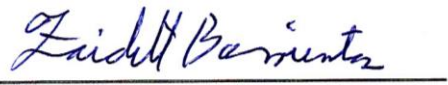
Edwin Solórzano Campos, M.Sc.  
Director(a) de Tesis



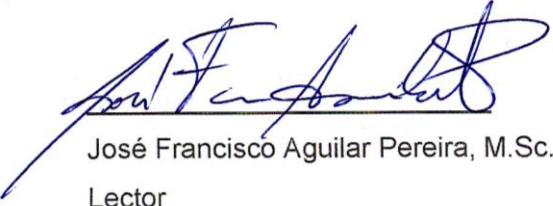
Gisella Vargas Vargas, M.Sc.  
Representante Director de la escuela de Ciencias Exactas y Naturales



Carlos Benavides León, M.Sc.  
Lector



Zaidett Barrientos Llosa, M.Sc.  
Coordinadora del Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales



José Francisco Aguilar Pereira, M.Sc.  
Lector



Marianela Alfaro Santamaría  
Estudiante

## **DEDICATORIA**

A Dios, por enseñarme que los caminos hacia Él nunca están cerrados.

## **AGRADECIMIENTO**

A todos aquellos que me acompañaron y dieron su apoyo durante todo este proceso.

A la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica por el apoyo con el área para realizar el estudio.

A Marvin Villalobos docente de la Escuela de Ingeniería Agrícola por su apoyo durante la realización del estudio.

A todas las personas que me brindaron su aporte o estímulo, por siempre les estaré agradecida.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
Hoja de firmas del tribunal.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	x
ABREVIATURAS UTILIZADAS.....	xi
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiv
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 La agricultura a cielo abierto.....	1
1.2 Agricultura en invernaderos .....	2
1.3 La sostenibilidad de la agricultura.....	3
1.4 Balances energéticos en la agricultura .....	4
1.5 Utilidad de los análisis costo-beneficio en sistemas productivos .....	8
1.6 Impactos de la agricultura en Costa Rica .....	9
1.7 El cultivo de lechuga .....	9
INTRODUCCIÓN .....	12
2.2 OBJETIVOS.....	15
2.2.1 Objetivo general .....	15
2.2.2 Objetivos específicos .....	15
2.2.3 Hipótesis .....	15
METODOLOGÍA.....	16
3.1 Zona de estudio .....	16
3.2 Unidad experimental.....	17
3.2.1 Método de cultivo utilizado para el estudio.....	18
3.3 Población y muestra .....	19
3.4 Espacio temporal de la investigación.....	19
3.5 Variables de la Investigación .....	20
3.6 Recolección de datos y cálculo de resultados. ....	21

3.7 Tratamiento estadístico de los datos .....	23
RESULTADOS .....	24
4.1 Análisis químico de suelos.....	24
4.2 Peso fresco del producto cosechado.....	24
4.3 Productividad de los sistemas agrícolas .....	27
4.4 Flujos de materiales y energía en los sistemas productivos .....	29
4.5 Balances energéticos de los sistemas productivos.....	32
4.5.1 Balance Energético contabilizando invernadero desde la primera cosecha.....	34
4.5.2 Balance Energético distribuyendo carga energética del invernadero.....	38
4.6 Análisis costo-beneficio .....	41
DISCUSIÓN .....	45
5.1 Conclusiones .....	52
5.2 Recomendaciones .....	54
REFERENCIAS CITADAS .....	56
ANEXOS .....	61

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
<b>Cuadro 1.1</b> Gasto energético y contenido calórico de insumos agrícolas.....	5
<b>Cuadro 3.1</b> Determinación de variables e instrumentos de medición para lograr los objetivos de la investigación.....	20
<b>Cuadro 4.1</b> Análisis químico de suelos en el invernadero y la parcela.....	23
<b>Cuadro 4.2</b> Resultados pruebas <i>t student</i> para el peso fresco por lechuga en el invernadero.....	24
<b>Cuadro 4.3</b> Resultados pruebas <i>t student</i> para el peso fresco por lechuga en el campo abierto.....	24
<b>Cuadro 4.4</b> Resultados pruebas <i>t student</i> para comparación del peso fresco por lechuga en el campo abierto y el invernadero.....	25
<b>Cuadro 4.5</b> Estadísticos descriptivos para el peso fresco por lechugas en campo abierto e invernadero.....	26
<b>Cuadro 4.6</b> Resultados pruebas <i>t student</i> para la productividad de las lechugas en el invernadero y en el campo abierto.....	27
<b>Cuadro 4.7</b> Estadísticos descriptivos para la productividad de las lechugas en el invernadero y el campo abierto.....	27
<b>Cuadro 4.8</b> Resultados pruebas <i>t student</i> para la producción neta de energía por lechuga en el invernadero y el campo abierto.....	33
<b>Cuadro 4.9</b> Estadísticos descriptivos para la Producción Neta de Energía por lechuga en campo abierto e invernadero.....	33

<b>Cuadro 4.10</b> Resultados pruebas <i>t student</i> el Índice de eficiencia energética por lechuga en campo abierto e invernadero.....	34
<b>Cuadro 4.11</b> Estadísticos descriptivos para el Índice de Eficiencia Energética por lechuga en campo abierto e invernadero.....	35
<b>Cuadro 4.12.</b> Prueba <i>t student</i> distribuyendo carga energética en la vida útil del Invernadero.....	38
<b>Cuadro 4.13</b> Resultados pruebas <i>t student</i> el Índice de eficiencia energética por lechuga en campo abierto e invernadero con distribución de carga energética del invernadero.....	40
<b>Cuadro 4.14.</b> Indicadores financieros del cultivo en invernadero y campo abierto.....	41
<b>Cuadro 4.15.</b> Indicadores financieros sensibilizados del cultivo en invernadero y campo....	42



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 3.1</b> Invernadero utilizado en el estudio.....	16
<b>Figura 3.2</b> Parcela en campo abierto utilizado en el estudio.....	17
<b>Figura 4.1.</b> Media del peso fresco por lechuga en campo abierto e invernadero.....	26
<b>Figura 4.2.</b> Productividad media por lechuga en invernadero y en campo abierto.....	28
<b>Figura 4.3.</b> Flujo de materiales y energía para el sistema campo abierto.....	29
<b>Figura 4.4.</b> Flujo de materiales y energía para el sistema bajo invernadero.....	30
<b>Figura 4.5.</b> Media de la Producción Neta de Energía por lechuga en campo abierto e invernadero.....	34
<b>Figura 4.6.</b> Índices medios de Eficiencia de Energética por lechuga en campo abierto e invernadero.....	36
<b>Figura 4.7</b> PNE de los sistemas, distribuyendo carga del invernadero.....	39
<b>Figura 4.6.</b> Índices medios de Eficiencia de Energética por lechuga en campo abierto e invernadero, con distribución de carga energética del invernadero.....	40

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
<b>ANEXO 1</b> Hojas de registro para recolección de datos .....	45
<b>ANEXO 2</b> Peso fresco de lechugas, productividad, energía de entrada, salida, PNE e IEE para los sistemas productivos .....	53

## ABREVIATURAS UTILIZADAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
CONAP	Comisión Nacional en Ambientes protegidos
ProNAP	Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola en Ambientes Protegidos
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria
TEC	Tecnológico de Costa Rica
BE	Balance energético
PNE	Producción neta de energía
IEE	Índice de eficiencia energética
MAG	Ministerio de Agricultura de Ganadería
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

# UTILIZACIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO EN LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD ECOLÓGICA DEL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*) EN CAMPO ABIERTO Y BAJO INVERNADERO EN CARTAGO, COSTA RICA

Marianela Alfaro Santamaría, Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, nellasant@gmail.com

## RESUMEN

Se estudió y comparó la sostenibilidad ecológica de cultivares de lechuga (*Lactuca sativa*) americana cv. Great Lakes, a campo abierto y bajo invernadero en época lluviosa comprendida del 01 de mayo al 2009 al 01 de agosto de 2009, ubicados en la provincia de Cartago, Costa Rica, utilizando la metodología de balance energético (BE) y de costos económicos. Para el análisis del cultivo en invernadero se siguieron dos metodologías, primero considerando toda la carga energética de la estructura del invernadero en la primera cosecha y luego distribuyendo la carga energética en una vida útil de 5 años. La segunda opción fue más acorde para realizar las comparaciones y comprender los requerimientos del sistema productivo en invernadero. La carga energética de ingreso al sistema se considera como “las entradas al sistema” (contenido energético de semillas, sustratos, agua, electricidad, materiales de cubierta, fertilizantes, herramientas y utensilios, material sistema de riego, insumo control de plagas y enfermedades, trabajo humano), y la carga energética de la producción final como “las salidas del sistema” (masa de lechuga frescas), se transformaron en energía al multiplicar las cantidades de insumos por sus contenidos energéticos. Los indicadores empleados para la comparación en cada ciclo productivo fueron: productividad neta de energía (PNE) y eficiencia energética (IEE). Los resultados de las pruebas *t student* para prueba de hipótesis indicaron, con un 95% de confianza, diferencias significativas entre los sistemas productivos en invernadero y campo abierto, tanto para el peso fresco de lechugas, la productividad, como para la PNE e IEE. La estructura del invernadero optimizó el desarrollo del cultivo, registrando mayores rendimientos por área, 23% más productividad que en campo abierto, además de disminuir el

consumo de riego. En ambos sistemas productivos, la producción neta de energía fue negativa y los índices de eficiencia energética menores que uno, indicando que el consumo energético de los sistemas fue mayor que las salidas energéticas, lo que los califica como no sostenibles ecológicamente. La energía consumida fue mayor en el sistema bajo invernadero, debido a la carga energética de la estructura, construida de metal y cobertura plástica, así como los requerimientos de mantenimiento, cambios de cobertura y disposición de los plásticos. El uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas productivos representó uno de los mayores insumos energéticos externos, más del 20%, debido a que los fertilizantes nitrogenados requieren un elevado consumo de energías fósiles para su fabricación. En el análisis financiero realizado a 5 años de los proyectos los TIR y VAN indican proyectos rentables, en el campo abierto estos indicadores son mayores que en el invernadero, debido a que no existe una inversión de infraestructura, sin embargo la relación costo/beneficio al final del proyecto es mayor en el invernadero al tener mayor productividad por área. Se recomienda la realización de estudios comparativos de agricultura convencional y orgánica, para determinar si la fertilización orgánica puede ser una opción para disminuir el consumo energético, la repetición de los estudios en diferentes épocas del año para determinar el efecto del clima en los sistemas productivos, y un análisis de riegos productivos para evaluar la funcionalidad del invernadero para enfrentar las incidencias climáticas adversas, de plagas y enfermedades.

## **PALABRAS CLAVE**

Agricultura, lechuga, invernadero, balances energéticos, sostenibilidad ecológica.

## ABSTRACT

Utilization of Energy Balance in Assessing the Ecological Sustainability of the cultivation of Lettuce (*Lactuca Sativa*) in Open Fields and Greenhouses in Cartago, Costa Rica

This project was developed to study and compare the ecological sustainability of American lettuce (*Lactuca Sativa*), in open fields and greenhouses during the rainy season which last from May 1st, 2009 till August 1st, 2009, in Cartago, Costa Rica by studying energy balance (EB) and the economical costs. To analyze greenhouse cultivation we follow two methodologies: first, carrying all the energy load of the greenhouse structure on the first harvest, and afterwards distributing the energy load for five years. The second methodology was better to make the comparisons and understand the requirements of the greenhouse production system. The energy costs of the system are considered "inputs to the system" (energy content of seeds, substrates, water, electricity, housing materials, fertilizers, tools and implements, irrigation materials, pest control and human labor), and the energetic cost of final production as "the system outputs" (mass of fresh lettuce). These inputs and outputs were transformed into energy by multiplying the quantities registered for their energetic contents. The indicators used for comparison in each production cycle were: net energy productivity (NEP), and energy efficiency index (EEI). The results of a student t-test indicated with 95% confidence level, significant differences between production systems in greenhouses and open fields for both fresh weight of lettuce, productivity, as well as NEP and EEI. The greenhouse structure optimized the crop development, reporting higher yields per area, 23% more productivity than in open fields. In addition, irrigation consumption was reduced. The net energy production was negative and the energy efficiency index was less than one in both production systems. The system energetic consumption was greater than the final production. These qualify them as ecologically unsustainable. The energy consumption was higher in the greenhouse system, due to the energy costs of the structure (building materials, maintenance requirements and waste disposal). The use of nitrogen fertilizers in the production systems also represented a major external energy input, over 20%, due to consumption of fossils fuels needed for their manufacture. In the financial analysis of the IRR and NPV projects performed for 5 years indicators demonstrated them to be profitable. In the open fields these indicators were higher than in the greenhouse, because there is no infrastructure investment; however the cost/benefit relationship of the project is greater in the greenhouse as a result of having higher productivity per area. I recommend carrying out comparative studies of conventional and organic agriculture to determine if

organic fertilization may be an option to reduce energy consumption. Studies repetition in different times of year to determine the climate effect in the production systems is also recommended. I also recommend productive risks analysis in order to evaluate greenhouse functionality as a protection structure against weather fluctuations, diseases and pests.

## **KEY WORDS**

Agriculture, lettuce, greenhouse, energy balances, ecological sustainability.

# MARCO TEÓRICO

## 1.1 La agricultura a cielo abierto

La agricultura convencional o agricultura a cielo abierto ha sido la modalidad de cultivo utilizada mayormente a través de los tiempos. En Costa Rica se ha trabajado la mayoría de la agricultura bajo esta modalidad, debido principalmente a la adaptabilidad que permitieron muchos productos al tipo de clima y suelos (García, 1997).

La agricultura de campo abierto es propensa a los efectos negativos de los factores abióticos tales como radiación, precipitación, temperatura, suelo y factores bióticos como plagas y enfermedades. Ambos factores limitan el potencial genético y de desarrollo de los cultivos. Otros factores que afectan este tipo de producción son las prácticas agrícolas de riego y nutrición, las cuales son en muchos casos ineficientes (Alpi y Tognoni, 1999).

Las técnicas de cultivo han cambiado sustancialmente a lo largo de los años, con la incorporación de maquinaria, equipos y el desarrollo de la industria de los fertilizantes y plaguicidas, que ha llevado a un aumento importante en la producción agrícola, pero también este aumento conlleva a una nueva problemática ambiental y de consumo energético muy alto (IICA, 1992).

La utilización excesiva e inadecuada de fertilizantes y plaguicidas, ha dado lugar a la contaminación de suelos y aguas, Camino y Muller (1993) indican que en promedio de la aplicación de un kg de plaguicidas, solo un 1% del producto llega a los organismos nocivos, el otro 99% queda restante en los ecosistemas, una parte va a parar a la atmósfera por volatilización, otra parte importante al suelo y otra a los acuíferos. Otros efectos de los plaguicidas son los daños que causan a la fauna del medio y los residuos que quedan en los alimentos que son consumidos por humanos y animales.

Actualmente los agricultores, han tenido que tomar una mayor conciencia de los costos de producción y de los beneficios y prestar a más atención al rendimiento y a la gestión empresarial, pero continúan dejando de lado la reducción de los impactos generados por la actividad agrícola (IICA, 1992).



## 1.2 Agricultura en invernaderos

Factores como la expansión de la frontera urbana, mala planificación en el uso del suelo y el uso de malas prácticas agrícolas, han provocado la reducción de las tierras agrícolas, por lo que la producción en invernaderos abre nuevos horizontes económicos para los agricultores, con la posibilidad de obtener mayores rendimientos, control del desarrollo del cultivo, uso eficiente de los recursos y oportunidad de producir fuera de temporada, aprovechando crecientes demandas tanto en el comercio interior como en el exterior (Robles, 1985).

Este tipo de agricultura entra dentro del sistema de producción denominado como producción en ambientes protegidos, que va desde coberturas simples como sarán hasta el uso de estructuras de invernadero artesanales o de alta tecnología.

Las estructuras de invernaderos pueden estar formadas por un armazón de materiales como madera, metal y hormigón, a la cual se le coloca una cubierta de material transparente, que puede ser cristal, polietileno, policarbonato, policloruro de vinilo o poliéster, con ventanas frontales y cenitales y puertas para la operación. Las instalaciones de los invernaderos pueden ser muy diversas, ya sea por las características o complejidad de las estructuras o por la mayor o menor capacidad del control interno del ambiente (Alpi y Tognoni, 1999).

Básicamente la agricultura bajo invernadero se orienta a obtener el más alto rendimiento por medio de un mayor grado de control del cultivo y del ambiente a su alrededor, para rentabilizar al máximo la ocupación del terreno, pero también requiere de mayores inversiones en infraestructura y equipo, cambio en las prácticas culturales y una adecuada planificación en el diseño y en el uso de los recursos para evitar efectos nocivos en el ambiente (Serrano, 1994).

En Costa Rica la modalidad de producción en ambientes protegidos está siendo impulsada en el nivel estatal desde el año 2002, cuando el MAG oficializa una Comisión Nacional, integrada por representantes del sector público, privado y académico, con el objetivo de presentar una propuesta integral para el desarrollo de esta tecnología en Costa Rica, en un contexto de cambio y renovación para la agricultura nacional.

En el año 2004 se publica el Decreto 32039, donde se establece la creación del Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola en Ambientes Protegidos (ProNAP), adscrito al

Despacho del Ministro de Agricultura y Ganadería, como una estrategia de trabajo que se aborda en forma sistemática e integral, sectorial e intersectorialmente, bajo un enfoque de cadena agroproductiva. Este decreto establece que en “el sistema de producción agrícola en ambientes protegidos está el futuro de gran parte de la agricultura de Costa Rica, considerando que esta alternativa podrá mejorar el posicionamiento y la competitividad de los productores, por su adaptabilidad a las demandas que están exigiendo los mercados internacionales a los productos, en aspectos como oferta constante, calidad, inocuidad y protección ambiental” (Presidencia de la República y MAG, 2004).

Según el Censo Nacional de Agricultura Protegida 2008-2009 actualmente en el país se puede encontrar bajo esta modalidad de producción los almácigos, helechos, plantas ornamentales y hortalizas, y se registran 687 unidades productivas, para un total de 684 hectáreas cultivadas, poniendo en manifiesto que la actividad se desarrolla en mayor parte en manos de pequeños productores (Pro-NAP, 2009).

### **1.3 La sostenibilidad de la agricultura**

El desarrollo sostenible es una corriente mundial que busca un equilibrio económico de las actividades productivas y el ambiente, garantizando para las futuras generaciones una herencia de acceso de recursos naturales y calidad de vida que permita el desarrollo y crecimiento económico, social y ecológico de manera equitativa (PNUMA, 1998).

La Cumbre Mundial del Desarrollo Sostenible realizada en el año 2002, identificó cinco grandes temas integrantes de un enfoque internacional coherente con el desarrollo sostenible, los cuales son agua y saneamiento, energía, salud, agricultura y biodiversidad (UNESCO, 2003).

Con respecto a la agricultura, su sostenibilidad se ha perfilado como un modelo de crecimiento del sector, con enfoque en los ingresos y la preservación del capital ecológico, bajo una tarea que en ocasiones se presenta bastante compleja al abarcar en forma simultánea e interdependiente factores como equidad, competitividad, preservación de los recursos naturales y ambiente.

La agricultura sostenible o ecológica entiende que, dentro de un mundo globalizado, la especialización de la agricultura es determinante para asegurar el suministro eficiente de

alimentos a una población mundial en rápido crecimiento y que permita preservar el ambiente (García, 1997).

Este tipo de agricultura se enfoca en el uso más eficiente de los recursos no renovables, como suelo, agua, combustibles, abonos inorgánicos, insecticidas y plaguicidas, incorporando técnicas como el uso de ciclos de control biológico, integración de los recursos de la finca y la creación de nuevas alternativas de uso y reducción del consumo de insumos, que permitan mantener la viabilidad económica de las operaciones agrícolas (Camino, 1993). Mediante este sistema, se proyecta la mejora en la producción, protección de los recursos naturales y la calidad de vida de los agricultores y la sociedad como un todo.

#### **1.4 Balances energéticos en la agricultura**

Los balances energéticos son una metodología por medio de la cual se analiza como los sistemas productivos captan, degradan y convierten la energía. Para ello se requiere de la cuantificación y estudio de las entradas y salidas de recursos e insumos de los sistemas productivos en unidades energéticas (kilocalorías o julios) (Leach, 1976).

Estos balances son considerados actualmente como un índice para el estudio de la sostenibilidad ecológica de los sistemas productivos ya que permiten evaluar la eficiencia en el uso de la energía y la conversión obtenida de la relación existente entre los flujos energéticos de entrada y salida de los sistemas (Fernández, 1981).

Desde la perspectiva de la economía ecológica se defiende la utilización de unidades físicas para medir la productividad de los sistemas, pues ese tipo de unidades son por definición, invariables en el tiempo y en el espacio, y no están sujetas a apreciación humana (Fernández *et al.*, 1997; Leach, 1976).

Se entiende por “entrada” energética a los ingresos de energía que tienen un costo de oportunidad en el sentido económico, y por lo tanto implican un costo monetario, e incorpora en los cálculos la energía bruta contenida en las “entradas”, y la energía gastada en la transformación de las mismas hasta que son utilizados por los agricultores. Por ejemplo si se aplica un kilogramo de fertilizante al sistema, se considera el valor energético del kilogramo de fertilizante como el costo energético invertido en su fabricación.

En el cuadro 2.1 se muestran valores de entradas energéticas determinadas por diferentes investigadores para insumos y materiales de uso agrícola. El aporte energético para las semillas se valora como un porcentaje del contenido energético del producto que se trabaje (Naredo y Campos, 1980). Las entradas consideradas suponen entre un 90 y 100% de las entradas energéticas de las actividades agrarias y las estimaciones a las que se llega pueden considerarse como una muy buena aproximación de los flujos energéticos para el análisis de sistemas agrícolas. (Pimentel *et al.*, 1989; Naredo y Campos, 1980).

**Cuadro 1.1 Gasto energético y contenido calórico de insumos agrícolas\*.**

<b>Insumos y materiales</b>	<b>Valor energético</b>
Diesel	43,3 MJ/litro
Gasolina	46,6 MJ/litro
Trabajo humano	1, 0 MJ/hora
Electricidad	3,59 MJ/ KW/h
Fertilizante (Nitrógeno)*	60 MJ/kg
Fertilizante (fosforo)*	14 MJ/kg
Fertilizante (Potasio)*	9 MJ/kg
Fertilizante urea	80 MJ/kg
Abono 10-30-10	42 MJ/kg
Abono orgánico*	0,29 MJ/kg
Metal	87,2 MJ/ kg
Plástico	56,3 MJ/ kg
Manguera de riego	5,86 kJ /kg
Agua	3,1 kJ/m <sup>3</sup>

\* Energía gastada en su fabricación y la energía contenida en el mismo.  
Fuente: Pimentel *et al.* (1989), Pimentel *et al.* (1983), Naredo y Campos (1980), Leach (1976), Fernández (1981).

En cuanto a las “salidas” energéticas se considera la energía contenida en los alimentos o biomasa producida y aprovechada al finalizar el ciclo productivo (Leach, 1976; Fernández, 1981, Pimentel, 1983).

Para el estudio del sistema productivo se pueden expresar los valores de las sumatorias de entradas y salidas como una diferencia (salidas - entradas), lo que indica la producción neta de energía (PNE):

$$PNE = \sum \text{Entradas} - \sum \text{Salidas} \quad (1)$$

La relación entre estos dos términos de salidas y entradas indica el rendimiento o índice de eficiencia energética del sistema (IEE):

$$IEE = \frac{\Sigma Salidas}{\Sigma Entradas} \quad (2)$$

Una energía neta positiva e índices de eficiencia mayores que uno (donde las salidas energéticas son mayores al consumo energético del sistema) indican sistemas agrícolas eficientes energéticamente y por ende sostenibles ecológicamente (Pimente *et al.*, 1983; Cusso *et al.*, 2006; Funes, 2005).

Diversas investigaciones sobre balances energéticos en la agricultura, realizados en Europa y Norteamérica, demuestran que desde principios de los años sesenta ha bajado considerablemente el rendimiento energético, pasando de ser claramente positivos en las agriculturas pre y semi-industrializadas, a rendimientos negativos en muchos casos y a consumir más calorías de las que se producen con el sistema agrario industrial actual (Leach, 1976; Puntí, 1982; Pimentel *et al.*, 1983; Naredo y Campos, 1980).

Esto implica que el progreso técnico en agricultura ha conducido a la rápida degradación de su rendimiento energético. La degradación del rendimiento energético se produce por una doble sustitución en los elementos del rendimiento. En las entradas aumentan la proporción de insumos no renovables (productos químicos o mecánicos, carburantes, alimentos preparados), disminuyendo los insumos gratuitos (energía solar, actividad biológica, reciclado de nutrientes y fertilización orgánica), convirtiendo al sistema productivo en un fuerte consumidor energético (Pimentel *et al.*, 1983; Roselló *et al.*, 2005).

Paralelamente, en las salidas la parte de productos inutilizados aumenta, debido a la especialización en la actividad agraria y a la evolución del modelo social y productivo de consumo (disminución de las complementariedades y los intercambios de subproductos dentro y entre explotaciones); esta producción no utilizada simplemente se pierde creando desechos (Puntí, 1982, Roselló *et al.*, 2005; Funes, 2005).

Bayliss-Smith (1982) en un estudio comparativo de la agricultura en un pueblo en el centro de Inglaterra, entre las décadas de 1820 y de 1970, encontró que el rendimiento por

hectárea y año pasó de 7.400 a 45.000 megajulios (MJ) (seis veces más) y la productividad por trabajador y día, pasó de 80 a 2.420 MJ (treinta veces más). Específicamente el autor menciona que para explotación en el año 1826, el 98% de los insumos energéticos eran biológicos: un 77% humanos y un 21% animales y sólo el 2% correspondía a energía fósil utilizada en la fabricación de equipos, con lo que se obtuvo una eficiencia energética de 40. Ya para el año 1977, se obtenía una producción agrícola muy parecida en volumen, pero los insumos de energía animal habían desaparecido, la energía humana bajó al 0,2% del total, siendo el 99,8% restante de energía fósil (energía consumida en la producción de máquinas y sustancias químicas y en el uso de las máquinas) y el valor de la eficiencia energética se redujo a 2,1.

Pimentel (1993) comparó un sistema de producción convencional de maíz con otro orgánico (ecológico), ambos en los Estados Unidos, con utilización de tractores, maquinaria y fluido eléctrico. Lo que distinguía esencialmente los sistemas era la sustitución completa de los fertilizantes inorgánicos por estiércol y la abstención de usar insecticidas y herbicidas por parte del sistema orgánico. En este caso la eficiencia energética (salidas/entradas) obtenida fue de 3,21 para la producción convencional y de 5,90 para la orgánica.

Millán (1995) encontró que en la agricultura industrial española para los años 90 la eficiencia energética sólo alcanzaba valores entre 0.8 a 1, por lo que, su balance energético era negativo. Asimismo Barney (2000) menciona que el sistema agroalimentario estadounidense funciona con rendimiento 1:10 en promedio, lo que significa que para poner una caloría sobre la mesa se invierten diez calorías petrolíferas y en el cultivo de verduras de invernadero durante el invierno llegan a alcanzarse valores tan elevados como 1:575.

Cussó *et al.* (2006), en un estudio comparativo entre mediados del siglo XIX y finales del siglo XX en la agricultura catalana, constataron que a partir de los balances energéticos desarrollados en los 150 años transcurridos, se ha producido una espectacular pérdida de eficiencia energética y de sostenibilidad de los sistemas agrarios, a pesar de los grandes incrementos de la productividad por hectárea de los diversos cultivos y de la producción ganadería, que se atribuye totalmente al paso de una agricultura orgánica avanzada a unos sistemas agrarios con un elevado consumo de combustibles fósiles en forma de carburantes, abonos de síntesis y fitosanitarios y, especialmente, al peso descomunal de la actividad ganadera, desarrollada completamente al margen del territorio.

En Costa Rica, Marozzi (2002), en la Antología de Balances Energéticos recoge dos proyectos de balances energéticos en sistemas agrícolas desarrollados por asistentes de investigación como parte de cursos en la Escuela de Economía de la Universidad Nacional, Heredia.

El primer estudio desarrollado por Bellavita y Varela (2001) se compara dos fincas productoras de café orgánico asociados con árboles frutales de sombra, donde la cosecha de los frutales también es aprovechada, utilizando dos cada una diferentes tipos de abono orgánico. Como resultados se obtuvo un balance energético positivo y otro negativo, ya que en un sistema por cada Kilojulio (KJ) aportado al sistema se obtuvo 2,44 KJ (IEE), mientras que en el otro sistema se obtuvieron 0,05 KJ. Se explica que la diferencia se debió principalmente en la aplicación del abono gallinaza en una finca y de compost en la otra, el primer abono aporta bastantes nutrientes pero posee un alto valor energético, mientras que el segundo aporta suficientes nutrientes y posee un menor valor energético.

El segundo estudio desarrollado por Méndez y Silva (2001) compara dos sistemas de producción de helechos en la zona sur de la provincia de Cartago, una con un sistema de cultivo en transición a orgánico y otra con sistema convencional. En ambos casos se obtuvieron balances energéticos positivos (fincas eficientes en el uso de la energía), sin presentarse diferencias considerables en la energía neta y la eficiencia energética de los sistemas.

### **1.5 Utilidad de los análisis costo-beneficio en sistemas productivos**

La técnica de análisis de costo-beneficio tiene como objetivo fundamental proporcionar una medida de la rentabilidad de un proyecto, mediante la comparación de los costos de producción (equivalente monetario de los diferentes factores o actividades en la ejecución) con los beneficios monetarios generados en la realización del mismo (Anandarup, 1986).

Estos análisis se utilizan para el estudio, comparación y estimación de impactos financieros y económicos de proyectos para la toma de decisiones. En ocasiones, un análisis costo-beneficio por sí solo no es una guía clara para tomar una buena decisión, por lo que resulta de gran ayuda para un mejor estudio de los proyectos complementarlos con otras técnicas de valoración, según sea la naturaleza de los mismos, por ejemplo técnicas de economía ecológica y valoraciones sociales (Londero, 1998; Mora *et al.* 2005).

La utilidad de los análisis costo-beneficio abarca la valoración de la necesidad y oportunidad en la realización de un proyecto, la selección de la o las alternativas más beneficiosas del mismo y la estimación adecuada de los recursos económicos necesarios en el plazo de realización de un proyecto y la continuidad de los mismos (Londero, 1998).

## **1.6 Impactos de la agricultura en Costa Rica**

Pese al innegable aporte de la agricultura en la economía nacional, las malas prácticas utilizadas en décadas anteriores contribuyeron a la destrucción de hábitats, pérdida de biodiversidad, erosión de suelos, sedimentación de ríos y alteraciones del equilibrio de ecosistemas y paisajes (Estado de la Nación 2010)

El Estado de la Nación (2010) cita a Bach (2009), quien menciona que las principales implicaciones ambientales de la actividad agrícola se centran en la huella de carbono y en el uso de agroquímicos, dado que en los últimos tres años el sector agrícola no ha reducido de manera significativa el uso de fertilizantes y plaguicidas químicos, y tampoco se ha logrado reforzar la producción orgánica y más bien se ha consolidado la tendencia de debilitamiento de esta modalidad de cultivo. Así mismo se menciona que el crecimiento de las importaciones de plaguicidas se contrapone a los avances que se han logrado en el área de la tecnificación agrícola, como el desarrollo e nuevas moléculas y formulaciones, herramientas para dosificación técnicas de aplicación más precisas y adelantos científicos en el área de la biotecnología.

Ramirez (2010) citado por Estado de la Nación (2010) menciona que en el periodo 1990-2008 de la agricultura nacional se caracterizó por el hecho de que el área agrícola se mantuvo constante, con disminución de cultivos para consumo nacional y aumento de en las áreas de cultivo para exportación; sin embargo, en las tres últimas décadas la importación total de plaguicidas ha sido creciente.

## **1.7 El cultivo de lechuga**

La lechuga es una planta anual, pertenece a la familia Compositae, género *Lactuca*, su nombre botánico es *Lactuca sativa L* (Muños, 1981).



El clima óptimo para el desarrollo de la lechuga es el templado, con temperaturas entre los 15 a 18 °C. Los suelos preferidos para su cultivo son los ligeros, arenoso-limosos, francos o franco-arenosos con buen drenaje y pH óptimo entre 6,7 y 7,4 (Bernard, 1977; InfoAgro, 2000).

Mallar (1978) menciona que las variedades de lechuga se clasifican en estos grupos botánicos:

-Romanas: *Lactuca sativa* var. *Longifolia*: No forman un verdadero cogollo, las hojas son oblongas, con bordes enteros y nervio central ancho.

-Acogolladas: *Lactuca sativa* var. *Capitata*: Estas lechugas forman un cogollo apretado de hojas.

-De hojas sueltas: *Lactuca sativa* var. *Inybasea*: Son lechugas que poseen las hojas sueltas y dispersas.

-Lechuga espárrago: *Lactuca sativa* var. *Augustaza*: Son aquellas que se aprovechan por sus tallos, teniendo las hojas puntiagudas y lanceoladas. Se cultiva principalmente en China y la India.

Entre las propiedades nutricionales de la lechuga están las de aportar minerales (concentrados en sus tallos) como el hierro, magnesio, calcio, yodo, fósforo, cobre, cobalto, zinc y potasio. Sus hojas proveen vitaminas A, C, D, E y Complejo B. El contenido de silicio de la lechuga ayuda a promover la flexibilidad de los músculos y las articulaciones. Hace igualmente su aporte de betacarotenos, fibra, pectinas, ácidos y aminoácidos, que primordialmente se encuentran en sus hojas. Ofrece potencial energético de 18 calorías por cada 100 g de sustancia (Cerdas y Montero, 2004).

El cultivo de la lechuga se puede realizar durante todo el año, teniendo el cuidado de elegir la variedad apropiada. En Costa Rica las principales zonas productoras se ubican en las provincias de Cartago, San José y Alajuela (Francis, 1980).

La lechuga presenta un ciclo de cultivo corto, aproximadamente 1,5 a 2 meses desde la siembra hasta la cosecha, dependiendo de la variedad. Es común también el uso del semillero, la cosecha en este caso se puede realizar entre 30 a 40 días luego del trasplante, para las variedades de más rápido desarrollo. El cultivo se realiza tanto en campo abierto, como en invernadero o en mesas o bancales hidropónicos (Soto, 2005).

Este cultivo ocupa un lugar económicamente importante dentro del mercado de hortalizas en Costa Rica, con gran demanda y exigencia en calidad por los consumidores, su producción ha ido incrementándose desde el año 2000, debido tanto a sus características como a la diversificación de tipos varietales (Cerdas, 2005). Es típica de ensaladas, considerada como una planta de propiedades tranquilizantes, y su alto contenido en vitaminas la hace una planta muy apreciada en la dietética actual (Rapaccioli *et al.*, 2002).

Según el INTA (2006) las importaciones de lechuga para abastecer la demanda nacional para el año 2003 fueron de 14 Kg (\$78) procedentes de Estados Unidos; 40.016 Kg (\$89.572) de Guatemala, 174 Kg (\$2.289) de México, lo que representa una fuga de divisas para el país, por lo que dicha institución impulsa el incrementar la producción inocua de estas hortalizas para abastecer el mercado nacional, estimular a un mayor consumo e incrementar las ganancias de las familias productoras.

# INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad importante dentro del sector económico mundial y como parte de las actividades de producción implica una utilización del medio natural con el empleo y extracción de insumos y energía, para la obtención de alimentos que permitan la subsistencia de los seres humanos.

En Europa y Norteamérica principalmente, se han realizado estudios para determinar la influencia que tiene la agricultura sobre el medio ambiente, utilizando la metodología de los balances energéticos, que funciona como instrumento para analizar como los sistemas agrarios captan, degradan, y convierten la energía, mediante un recuento minucioso de la energía que entra o se emplea en la actividad productiva, los productos cosechados y la eficiencia de conversión obtenida de la relación existente entre ambos flujos (Fernández, 1981).

Estos estudios mostraron que los sistemas agrícolas existentes en el pasado, con un nivel de pre y semi industrialización, presentaban rendimientos energéticos positivos. Al convertirse, con el paso del tiempo, a sistemas más industrializados (uso maquinaria) han presentado rendimientos energéticos negativos, pues consumen más calorías de las que producen. Esto se debe a que aumentó la proporción de consumo de insumos no renovables y creando residuos que podrían ser reutilizados y por el contrario son manejados como desechos. Este rendimiento energético negativo hace que estos sistemas sean insostenibles ecológicamente en el tiempo (Leach, 1976, Pimentel *et al.*, 1983; Naredo y Campos, 1985, Fernández, 1981; Cusso *et al.*, 1996; Funes, 2005).

Muchos sistemas productivos se han convertido en grandes consumidores y dependientes de energía proveniente de combustibles fósiles, recursos no renovables. En el caso de los sistemas productivos agrícolas, con el fin de aumentar los rendimientos y reducir el trabajo humano, se aumenta el uso de insumos y maquinaria, lo que conlleva a un mayor consumo energético (Leach, 1976).

El Banco Mundial en su Informe “Agricultura para el Desarrollo (2008)”, rescata la importancia de la agricultura como instrumento de desarrollo fundamental para alcanzar el objetivo del milenio, que consiste en reducir para el año 2015 a la mitad el porcentaje de personas que sufren de hambre en el mundo y viven en la pobreza extrema. Se destaca la

necesidad de investigación, inversión e incentivos para enfrentar la crisis alimentaria mundial, y ligar la agricultura con la protección del ambiente y la custodia de los recursos naturales.

Bajo estas perspectivas, los expertos concuerdan con la necesidad de optar por modelos agrícolas de desarrollo sostenibles, capaces de cumplir con los requerimientos de cantidad, calidad y sanidad que exige el mercado. Modelos que permitan mejorar la conservación de los recursos naturales renovables y no renovables, garantizando su acceso a las futuras generaciones (Izquierdo, 2006; García, 1997; Quiroga, 2001)

El sector agropecuario en Costa Rica representa una de las actividades socioeconómicas más importantes, ocupando un 11,4% del Producto Interno Bruto (PIB) con un 11,4%, siendo solo superado por los sectores industrial (22,8%) y turístico (18,3%). La producción hortícola, por su parte, llega a ocupar entre un 4 y 5% del PIB agropecuario. En el país se cultivan aproximadamente 35000 ha/año de las diferentes hortalizas, con aproximadamente 7.000 productores, donde el 80% de estos son pequeños y medianos agricultores con fincas de menos de 3 ha., y generando empleo directo a unos 150,000 personas e indirecto a una cantidad aún mayor (Programa del Estado de la Nación, 2009).

El sector hortícola es muy dinámico en producción y consumo, en el mercado local la oferta de hortalizas se caracteriza por tener una alta intermediación y ser estacional, inestable y riesgosa; lo anterior debido a problemas de carencia de planificación y definición de políticas de desarrollo, a problemas económicos (crédito, oferta y demanda), a problemas ambientales y otros.

Los sistemas productivos a campo abierto han sido ampliamente desarrollados en el país, pero las presiones actuales por disposiciones de uso de suelo, creciente urbanismo, restricciones al comercio de material biológico y la variabilidad climática, principalmente, han llevado a la introducción de nuevas modalidades productivas, como es la agricultura en invernaderos (Serrano, 1994).

La producción hortícola bajo invernadero se orienta a obtener el más alto rendimiento por medio de un mayor grado de control del cultivo y del ambiente a su alrededor, para rentabilizar al máximo la ocupación del terreno, lo que implica una mejora en la utilización de los insumos, el agua y el suelo (Cook, 2005).

El desarrollo de esta investigación busca evaluar la sostenibilidad ecológica de dos sistemas de producción hortícola, uno en campo abierto y otro en invernadero, la metodología propuesta para ello son los balances energéticos. Con ello se pretende generar información que permita brindar recomendaciones que favorezcan el buen uso de los recursos naturales en ambos sistemas productivos.

Además, se realizarán un análisis costo-beneficio de los sistemas agrícolas. Con la aplicación de las técnicas de balances energéticos y la relación costo-beneficio, se pretende lograr información sobre el mejoramiento de los rendimientos en cuanto a uso de los recursos e insumos y utilidades de los sistemas.

La importancia del presente estudio radica en que con la creciente crisis energética, mala planificación en el uso de los suelos, restricción para exportación de alimentos y las presiones adicionales que impone un mundo globalizado, el futuro de la agricultura está intrínsecamente ligado al mejor de los recursos naturales. Es importante que los avances tecnológicos en la agricultura deben considerar no solo el mejoramiento de los rendimientos productivos, sino también la optimización y custodia de los recursos naturales.

En países en desarrollo, el tema del uso de la energía y recursos naturales en sistemas productivos es de gran importancia para la elaboración de conclusiones de carácter nacional, sin embargo con escasez de información acerca de la eficiencia en el uso de la energía y recursos resulta difícil o carente de precisión. Es por ello que surge la necesidad de enfocar el análisis energético a nivel de cultivos, donde la recopilación de información básica es factible. Para muchas de las etapas del proceso de producción de alimentos no existen datos confiables y más aún, son escasas las referencias disponibles acerca del uso de la energía en cultivos tales como los hortícolas.

En Costa Rica han sido escasos los estudios científicos desarrollados para evaluar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (García, 1997), siendo la temática energética prácticamente novedosa en la valoración y comparación de los modelos y tendencias productivas (Rosselló, Domínguez y Gascón, 2005).

Para esta investigación se trabajará con la lechuga, producto hortícola representativo tanto en sistemas productivos a cielo abierto como en invernadero, que cumple con características

de ciclo corto (permitiendo la repetitividad de los ciclos productivos), fácil manejo, cuantificación simple y constituye un cultivo hortícola importante que demanda tierras fértiles. Ocupa un lugar económicamente relevante dentro de las hortalizas, demostrado por la gran demanda y exigencia que existe en los mercados, además por ser de gran importancia dentro de la dieta humana y su consumo aumenta a medida que el hombre conoce sus propiedades (Cerdas, 2005; Cerdas y Montero, 2004; Rapaccioli, Fernández y Aguirre, 2002; Soto, 2005).

## **2.2 OBJETIVOS**

### **2.2.1 Objetivo general**

Evaluar la sostenibilidad ecológica del cultivo de lechuga en sistemas de producción en campo abierto e invernadero en Cartago, Costa Rica, utilizando la metodología del balance energético, para generar información que permita enlazar su producción con el buen uso de los recursos naturales.

### **2.2.2 Objetivos específicos**

1. Analizar la producción neta de energía (PNE) de los sistemas agrícolas de producción de lechuga a campo abierto e invernadero.
2. Analizar el rendimiento o índice de eficiencia energética del sistema (IEE) de los sistemas agrícolas de producción de lechuga a campo abierto e invernadero.
3. Realizar un análisis financiero de los sistemas agrícolas de producción de lechuga a campo abierto e invernadero para determinar rentabilidad de los sistemas.
4. Plantear recomendaciones para la producción de lechuga que permitan el mejor uso de los recursos naturales y que no afecte el rendimiento de los sistemas.

### **2.2.3 Hipótesis**

La hipótesis nula propone que los dos sistemas de producción agrícola de lechuga (campo abierto e invernadero) no difieren de manera significativa entre sí con respecto a productividad (medida en kilogramos de producto cosechado por m<sup>2</sup> de siembra), producción neta de energía y rendimiento o índice de eficiencia energética. La hipótesis alternativa propone que los sistemas difieren significativamente.

# METODOLOGÍA

## 3.1 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la provincia de Cartago, Costa Rica, en las instalaciones del Tecnológico de Costa Rica (TEC). La provincia de Cartago presenta características importantes de sector agrícola, con producción de diferentes ornamentales, tubérculos, hortalizas y vegetales de hoja, logrando encontrar métodos de cultivos tanto en campo abierto como en invernadero, por lo cual resulta representativa para el desarrollo del estudio.

Se trabajó con dos módulos experimentales: un invernadero y una parcela, en el área destinada para las prácticas de campo e investigaciones de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la institución mencionada. La ubicación geográfica de la zona de estudio es  $9^{\circ} 51' 11,60''$  N y  $83^{\circ} 54' 34,80''$  W, con elevación de 1402 m.s.n.m.

El invernadero ya se encontraba instalado en la zona, sus dimensiones son de 20 metros de largo por 7 metros de ancho, estructura a dos aguas construido con tubo de metal, con material de cubierta de malla anti-insectos 50 Mesh (material Monofilamentos de polietileno HD), altura lateral de 2,5 m de alto y 4 m altura a cumbre, con ventana cenital con abertura de 0,30 m. La figura 3.1 muestra el invernadero utilizado en el estudio.



**Figura 3.1** Invernadero utilizado en el estudio.

La parcela utilizada para el estudio contó con dimensiones de 7 m de ancho x 20 m de largo (iguales dimensiones que el invernadero), se encontró a una distancia de separación de 15

metros del invernadero, dadas las características del área. La figura 3.2 muestra la parcela utilizada para el estudio.



**Figura 3.2** Parcela en campo abierto utilizado en el estudio.

Los módulos experimentales trabajados representan los sistemas productivos de lechuga utilizados en Costa Rica, con el fin de que los resultados puedan ser útiles y aplicables en el sector productivo nacional.

El medio de cultivo a utilizado fue el suelo y la siembra se realizó mediante el trasplante de plántulas lechuga americana: *Lactuca sativa*, cv. Great Lakes.

Las plántulas fueron adquiridas en la Empresa Agroverde S.A., ubicada en la Guácima de Alajuela, teniendo la previsión que se encontraran en igual etapa de cultivo (23 días de siembra).

### **3.2 Unidad experimental**

La unidad experimental correspondió a camas elaboradas dentro del invernadero y la parcela, con tamaño de 17 m de ancho por 1 m de ancho y 0,10 m de altura, en las cuales se cultivó una población de 200 plántulas de lechuga, en cuadrículas de 0,25 m x 0,25 m.

Se cultivó una cama dentro del invernadero y otra en la parcela útil en campo abierto, se replicó la siembra en dos ocasiones más, con una diferencia temporal de una semana entre cada réplica.



### 3.2.1 Método de cultivo utilizado para el estudio

Primeramente se procedió a realizar un análisis químico de suelos para determinar la oferta de nutrientes del suelo y garantizar condiciones similares de siembra, tanto para la parcela en campo abierto como para la parcela en el invernadero. Las muestras se recolectaron y fueron llevadas para su análisis en el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Una semana antes de la siembra se realizó una desinfección del suelo, para la cual se utilizó peróxido de hidrógeno, a razón de 40L/ha. Este producto es biodegradable, se caracteriza por no dejar ningún tipo de residuos al descomponerse en oxígeno y agua, es decir, produce productos secundarios “limpios”.

El tratamiento aplicado a los sistemas de cultivo fue el siguiente (L. F. Campos, comunicación personal, febrero 5, 2009):

1. **Aplicación de riego:** mediante el sistema de riego por goteo (sistema representativo en cultivo de lechuga, permite mayor eficiencia y control en el consumo de agua). Se determinó requerimientos de riego mediante medición de humedad en el suelo.
2. **Aplicación de fertilizantes:** a una semana luego de la siembra en cada ensayo se aplicó fórmula 10-30-10, a razón de 6 g/planta, una semana después de la primera fertilización se aplicó úrea a razón de 7 g/planta.
3. **Control de plagas y enfermedades:** Durante los ensayos realizados no se requirió de ninguna aplicación. Aún así se planteó la utilización de “chilagro” (versión comercial de la de mezcla chile picante y ajo) para combate de plagas, en dosis de 2.5 cc/litro de agua, aplicando una vez por semana. Se planteó el control biológico de plagas con el uso de hongos entomopatógenos: *Beauveria sp.* para tratar Coleoptera, Lepidoptera, Diptera con dosis inundativa 2 kg/Ha (primera aplicación), dosis inoculativa 1,5 kg/Ha una vez cada 15 días. *Metharrizium annisoplae* para tratar invertebrados como trips, ácaros, babosas, cochinillas, caracoles, jobotos, prosapia, abejones, termitas, garrapatas) con dosis inundativa 2 kg/Ha (primera aplicación), inoculativa 1,5 kg/Ha una vez cada 15 días.

4. **Deshierba:** Se utilizó sistema manual, se deshierbó cada 2 semanas.
  
5. **Cosecha:** se realizó a ocho semanas luego de la siembra. Se retiró manualmente la planta del suelo, se eliminó el exceso de tierra de la raíz y se procedió a cortarla con cuchilla. Se pesó la planta sin raíz y se colocó en cajas plásticas para su traslado y venta.

Además en el invernadero se llevó control de temperatura y humedad relativa interna, con el fin que estas variables no se presentaran fuera de los rangos óptimos de crecimiento y desarrollo del cultivo.

### **3.3 Población y muestra**

Para el cálculo de la muestra ( $n$ ) se procedió a utilizar el programa StatsR, recomendado por Hernández, *et al.* (2006, pag. 246), que sirve para determinar el tamaño de una muestra aleatoria simple y generar números aleatorios para seleccionar los casos de la muestra de una población.

El programa solicita el tamaño de la población, definir el error estándar (probabilidad) y el nivel de significancia o margen de error. Introduciendo los datos en el programa se tiene:

Tamaño de la población ( $N$ ): 200 plantas

Error máximo aceptable: 5% (0,05)

Nivel de confianza: 95%

De forma automática el programa calcula el tamaño de la muestra, con un  $n = 132$  plantas.

Con el mismo programa se generaron tablas de números aleatorios para determinar los sujetos de formaron la muestra.

### **3.4 Espacio temporal de la investigación**

El estudio se realizaron por espacio de 10 semanas comprendidas entre el 1 de julio del 2009 al 15 de setiembre del 2009, durante la época lluviosa.

### 3.5 Variables de la Investigación

En la sistematización de esta investigación se considerarán las variables consignados en el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1** Determinación de variables e instrumentos de medición para lograr los objetivos de la investigación.

OBJETIVOS	Variables	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INSTRUMENTOS
Evaluar la sostenibilidad ecológica del cultivo de lechuga en sistemas de producción en campo abierto e invernadero en Cartago, Costa Rica, utilizando la metodología del balance energético, para generar información que permita enlazar su producción con el buen uso de los recursos naturales.	Balance energético (BE)	Estudio de insumos y recursos que ingresan a un sistema productivo, comparado con las salidas del sistema.	Indicadores Producción Neta de Energía, Eficiencia Energética
Analizar la producción neta de energía (PNE) de los sistemas de producción agrícola de lechuga a campo abierto e invernadero.	1. Entradas energéticas 2. Productividad 3. Salidas energéticas	1. Materiales, insumos, recursos que ingresan al sistema 2. Peso de lechuga cosechada/área 3. Materia, residuos, desechos de salida del sistema.	Registro de entradas de insumos y recursos al sistema productivo. Registro de peso fresco de lechugas en la cosecha y peso residuos y desechos.
Analizar el rendimiento o índice de eficiencia energética del sistema (IEE) de los sistemas agrícolas de producción de lechuga a campo abierto e invernadero.	1. Entradas energéticas 2. Salidas energéticas	1. Materiales, insumos, recursos que ingresan al sistema 2. Materia, residuos, desechos de salida del sistema.	Registro de entradas de insumos y recursos al sistema productivo. Registro de peso fresco de lechugas en la cosecha y peso residuos y desechos.
Determinar la relación costo-beneficio de los sistemas agrícolas de producción de lechuga: a campo abierto e invernadero.	1. Costos económico de producción 2. Beneficio económico por venta de productos de salida	1. Costo monetario de insumos y recursos ingresados al sistema. 2. Beneficio monetario producto de venta de productos salidos del sistema.	Registro de costos de entradas de insumos y recursos al sistema productivo. Registro de precio comercial de lechugas cosechadas.

Plantear recomendaciones para la producción de lechuga que permitan el mejor uso de los recursos naturales, procurando no afectar el rendimiento de los sistemas	Recomendaciones Oportunidades de mejoramiento	Consejos o sugerencias para establecer acciones o tomar decisiones que permitan mejorar una situación.	De acuerdo con los resultados obtenidos de esta investigación.
--	---	--	--

Fuente: La autora, 2010.

### 3.6 Recolección de datos y cálculo de resultados.

Para la recolección de datos se utilizó hojas de registro (Anexo 1).

Para contabilizar las entradas del sistema productivo se llevaron registros diarios de todos los insumos y recursos utilizados durante cada réplica, en cantidad y tipo de producto utilizado (agua, fertilizantes, fitosanitarios, material de cubierta), material de riego, equipos, utensilios y mano de obra utilizada.

La mano de obra utilizada comprendió preparación del suelo, siembra, instalación y control de riego, aplicación de fertilización, deshierba y cosecha. Dos personas fueron las encargadas de realizar estas labores, y se llevaron registros con anotación de tipo de actividad realizada y tiempo de ejecución de la misma y que convirtió a su equivalente energético según datos presentes en el cuadro 1.1.

En las salidas del sistema se registró el peso fresco de las lechugas de la muestra.

Los valores energéticos para los insumos y salidas se tomaron de valores encontrados en la teoría para el gasto energético y contenido calórico de insumos y productos agrícolas, calculados y proporcionados por diferentes investigadores, específicamente: Pimentel (1980); Fernández (1981); Leach (1976), (Cuadro 1.1).

Los valores energéticos de los insumos y materiales considerados como “entradas” toman en cuenta el calor contenido en el mismo, la energía de las materias primas consumidas en su fabricación, energía de maquinaria y combustibles usados de su fabricación y distribución final.

La energía solar no se contabilizó como una entrada, ya que no representa un costo económico el consumo por parte del sistema agrícola.

Los desechos por el cambio de plástico del invernadero son un residuo que sale del sistema, pero según la teoría del balance energético, se debe considerarse el costo energético y económico de disponer adecuadamente del mismo, por lo que se toma en cuenta para el presente estudio los costos de disposición del plástico en una recicladora.

Los desechos de deshierba y de cosecha (raíces, hojas) se recolectaron y se utilizaron para fabricar abono para reincorporarlo a los sistemas productivos, como se reincorporan al sistema sin producir bien económico no son contabilizados como “salida energética”.

Para las salidas energéticas se pesó cada lechuga cosechada y se determinó la equivalencia energética según el contenido energético. Se tomó como referencia un valor energético de de 18 calorías cada 100 g de producto (Cerdas y Montero, 2004).

La productividad de los sistemas agrícolas, entendida como rendimiento de un determinado producto por área cultivada, se determinó como el peso fresco de la lechuga cosechada por área. El área la determinó el sistema de siembra utilizado, espaciamiento de 0,25m x 0,25m.

La producción neta de energía y los índices de eficiencia energética se determinaron mediante las siguientes fórmulas:

$$PNE = \sum \text{Entradas} - \sum \text{Salidas} \quad (1)$$

$$IEE = \frac{\sum \text{Salidas}}{\sum \text{Entradas}} \quad (2)$$

Se llevaron registros de los costos económicos de cada insumo y recurso de entrada al sistema. Se registró el precio económico por la venta de cada lechuga. Las lechugas luego de cosechadas colocadas en cajas plásticas y vendidas a un solo comprador que las recogió en el mismo sitio de cultivo, por lo que no se contabilizan en el estudio gastos energéticos.

Con los registros económicos se determinó la rentabilidad del proyecto, calculando los indicadores de Valor Actual Neto (VAN) Tasa Interna de Retorno (TIR), y relación beneficio/Costo (B/C). Se determinaron también los indicadores reales con una inflación de una 13%, calculada como el promedio de inflación en los 5 años anteriores al proyecto (2005-2009).

Además se realizó un análisis de un escenario sensibilizando el proyecto con un 5% menos de ingreso anual, tomando el 5% como un valor promedio utilizado para estudiar en riesgo a inversión en caso de disminuir en esa cantidad los ingresos, ya que los bienes agrícolas son dependientes de la oferta y la demanda (Anandarup, 1986).

### **3.7 Tratamiento estadístico de los datos**

Para el análisis de los datos se utilizó la estadística descriptiva que comprende:

- Prueba  $t$  para evaluar si los dos sistemas de producción difieren entre sí de manera significativa.

Para el cálculo matemático y el análisis estadístico se utilizó el programa XLSTAT, que un conjunto de módulos de análisis estadístico para Microsoft Excel.

# RESULTADOS

## 4.1 Análisis químico de suelos

El cuadro 4.1 muestra los resultados de los análisis químicos de suelos aplicados antes del estudio, con el fin de garantizar condiciones similares en la siembra.

**Cuadro 4.1** Análisis químico de suelos en el invernadero y la parcela.

Solución Extractora: KCl-Olsen Modificado		pH	cmol(+)/L					%	mg/L				
ID USUARIO	ID LAB	H <sub>2</sub> O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
		5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
Muestra campo	S-09-03638	5,4	0,21	15,44	5,68	0,42	22,13	1	39	14,1	24	197	63
Muestra invernadero	S-09-03639	5,6	0,19	16,19	5,71	0,40	22,41	1	40	14,8	25	199	65

Los valores debajo de cada elemento corresponden con los Niveles Críticos generales para la solución extractora usada  
 SA=Porcentaje de Saturación de  
 Acidez=(Acidez/CICE)\*100  
 CICE=Capacidad de intercambio de Cationes Efectiva=Acidez+Ca+Mg+K

Los resultados muestran que tanto la parcela en campo como en el invernadero tienen características químicas similares, por lo que no fue necesario equilibrar los minerales y nutrientes para trabajar con iguales condiciones de siembra.

## 4.2 Peso fresco del producto cosechado

En el Anexo 2 se muestran las tablas del peso fresco registrado para cada prueba realizada en campo abierto e invernadero.

El cuadro 4.2 muestra los resultados de las pruebas estadísticas t student realizadas para el peso fresco de las lechugas en cada repetición en el invernadero, utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

**Cuadro 4.2** Resultados pruebas *t student* para el peso fresco por lechuga en el invernadero.

Repetición 1 y 2		Repetición 1 y 3		Repetición 2 y 3	
Diferencia	1,069	Diferencia	3,738	Diferencia	2,669
t (valor observado)	0,201	t (valor observado)	0,678	t (valor observado)	0,526
t (valor crítico)	1,969	t (valor crítico)	1,969	t (valor crítico)	1,969
p-valor	0,841	p-valor	0,498	p-valor	0,599
GDL	260	GDL	260	GDL	260
alfa	0,05	alfa	0,05	alfa	0,05

$H_0$ : La diferencia entre las medias es igual a 0

$H_a$ : La diferencia entre las medias es diferente de 0

p-valor mayor que nivel de significancia alfa = 0,05

Se acepta hipótesis nula  $H_0$

Según muestra el cuadro 4.2, comparando cada repetición realizada en el invernadero, el p-valor computado es mayor que el nivel de significancia alfa = 0,05; por lo que se acepta la hipótesis nula  $H_0$ , lo que indica que no se encontraron diferencias significativas en las repeticiones efectuadas en el invernadero.

En el cuadro 4.3 se muestra los resultados de las pruebas estadísticas *t student* realizadas para el peso fresco de las lechugas en cada repetición efectuada en campo abierto, utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

**Cuadro 4.3** Resultados pruebas *t student* para el peso fresco por lechuga en el campo abierto.

Repetición 1 y 2		Repetición 1 y 3		Repetición 2 y 3	
Diferencia	5,162	Diferencia	1,989	Diferencia	3,173
t (valor observado)	1,549	t (valor observado)	0,557	t (valor observado)	0,886
t (valor crítico)	1,969	t (valor crítico)	1,969	t (valor crítico)	1,969
p-valor	0,123	p-valor	0,578	p-valor	0,377
GDL	260	GDL	260	GDL	260
alfa	0,05	alfa	0,05	alfa	0,05

$H_0$ : La diferencia entre las medias es igual a 0

$H_a$ : La diferencia entre las medias es diferente de 0

p-valor mayor que nivel de significancia alfa = 0,05

Se acepta hipótesis nula  $H_0$



Según muestra el cuadro 4.2, al comparar cada repetición realizada en el campo abierto, el p-valor computado es mayor que el nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ ; por lo que se acepta la hipótesis nula  $H_0$ , esto indica que no se encontraron diferencias significativas en las repeticiones efectuadas en el campo abierto.

Al no encontrarse diferencias significativas en las repeticiones de cultivo de lechuga en el invernadero y el campo abierto, según los resultados de las pruebas t student, los datos de cada muestra pueden tratarse como un solo set de datos para los siguientes análisis.

En el cuadro 4.4 se muestra los resultados de las pruebas estadísticas t student realizadas para comparar el peso fresco por lechuga en campo abierto y en invernadero, utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

**Cuadro 4.4** Resultados pruebas *t student* para comparación del peso fresco por lechuga en el campo abierto y el invernadero

<b>Prueba t campo abierto vrs invernadero</b>	
Diferencia	84,85
t (Valor observado)	32,90
t (Valor crítico)	1,96
GDL	788,00
p-valor (bilateral)	< 0,0001
alfa	0,050
H <sub>0</sub> : La diferencia entre las medias es igual a 0.	
H <sub>a</sub> : La diferencia entre las medias es diferente de 0.	
P-valor computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0,05$ .	
Se rechaza la hipótesis nula H <sub>0</sub> , se acepta la hipótesis alternativa H <sub>a</sub> .	

Según muestra el cuadro 4.4, comparando en campo abierto y en el invernadero, el p-valor computado es menor que el nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ ; por lo que se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  y se acepta la hipótesis alternativa, lo que indica que se encontraron diferencias significativas en el peso fresco de la lechugas según el sistema productivo en que se desarrollaron, campo abierto y bajo invernadero.

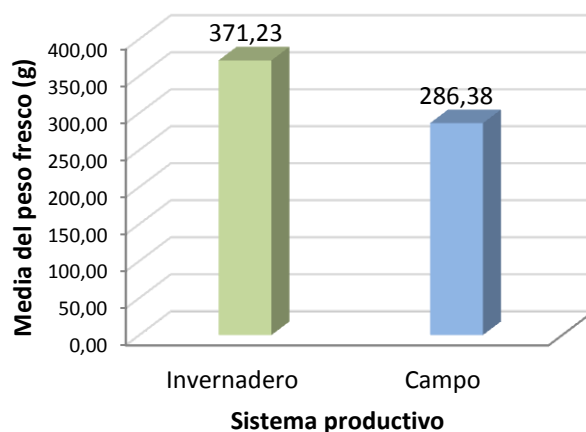
El cuadro 4.5 muestra que la media la media del peso fresco de las lechugas fue mayor en el sistema de cultivo bajo invernadero que en campo abierto. La desviación estándar o típica que indica que tan lejos se encuentran los datos de la media en todos los casos, muestra que las mayores variaciones se encontraron en las muestras de lechuga en campo abierto.

El coeficiente de variación indica que la dispersión relativa es mayor en el sistema productivo de lechuga en campo abierto.

**Cuadro 4.5** Estadísticos descriptivos para el peso fresco por lechugas en campo abierto e invernadero

Estadístico	Sistema productivo	
	Invernadero	campo abierto
<b>Mínimo (g)</b>	264,80	218,50
<b>Máximo (g)</b>	497,50	385,30
<b>Media (g)</b>	371,23	286,38
Desv. Típica (g)	12,75	18,28
<b>Coef. Variación (%)</b>	3,43%	6,38%

La figura 4.1 muestra que la media del peso fresco de lechugas en el invernadero fue más alta que en el campo abierto. Se presentó una diferencia de peso fresco de lechuga de 84 g entre las medias del invernadero y el campo abierto. La media de peso en el campo abierto no superó los 300 g.



**Figura 4.1.** Media del peso fresco por lechuga en campo abierto e invernadero.

### 4.3 Productividad de los sistemas agrícolas

En el cuadro 4.6 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas t student realizada a la productividad de los sistemas agrícolas, utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

**Cuadro 4.6** Resultados pruebas *t student* para la productividad de las lechugas en el invernadero y en el campo abierto

<b>Prueba t campo abierto vrs invernadero</b>	
Diferencia	1,36
t (Valor observado)	32,90
t (Valor crítico)	1,96
GDL	788,00
p-valor (bilateral)	< 0,0001
alfa	0,050
H <sub>0</sub> : La diferencia entre las medias es igual a 0.	
H <sub>a</sub> : La diferencia entre las medias es diferente de 0.	
P-valor computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05.	
Se rechaza la hipótesis nula H <sub>0</sub> , se acepta la hipótesis alternativa H <sub>a</sub> .	

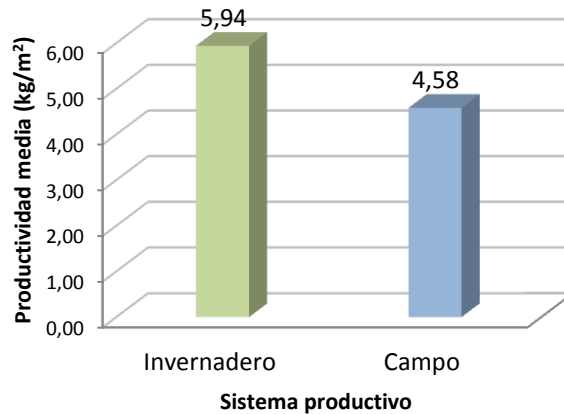
Según muestra el cuadro 4.6, el p-valor computado es menor que el nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ ; por lo que se rechaza la hipótesis nula  $H_0$ , y se acepta la hipótesis alternativa  $H_a$ , lo que indica que la productividad media del cultivo de lechuga en invernadero presenta diferencia significativa a la productividad media del cultivo de lechuga a campo abierto.

En el cuadro 4.7 se presentan los estadísticos descriptivos para cada ensayo y sistema productivo.

**Cuadro 4.7** Estadísticos descriptivos para la productividad de las lechugas en el invernadero y el campo abierto

<b>Estadístico</b>	<b>Sistema productivo</b>	
	<b>Invernadero</b>	<b>campo abierto</b>
<b>Mínimo (kg/m<sup>2</sup>)</b>	4,24	3,49
<b>Máximo (kg/m<sup>2</sup>)</b>	7,96	6,17
<b>Media (kg/m<sup>2</sup>)</b>	5,94	4,58
<b>Desv. Típica (kg/m<sup>2</sup>)</b>	0,45	0,68
<b>Coef. Variación (%)</b>	9,88	11,51

El cuadro 4.7 muestra que la productividad media fue mayor en el sistema de cultivo bajo invernadero que en campo abierto. La desviación estándar o típica que indica que tan lejos se encuentran los datos de la media, en todos los casos fue menor a un kg/m<sup>2</sup>. La dispersión relativa de los datos, según indica el coeficiente de variación fue mayor en la producción en campo abierto.



**Figura 4.2.** Productividad media por lechuga en invernadero y en campo abierto.

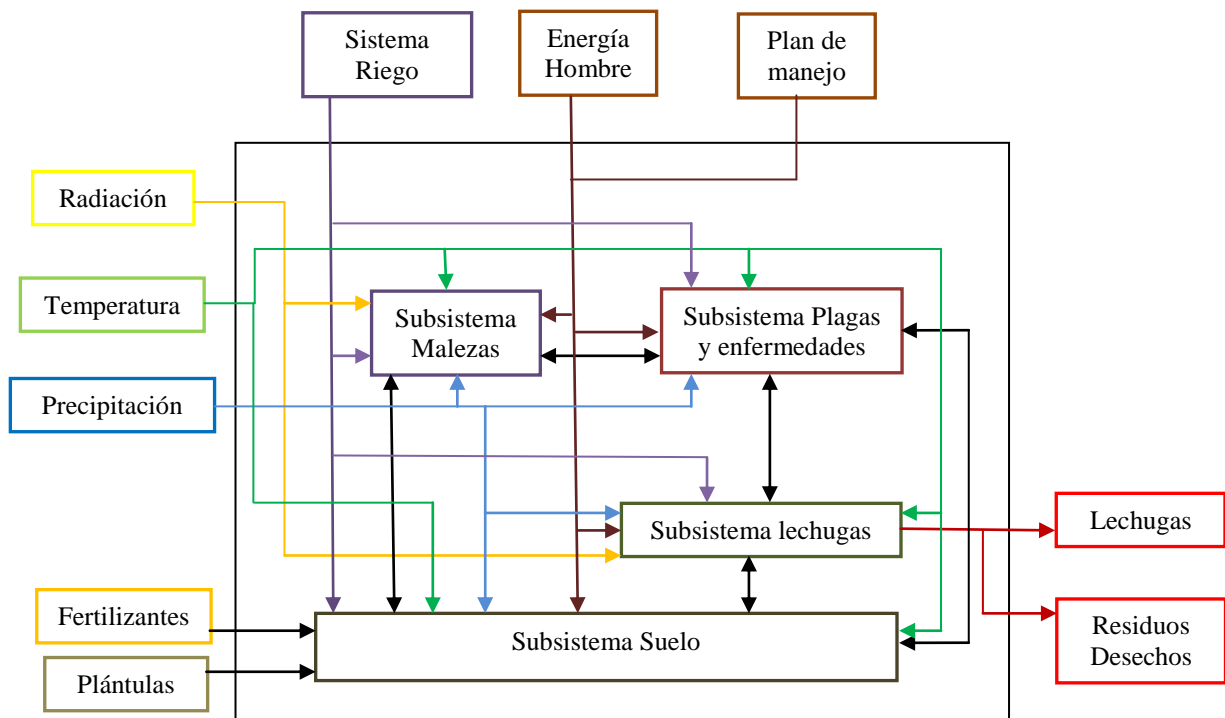
Comparando las medias de los sistemas agrícolas estudiados, en la figura 4.2 se observa que en el invernadero la productividad fue de poco más de un kilogramo (1 kg) de producto por metro cuadrado de área de cultivo, con respecto a la producción en campo abierto.

Estos resultados indican que la razón de la mayor productividad se debió a la protección al cultivo que brinda la estructura del invernadero. Como indica la teoría, un invernadero bien diseñado y operado ofrece mayor protección de las incidencias climáticas del entorno, lo que favorece la estabilidad en el desarrollo del cultivo, permitiendo obtener mayores rendimientos por área que en una producción a campo abierto.

#### 4.4 Flujos de materiales y energía en los sistemas productivos

Para analizar energéticamente los sistemas productivos es importante conocer cuáles son las entradas de energía, insumos y materiales que ingresan al sistema, así como aquellos residuos y productos que salen del sistema, para ello se elaboró diagramas de flujo de materiales y energía el sistema productivo de invernadero y campo abierto. Estos diagramas son importantes para determinar los factores a considerar para calcular los balances energéticos.

Las entradas, salidas y las interrelaciones determinadas en el sistema productivo de lechuga en campo abierto se muestran en la figura 4.3. En este sistema se observa que los factores de radiación, temperatura y precipitación influyen directamente en el sistema productivo.

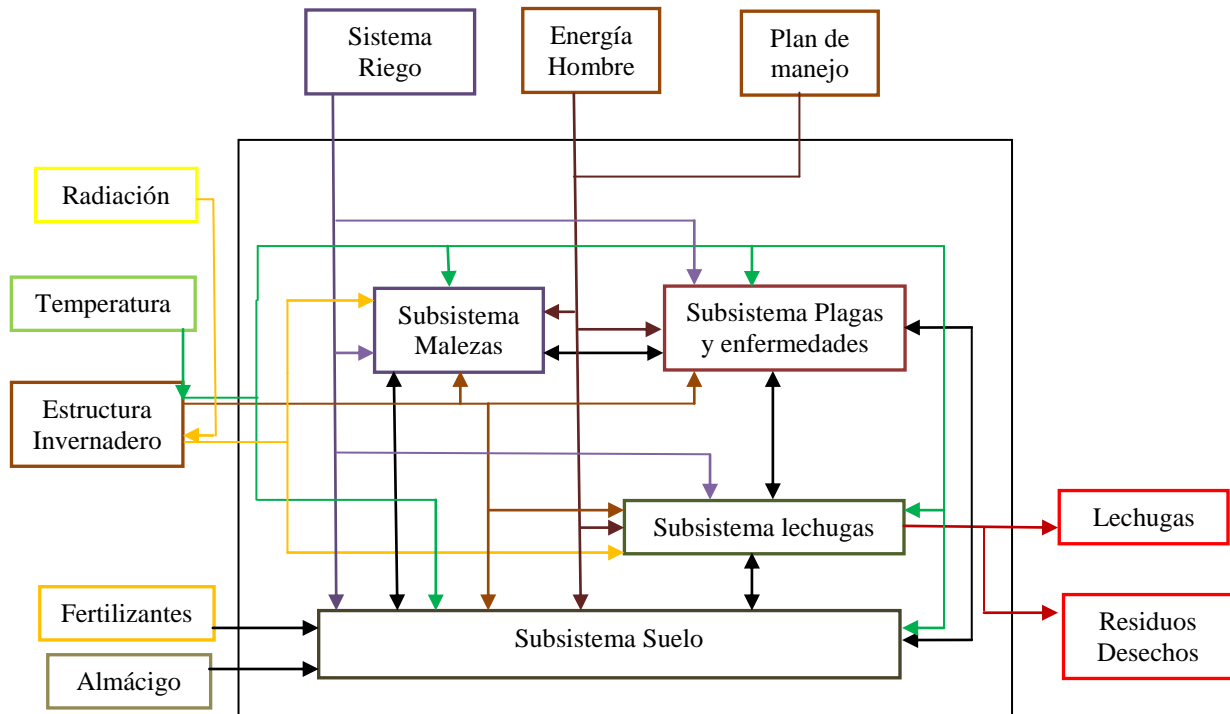


**Figura 4.3.** Flujo de materiales y energía para el sistema campo abierto.

La figura 4.3 muestra que se determinaron cuatro subsistemas básicos en el sistema productivo agrícola a campo abierto, estos son el suelo, el cual es utilizado y modificado para crear el subsistema de cultivo de lechugas, y de la interacción entre ambos aparecen los subsistemas de malezas y las plagas y enfermedades. Sobre estos subsistemas influyen directamente los factores ambientales de precipitación, temperatura, radiación. Los factores de riego y plan manejo aplicados ingresan para controlar y modificar estos subsistemas.

Como productos se salida al sistema a campo abierto se pueden distinguir las lechugas cosechadas y los residuos y desechos producidos.

Las entradas, salidas y las interrelaciones determinadas en el sistema productivo de lechuga bajo invernadero se muestran en la figura 4.4.



**Figura 4.4.** Flujo de materiales y energía para el sistema bajo invernadero.

La Figura 4.4 muestra que se determinaron cuatro subsistemas básicos en el sistema productivo agrícola bajo invernadero, estos son el suelo, el cual es utilizado y modificado para crear el subsistema de cultivo de lechugas, y de la interacción entre ambos aparecen los subsistemas de malezas y las plagas y enfermedades. Los factores de radiación, temperatura no influyen directamente en el sistema productivo, primero actúan sobre la estructura del invernadero, que funciona como una estructura de protección que modifica dichos factores, por lo que no afectan directamente al cultivo. Además se observa que el factor precipitación no influye en el sistema productivo. Los factores de riego y plan manejo aplicados ingresan para controlar y modificar los subsistemas.

Como productos se salida al sistema productivo de lechuga bajo invernadero se pueden distinguir las lechugas cosechadas y los residuos y desechos producidos.

## 4.5 Balances energéticos de los sistemas productivos

Con los diagramas de flujos de entrada y salida de energía a los sistemas calculados en el punto 4.4, se determinaron para el invernadero y el campo abierto los factores que se contabilizan en el sistema de balances energéticos, al considerarse materias primas energéticas o energía técnicamente útil (finita y no renovable) con costo económico.

Para el caso del sistema a campo abierto se determinó:

### **Entradas energéticas:**

1. Los almácigos: semillas, sustrato
2. Los fertilizantes: fórmula 10-30-10 y úrea.
3. Sistema de riego: manguera y fitting de riego, cantidad de agua aplicada y electricidad consumida por operación.
4. Energía humana: instalación de sistemas, deshierba, aplicación fertilizantes, cosecha.

### **Salidas Energéticas:**

1. Lechugas cosechadas

Para el caso del sistema en invernadero se determinó:

### **Entradas energéticas:**

1. Invernadero: metal y plástico de las estructura
2. Los almácigos: semillas, sustrato
3. Los fertilizantes: fórmula 10-30-10 y úrea.
4. Sistema de riego: manguera y fitting de riego, cantidad de agua aplicada y electricidad consumida por operación.
5. Energía humana: labores de instalación de sistemas, deshierba, aplicación fertilizantes, cosecha.

### **Salidas Energéticas:**

6. Lechugas cosechadas

Las entradas de energía o materias primas energéticas determinadas en ambos sistemas productivos toman en cuenta la energía total en forma de materias primas energéticas fósiles, extraídas del suelo, que se haya “agotado”, sin contar donde ni como este consumo se haya producido. Esto quiere decir, que toma en cuenta el calor contenido en el mismo, la

energía de las materias primas consumidas en su fabricación, energía de maquinaria y combustibles usados de su fabricación y distribución final.

La energía solar no se cuenta como una entrada, porque no representa un costo económico su consumo por parte del sistema agrícola y la complicación de su medición es muy alta, ya que solo la energía fotosintéticamente activa (PAR) es utilizada por la planta, la cantidad consumida podría solo ser determinada por los requerimientos en procesos fotosintéticos del cultivo, y se encuentran fuera del alcance pretendido para este estudio.

No se contabilizaron en las entradas los insumos para control de plagas y enfermedades, ya que no registró, para ambos sistemas productivos, ninguna incidencia de las mismas durante el estudio.

Del total de la biomasa producida por la cosecha, se contabilizó para los balances energéticos, la biomasa útil de valor comercial, que son las lechugas cosechadas, el resto se considera como biomasa residual. La biomasa residual producida en los sistemas, corresponde a las raíces de las plantas y algunas hojas de lechuga. Esta no se toma como salidas energéticas al utilizarse para producir abono orgánico, se reincorpora nuevamente al sistema suelo y no tiene valor comercial.

Para determinar los valores por planta de energía de entrada, para el caso del invernadero, se determinó la equivalencia energética de toda la estructura, se calculó el área ocupada por el mismo para determinar energía por metro cuadrado, y luego con el área ocupada por cada planta según las cuadrículas de siembra.

En el Anexo 2 se presentan las tablas con los cálculos de energía de entrada y salida por planta, así como los resultados de la producción neta de energía (PNE) y el índice de eficiencia energética (IEE).

Se presentan dos formas de análisis para los balances energéticos, la primera es contabilizando la estructura del invernadero desde la primera cosecha y la segunda forma consiste en distribuir la carga energética durante una vida útil de 5 años de la estructura, que representa el tiempo de depreciación de un invernadero de baja escala, según Tributación Directa, Costa Rica.



#### 4.5.1 Balance Energético Contabilizando invernadero desde la primera cosecha.

En el cuadro 4.8 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas *t student* realizadas para la producción neta de energía por lechuga, utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

**Cuadro 4.8** Resultados pruebas *t student* para la producción neta de energía por lechuga en el invernadero y el campo abierto.

Prueba t para PNE campo abierto vrs invernadero	
Diferencia	-2,43
t (Valor observado)	-1091,93
t (Valor crítico)	1,96
GDL	788,00
p-valor (bilateral)	< 0,0001
alfa	0,050

H<sub>0</sub>: La diferencia entre las medias es igual a 0.  
Ha: La diferencia entre las medias es diferente de 0.  
P-valor computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05.  
Se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub>, se acepta la hipótesis alternativa Ha.

Según muestra el cuadro 4.8, el p-valor computado es menor que el nivel de significancia alfa = 0,05; por lo que se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub>, y se acepta la hipótesis alternativa Ha. Esto significa que la media de la producción neta de energía del cultivo de lechuga en invernadero presenta diferencias significativas a la media de la producción neta de energía del cultivo de lechuga a campo abierto.

En el cuadro 4.9 se presentan los estadísticos descriptivos para la producción neta de energía de los sistemas agrícolas.

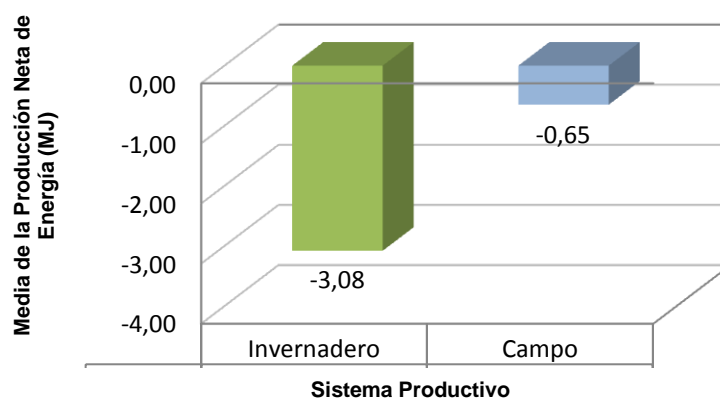
**Cuadro 4.9** Estadísticos descriptivos para la Producción Neta de Energía por lechuga en campo abierto e invernadero.

Estadístico	Sistema productivo	
	Invernadero	Campo abierto
<b>Mínimo (MJ)</b>	-3,16	-0,70
<b>Máximo (MJ)</b>	-2,65	-0,57
<b>Media (MJ)</b>	-3,08	-0,65
<b>Desv. Típica (MJ)</b>	0,039	0,021
<b>Coef. Variación (%)</b>	1,27	3,23

En el cuadro 4.9 se observa que las medias de la PNE son negativas, lo que significa que el consumo energético en los sistemas, tanto en campo abierto como en invernadero, fue mayor que las salidas energéticas. La dispersión de los datos indicada por el coeficiente de variación, fue mayor en el sistema productivo en campo abierto.

En la Figura 4.5, se observan las medias de la producción neta de energía (PNE), los valores negativos indican que el consumo energético fue mayor que las salidas energéticas (producto cosechado). La PNE fue mayor en los sistemas productivos en campo abierto.

La diferencia entre los sistemas agrícolas la marca la estructura de cobertura (invernadero) construido de metal y plástico, este insumo involucra mayor consumo energético. En general la estructura del invernadero disparó la energía consumida en poco más del triple de la energía de entrada que en el campo abierto, debido a que los índices energéticos del metal y el plástico son altos, al requerir de un importante consumo de recursos naturales para su fabricación.



**Figura 4.5.** Media de la Producción Neta de Energía por lechuga en campo abierto e invernadero.

En el cuadro 4.10 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas *t student* realizadas el índice de eficiencia energética por lechuga (IEE), utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

**Cuadro 4.10** Resultados pruebas *t student* el Índice de eficiencia energética por lechuga en campo abierto e invernadero.

Prueba t para IEE campo abierto vrs invernadero	
Diferencia	-0,17
t (Valor observado)	-125,39
t (Valor crítico)	1,96
GDL	788,00
p-valor (bilateral)	< 0,0001
alfa	0,050
H <sub>0</sub> : La diferencia entre las medias es igual a 0.	
H <sub>a</sub> : La diferencia entre las medias es diferente de 0.	
P-valor computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05.	
Se rechaza la hipótesis nula H <sub>0</sub> , se acepta la hipótesis alternativa H <sub>a</sub> .	

Según muestra el cuadro 4.10, el p-valor computado es menor que el nivel de significancia alfa = 0,05; por lo que se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub>, y se acepta la hipótesis alternativa H<sub>a</sub>. Esto significa que la media del índice de eficiencia energética del cultivo de lechuga en invernadero presenta diferencias significativas a la media del índice de eficiencia energética del cultivo de lechuga a campo abierto.

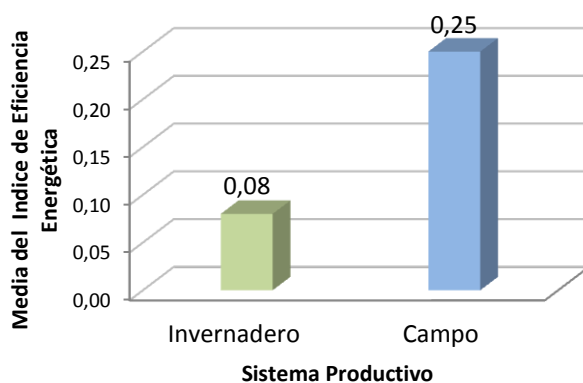
En el cuadro 4.11 se presentan los estadísticos descriptivos para el índice de eficiencia energética por lechuga en los sistemas productivos agrícolas.

**Cuadro 4.11** Estadísticos descriptivos para el Índice de Eficiencia Energética por lechuga en campo abierto e invernadero.

Estadístico	Sistema productivo	
	Invernadero	Campo abierto
<b>Mínimo</b>	0,06	0,19
<b>Máximo</b>	0,11	0,34
<b>Media</b>	0,08	0,25
<b>Desv. Típica</b>	0,025	0,010
<b>Coef. Variación (%)</b>	10,0	12,5

En el cuadro 4.11 se observa, como es de esperar, al tener producciones netas de energía negativas, las eficiencias energéticas son menores a uno. La dispersión relativa de los datos fue mayor en el campo abierto, al contar con coeficiente de variación más alto.

En la figura 4.6 se observa que las eficiencias energéticas fueron menores en el sistema productivo bajo invernadero, dado que el consumo energético fue superior a las salidas energéticas en este sistema. En general ambos sistemas productivos son ineficientes energéticamente, superando de forma importante la ineficiencia energética el sistema bajo invernadero, por el alto consumo que significa la estructura del invernadero.



**Figura 4.6.** Índices medios de Eficiencia de Energética por lechuga en campo abierto e invernadero

Los balances energéticos realizados a ambos sistemas productivos de lechuga (campo abierto, invernadero) dieron como resultado energías netas negativas e índices de eficiencia menores a uno, esto quiere decir que el consumo energético de ambos sistemas fue mayor a la energía producida (producto fresco). Esto indica que son sistemas agrícolas ineficientes energéticamente y por ende no sostenibles ecológicamente bajo las particulares desarrolladas en el presente estudio.

#### 4.5.2 Balance Energético distribuyendo carga energética del invernadero.

En este análisis de distribuye la carga del invernadero durante una vida útil de 5 años, se consideraron 5 cosechas al año durante cinco años, el valor de la carga del invernadero se divide y se asigna a cada cosecha para comparar con el campo abierto, además se incluyeron nuevas cargas energéticas que corresponden al mantenimiento del invernadero y cambio de plásticos cada 2 años, así como el costo de disposición del plástico de desecho.

En el cuadro 4.12 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas *t student* realizadas para la producción neta de energía por lechuga, utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%.

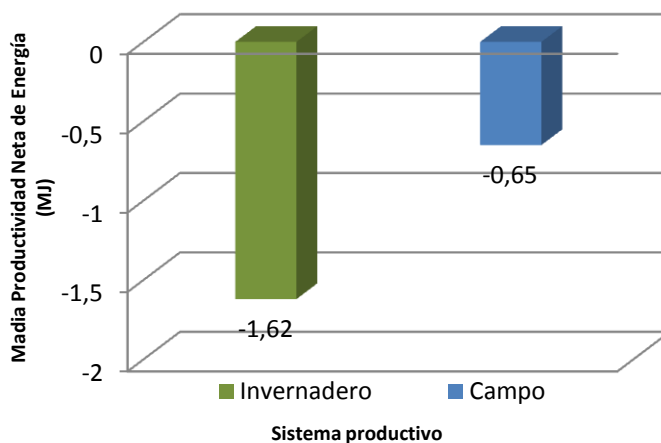
**Cuadro 4.12.** Prueba t student distribuyendo carga energética en la vida útil del invernadero

Prueba t para PNE campo abierto vrs invernadero	
Diferencia	-0,97
t (Valor observado)	-1131,23
t (Valor crítico)	1,96
GDL	788,00
p-valor (bilateral)	< 0,0001
alfa	0,050
H <sub>0</sub> : La diferencia entre las medias es igual a 0.	
H <sub>a</sub> : La diferencia entre las medias es diferente de 0.	
P-valor computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05.	
Se rechaza la hipótesis nula H <sub>0</sub> , se acepta la hipótesis alternativa H <sub>a</sub> .	

Según muestra el cuadro 4.12, el p-valor computado es menor que el nivel de significancia alfa = 0,05; por lo que se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub>, y se acepta la hipótesis alternativa H<sub>a</sub>. Esto significa que la media de la producción neta de energía del cultivo de lechuga en invernadero presenta diferencias significativas a la media de la producción neta de energía

del cultivo de lechuga a campo abierto, aún distribuyendo la carga energética del invernadero durante su vida útil.

En la Figura 4.7, se observan las medias de la producción neta de energía (PNE), los valores negativos indican que el consumo energético fue mayor que las salidas energéticas (producto cosechado). La PNE fue mayor en los sistemas productivos en campo abierto.



**Figura 4.7** PNE de los sistemas, distribuyendo carga del invernadero

En la Figura 4.7 se muestra con la distribución de las cargas energéticas del invernadero durante la vida útil, se disminuye la PNE de -3,08 MJ a -1,62 MJ, sin embargo continúa negativa, lo indica que el sistema consume más energía de la producida.

Distribuyendo la carga energética del invernadero en el tiempo se permite disminuir la carga energética en cada cosecha, pero durante el tiempo de vida útil también debe considerarse el mantenimiento de invernadero, el cambio de plásticos cada dos años y la disposición adecuada del plástico de desecho, aspectos que también requieren nuevas contabilizaciones energéticas. Este sistema de análisis puede ser más acertado que contabilizando en un solo momento la carga del invernadero.

En el cuadro 4.13 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas *t student* realizadas el índice de eficiencia energética por lechuga (IEE), utilizando un nivel de confianza de 95%, error máximo aceptable 5%, distribuyendo la carga del invernadero durante una vida útil de 5 años.

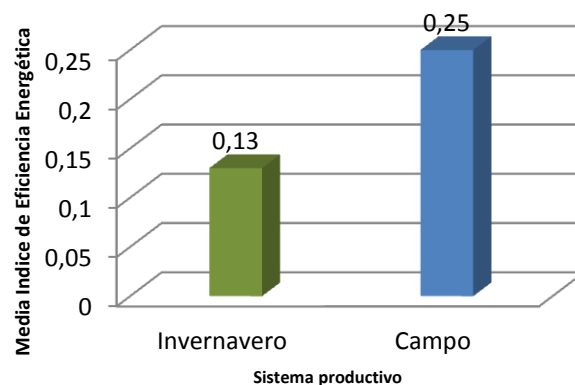
**Cuadro 4.13** Resultados pruebas *t student* el Índice de eficiencia energética por lechuga en campo abierto e invernadero con distribución de carga energética del invernadero.

Prueba t para IEE campo abierto vrs invernadero	
Diferencia	0,12
t (Valor observado)	-125,39
t (Valor crítico)	1,96
GDL	788,00
p-valor (bilateral)	< 0,0001
alfa	0,050

H<sub>0</sub>: La diferencia entre las medias es igual a 0.  
 Ha: La diferencia entre las medias es diferente de 0.  
 P-valor computado es menor que el nivel de significación alfa=0,05.  
 Se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub>, se acepta la hipótesis alternativa Ha.

Según muestra el cuadro 4.13, el p-valor computado es menor que el nivel de significancia alfa = 0,05; por lo que se rechaza la hipótesis nula H<sub>0</sub>, y se acepta la hipótesis alternativa Ha. Esto significa que la media del índice de eficiencia energética del cultivo de lechuga en invernadero presenta diferencias significativas a la media del índice de eficiencia energética del cultivo de lechuga a campo abierto, aún distribuyendo la carga energética durante la vida útil del invernadero.

En la figura 4.6 se observa que las eficiencias energéticas fueron menores en el sistema productivo bajo invernadero, dado que el consumo energético fue superior a las salidas energéticas en este sistema. En general ambos sistemas productivos son ineficientes energéticamente, superando de forma importante la ineficiencia energética el sistema bajo invernadero, por el alto consumo que significa la estructura del invernadero.



**Figura 4.6.** Índices medios de Eficiencia de Energética por lechuga en campo abierto e invernadero, con distribución de carga energética del invernadero.

En la figura 4.6 se observa que las eficiencias energéticas con distribución de la carga del invernadero en su vida útil, pasó de 0,08 a 0,13, aún menores que cero, dado que el consumo energético fue superior a las salidas energéticas en este sistema. En general ambos sistemas productivos son ineficientes energéticamente.

Los balances energéticos realizados a ambos sistemas productivos de lechuga (campo abierto, invernadero) con distribución de la carga energética del invernadero durante su vida útil, dieron como resultado energías netas negativas e índices de eficiencia menores a uno, esto quiere decir que el consumo energético de ambos sistemas fue mayor a la energía producida (producto fresco). Esto indica que son sistemas agrícolas ineficientes energéticamente y por ende no sostenibles ecológicamente bajo las particulares desarrolladas en el presente estudio.

El distribuir la carga energética del invernadero durante su vida útil es más representativo para comparar las cosechas contra el campo abierto, además este análisis introduce nuevos factores a considerar que permiten entender mejor el funcionamiento energético del mismo y considerar la disposición de los desechos de plástico durante cada cambio.

#### 4.6 Análisis costo-beneficio

El cuadro 4.14 muestra los valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio/costo (B/C) calculados para el cultivo de lechuga en invernadero y en el campo abierto.

**Cuadro 4.14.** Indicadores financieros del cultivo en invernadero y campo abierto

Indicador	Modalidad productiva	
	Invernadero	Campo Abierto
<b>VAN</b>	₡972.469	₡438.176
<b>TIR</b>	28%	36%
<b>B/C</b>	1,53	1,21
<b>VAN real*</b>	₡856.846	₡399.327
<b>TIR real*</b>	23%	31%
<b>B/C real *</b>	1,32	1,02

\*Indicadores reales con tasa inflación 13%

\*Calculado con valor de lechuga a Julio 2009.



Los valores TIR y VAN determinados para ambos sistemas los hace rentables, de igual forma sucede con los indicadores calculados con una tasa de inflación de 13%, que permite tener una mayor objetividad para evaluar financieramente el proyecto.

En el cuadro 4.15 se puede observar que la mejor tasa interna de retorno lo presentan el sistema productivo en campo abierto (36%), esto debido en este sistema son menores las inversiones. En este sistema desde el primer año se recuperan las inversiones. Para el caso del sistema de invernadero la TIR fue de 28%, debido a que se debe recuperar la inversión del invernadero, las inversiones se recuperan a partir del segundo año de ejecutado el proyecto.

La relación Beneficio/Costo (B/C) al final de la vida útil evaluada de los proyectos (5 años), fue mayor en el cultivo bajo invernadero, esto debido a que la productividad es mayor, por tanto los ingresos mayores y permiten superar los costos por mantenimiento del invernadero. En el campo abierto la aplicación de riego es más ineficiente lo que aumenta los costos de riego y el mantenimiento del sistema es más costoso por estar expuesto a mayores incidencias climáticas externas.

La relación B/C indica para el caso del invernadero que por cada colón invertido se obtienen 0,53 colones de beneficio neto. Para el campo abierto por cada colón invertido se obtienen 0,21 colones de beneficio. Al determinarse los valores reales con una tasa de inflación de un 13% se obtienen 0,32 colones por cada colón invertido en el invernadero y 0,02 colones por cada colón invertido en el campo abierto.

De igual manera se procedió a realizar un análisis de un escenario, para estudiar el riego de inversión, sensibilizando el proyecto con un 5% menos los ingresos, valor comúnmente utilizado para análisis de escenarios (Anandarup, 1986), los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 4.16.

**Cuadro 4.15.** Indicadores financieros sensibilizados del cultivo en invernadero y campo abierto

Indicador	Modalidad productiva	
	Invernadero	Campo Abierto
<b>VAN</b>	€631.910	€137.029
<b>TIR</b>	18%	22%
<b>B/C</b>	1,43	1,11
<b>VAN real*</b>	€543.976	€103.579
<b>TIR real*</b>	13%	11%
<b>B/C real *</b>	1,21	1,10

\*Indicadores reales con tasa inflación 13%

\*Calculado con valor de lechuga a Julio 2009.

Los valores TIR y VAN sensibilizados indican que la inversión se vuelve riesgosa si el proyecto llega a recibir en promedio un 5% menos de ingresos anuales. De igual forma sucede con los indicadores calculados con una tasa de inflación de 13%, que permite tener una mayor objetividad para evaluar financieramente el proyecto. La relación costo-beneficio indica que para el invernadero por cada colón invertido se tendrá una ganancia de 0,43 centavos y para el campo abierto por cada colón se recibirá 0,11 centavos.

Los costos productivos considerados toman en cuenta los costos de los insumos (plántulas, fertilizantes, agua, electricidad de operación del sistema de riego) y como salidas la venta del producto, que son los costos que se seguirán generando con la operación de los sistemas agrícolas, el costo del invernadero y del sistema de riego se consideran aparte, al ser un solo gasto inicial.

Se observa que el ingreso fue mayor en el sistema bajo invernadero, esto se debió a que la productividad fue mayor en el mismo, como segundo factor, que influyó fue el consumo de agua y electricidad del sistema de riego, que fue mayor en el campo abierto.

Con respecto a los costos del invernadero y sistema de riego, que son las inversiones iniciales requeridas por los sistemas, específicamente la compra del sistema de riego por goteo, se cotizó en 2000 colones el m<sup>2</sup> y la estructura del invernadero en 10 dólares del metro cuadrado, cercano a los 5000 colones el m<sup>2</sup>. El sistema de riego por goteo ofrece mayor control y eficiencia en el consumo de agua.

En el caso del invernadero, la estructura requiere una mayor inversión inicial, pero al mismo tiempo permite proteger más la producción de las incidencias climáticas externos, obtener mayor productividad, así como optimizar el riego.

En el estudio realizado no se registró incidencia de plagas y enfermedad en ninguno de los sistemas productivos, por lo que no se requirió de inversión económica en la compra de sustancias para su control.

## DISCUSIÓN

Los resultados de mayor peso fresco de lechugas y productividad indicaron que la estructura del invernadero favoreció la producción, según Alpi y Tognoni (1999) indican que un invernadero bien diseñado y operado ofrece una mayor protección de las incidencias climáticas del entorno, lo que favorece la estabilidad en el desarrollo del cultivo, permitiendo obtener mayores rendimientos por área, que en una producción a campo abierto, esto se comprobó en el estudio realizado.

En promedio la productividad de lechuga encontrada en el invernadero fue un 23% mayor que la productividad en campo abierto. No se logró localizar estudios similares donde se comparen rendimientos productivos de lechuga convencional en campo abierto e invernadero, los estudios localizados comprenden evaluaciones de otro tipo de hortalizas como tomate y chile, al ser las hortalizas más comercializadas internacionalmente (Cook, 2055).

Cook (2005) menciona que para el caso de tomate cultivado bajo invernadero, el rendimiento productivo es mayor que en cultivos en campo abierto, con rendimientos mayores a 10 toneladas por hectárea. Además hace referencia que con la agricultura bajo invernadero se busca obtener un rendimiento más alto por medio de un mayor grado de control del cultivo y del ambiente a su alrededor, con el fin de rentabilizar al máximo la ocupación del terreno.

Los balances energéticos realizados en el sistema de producción en invernadero y en campo abierto indicaron, una energía neta negativa e índices de eficiencia menores que uno. Esto implica que el consumo energético de los sistemas fue mayor que las salidas energéticas, lo que califica a los sistemas como no sostenibles ecológicamente, al consumirse más energía de la que producen. Denoia y Montico (2009) en un estudio realizado en Argentina, encontraron resultados similares, al determinar balances energéticos negativos en el cultivo de lechuga.

La baja eficiencia energética encontrada para la producción de lechuga, puede verse influenciada por el bajo contenido energético por unidad de peso del cultivo, ya que Denioa y Montico (2009) encontraron que para otros cultivos hortícolas, como tomate y papa donde la cantidad de kilogramos recolectados por unidad de superficie es mayor que en lechuga, los balances energéticos fueron positivos, cumpliendo los supuestos de sostenibilidad ecológica.

Fernández (1981) menciona en sus investigaciones que entre algunos de los cultivos con balances energéticos negativos, se encuentran los hortícolas intensivos, como el analizado en el presente estudio, y las plantas ornamentales, ya que los productos cosechados presentan un valor calórico bajo y los valores energéticos de las entradas o materias primas energéticas utilizados, toman en cuenta la energía total en forma de materias primas energéticas fósiles, extraídas del suelo, sin contar donde ni como este consumo se haya producido.

Lo anterior significa, que los valores energéticos de los insumos toman en cuenta el calor contenido en el mismo, la energía de las materias primas consumidas en su fabricación, la energía de maquinaria y combustibles usados de su fabricación y la distribución final. De esta forma involucra toda la cadena de uso y consumo de recursos naturales, desde su extracción, fabricación y uso final. Este uso y consumo de recursos naturales con respecto a la producción final obtenida es lo que se relaciona con la sostenibilidad ecológica de los sistemas.

El distribuir la carga energética del invernadero durante su vida útil resulta más representativo para comparar las cosechas contra el campo abierto, además este análisis introduce nuevos factores a considerar que permiten entender mejor el funcionamiento energético del mismo, y considerar la disposición de los desechos de plástico durante cada cambio, así como el mantenimiento de esta cobertura

La recomendación para cambio de plástico monocapa es de dos años, según las empresas distribuidoras, sin embargo no existe información técnica confiable para determinar el tiempo de degradación del mismo y como puede verse afectada esa degradación dependiendo de las condiciones climatológicas en que este expuesto.

En ambos sistemas productivos la media de la PNE indica una diferencia entre el consumo energético y las salidas energéticas, siendo el mayor consumo energético en la producción en invernadero y por tanto una menor eficiencia energética. La estructura de metal, la cobertura plástica, mantenimiento, cambios de cobertura y disposición de los plásticos, marcaron la diferencia de consumo en los sistemas, ya que estos materiales presentan un alto gasto energético en su fabricación y disposición, según encontró en sus investigaciones Pimentel *et al.* (1989) y Fernández (1981).

La importancia de la estructura del invernadero radica en la obtención de mayores rendimientos productivos y protección del cultivo (como se mencionó anteriormente). Ofrece la ventaja que el material es durable en el tiempo, principalmente el metal. Y se puede asegurar aún más la producción, al no verse el cultivo expuesto a las condiciones climatológicas externas, lo que lo hace más eficiente productivamente.

El otro factor que aumentó el consumo energético, más allá que el consumo de electricidad para riego, fue la fertilización, que se basó en fertilizante granular fórmula 10-30-10 y úrea, al ser los fertilizantes más comúnmente utilizados en la producción hortícola.

En el presente estudio se consideró dos únicas aplicaciones de fertilizantes para ambos sistemas productivos, sin embargo, en el invernadero se obtuvo un mayor rendimiento por área. Cook (2005) menciona que la protección a las condiciones ambientales externas que brinda un invernadero al cultivo, favorece la disminución en el consumo y optimización del uso de los fertilizantes, lo que explicaría los mayores rendimientos en el invernadero.

Añez y Espinoza (2003) indican que los factores ambientales de alta precipitación y fuerte viento pueden disminuir el aprovechamiento de la fertilización granular aplicada sobre el suelo (método utilizado en el presente estudio), lo que conlleva en muchos casos en la necesidad de nuevas aplicaciones de fertilizantes. Esto puede explicar los menores rendimientos obtenidos en el campo abierto, ya que el estudio se efectuó en la época lluviosa.

La producción de fertilizantes nitrogenados requiere un elevado consumo de energías fósiles, del orden a la energía equivalente de 1,4 – 1,8 litros de gasolina por cada kg de nitrógeno (N) presente en el fertilizante (Pimentel *et al.*, 1983). Como consecuencia, el uso

de fertilizantes nitrogenados en los sistemas productivos analizados representó uno de los mayores insumos energéticos externos, más del 20%.

La úrea de grado fertilizante utilizada contiene un 46% de N, Pimentel *et al.* (1983) indica que este es el fertilizante nitrogenado más extendido, fabricándose anualmente en todo el mundo unos 100 millones de toneladas de urea y su proceso industrial utiliza como materias primas fundamentales el amonio y el dióxido de carbono y requiere grandes cantidades de carbón e hidrocarburos, como el gas natural y las materias primas derivadas del petróleo.

Aunque la eficiencia energética del proceso de producción de urea puede haber mejorado con el tiempo, el dato energético del mismo, citado por diferentes investigadores es de 80 MJ/kg (Leach, 1976; Puntí, 1982; Pimentel *et al.*, 1983; Naredo y Campos, 1980). Es importante también mencionar que la equivalencia masa/energía no siempre es la misma que la de masa/precio y que los precios de los fertilizantes nitrogenados son fuertemente dependientes de los precios del petróleo y del gas natural, debido a que son componentes esenciales de la de producción de la úrea.

Con la fertilización química utilizada en el estudio, las entradas aumentaron la proporción de insumos no renovables (productos químicos), disminuyendo los insumos gratuitos (actividad biológica, reciclado de nutrientes y fertilización orgánica), convirtiendo los sistemas productivos en un fuertes consumidores energéticos.

La degradación del rendimiento energético más importante a largo plazo de los sistemas productivos agrícolas estudiados, puede producirse por la fertilización, ya que es un factor que debe aplicarse para todos los ciclos productivos. El invernadero puede optimizar su uso, como se presentó en el presente estudio al mejorar rendimientos productivos, sin embargo en campo abierto los factores ambientales repercuten en su eficiencia, por lo que puede ser necesario nuevas aplicaciones de fertilizantes para mejorar rendimientos, lo que implica mayores consumos energéticos.

En el análisis financiero realizado a 5 años de los proyectos los TIR y VAN indican proyectos rentables, en el campo abierto estos indicadores son mayores que en el invernadero, debido a que no existe una inversión de infraestructura, sin embargo la relación costo/beneficio al final del proyecto es mayor en el invernadero al tener mayor productividad.

Aunque en el sistema productivo en invernadero requiera de más tiempo para recuperar las inversiones, es importante considerar que la finalidad del invernadero es la protección del cultivo de los factores climáticos externos, cosa que no sucede en el campo abierto, esto solo se podía determinar con un análisis de riesgos, que se encuentran fuera de los alcances del presente proyecto, y se requeriría una evaluación de al menos 2 años de duración.

Pimentel *et al* (1983) menciona que es común encontrar proyectos agrícolas que sean restables económicamente y sin embargo no presenten balances energéticos positivos, esto debido a que los estudios económicos solo consideran el costo de los insumos y no sus costos de fabricación. Los análisis económicos usuales no consideran las actividades productivas como transformadoras, consumidoras y agotadoras de los recursos naturales, sólo permiten determinar la rentabilidad a cierto plazo, de aquí la importancia de asociar los estudios económicos con los nuevos postulados de la economía ecológica, que permitan asociar la rentabilidad económica con la mejor custodia de los recursos naturales.

El balance costo-beneficio aplicado a los sistemas indicó que el rendimiento económico fue mayor en el sistema bajo invernadero, ya que al obtener lechugas de mayor tamaño, se vendieron a un mejor precio. Además, el consumo de agua fue menor en el invernadero. Según Fernández (1981), es frecuente que explotaciones agrarias con balances en energéticos negativos, desde un punto de vista empresarial, pueden ser rentables, ya que, el precio de los productos no está fijado precisamente por su contenido calórico.

Complementando el análisis económico con el análisis de un escenario, que es lo comúnmente utilizado para estudiar la rentabilidad de un sistema productivo, se consideró un escenario sensibilizando el proyecto con un 5% menos de ganancias anuales (promedio comúnmente utilizado). En este análisis los valores TIR, VAN y C/B indican que la inversión puede volverse riesgosa al decaer los valores de estos indicadores, esto indica que un proyecto tan pequeño con las unidades experimentales utilizadas es riesgoso en caso de recibir un 5 % menos de ingresos anuales, para que el proyecto pueda ser rentable económicamente en nivel real debe considerarse un mayor volumen de producción.

Hasta hace pocos años, los análisis de la agricultura se basaban solamente en los estudios económicos, ya que eran los que proporcionaban los datos necesarios para determinar la rentabilidad de las explotaciones. Estos balances económicos contabilizaban los precios de los insumos energéticos, sin embargo, según menciona Leach (1976), el análisis de los

ecosistemas agrarios como integrantes de una actividad productora y consumidora de la biosfera, no puede sustentarse solo en balances económicos, ya que los precios de los productos e insumos son muy variables según la zona productora, que en algunos casos puede verse protegida por subvenciones o precios protegidos.

La ventaja que presenta un balance energético frente a un balance económico, radica en la invariabilidad de los datos energéticos en el tiempo frente a las fluctuaciones del valor de la moneda (Pimentel *et al.*, 1983).

Es importante repetir el estudio comparando sistemas productivos convencionales y orgánicos, con el fin de determinar si la fertilización orgánica puede resultar una opción, para tratar de frenar el alto consumo energético causado por la fertilización química en los sistemas productivos estudiados, y así favorecer la sostenibilidad ecológica. Souza *et al.* (2008) determinó balances energéticos positivos en la producción orgánica y convencional (fertilización química) de hortalizas (papa, tomate, repollo, calabaza, zanahoria, camote, coliflor, ajo) en el estado de Espírito Santo en Brasil, siendo la eficiencia energética mayor en el sistema orgánico, de 2,78 en orgánico y 1,93 en convencional.

Para realizar un nuevo estudio en el ámbito de la fertilización convencional versus orgánica es importante considerar que los aportes de nutrientes al suelo con la fertilización orgánica deben evaluarse a largo plazo, no es posible obtener resultados inmediatos en los rendimientos productivos con el uso de estos fertilizantes, ya que el aporte de nutrientes es menor que con la fertilización química (Añez y Espinoza, 2003).

Además es primordial desarrollar mediante nuevas investigaciones datos técnicos sobre las recomendaciones de fertilizantes en cultivos orgánicos de hortalizas, dada su escasez. Voogt (1999) menciona que una aplicación anual de 50 t/ha de estiércol, equivalente a 1,4 t/ha de materia orgánica seca, se recomienda sólo para el sustento de la biomasa del suelo, necesiándose cantidades adicionales para suplir las cantidades de nitrógeno y potasio requeridas por las plantas de cultivo.

Añez y Espinoza (2003) mencionan que en el caso de la fertilización química, la problemática radica en el mal uso de las fórmulas y exceso en las dosis a aplicar, bajo el supuesto que a cantidades más altas mayores rendimientos, lo que aumenta el consumo energético. La



recomendación está basada en fertilizar de acuerdo a los requerimientos del suelo y del cultivo.

El sistema de riego utilizado (por goteo) permitió un mayor control en la aplicación del agua, esta es una inversión inicial de los sistemas tanto a campo abierto como invernadero, que puede ser recuperable a corto plazo.

La estructura del invernadero involucra una mayor inversión, cercano a los 10 dólares por m<sup>2</sup>. Los resultados del estudio indicaron que esta estructura favoreció la producción de lechugas, al obtenerse mayores rendimientos que en campo abierto, así como la optimización en el uso de los fertilizantes y agua de riego. Los beneficios monetarios obtenidos permitirían la recuperación de esta inversión a un mediano plazo.

Según menciona Fernández *et al.* (1997) una crisis energética se comenzó a sentir como consecuencia del encarecimiento de los productos petrolíferos. Así la energía utilizada en la agricultura ha dejado de ser considerada como un bien abundante y barato. En la actualidad al hacer cualquier planificación de los procesos productivos agrícolas, hay que considerar el componente energético del sistema, su incidencia en los costos de producción, como por su posible escasez en el futuro.

Para los sistemas agrícolas estudiados, como sucede en muchos casos el ámbito productivo nacional, se utilizaron y transformaron los ecosistemas para resolver las demandas de insumos y recursos. Esta explotación del planeta puede aportar beneficios para la alimentación humana y el desarrollo económico, sin embargo, los costos asociados con esos beneficios solo pueden ser observables mediante los balances energéticos.

La fuerte dependencia y uso excesivo de fertilizantes químicos lleva a la degradación de los procesos reguladores y a utilizar los recursos naturales más rápidamente de lo que el sistema natural puede reemplazarlos. En los sistemas productivos la naturaleza inicia y mantiene un sistema de energía y ciclo de nutrientes, y si se trabaja para mantener la integridad del sistema, se mantendría su capacidad de funcionamiento en el tiempo (Añez y Espinoza, 2003).

El capital natural es básicamente nuestro medio ambiente y se define como el banco de bienes que provienen del medio ambiente (como el suelo, los microbios, la atmósfera, los

bosques, el agua), y que proveen de un flujo de bienes y servicios (Pimentel *et al.*, 1992). Los flujos de bienes y servicios son vitales para los sistemas productivos agrícolas y la economía, por eso cada vez más los científicos basan la idea de sostenibilidad en la necesidad de asegurar el suministro (actual y/o potencial) de los servicios de los ecosistemas, que son indispensables para el mantenimiento de nuestra sociedad.

En el caso de la producción en invernaderos, dado el consumo energético que conlleva la estructura, la solución no se encuentra en frenar este tipo de agricultura, ni el desarrollo tecnológico, ya que dada la presión existente a nivel nacional por el uso del suelo, ineficiente planificación urbana, los peligros de una crisis alimentaria, la variabilidad climática, y las restricciones internacional en mercado de productos; la optimización y protección de la producción agrícola es fundamental.

Un diseño de invernadero adecuado a las condiciones climatológicas de la zona y un buen manejo del mismo, puede favorecer la disminución en el consumo de fertilizantes, riego y uso de fitosanitarios (Cook, 2005), lo que favorecería a largo plazo la eficiencia energética del sistema productivo.

La utilización de materiales para la construcción de la estructura con menor índice energético, también puede resultar favorecedor, por ejemplo uso de maderas o bambú en lugar de metal, siempre y cuando las restricciones en la exportación de alimentos así lo permitan.

El control biológico de plagas y enfermedades es importante para disminuir el consumo energético de fitosanitarios de naturaleza química, que también son los principales contaminantes de suelos, aguas y alimentos.

Los servicios de los ecosistemas contribuyen a la producción de alimentos de muchas maneras, directa e indirectamente y representan una gran parte del valor económico del planeta. Los servicios de los ecosistemas y el capital natural que los produce, han sido degradados por el consumismo de recursos no renovables en la agricultura, amenazando la sostenibilidad de los sistemas, por lo que es importante considerar nuevas alternativas de valoración de economía ecológica en los sistemas productivos, para guiar a la agricultura al mejor uso de los recursos.

Una agricultura más eficiente en el uso de los recursos naturales es deseable, pero debe ser trabajada, para ello es necesario desarrollar una visión, promover la investigación sobre tecnología, sustitutos de insumos no renovables y la transferencia de conocimientos, incorporando en el desarrollo de la tecnología y la innovación en la agricultura las valoraciones de orden ecológico para la toma de decisiones.

## **5.1 Conclusiones**

Con un nivel de confianza del 95%, se encontraron diferencias significativas entre la producción en campo abierto y bajo invernadero, rechazando la hipótesis nula, que indicaba que no existía diferencia significativa entre las medias del peso fresco, productividad, PNE e IEE.

Se registraron mayores pesos de lechugas en el cultivo bajo invernadero. La productividad en el invernadero fue un 23% mayor que en campo abierto. La productividad media indicó que se obtuvo en el invernadero, un kilogramo más de lechuga por m<sup>2</sup>.

Los coeficientes de variación del peso fresco de lechuga indicaron que la dispersión relativa fue mayor en el sistema productivo de lechuga en campo abierto.

Los resultados obtenidos concordaron con la teoría de que un invernadero ofrece al cultivo protección de las incidencias climáticas del entorno, favoreciendo la estabilidad en el desarrollo del cultivo, optimización en el uso de fertilizantes y riego, permitiendo obtener mayores rendimientos por área, que en una producción a campo abierto.

Los balances energéticos realizados en ambos sistemas de producción estudiados indicaron una energía neta negativa e índices de eficiencia menores que uno, lo que implica que el consumo energético de los sistemas fue mayor que las salidas energéticas. Esto convierte a los sistemas en no sostenibles ecológicamente.

La energía consumida fue mayor en el sistema productivo bajo invernadero, debido a la carga energética que conlleva la estructura, construida de metal y con cobertura plástica, lo que convirtió al sistema en menos eficiente energéticamente.

En el uso de invernaderos en la producción de lechuga involucra un alto consumo energético en infraestructura, pero es un consumo único a largo plazo. Estas estructuras tienen una amplia vida útil y su uso favorecería a largo plazo la reducción del consumo energético en fertilizantes químicos y riego, que son consumos requeridos en cada ciclo productivo.

La fertilización química aumentó el consumo energético de los sistemas productivos. El uso de fertilizantes nitrogenados en los sistemas productivos analizados representó uno de los mayores insumos energéticos externos, más del 20% del total de la energía consumida.

La producción de fertilizantes nitrogenados requiere un elevado consumo de energías fósiles en su fabricación, lo que aumenta su equivalencia energética. El uso de estos productos aumenta la proporción de insumos no renovables (productos químicos), disminuyendo el uso de los insumos gratuitos (actividad biológica, reciclado de nutrientes y fertilización orgánica), lo que convierte a los sistemas productivos estudiados en importantes consumidores energéticos.

El balance costo-beneficio aplicado a los sistemas productivos indicó que el rendimiento económico fue mayor en el sistema bajo invernadero, ya que al obtener lechugas de mayor tamaño, se vendieron a un mejor precio.

Los análisis económicos usuales no consideran las actividades productivas como transformadoras, consumidoras y agotadoras de los recursos naturales, de aquí la importancia de asociar los estudios económicos con los nuevos postulados de la economía ecológica, que permitan asociar la rentabilidad económica con la mejor custodia de los recursos naturales.

## **5.2 Recomendaciones**

Es importante repetir el estudio comparando sistemas productivos convencionales y orgánicos, con el fin de determinar si la fertilización orgánica puede resultar una opción, para tratar de frenar el alto consumo energético causado por la fertilización química en los sistemas productivos estudiados, y así favorecer la sostenibilidad ecológica.

Se recomienda en caso de realizar estudios comparativos entre sistemas productivos orgánicos y convencionales, evaluar diferentes épocas del año, y así evaluar el efecto que pueda ejercer el clima en estos sistemas productivos.

Se recomienda la realización de nuevos estudios para diferentes épocas del año, ya que este estudio solo evaluó época lluviosa, y se desconoce si al cambiar de estación climática cambiarían las condiciones productivas y consumos de insumos.

Las dosis y uso de fertilizantes químicos debe ir acorde a las necesidades de nutrientes del suelo y del cultivo, por lo que se recomienda la realización de análisis químicos para determinar los requerimientos.

Dadas las ventajas en rendimientos productivos que puede ofrecer el uso de un invernadero, se recomienda su uso, bajo los parámetros adecuados de diseño, ya que a largo plazo permitiría favorecer un menor consumo de otros insumos energéticos, como los fertilizantes, riego y fitosanitarios.

La utilización de materiales para la construcción de la estructura de invernaderos con menor índice energético puede resultar favorecedor para disminuir el consumo de energía, por ejemplo uso de maderas o bambú en lugar de metal, siempre y cuando las restricciones en la exportación de alimentos así lo permitan.

A pesar de la dificultad que puede involucrar la contabilización energética de insumos, recursos y salidas de los sistemas agrícolas productivos y de la incertidumbre de los métodos aplicados para la estimación del valor de los ecosistemas, es necesario valorar convenientemente el aporte que los sistemas ecológicos hacen a la agricultura y por ende a la economía, con el objetivo de no causar mayores problemas a una sociedad que depende de este capital natural.

Se recomienda elaborar nuevos estudios donde se tome en cuenta la degradación y erosión que puede sufrir el suelo en los sistemas productivos a campo abierto e invernadero, para determinar el nivel de protección que puede ofrecer la estructura de invernadero.

Es importante evaluar con nuevos estudios la factibilidad del uso de control biológico de plagas para disminuir consumos de plaguicidas y fitosanitarios de naturaleza química, tanto para favorecer aspectos ambientales como de consumo energético.

Se recomienda estudios para determinar de calidad de plásticos para invernaderos presentes en el mercado y de durabilidad para determinar el tiempo apropiado para cambio.

## REFERENCIAS CITADAS

- ALPI, A; TOGNONI, F. 1999. Cultivo en Invernadero. 3ra ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 347p.
- ALVARADO, F. 1986. Encuesta de consumo energético en el sector agrícola. Dirección Sectorial de Energía. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 156 p
- ANANDARUP, R. 1986. Análisis de costos-beneficios: cuestiones y metodología. Tecnos. Madrid. 173 p.
- AÑEZ, B.; ESPINOZA, W. 2003. Respuestas de la lechuga y el repollo a la fertilización química y orgánica. Revista Forestal Venezuela. 47(2): 73-82. Consultado el 18 de mayo de 2011 en <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24314/2/articulo8.pdf>
- BAYLISS-SMITH, T. 1982. The ecology of agricultural systems. Cambridge University Press. Cambridge. 134 p.
- BANCO MUNDIAL. 2008. Informe sobre el desarrollo mundial 2008: Agricultura para el desarrollo. Banco Mundial. Washington, DC. 386 p
- BOTERO, E. 2000. Valoración exergética de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fósiles. Memoria de tesis doctoral. Programa de Ingeniería Térmica Avanzada y Optimización Energética. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. España. 376 p.
- CAMINO, R; MULLER, S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales: bases para establecer indicadores. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 128 p.
- CERDAS, M.; MONTERO, M. 2004. Guías técnicas del manejo poscosecha de apio y lechuga para el mercado fresco. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 63 p.
- CERDAS, M. 2005. Manejo poscosecha de lechuga (lactuca sativa). CNP-UCR. San José. Costa Rica.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA (CEPAL). 2005. Los recursos hídricos y la agricultura en el Istmo Centroamericano. Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente. Mexico, D.F.. 64 p.
- COOK, R.; CALVIN, L. 2005. Greenhouse vegetables change the dynamic of de North American fresh industry: electronic report from de Economic Research Service/USDA. Consultado el 2 de mayo de 2011 en [www.ers.usda.gov](http://www.ers.usda.gov)
- CUSSIANOVICH, P. 2005. Análisis de la rentabilidad de 10 hortalizas cultivadas en forma orgánica y en forma convencional. Boletín N° 12 Programa Nacional de Agricultura Orgánica. IMAS, San José, Costa Rica.

- CUSSÓ, X.; GARRABOU, R. Y TELLO, E. 2006. Social metabolism in an agrarian region of Catalonia (Spain) in 1860-70: flows, energy balance and land use. *Ecological Economics*. 58 (2): 49-65.
- CUSSÓ, X.; GARRABOU, R. Y TELLO, E. 2006. Balances energéticos y usos del suelo en la agricultura catalana: una comparación entre mediados del siglo XIX y finales del siglo XX. Ministerio de Ciencia y Tecnología. España. 27 p.
- DENOIA, J.; MONTICO, S. 2009. Balance de energía en cultivos hortícolas a campo en Rosario (Santa Fe, Argentina). *Ciencia, Docencia y Tecnología* 41(2): 145-157. Consultado el 18 de mayo 2011 en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cdyt/n41/n41a07.pdf>.
- FERNÁNDEZ, J. 1981. Balance energético de las explotaciones agrarias: Ponencia 2.2. XIII Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Madrid. 29 p.
- FERNÁNDEZ, X. S; COLLAZO, A. J; CORRAL, J. A. 1997. Novas formas para medir a eficiencia: balances enerxético e tempos de reproducción. 1<sup>as</sup> Xornadas de Agroecoloxía: Lugo 1995. Edicións Fouse. Brasil.
- FIELD, B; AZQUETA, D. 1998. Economía y medio ambiente. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia. 299p.
- FLORES, C.; SARANDÓN, S. 2002. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de suelo durante el proceso de agriculturización en la región Pampeana de Argentina. *Rev. Facultad de Agronomía. Argentina* 105(1): 52-67.
- FUNES, F. 2005. Eficiencia energética de los sistemas agrícolas integrados ganadería/agricultura. Instituto de Investigaciones de Pastos y Forrajes. Cuba. Consultado el 1 de junio del 2010 en <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia4/articulos/Ponencia3.htm>
- GARCÍA, J. 1997. La Agricultura Ecológica en Costa Rica: situación actual y perspectiva. UNED. San José, Costa Rica. 47 p.
- GUEVARA, G.; ARMAS, D.; GUEVARA, R, PEDRAZA, R. 2006. Balance energético, proteico, forrajero y sostenibilidad en una unidad de producción lechera vacuna. *Revista Producción Animal (Cuba)*. 18(2): 99-102.
- GUEVARA, G.; RIVERO, P.; GUEVARA, R, CURBELO, L. 2006. Balance de energía y de sostenibilidad en un sistema ganadero-forestal. *Producción Animal (Cuba)*. 18(2): 121-126.
- HERNÁNDEZ, R.; FERNÁNDEZ-COLLADO, C.; BAPTISTA, P. 2006. Metodología de la Investigación. Mc Graw Hill Interamericana. México. 850 p.
- HÜLSBERGEN K. , FEIL B., BIERMANN S., RATHKE G., KALK W., DIEPENBROCK W. 2001. A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term energetic trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86 (2001): 303-321.
- INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA (IICA). 1992. Tecnología y sostenibilidad de la agricultura en América Latina. Programa II Generación y transferencia de tecnología. San José, Costa Rica. 133 p.



- INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). 2006. Desarrollo de Prácticas de Cultivo y Manejo Postcosecha para la Inocuidad de la Lechuga en Costa Rica. San José, Costa Rica. 6 p.
- LEACH, G. 1976. Energía y producción de alimentos. Trad. MT Montes, MA García. Servicio de Publicaciones Agrarias. Madrid. 210 p.
- LOMAS, P.; MARTÍN, B.; RODRÍGUEZ, M. 2006. La síntesis energética: integrando la energía, ecología y economía. Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 77 p.
- LONDERO, E. 1998. Beneficios y beneficiarios: una introducción de los efectos distributivos en el análisis costo beneficio. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D.C. 311 p.
- MARTINEZ, J. 1998. Curso de economía ecológica. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental N° 1. Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. México, D.F. 132 p.
- MAROTO, J.; VICENTE, A.; BAIXAULI, C. 2000. La lechuga y la escarola. Caja Rural Valencia. Madrid. 242 p.
- MAROZZI, M. 2002. Antología N°1 de Balances Energéticos. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 125 p.
- MASERA, O; ASTIER, M. 1996. Energía y sistema alimentario en México. Agroecología y Agricultura sostenible. Módulo I. Curso para diplomado de posgrado. Bases históricas y Teóricas. CLADES-CEAS-ACAO. México. pp 10-29.
- MORA, J.; DELGADO, C.; QUIRÓS, O. 2005. Análisis beneficio-coste y cuantificación de la energía invertida en sistemas de caficultura campesina en Puriscal, Costa Rica. Agronomía Costarricense. 30 (2): 71-82.
- NAREDO, J. M.; CAMPOS, P. 1980. La energía en los sistemas agrarios. Agricultura y Sociedad N° 15. Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura y Pesca. España. 113 p.
- PIMENTEL D., STACHOW U., TAKACS D.A., BRUBAKER H.W., DUMAS A.R., MEANEY J.J, O'NEIL J.A.S., ONSI D.E., CORZILIUS D.B. 1992. Conserving Biological Diversity in Agricultural/Forestry Systems. BioScience, 42: 354-362
- PIMENTEL, D. 1980. Handbook of energy utilization in agriculture. CRC Press. Boca Ratón, USA.
- PIMENTEL, D.; BERARDE, A; FAST, S. 1983. Energy efficiency of farming systems: Organic and Convencional Agriculture. Agriculture, ecosystems and environment (9): 359-72.
- PIMENTEL, D.; CULLINEY, T.; BUTTLER, I. 1989. Low input sustainable agriculture using ecological managements practices. Agriculture, ecosystems and environment 27(2): 3 – 24.

- PIMENTEL, D. 1993. Economics and energetic of organic and conventional farming". Journal of Agricultural and Environmental Ethics. 6(1): 45-57.
- PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA; MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2004. Decreto No 32039 para la Producción Nacional en Ambientes Protegidos. San José, Costa Rica. 4 p.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA). 1998. Una empresa con futuro: el desarrollo económico y las tecnologías ecológicas. The Regency Corporation Limited. Londres. 272 p.
- PROGRAMA NACIONAL DE PRODUCCION EN MABIENTES PROTEGIDOS (PRO-NAP) 2009. Censo Nacional de Agricultura protegida 2008-2009. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.
- PROGRAMA ESTADO DE LA NACION (2009). Decimoquinto Informe de la Nación en Desarrollo Sostenible. Programa de Estado de la Nación. San José, Costa Rica.
- PROGRAMA ESTADO DE LA NACION (2010). Decimosexto Informe de la Nación en Desarrollo Sostenible. Programa de Estado de la Nación. San José, Costa Rica.
- PUNTÍ, A., 1982, Balance energético y costo ecológico de la agricultura española. Agricultura y Sociedad, Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura. España.
- RAPACCIOLI, G.; FERNANDEZ, N.; AGUIRRE, C. 2002. Efecto de la fertilización nitrogenada y densidad de siembra en lechuga (*Lactusa sativa*) en suelos arenosos de Corrientes. Ciencias Agrarias (Argentina). 2 (1): 10-14
- RICO, E. 2005. Tecnología Nacional Universitaria en Invernaderos. Extraído el 28 de marzo del 2010 del sitio web del Centro Universitario Cerro de las Campanas: <http://www.uaq.mx/ingenieria/especialidad/index.html>
- ROBLES, J. 1985. Como se cultiva en invernadero. Ediciones De Vecchi. Barcelona. 183p.
- ROSELLÓ, J.; DOMÍNGUEZ, A.; GASCÓN; A. 2005. Comparación del balance energético y de los costos económicos en cítricos y hortalizas valencianas en cultivo ecológico y convencional. Estación Experimental Agraria de Carcaixent. España. Consultado el 1 de junio del 2008 en [www.uib.es/catedra\\_iberamericana/publicaciones/seae/mesa4/citri.html](http://www.uib.es/catedra_iberamericana/publicaciones/seae/mesa4/citri.html).
- SERRANO, Z. 1994. Construcción de invernaderos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 444p.
- SMALDONI, R.; SANGIACOMO, M.; GARBI, M. 2002. Análisis de costos de producción y caracterización de los productores de lechuga (*lactuca sativa*) a campo en el partido de Luján. Ponencia presentada en el XXV Congreso Argentino de Horticultura. Buenos Aires. Argentina.
- SOUZA, J.; CASALI, V.; SANTOS, R.; CECON, P. 2008. Balanço e análise da sustentabilidade energética na produção orgânica de hortaliças. Horticultura Brasileira 26 (4): 433-440. Consultado el 20 de mayo de 2011 en <http://www.scielo.br/pdf/hb/v26n4/v26n4a03.pdf>

VIGLIZZO, E. 1996. La sustentabilidad en la agricultura ¿cómo evaluar y medir?. Agricultura Integrada. INTA, Argentina 26(1): 1-15

VOOGT, W. 1999. Water and mineral balances of organically grown vegetables under glass. Acta Horticulturae, 50(6): 51-57.

## **COMUNICACIONES PERSONALES**

Ing. Luis Fernando Campos, comunicación personal, febrero 5, 2009. Profesor Escuela de Administración Agropecuaria. Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

# **ANEXOS**

# ANEXO 1

## Hojas de registro de datos

<b>HOJA DE REGISTRO</b>			
<b>CONTROL DE FERTILIZACIÓN</b>			
<b>CULTIVO: LECHUGA</b>			
Proyecto: Utilización balance energético en la evaluación de sostenibilidad ecológica de lechuga. Investigador: Marianela Alfaro S.			
Ensayo Invernadero / campo	1	2	3
Fecha de aplicación	Fórmula	Cantidad (g)	Nombre persona que realiza aplicación

**HOJA DE REGISTRO****CONTROL DE APLICACIÓN DE FITOSANITARIOS****CULTIVO: LECHUGA**

Proyecto: Utilización balance energético en la evaluación de sostenibilidad ecológica de lechuga.  
Investigador: Marianela Alfaro S.

Ensayo: Invernadero / campo	1	2	3
Fecha de aplicación	Producto	Cantidad (g, ml)	Nombre persona que realiza aplicación

<b>HOJA DE REGISTRO</b>				
<b>CONTROL DE MANO DE OBRA Y USO HERRAMIENTAS AGRICOLAS</b>				
<b>CULTIVO: LECHUGA</b>				
Proyecto: Utilización balance energético en la evaluación de sostenibilidad ecológica de lechuga. Investigador: Marianela Alfaro S.				
Ensayo: Invernadero / campo	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Labor realizada</b>	<b>Herramienta utilizada</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Nombre persona que realiza aplicación</b>

<b>HOJA DE REGISTRO</b>			
<b>CONTROL DE APLICACIÓN DE RIEGO</b>			
<b>CULTIVO: LECHUGA</b>			
Proyecto: Utilización balance energético en la evaluación de sostenibilidad ecológica de lechuga. Investigador: Marianela Alfaro S.			
Ensayo: Invernadero / campo	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Fecha</b>	<b>Hora encendido bomba</b>	<b>Hora apagado bomba</b>	<b>Nombre persona que realiza labor</b>



<b>HOJA DE REGISTRO</b>							
<b>PESO DE LECHUGAS EN LA COSECHA</b>							
Proyecto: Utilización balance energético en la evaluación de sostenibilidad ecológica de lechuga. Investigador: Marianela Alfaro S.							
Invernadero / campo		Número Ensayo: 1      2      3					
FECHA:							
#	Peso (g)	#	Peso (g)	#	Peso (g)	#	Peso (g)
1		21		41		61	
2		22		42		62	
3		23		43		63	
4		24		44		64	
5		25		45		65	
6		26		46		66	
7		27		47		67	
8		28		48		68	
9		29		49		69	
10		30		50		70	
11		31		51		71	
12		32		52		72	
13		33		53		73	
14		34		54		74	
15		35		55		75	
16		36		56		76	
17		37		57		77	
18		38		58		78	
19		39		59		79	
20		40		60		80	

<b>HOJA DE REGISTRO</b>							
<b>PESO DE LECHUGAS EN LA COSECHA</b>							
Proyecto: Utilización balance energético en la evaluación de sostenibilidad ecológica de lechuga. Investigador: Marianela Alfaro S.							
Invernadero / campo			Número Ensayo: 1      2      3				
FECHA:							
#	Peso (g)	#	Peso (g)	#	Peso (g)	#	Peso (g)
81		101		121			
82		102		122			
83		103		123			
84		104		124			
85		105		125			
86		106		126			
87		107		127			
88		108		128			
89		109		129			
90		110		130			
91		111		131			
92		112		132			
93		113					
94		114					
95		115					
96		116					
97		117					
98		118					
99		119					
110		120					

## ANEXO 2

### Peso fresco de lechugas, productividad, energía de entrada y salida, PNE e IEE para los sistemas productivos

#### Producción en invernadero, Prueba 1.

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m <sup>2</sup> )	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
1	375,4	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
2	386,4	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
3	302,7	4,84	3,36	0,23	-3,13	0,07
4	324,8	5,20	3,36	0,24	-3,12	0,07
5	379,5	6,07	3,36	0,29	-3,07	0,09
6	375,7	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
7	384,7	6,16	3,36	0,29	-3,07	0,09
8	264,8	4,24	3,36	0,20	-3,16	0,06
9	365,9	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
10	348,5	5,58	3,36	0,26	-3,10	0,08
11	297,4	4,76	3,36	0,22	-3,14	0,07
12	369,3	5,91	3,36	0,28	-3,08	0,08
13	375,7	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
14	429,5	6,87	3,36	0,32	-3,04	0,10
15	428,7	6,86	3,36	0,32	-3,04	0,10
16	465,3	7,44	3,36	0,35	-3,01	0,10
17	346,7	5,55	3,36	0,26	-3,10	0,08
18	385,4	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
19	438,5	7,02	3,36	0,33	-3,03	0,10
20	387,6	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09
21	318,5	5,10	3,36	0,24	-3,12	0,07
22	374,5	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
23	364,5	5,83	3,36	0,27	-3,09	0,08
24	284,6	4,55	3,36	0,21	-3,15	0,06
25	358,5	5,74	3,36	0,27	-3,09	0,08
26	375,9	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
27	287,5	4,60	3,36	0,22	-3,14	0,06
28	329,5	5,27	3,36	0,25	-3,11	0,07
29	393,5	6,30	3,36	0,30	-3,06	0,09
30	295,7	4,73	3,36	0,22	-3,14	0,07

### Producción en invernadero, Prueba 1, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
31	375,7	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
32	317,4	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
33	367,4	5,88	3,36	0,28	-3,08	0,08
34	344,8	5,52	3,36	0,26	-3,10	0,08
35	314,3	5,03	3,36	0,24	-3,12	0,07
36	374,6	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
37	347,5	5,56	3,36	0,26	-3,10	0,08
38	346,5	5,54	3,36	0,26	-3,10	0,08
39	333,4	5,33	3,36	0,25	-3,11	0,07
40	327,4	5,24	3,36	0,25	-3,11	0,07
41	348,5	5,58	3,36	0,26	-3,10	0,08
42	374,5	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
43	357,9	5,73	3,36	0,27	-3,09	0,08
44	328,4	5,25	3,36	0,25	-3,11	0,07
45	346,5	5,54	3,36	0,26	-3,10	0,08
46	365,4	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
47	342,4	5,48	3,36	0,26	-3,10	0,08
48	320,5	5,13	3,36	0,24	-3,12	0,07
49	327,5	5,24	3,36	0,25	-3,11	0,07
50	385,5	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
51	378,6	6,06	3,36	0,29	-3,07	0,08
52	375,6	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
53	386,4	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
54	385,6	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
55	384,3	6,15	3,36	0,29	-3,07	0,09
56	382,1	6,11	3,36	0,29	-3,07	0,09
57	336,7	5,39	3,36	0,25	-3,11	0,08
58	349,5	5,59	3,36	0,26	-3,10	0,08
59	329,7	5,28	3,36	0,25	-3,11	0,07
60	318,4	5,09	3,36	0,24	-3,12	0,07
61	299,6	4,79	3,36	0,23	-3,13	0,07
62	347,3	5,56	3,36	0,26	-3,10	0,08
63	317,6	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
64	309,5	4,95	3,36	0,23	-3,13	0,07
65	374,3	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08

### Producción en invernadero, Prueba 1, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m <sup>2</sup> )	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
66	375,6	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
67	375,2	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
68	364,7	5,84	3,36	0,27	-3,09	0,08
69	364,5	5,83	3,36	0,27	-3,09	0,08
70	417,4	6,68	3,36	0,31	-3,05	0,09
71	410,6	6,57	3,36	0,31	-3,05	0,09
72	479,5	7,67	3,36	0,36	-3,00	0,11
73	490,5	7,85	3,36	0,37	-2,99	0,11
74	426,9	6,83	3,36	0,32	-3,04	0,10
75	329,6	5,27	3,36	0,25	-3,11	0,07
76	365,6	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
77	357,4	5,72	3,36	0,27	-3,09	0,08
78	484,6	7,75	3,36	0,36	-3,00	0,11
79	398,6	6,38	3,36	0,30	-3,06	0,09
80	475,3	7,60	3,36	0,36	-3,00	0,11
81	472,3	7,56	3,36	0,36	-3,00	0,11
82	347,3	5,56	3,36	0,26	-3,10	0,08
83	438,5	7,02	3,36	0,33	-3,03	0,10
84	373,5	5,98	3,36	0,28	-3,08	0,08
85	375,4	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
86	364,9	5,84	3,36	0,27	-3,09	0,08
87	326,7	5,23	3,36	0,25	-3,11	0,07
88	427,5	6,84	3,36	0,32	-3,04	0,10
89	395,7	6,33	3,36	0,30	-3,06	0,09
90	385,4	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
91	374,3	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
92	318,5	5,10	3,36	0,24	-3,12	0,07
93	288,5	4,62	3,36	0,22	-3,14	0,06
94	334,6	5,35	3,36	0,25	-3,11	0,08
95	374,5	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
96	319,6	5,11	3,36	0,24	-3,12	0,07
97	378,5	6,06	3,36	0,29	-3,07	0,08
98	429,5	6,87	3,36	0,32	-3,04	0,10
99	478,5	7,66	3,36	0,36	-3,00	0,11
100	484,5	7,75	3,36	0,36	-3,00	0,11

**Producción en Invernadero, Prueba 1, continuación**

<b>#</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Productividad (Kg/m2)</b>	<b>Energía entrada (MJ)</b>	<b>Energía Salida (MJ)</b>	<b>Energía neta (MJ)</b>	<b>Eficiencia energética</b>
<b>101</b>	428,5	6,86	3,36	0,32	-3,04	0,10
<b>102</b>	435,4	6,97	3,36	0,33	-3,03	0,10
<b>103</b>	409,5	6,55	3,36	0,31	-3,05	0,09
<b>104</b>	397,5	6,36	3,36	0,30	-3,06	0,09
<b>105</b>	375,7	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>106</b>	367,6	5,88	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>107</b>	275,9	4,41	3,36	0,21	-3,15	0,06
<b>108</b>	373,7	5,98	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>109</b>	374,9	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>110</b>	338,5	5,42	3,36	0,25	-3,11	0,08
<b>111</b>	364,5	5,83	3,36	0,27	-3,09	0,08
<b>112</b>	365,8	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>113</b>	364,5	5,83	3,36	0,27	-3,09	0,08
<b>114</b>	364,6	5,83	3,36	0,27	-3,09	0,08
<b>115</b>	374,6	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>116</b>	358,5	5,74	3,36	0,27	-3,09	0,08
<b>117</b>	329,6	5,27	3,36	0,25	-3,11	0,07
<b>118</b>	368,5	5,90	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>119</b>	376,9	6,03	3,36	0,28	-3,08	0,08
<b>120</b>	378,5	6,06	3,36	0,29	-3,07	0,08
<b>121</b>	406,7	6,51	3,36	0,31	-3,05	0,09
<b>122</b>	433,5	6,94	3,36	0,33	-3,03	0,10
<b>123</b>	428,6	6,86	3,36	0,32	-3,04	0,10
<b>124</b>	463,5	7,42	3,36	0,35	-3,01	0,10
<b>125</b>	406,3	6,50	3,36	0,31	-3,05	0,09
<b>126</b>	397,4	6,36	3,36	0,30	-3,06	0,09
<b>127</b>	437,4	7,00	3,36	0,33	-3,03	0,10
<b>128</b>	396,7	6,35	3,36	0,30	-3,06	0,09
<b>129</b>	398,5	6,38	3,36	0,30	-3,06	0,09
<b>130</b>	385,4	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
<b>131</b>	399,6	6,39	3,36	0,30	-3,06	0,09
<b>132</b>	387,5	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09

### Producción en Campo abierto, Prueba 1

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
1	264,8	4,24	0,86	0,20	-0,66	0,23
2	273,9	4,38	0,86	0,21	-0,66	0,24
3	286,7	4,59	0,86	0,22	-0,65	0,25
4	299,4	4,79	0,86	0,23	-0,64	0,26
5	270,6	4,33	0,86	0,20	-0,66	0,24
6	287,2	4,60	0,86	0,22	-0,65	0,25
7	269,8	4,32	0,86	0,20	-0,66	0,24
8	250,6	4,01	0,86	0,19	-0,68	0,22
9	314,6	5,03	0,86	0,24	-0,63	0,27
10	281,5	4,50	0,86	0,21	-0,65	0,25
11	253,8	4,06	0,86	0,19	-0,67	0,22
12	316,7	5,07	0,86	0,24	-0,63	0,28
13	274,5	4,39	0,86	0,21	-0,66	0,24
14	290,7	4,65	0,86	0,22	-0,65	0,25
15	265,1	4,24	0,86	0,20	-0,66	0,23
16	280,3	4,48	0,86	0,21	-0,65	0,24
17	290,2	4,64	0,86	0,22	-0,65	0,25
18	278,4	4,45	0,86	0,21	-0,65	0,24
19	264,2	4,23	0,86	0,20	-0,67	0,23
20	259,5	4,15	0,86	0,20	-0,67	0,23
21	268,5	4,30	0,86	0,20	-0,66	0,23
22	292,2	4,68	0,86	0,22	-0,64	0,25
23	327,1	5,23	0,86	0,25	-0,62	0,29
24	290,4	4,65	0,86	0,22	-0,65	0,25
25	254,7	4,08	0,86	0,19	-0,67	0,22
26	277,4	4,44	0,86	0,21	-0,66	0,24
27	293,2	4,69	0,86	0,22	-0,64	0,26
28	335,6	5,37	0,86	0,25	-0,61	0,29
29	352,3	5,64	0,86	0,27	-0,60	0,31
30	304,6	4,87	0,86	0,23	-0,63	0,27
31	280,2	4,48	0,86	0,21	-0,65	0,24
32	278,6	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
33	310,9	4,97	0,86	0,23	-0,63	0,27
34	262,6	4,20	0,86	0,20	-0,67	0,23
35	281,2	4,50	0,86	0,21	-0,65	0,25

**Producción en Campo abierto, Prueba 1, continuación**

<b>#</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Productividad (Kg/m2)</b>	<b>Energía entrada (MJ)</b>	<b>Energía Salida (MJ)</b>	<b>Energía neta (MJ)</b>	<b>Eficiencia energética</b>
<b>36</b>	290,2	4,64	0,86	0,22	-0,65	0,25
<b>37</b>	230,5	3,69	0,86	0,17	-0,69	0,20
<b>38</b>	254,7	4,08	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>39</b>	295,2	4,72	0,86	0,22	-0,64	0,26
<b>40</b>	254,8	4,08	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>41</b>	267,4	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
<b>42</b>	311,6	4,99	0,86	0,23	-0,63	0,27
<b>43</b>	314,8	5,04	0,86	0,24	-0,63	0,27
<b>44</b>	290,1	4,64	0,86	0,22	-0,65	0,25
<b>45</b>	335,7	5,37	0,86	0,25	-0,61	0,29
<b>46</b>	308,5	4,94	0,86	0,23	-0,63	0,27
<b>47</b>	316,7	5,07	0,86	0,24	-0,63	0,28
<b>48</b>	325,6	5,21	0,86	0,25	-0,62	0,28
<b>49</b>	308,3	4,93	0,86	0,23	-0,63	0,27
<b>50</b>	249,1	3,99	0,86	0,19	-0,68	0,22
<b>51</b>	299,3	4,79	0,86	0,23	-0,64	0,26
<b>52</b>	310,5	4,97	0,86	0,23	-0,63	0,27
<b>53</b>	286,2	4,58	0,86	0,22	-0,65	0,25
<b>54</b>	302,6	4,84	0,86	0,23	-0,64	0,26
<b>55</b>	364,7	5,84	0,86	0,27	-0,59	0,32
<b>56</b>	252,3	4,04	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>57</b>	352,7	5,64	0,86	0,27	-0,60	0,31
<b>58</b>	277,7	4,44	0,86	0,21	-0,65	0,24
<b>59</b>	251,9	4,03	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>60</b>	295,2	4,72	0,86	0,22	-0,64	0,26
<b>61</b>	284,3	4,55	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>62</b>	281,5	4,50	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>63</b>	352,8	5,64	0,86	0,27	-0,60	0,31
<b>64</b>	280,5	4,49	0,86	0,21	-0,65	0,24
<b>65</b>	345,2	5,52	0,86	0,26	-0,60	0,30
<b>66</b>	275,4	4,41	0,86	0,21	-0,66	0,24
<b>67</b>	287,2	4,60	0,86	0,22	-0,65	0,25
<b>68</b>	248,7	3,98	0,86	0,19	-0,68	0,22
<b>69</b>	312,6	5,00	0,86	0,24	-0,63	0,27
<b>70</b>	273,7	4,38	0,86	0,21	-0,66	0,24



### Producción en Campo abierto, Prueba 1, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
71	225,5	3,61	0,86	0,17	-0,69	0,20
72	258,9	4,14	0,86	0,19	-0,67	0,23
73	286,1	4,58	0,86	0,22	-0,65	0,25
74	316,6	5,07	0,86	0,24	-0,63	0,28
75	293,2	4,69	0,86	0,22	-0,64	0,26
76	304,7	4,88	0,86	0,23	-0,63	0,27
77	310,3	4,96	0,86	0,23	-0,63	0,27
78	295,1	4,72	0,86	0,22	-0,64	0,26
79	291,4	4,66	0,86	0,22	-0,64	0,25
80	328,6	5,26	0,86	0,25	-0,62	0,29
81	298,7	4,78	0,86	0,22	-0,64	0,26
82	314,5	5,03	0,86	0,24	-0,63	0,27
83	312,5	5,00	0,86	0,24	-0,63	0,27
84	321,5	5,14	0,86	0,24	-0,62	0,28
85	290,7	4,65	0,86	0,22	-0,65	0,25
86	278,7	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
87	286,2	4,58	0,86	0,22	-0,65	0,25
88	246,5	3,94	0,86	0,19	-0,68	0,21
89	295,1	4,72	0,86	0,22	-0,64	0,26
90	307,6	4,92	0,86	0,23	-0,63	0,27
91	285,6	4,57	0,86	0,22	-0,65	0,25
92	272,4	4,36	0,86	0,21	-0,66	0,24
93	256,8	4,11	0,86	0,19	-0,67	0,22
94	297,4	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
95	276,1	4,42	0,86	0,21	-0,66	0,24
96	290,4	4,65	0,86	0,22	-0,65	0,25
97	325,7	5,21	0,86	0,25	-0,62	0,28
98	258,4	4,13	0,86	0,19	-0,67	0,23
99	286,1	4,58	0,86	0,22	-0,65	0,25
100	316,5	5,06	0,86	0,24	-0,63	0,28

### Producción en Campo abierto, Prueba 1, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
101	293,7	4,70	0,86	0,22	-0,64	0,26
102	295,2	4,72	0,86	0,22	-0,64	0,26
103	291,7	4,67	0,86	0,22	-0,64	0,25
104	328,9	5,26	0,86	0,25	-0,62	0,29
105	292,6	4,68	0,86	0,22	-0,64	0,26
106	283,3	4,53	0,86	0,21	-0,65	0,25
107	314,5	5,03	0,86	0,24	-0,63	0,27
108	264,2	4,23	0,86	0,20	-0,67	0,23
109	269,5	4,31	0,86	0,20	-0,66	0,23
110	295,5	4,73	0,86	0,22	-0,64	0,26
111	298,3	4,77	0,86	0,22	-0,64	0,26
112	339,6	5,43	0,86	0,26	-0,61	0,30
113	342,7	5,48	0,86	0,26	-0,61	0,30
114	255,7	4,09	0,86	0,19	-0,67	0,22
115	268,5	4,30	0,86	0,20	-0,66	0,23
116	243,3	3,89	0,86	0,18	-0,68	0,21
117	245,8	3,93	0,86	0,19	-0,68	0,21
118	267,8	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
119	253,5	4,06	0,86	0,19	-0,67	0,22
120	312,8	5,00	0,86	0,24	-0,63	0,27
121	268,7	4,30	0,86	0,20	-0,66	0,23
122	298,2	4,77	0,86	0,22	-0,64	0,26
123	286,7	4,59	0,86	0,22	-0,65	0,25
124	257,4	4,12	0,86	0,19	-0,67	0,22
125	285,8	4,57	0,86	0,22	-0,65	0,25
126	273,7	4,38	0,86	0,21	-0,66	0,24
127	267,2	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
128	293,1	4,69	0,86	0,22	-0,64	0,26
129	274,5	4,39	0,86	0,21	-0,66	0,24
130	269,3	4,31	0,86	0,20	-0,66	0,23
131	258,2	4,13	0,86	0,19	-0,67	0,23
132	295,4	4,73	0,86	0,22	-0,64	0,26

## Producción en Invernadero, Prueba 2

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
1	375,3	5,52	3,36	0,26	-3,10	0,08
2	398,6	6,38	3,36	0,30	-3,06	0,09
3	475,9	7,61	3,36	0,36	-3,00	0,11
4	413,2	6,61	3,36	0,31	-3,05	0,09
5	437,9	6,53	3,36	0,31	-3,05	0,09
6	395,6	5,37	3,36	0,25	-3,11	0,08
7	346,2	5,54	3,36	0,26	-3,10	0,08
8	371,2	5,94	3,36	0,28	-3,08	0,08
9	399,5	6,39	3,36	0,30	-3,06	0,09
10	429,1	6,87	3,36	0,32	-3,04	0,10
11	456,9	7,31	3,36	0,34	-3,02	0,10
12	371,5	5,94	3,36	0,28	-3,08	0,08
13	387,4	4,60	3,36	0,22	-3,14	0,06
14	363,8	5,18	3,36	0,24	-3,12	0,07
15	354,8	5,68	3,36	0,27	-3,09	0,08
16	384,2	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
17	394,7	5,04	3,36	0,24	-3,12	0,07
18	386,9	4,91	3,36	0,23	-3,13	0,07
19	452,5	7,24	3,36	0,34	-3,02	0,10
20	374,7	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
21	391,4	4,98	3,36	0,23	-3,13	0,07
22	375,9	5,05	3,36	0,24	-3,12	0,07
23	287,6	4,60	3,36	0,22	-3,14	0,06
24	373,2	5,97	3,36	0,28	-3,08	0,08
25	357,4	5,72	3,36	0,27	-3,09	0,08
26	376,9	6,03	3,36	0,28	-3,08	0,08
27	386,5	5,06	3,36	0,24	-3,12	0,07
28	402,8	4,84	3,36	0,23	-3,13	0,07
29	393,8	4,70	3,36	0,22	-3,14	0,07
30	378,4	4,93	3,36	0,23	-3,13	0,07
31	399,3	4,79	3,36	0,23	-3,13	0,07
32	392,1	4,83	3,36	0,23	-3,13	0,07
33	349,8	5,60	3,36	0,26	-3,10	0,08
34	346,2	5,54	3,36	0,26	-3,10	0,08
35	412,3	5,00	3,36	0,24	-3,12	0,07

### Producción en Invernadero, Prueba 2, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m <sup>2</sup> )	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
36	432,7	6,92	3,36	0,33	-3,03	0,10
37	329,7	5,28	3,36	0,25	-3,11	0,07
38	342,2	5,48	3,36	0,26	-3,10	0,08
39	374,8	5,04	3,36	0,24	-3,12	0,07
40	329,7	5,28	3,36	0,25	-3,11	0,07
41	339,3	5,43	3,36	0,26	-3,10	0,08
42	395,7	6,33	3,36	0,30	-3,06	0,09
43	352,4	5,64	3,36	0,27	-3,09	0,08
44	312,9	5,01	3,36	0,24	-3,12	0,07
45	334,1	5,35	3,36	0,25	-3,11	0,07
46	398,5	4,78	3,36	0,22	-3,14	0,07
47	384,9	5,04	3,36	0,24	-3,12	0,07
48	379,2	4,95	3,36	0,23	-3,13	0,07
49	326,6	5,23	3,36	0,25	-3,11	0,07
50	375,3	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
51	375,2	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
52	387,5	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09
53	387,3	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09
54	378,4	4,45	3,36	0,21	-3,15	0,06
55	344,4	5,51	3,36	0,26	-3,10	0,08
56	369,5	5,91	3,36	0,28	-3,08	0,08
57	352,4	5,64	3,36	0,27	-3,09	0,08
58	351,3	5,62	3,36	0,26	-3,10	0,08
59	321,3	5,14	3,36	0,24	-3,12	0,07
60	395,1	6,32	3,36	0,30	-3,06	0,09
61	342,7	5,48	3,36	0,26	-3,10	0,08
62	326,4	5,22	3,36	0,25	-3,11	0,07
63	383,7	6,14	3,36	0,29	-3,07	0,09
64	362,6	5,80	3,36	0,27	-3,09	0,08
65	370,9	5,93	3,36	0,28	-3,08	0,08
66	487,4	7,80	3,36	0,37	-2,99	0,11
67	452,2	7,24	3,36	0,34	-3,02	0,10
68	412,7	6,60	3,36	0,31	-3,05	0,09
69	386,4	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
70	415,6	6,65	3,36	0,31	-3,05	0,09

### Producción en Invernadero, Prueba 2, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
71	403,1	6,45	3,36	0,30	-3,06	0,09
72	376,5	6,02	3,36	0,28	-3,08	0,08
73	352,2	5,64	3,36	0,27	-3,09	0,08
74	325,3	5,20	3,36	0,24	-3,12	0,07
75	341,7	5,47	3,36	0,26	-3,10	0,08
76	433,5	5,34	3,36	0,25	-3,11	0,07
77	351,1	5,62	3,36	0,26	-3,10	0,08
78	401,2	6,42	3,36	0,30	-3,06	0,09
79	386,4	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
80	346,4	5,54	3,36	0,26	-3,10	0,08
81	355,8	5,69	3,36	0,27	-3,09	0,08
82	316,8	5,07	3,36	0,24	-3,12	0,07
83	327,5	5,24	3,36	0,25	-3,11	0,07
84	296,4	4,74	3,36	0,22	-3,14	0,07
85	342,3	5,48	3,36	0,26	-3,10	0,08
86	437,6	7,00	3,36	0,33	-3,03	0,10
87	385,1	6,16	3,36	0,29	-3,07	0,09
88	443,2	7,09	3,36	0,33	-3,03	0,10
89	412,6	6,60	3,36	0,31	-3,05	0,09
90	296,4	4,74	3,36	0,22	-3,14	0,07
91	367,5	5,88	3,36	0,28	-3,08	0,08
92	392,5	6,28	3,36	0,30	-3,06	0,09
93	357,4	5,72	3,36	0,27	-3,09	0,08
94	351,3	5,62	3,36	0,26	-3,10	0,08
95	387,5	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09
96	364,7	5,84	3,36	0,27	-3,09	0,08
97	312,5	5,00	3,36	0,24	-3,12	0,07
98	324,6	5,19	3,36	0,24	-3,12	0,07
99	372,5	5,96	3,36	0,28	-3,08	0,08
100	342,4	5,48	3,36	0,26	-3,10	0,08

### Producción en Invernadero, Prueba 2, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
101	381,4	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
102	335,3	5,07	3,36	0,24	-3,12	0,07
103	373,5	4,71	3,36	0,22	-3,14	0,07
104	326,7	5,07	3,36	0,24	-3,12	0,07
105	315,8	5,67	3,36	0,27	-3,09	0,08
106	365,4	5,80	3,36	0,27	-3,09	0,08
107	390,7	5,98	3,36	0,28	-3,08	0,08
108	317,3	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
109	354,7	5,52	3,36	0,26	-3,10	0,08
110	326,4	5,19	3,36	0,24	-3,12	0,07
111	294,6	5,78	3,36	0,27	-3,09	0,08
112	306,7	5,36	3,36	0,25	-3,11	0,08
113	396,4	4,86	3,36	0,23	-3,13	0,07
114	385,1	5,23	3,36	0,25	-3,11	0,07
115	405,7	5,05	3,36	0,24	-3,12	0,07
116	395,2	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
117	378,4	4,97	3,36	0,23	-3,13	0,07
118	456,3	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
119	417,5	5,68	3,36	0,27	-3,09	0,08
120	386,4	5,22	3,36	0,25	-3,11	0,07
121	398,6	4,71	3,36	0,22	-3,14	0,07
122	409,6	4,91	3,36	0,23	-3,13	0,07
123	381,4	6,34	3,36	0,30	-3,06	0,09
124	335,3	6,16	3,36	0,29	-3,07	0,09
125	373,5	6,49	3,36	0,31	-3,05	0,09
126	326,7	6,32	3,36	0,30	-3,06	0,09
127	315,8	6,05	3,36	0,28	-3,08	0,08
128	365,4	7,30	3,36	0,34	-3,02	0,10
129	390,7	6,68	3,36	0,31	-3,05	0,09
130	317,3	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
131	354,7	6,38	3,36	0,30	-3,06	0,09
132	326,4	6,55	3,36	0,31	-3,05	0,09

## Producción en Campo abierto, Prueba 2

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
1	284,5	4,55	0,86	0,21	-0,65	0,25
2	289,2	4,63	0,86	0,22	-0,64	0,25
3	312,5	5,00	0,86	0,24	-0,62	0,27
4	306,7	4,91	0,86	0,23	-0,63	0,27
5	269,2	4,31	0,86	0,20	-0,66	0,24
6	247,5	3,96	0,86	0,19	-0,67	0,22
7	279,2	4,47	0,86	0,21	-0,65	0,24
8	314,7	5,04	0,86	0,24	-0,62	0,28
9	327,2	5,24	0,86	0,25	-0,61	0,29
10	265,4	4,25	0,86	0,20	-0,66	0,23
11	315,2	5,04	0,86	0,24	-0,62	0,28
12	283,4	4,53	0,86	0,21	-0,65	0,25
13	345,3	5,52	0,86	0,26	-0,60	0,30
14	253,4	4,05	0,86	0,19	-0,67	0,22
15	285,2	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
16	293,2	4,69	0,86	0,22	-0,64	0,26
17	257,2	4,12	0,86	0,19	-0,67	0,23
18	276,5	4,42	0,86	0,21	-0,65	0,24
19	338,9	5,42	0,86	0,26	-0,60	0,30
20	287,2	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
21	285,4	4,57	0,86	0,21	-0,65	0,25
22	298,5	4,78	0,86	0,22	-0,64	0,26
23	278,7	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
24	296,5	4,74	0,86	0,22	-0,64	0,26
25	295,2	4,72	0,86	0,22	-0,64	0,26
26	275,5	4,41	0,86	0,21	-0,65	0,24
27	282,6	4,52	0,86	0,21	-0,65	0,25
28	249,6	3,99	0,86	0,19	-0,67	0,22
29	289,3	4,63	0,86	0,22	-0,64	0,25
30	315,2	5,04	0,86	0,24	-0,62	0,28
31	237,4	3,80	0,86	0,18	-0,68	0,21
32	327,6	5,24	0,86	0,25	-0,61	0,29
33	356,3	5,70	0,86	0,27	-0,59	0,31
34	296,4	4,74	0,86	0,22	-0,64	0,26
35	268,6	4,30	0,86	0,20	-0,66	0,24

**Producción en Campo abierto, Prueba 2, continuación**

<b>#</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Productividad (Kg/m2)</b>	<b>Energía entrada (MJ)</b>	<b>Energía Salida (MJ)</b>	<b>Energía neta (MJ)</b>	<b>Eficiencia energética</b>
36	296,3	4,74	0,86	0,22	-0,64	0,26
37	293,5	4,70	0,86	0,22	-0,64	0,26
38	286,6	4,59	0,86	0,22	-0,64	0,25
39	282,5	4,52	0,86	0,21	-0,65	0,25
40	279,2	4,47	0,86	0,21	-0,65	0,24
41	294,4	4,71	0,86	0,22	-0,64	0,26
42	297,6	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
43	257,9	4,13	0,86	0,19	-0,67	0,23
44	259,4	4,15	0,86	0,20	-0,66	0,23
45	287,6	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
46	285,6	4,57	0,86	0,22	-0,64	0,25
47	294,3	4,71	0,86	0,22	-0,64	0,26
48	312,2	5,00	0,86	0,24	-0,62	0,27
49	287,5	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
50	296,3	4,74	0,86	0,22	-0,64	0,26
51	273,4	4,37	0,86	0,21	-0,65	0,24
52	346,7	5,55	0,86	0,26	-0,60	0,30
53	333,5	5,34	0,86	0,25	-0,61	0,29
54	295,7	4,73	0,86	0,22	-0,64	0,26
55	258,6	4,14	0,86	0,19	-0,67	0,23
56	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
57	260,5	4,17	0,86	0,20	-0,66	0,23
58	284,7	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
59	264,6	4,23	0,86	0,20	-0,66	0,23
60	274,3	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
61	253,2	4,05	0,86	0,19	-0,67	0,22
62	255,6	4,09	0,86	0,19	-0,67	0,22
63	260,5	4,17	0,86	0,20	-0,66	0,23
64	269,4	4,31	0,86	0,20	-0,66	0,24
65	262,3	4,20	0,86	0,20	-0,66	0,23
66	271,3	4,34	0,86	0,20	-0,66	0,24
67	259,4	4,15	0,86	0,20	-0,66	0,23
68	274,2	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
69	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
70	290,5	4,65	0,86	0,22	-0,64	0,25



### Producción en Campo abierto, Prueba 2, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
71	275,5	4,41	0,86	0,21	-0,65	0,24
72	268,7	4,30	0,86	0,20	-0,66	0,24
73	344,7	5,52	0,86	0,26	-0,60	0,30
74	276,4	4,42	0,86	0,21	-0,65	0,24
75	252,1	4,03	0,86	0,19	-0,67	0,22
76	267,4	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
77	253,7	4,06	0,86	0,19	-0,67	0,22
78	271,8	4,35	0,86	0,20	-0,66	0,24
79	278,5	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
80	265,8	4,25	0,86	0,20	-0,66	0,23
81	257,4	4,12	0,86	0,19	-0,67	0,23
82	257,3	4,12	0,86	0,19	-0,67	0,23
83	251,2	4,02	0,86	0,19	-0,67	0,22
84	248,5	3,98	0,86	0,19	-0,67	0,22
85	283,6	4,54	0,86	0,21	-0,65	0,25
86	274,5	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
87	263,4	4,21	0,86	0,20	-0,66	0,23
88	251,4	4,02	0,86	0,19	-0,67	0,22
89	284,3	4,55	0,86	0,21	-0,65	0,25
90	294,6	4,71	0,86	0,22	-0,64	0,26
91	346,5	5,54	0,86	0,26	-0,60	0,30
92	248,5	3,98	0,86	0,19	-0,67	0,22
93	274,5	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
94	244,6	3,91	0,86	0,18	-0,68	0,21
95	263,5	4,22	0,86	0,20	-0,66	0,23
96	254,7	4,08	0,86	0,19	-0,67	0,22
97	267,9	4,29	0,86	0,20	-0,66	0,23
98	248,5	3,98	0,86	0,19	-0,67	0,22
99	266,9	4,27	0,86	0,20	-0,66	0,23
100	257,3	4,12	0,86	0,19	-0,67	0,23

**Producción en Campo abierto, Prueba 2, continuación**

<b>#</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Productividad (Kg/m2)</b>	<b>Energía entrada (MJ)</b>	<b>Energía Salida (MJ)</b>	<b>Energía neta (MJ)</b>	<b>Eficiencia energética</b>
<b>101</b>	285,3	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>102</b>	263,7	4,22	0,86	0,20	-0,66	0,23
<b>103</b>	304,6	4,87	0,86	0,23	-0,63	0,27
<b>104</b>	275,6	4,41	0,86	0,21	-0,65	0,24
<b>105</b>	312,5	5,00	0,86	0,24	-0,62	0,27
<b>106</b>	297,4	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
<b>107</b>	275,4	4,41	0,86	0,21	-0,65	0,24
<b>108</b>	285,2	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>109</b>	249,5	3,99	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>110</b>	284,7	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>111</b>	264,9	4,24	0,86	0,20	-0,66	0,23
<b>112</b>	249,5	3,99	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>113</b>	341,6	5,47	0,86	0,26	-0,60	0,30
<b>114</b>	309,5	4,95	0,86	0,23	-0,63	0,27
<b>115</b>	296,3	4,74	0,86	0,22	-0,64	0,26
<b>116</b>	284,3	4,55	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>117</b>	343,5	5,50	0,86	0,26	-0,60	0,30
<b>118</b>	357,9	5,73	0,86	0,27	-0,59	0,31
<b>119</b>	367,4	5,88	0,86	0,28	-0,58	0,32
<b>120</b>	247,8	3,96	0,86	0,19	-0,67	0,22
<b>121</b>	315,6	5,05	0,86	0,24	-0,62	0,28
<b>122</b>	298,6	4,78	0,86	0,22	-0,64	0,26
<b>123</b>	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
<b>124</b>	275,3	4,40	0,86	0,21	-0,65	0,24
<b>125</b>	271,6	4,35	0,86	0,20	-0,66	0,24
<b>126</b>	265,4	4,25	0,86	0,20	-0,66	0,23
<b>127</b>	284,6	4,55	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>128</b>	284,7	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>129</b>	265,8	4,25	0,86	0,20	-0,66	0,23
<b>130</b>	285,8	4,57	0,86	0,22	-0,64	0,25
<b>131</b>	284,7	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
<b>132</b>	258,5	4,14	0,86	0,19	-0,67	0,23

### Producción en Invernadero, Prueba 3

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
1	400,6	6,41	3,36	0,30	-3,06	0,09
2	349,6	5,59	3,36	0,26	-3,10	0,08
3	324,7	5,20	3,36	0,24	-3,12	0,07
4	349,7	5,60	3,36	0,26	-3,10	0,08
5	340,6	5,45	3,36	0,26	-3,10	0,08
6	385,7	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
7	353,6	5,66	3,36	0,27	-3,09	0,08
8	385,3	6,16	3,36	0,29	-3,07	0,09
9	371,4	5,94	3,36	0,28	-3,08	0,08
10	328,6	5,26	3,36	0,25	-3,11	0,07
11	302,6	4,84	3,36	0,23	-3,13	0,07
12	384,5	6,15	3,36	0,29	-3,07	0,09
13	389,6	6,23	3,36	0,29	-3,07	0,09
14	375,4	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
15	333,8	5,34	3,36	0,25	-3,11	0,07
16	384,7	6,16	3,36	0,29	-3,07	0,09
17	328,5	5,26	3,36	0,25	-3,11	0,07
18	306,8	4,91	3,36	0,23	-3,13	0,07
19	297,6	4,76	3,36	0,22	-3,14	0,07
20	367,5	5,88	3,36	0,28	-3,08	0,08
21	296,4	4,74	3,36	0,22	-3,14	0,07
22	286,4	4,58	3,36	0,22	-3,14	0,06
23	385,6	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
24	374,1	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
25	428,5	6,86	3,36	0,32	-3,04	0,10
26	475,6	7,61	3,36	0,36	-3,00	0,11
27	429,3	6,87	3,36	0,32	-3,04	0,10
28	405,7	6,49	3,36	0,31	-3,05	0,09
29	465,3	7,44	3,36	0,35	-3,01	0,10
30	374,6	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
31	365,8	5,85	3,36	0,28	-3,08	0,08
32	305,7	4,89	3,36	0,23	-3,13	0,07
33	308,6	4,94	3,36	0,23	-3,13	0,07
34	319,8	5,12	3,36	0,24	-3,12	0,07
35	358,5	5,74	3,36	0,27	-3,09	0,08

### Producción en Invernadero, Prueba 3, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
36	375,7	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
37	397,5	6,36	3,36	0,30	-3,06	0,09
38	286,7	4,59	3,36	0,22	-3,14	0,06
39	385,4	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
40	376,9	6,03	3,36	0,28	-3,08	0,08
41	399,6	6,39	3,36	0,30	-3,06	0,09
42	439,6	7,03	3,36	0,33	-3,03	0,10
43	463,5	7,42	3,36	0,35	-3,01	0,10
44	472,4	7,56	3,36	0,36	-3,00	0,11
45	379,5	6,07	3,36	0,29	-3,07	0,09
46	374,6	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
47	333,7	5,34	3,36	0,25	-3,11	0,07
48	384,2	6,15	3,36	0,29	-3,07	0,09
49	354,7	5,68	3,36	0,27	-3,09	0,08
50	474,6	7,59	3,36	0,36	-3,00	0,11
51	376,8	6,03	3,36	0,28	-3,08	0,08
52	396,5	6,34	3,36	0,30	-3,06	0,09
53	314,6	5,03	3,36	0,24	-3,12	0,07
54	398,2	6,37	3,36	0,30	-3,06	0,09
55	317,5	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
56	329,6	5,27	3,36	0,25	-3,11	0,07
57	338,5	5,42	3,36	0,25	-3,11	0,08
58	375,3	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
59	342,5	5,48	3,36	0,26	-3,10	0,08
60	375,2	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
61	368,9	5,90	3,36	0,28	-3,08	0,08
62	369,4	5,91	3,36	0,28	-3,08	0,08
63	338,6	5,42	3,36	0,26	-3,10	0,08
64	356,9	5,71	3,36	0,27	-3,09	0,08
65	367,5	5,88	3,36	0,28	-3,08	0,08
66	376,4	6,02	3,36	0,28	-3,08	0,08
67	375,4	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
68	428,6	6,86	3,36	0,32	-3,04	0,10
69	436,4	6,98	3,36	0,33	-3,03	0,10
70	375,6	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08

### Producción en Invernadero, Prueba 3, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m <sup>2</sup> )	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
71	386,4	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
72	329,7	5,28	3,36	0,25	-3,11	0,07
73	365,1	5,84	3,36	0,27	-3,09	0,08
74	327,4	5,24	3,36	0,25	-3,11	0,07
75	336,5	5,38	3,36	0,25	-3,11	0,08
76	345,3	5,52	3,36	0,26	-3,10	0,08
77	374,1	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
78	356,2	5,70	3,36	0,27	-3,09	0,08
79	374,5	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
80	317,4	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
81	304,3	4,87	3,36	0,23	-3,13	0,07
82	287,5	4,60	3,36	0,22	-3,14	0,06
83	308,5	4,94	3,36	0,23	-3,13	0,07
84	386,4	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
85	362,1	5,79	3,36	0,27	-3,09	0,08
86	383,5	6,14	3,36	0,29	-3,07	0,09
87	386,1	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
88	354,2	5,67	3,36	0,27	-3,09	0,08
89	374,5	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
90	375,3	6,00	3,36	0,28	-3,08	0,08
91	315,4	5,05	3,36	0,24	-3,12	0,07
92	326,4	5,22	3,36	0,25	-3,11	0,07
93	329,5	5,27	3,36	0,25	-3,11	0,07
94	345,3	5,52	3,36	0,26	-3,10	0,08
95	317,5	5,08	3,36	0,24	-3,12	0,07
96	382,1	6,11	3,36	0,29	-3,07	0,09
97	326,4	5,22	3,36	0,25	-3,11	0,07
98	384,2	6,15	3,36	0,29	-3,07	0,09
99	427,4	6,84	3,36	0,32	-3,04	0,10
100	375,8	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08

### Producción en Invernadero, Prueba 3, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
101	387,5	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09
102	386,5	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
103	428,7	6,86	3,36	0,32	-3,04	0,10
104	497,5	7,96	3,36	0,37	-2,99	0,11
105	326,5	5,22	3,36	0,25	-3,11	0,07
106	367,4	5,88	3,36	0,28	-3,08	0,08
107	385,7	6,17	3,36	0,29	-3,07	0,09
108	376,3	6,02	3,36	0,28	-3,08	0,08
109	374,6	5,99	3,36	0,28	-3,08	0,08
110	328,5	5,26	3,36	0,25	-3,11	0,07
111	457,3	7,32	3,36	0,34	-3,02	0,10
112	438,4	7,01	3,36	0,33	-3,03	0,10
113	425,4	6,81	3,36	0,32	-3,04	0,10
114	458,5	7,34	3,36	0,35	-3,01	0,10
115	398,5	6,38	3,36	0,30	-3,06	0,09
116	378,5	6,06	3,36	0,29	-3,07	0,08
117	349,6	5,59	3,36	0,26	-3,10	0,08
118	387,5	6,20	3,36	0,29	-3,07	0,09
119	364,6	5,83	3,36	0,27	-3,09	0,08
120	375,4	6,01	3,36	0,28	-3,08	0,08
121	366,2	5,86	3,36	0,28	-3,08	0,08
122	318,5	5,10	3,36	0,24	-3,12	0,07
123	386,1	6,18	3,36	0,29	-3,07	0,09
124	376,3	6,02	3,36	0,28	-3,08	0,08
125	379,4	6,07	3,36	0,29	-3,07	0,09
126	376,4	6,02	3,36	0,28	-3,08	0,08
127	365,3	5,84	3,36	0,28	-3,08	0,08
128	327,4	5,24	3,36	0,25	-3,11	0,07
129	338,6	5,42	3,36	0,26	-3,10	0,08
130	398,5	6,38	3,36	0,30	-3,06	0,09
131	378,4	6,05	3,36	0,28	-3,08	0,08
132	373,8	5,98	3,36	0,28	-3,08	0,08

### Producción en Campo abierto, Prueba 3

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
1	315,3	5,04	0,86	0,24	-0,62	0,28
2	321,4	5,14	0,86	0,24	-0,62	0,28
3	298,4	4,77	0,86	0,22	-0,64	0,26
4	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
5	238,5	3,82	0,86	0,18	-0,68	0,21
6	276,4	4,42	0,86	0,21	-0,65	0,24
7	278,4	4,45	0,86	0,21	-0,65	0,24
8	278,5	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
9	319,4	5,11	0,86	0,24	-0,62	0,28
10	385,3	6,16	0,86	0,29	-0,57	0,34
11	367,5	5,88	0,86	0,28	-0,58	0,32
12	274,3	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
13	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
14	286,3	4,58	0,86	0,22	-0,64	0,25
15	275,3	4,40	0,86	0,21	-0,65	0,24
16	328,6	5,26	0,86	0,25	-0,61	0,29
17	347,4	5,56	0,86	0,26	-0,60	0,30
18	376,4	6,02	0,86	0,28	-0,58	0,33
19	286,2	4,58	0,86	0,22	-0,64	0,25
20	283,1	4,53	0,86	0,21	-0,65	0,25
21	295,4	4,73	0,86	0,22	-0,64	0,26
22	268,5	4,30	0,86	0,20	-0,66	0,24
23	278,4	4,45	0,86	0,21	-0,65	0,24
24	257,4	4,12	0,86	0,19	-0,67	0,23
25	276,3	4,42	0,86	0,21	-0,65	0,24
26	267,4	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
27	289,5	4,63	0,86	0,22	-0,64	0,25
28	278,5	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
29	275,9	4,41	0,86	0,21	-0,65	0,24
30	267,5	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
31	286,4	4,58	0,86	0,22	-0,64	0,25
32	278,4	4,45	0,86	0,21	-0,65	0,24
33	286,5	4,58	0,86	0,22	-0,64	0,25
34	278,4	4,45	0,86	0,21	-0,65	0,24
35	289,5	4,63	0,86	0,22	-0,64	0,25

### Producción en Campo abierto, Prueba 3, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
36	268,4	4,29	0,86	0,20	-0,66	0,24
37	279,6	4,47	0,86	0,21	-0,65	0,24
38	287,2	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
39	276,5	4,42	0,86	0,21	-0,65	0,24
40	289,5	4,63	0,86	0,22	-0,64	0,25
41	325,4	5,21	0,86	0,25	-0,61	0,28
42	312,5	5,00	0,86	0,24	-0,62	0,27
43	314,3	5,03	0,86	0,24	-0,62	0,28
44	352,4	5,64	0,86	0,27	-0,59	0,31
45	298,4	4,77	0,86	0,22	-0,64	0,26
46	286,3	4,58	0,86	0,22	-0,64	0,25
47	218,5	3,50	0,86	0,16	-0,70	0,19
48	267,4	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
49	298,5	4,78	0,86	0,22	-0,64	0,26
50	256,4	4,10	0,86	0,19	-0,67	0,22
51	278,5	4,46	0,86	0,21	-0,65	0,24
52	271,5	4,34	0,86	0,20	-0,66	0,24
53	246,4	3,94	0,86	0,19	-0,67	0,22
54	248,5	3,98	0,86	0,19	-0,67	0,22
55	249,6	3,99	0,86	0,19	-0,67	0,22
56	256,7	4,11	0,86	0,19	-0,67	0,22
57	249,1	3,99	0,86	0,19	-0,67	0,22
58	285,3	4,56	0,86	0,21	-0,65	0,25
59	297,4	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
60	336,9	5,39	0,86	0,25	-0,61	0,30
61	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
62	267,8	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
63	255,4	4,09	0,86	0,19	-0,67	0,22
64	271,5	4,34	0,86	0,20	-0,66	0,24
65	267,5	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
66	248,4	3,97	0,86	0,19	-0,67	0,22
67	263,4	4,21	0,86	0,20	-0,66	0,23
68	274,3	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
69	267,4	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
70	253,2	4,05	0,86	0,19	-0,67	0,22



### Producción en Campo abierto, Prueba 3, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
71	236,3	3,78	0,86	0,18	-0,68	0,21
72	229,6	3,67	0,86	0,17	-0,69	0,20
73	256,9	4,11	0,86	0,19	-0,67	0,22
74	263,4	4,21	0,86	0,20	-0,66	0,23
75	254,3	4,07	0,86	0,19	-0,67	0,22
76	275,3	4,40	0,86	0,21	-0,65	0,24
77	274,5	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
78	257,9	4,13	0,86	0,19	-0,67	0,23
79	305,7	4,89	0,86	0,23	-0,63	0,27
80	328,5	5,26	0,86	0,25	-0,61	0,29
81	333,1	5,33	0,86	0,25	-0,61	0,29
82	312,4	5,00	0,86	0,24	-0,62	0,27
83	284,3	4,55	0,86	0,21	-0,65	0,25
84	279,3	4,47	0,86	0,21	-0,65	0,24
85	273,8	4,38	0,86	0,21	-0,65	0,24
86	267,4	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
87	268,4	4,29	0,86	0,20	-0,66	0,24
88	275,3	4,40	0,86	0,21	-0,65	0,24
89	276,3	4,42	0,86	0,21	-0,65	0,24
90	267,9	4,29	0,86	0,20	-0,66	0,23
91	247,4	3,96	0,86	0,19	-0,67	0,22
92	275,6	4,41	0,86	0,21	-0,65	0,24
93	296,3	4,74	0,86	0,22	-0,64	0,26
94	297,4	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
95	308,3	4,93	0,86	0,23	-0,63	0,27
96	328,8	5,26	0,86	0,25	-0,61	0,29
97	347,5	5,56	0,86	0,26	-0,60	0,30
98	287,9	4,61	0,86	0,22	-0,64	0,25
99	267,3	4,28	0,86	0,20	-0,66	0,23
100	247,3	3,96	0,86	0,19	-0,67	0,22

### Producción en Campo abierto, Prueba 3, continuación

#	Peso fresco (g)	Productividad (Kg/m2)	Energía entrada (MJ)	Energía Salida (MJ)	Energía neta (MJ)	Eficiencia energética
101	243,9	3,90	0,86	0,18	-0,68	0,21
102	265,1	4,24	0,86	0,20	-0,66	0,23
103	281,4	4,50	0,86	0,21	-0,65	0,25
104	247,1	3,95	0,86	0,19	-0,67	0,22
105	290,5	4,65	0,86	0,22	-0,64	0,25
106	325,7	5,21	0,86	0,25	-0,61	0,29
107	291,5	4,66	0,86	0,22	-0,64	0,26
108	287,4	4,60	0,86	0,22	-0,64	0,25
109	309,4	4,95	0,86	0,23	-0,63	0,27
110	274,5	4,39	0,86	0,21	-0,65	0,24
111	327,4	5,24	0,86	0,25	-0,61	0,29
112	307,8	4,92	0,86	0,23	-0,63	0,27
113	365,9	5,85	0,86	0,28	-0,58	0,32
114	264,3	4,23	0,86	0,20	-0,66	0,23
115	285,4	4,57	0,86	0,21	-0,65	0,25
116	329,7	5,28	0,86	0,25	-0,61	0,29
117	298,6	4,78	0,86	0,22	-0,64	0,26
118	279,1	4,47	0,86	0,21	-0,65	0,24
119	348,5	5,58	0,86	0,26	-0,60	0,31
120	343,2	5,49	0,86	0,26	-0,60	0,30
121	275,3	4,40	0,86	0,21	-0,65	0,24
122	328,5	5,26	0,86	0,25	-0,61	0,29
123	314,2	5,03	0,86	0,24	-0,62	0,28
124	297,4	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
125	263,1	4,21	0,86	0,20	-0,66	0,23
126	259,5	4,15	0,86	0,20	-0,66	0,23
127	275,1	4,40	0,86	0,21	-0,65	0,24
128	297,3	4,76	0,86	0,22	-0,64	0,26
129	268,4	4,29	0,86	0,20	-0,66	0,24
130	272,5	4,36	0,86	0,21	-0,65	0,24
131	327,4	5,24	0,86	0,25	-0,61	0,29
132	310,7	4,97	0,86	0,23	-0,63	0,27